

УДК 621.315
ББК 30.3
С40

Сироткин, Олег Семенович.

С40 **Материаловедение. Технология конструкционных материалов:** практикум. – 3-е изд., перераб. и доп. / О. С. Сироткин, А. Е. Бунтин, Р. О. Сироткин. – Казань : КГЭУ, 2022. – 130 с.

Содержит описание десяти лабораторных работ по дисциплине «Материаловедение». Четыре лабораторные работы выполняются с использованием имитационного виртуального тренажера «Сопротивление материалов», предназначенного для моделирования механических испытаний, направленных на исследование структуры и свойств конструкционных материалов.

Предназначен для обучающихся по образовательной программе специальности 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг, специализация «Проектирование и эксплуатация атомных станций».

УДК 621.315
ББК 30.3

© Сироткин О. С., Шибает П. Б., Бунтин А. Е., 2011
© Сироткин О. С., Бунтин А. Е., Сироткин Р. О., 2017, с изменениями
© Сироткин О. С., Бунтин А. Е., Сироткин Р. О., 2022, с изменениями
© КГЭУ, 2022

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 в эволюционных процессах для получения других его видов и форм, с целью реализации конкретной практической задачи, необходимости в целом и т. д. В более узком практическом смысле материал – это вид вещества или совокупность нескольких его типов (фаз) в виде одной материальной системы (материального тела), предназначенных для получения продукции в виде сырья, изделия или конструкции.

Детальное изложение состава, типов связей в основных соединениях, структуры, свойств и областей применения конструкционных материалов даст обучающимся более глубокие познания, необходимые при решении важнейших технологических задач. Непрерывный процесс создания новых материалов и технологий, а также совершенствование имеющихся обогащает различные направления науки и техники.

Цель издания практикума – оказание помощи обучающимся в ходе изучения дисциплины «Материаловедение», основанной на исследовании зависимости между составом, типом химической связи, строением и свойствами металлов и сплавов, закономерностей их изменения под воздействием внешних факторов (химических, тепловых, механических), способствуя формированию следующих знаний, умений и навыков:

знать:

– физико-химические основы строения и свойства материалов, закономерности их изменения под действием внешних факторов, типы и марки конструкционных материалов;

– средства и методы исследования строения и свойств конструкционных материалов;

уметь:

– осуществлять обоснованный выбор материалов, средств и методов их исследования на основе анализа условий эксплуатации, экологических и экономических факторов;

владеть:

– средствами и методами исследования строения и свойств конструкционных материалов.

Описание каждой лабораторной работы включает в себя основные теоретические сведения по соответствующей теме, порядок проведения эксперимента, указания по обработке полученных результатов, а также контрольные вопросы и задания с целью проверки полученных теоретических знаний и закрепления практических навыков и умений.

В связи с тем, что не всегда проведение экспериментов в учебной лаборатории по разным причинам представляется возможным, прибегают к использованию в процессе обучения имитационных виртуальных тренажеров. Это позволяет воспроизводить процессы и условия, аналогичные реальным, существенно снижая уровень абстрактных знаний о них, повышая тем самым эффективность получения и усвоения этих знаний на практике. Так, четыре из представленных в данном практикуме десяти лабораторных работ проводятся с использованием имитационного виртуального тренажера «Сопrotивление материалов», позволяющего моделировать механические испытания с целью исследования структуры и свойств металлических материалов. Ознакомиться с подробным описанием данного имитационного виртуального тренажера Вы можете, перейдя по ссылке <https://lms.kgeu.ru/enrol/index.php?id=2790>.

Перечень горячих клавиш, используемых в процессе работы, приведен ниже:

W, S, A, D – перемещение в пространстве;

F2, E – аналоги средней клавиши манипулятора (первое нажатие – захват объекта, последующее – объект ставится);

F10 – выход из программы;

левая кнопка мыши – при нажатии и удерживании обрабатывается (поворачивается, переключается) тот или иной объект;

средняя кнопка мыши – при первом нажатии (прокрутка не используется) осуществляется захват объекта, при последующем – объект ставится.

правая кнопка мыши – отвечает за появление курсора-указателя (при повторном нажатии – курсор исчезает).

Форма отчета для всех лабораторных работ – унифицированная. Отчет оформляется каждым обучающимся индивидуально и должен содержать:

- номер, тему и цель лабораторной работы;
- описание лабораторного оборудования, материалов и реактивов;
- краткие теоретические сведения по теме лабораторной работы;
- описание эксперимента;
- результаты в табличной форме;
- расчетные формулы в общем виде и после подстановки в них соответствующих числовых значений;
- графики зависимостей;
- ВЫВОДЫ.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Выполнение каждой лабораторной работы включает в себя:

1) самостоятельную подготовку к лабораторной работе, которая предполагает:

- наличие четкого представления о цели лабораторной работы;
- изучение теоретических основ по теме лабораторной работы посредством списка рекомендуемой литературы;
- знание схемы установки и метода измерения;
- понимание физической сущности ожидаемых результатов;
- наличие протокола измерений, содержащего таблицы для записи результатов измерений и основные расчетные формулы.

Обучающиеся, не подготовившиеся к лабораторной работе в соответствии с приведенными выше требованиями, не допускаются к ее выполнению;

2) проведение эксперимента в соответствии с методическими указаниями, приведенными в каждой лабораторной работе;

3) оформление отчета о проделанной работе на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (210×297 мм);

4) защиту лабораторной работы индивидуально с предоставлением отчета, включая ответы на контрольные вопросы.

ПРАВИЛА ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Число лиц, присутствующих в лаборатории термической обработки, должно быть не более 12 человек плюс 1 преподаватель.

При выполнении лабораторных работ обучающиеся 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.

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). 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.

В металлографии – науке, изучающей структуру металлов и сплавов, – структура материала традиционно подразделяется на четыре уровня (рис. 2, а): макро- (10^{-1} м), микро- (10^{-4} м), суб- (10^{-7} м) и субмикроструктура (10^{-9} м).

Современные достижения структурной химии и физики привели к необходимости выработки общих подходов к иерархии структур. Так, Л.И. Тушинский помимо традиционных выделяет новые уровни (рис. 2, б):

- макроструктуру (вид излома, дендритное и полиэдрическое строение, размеры зерен и их ориентация, $\sim 10^{-3} \dots \sim 10^{-1}$ м);
- мезоструктуру (структура внутри зерен, дислокации и их ансамбли, дисклинации, ячейки, полигоны, их размеры и ориентация, $\sim 10^{-7} \dots \sim 10^{-3}$ м);
- микро- или рентгеноструктуру (точечные дефекты, размеры и тип кристаллических решеток, величиной $\sim 10^{-10} \dots \sim 10^{-7}$ м), включая наноструктуры.



Рис. 1. Шкала увеличений и практические примеры использования микроскопов при изучении структуры материалов

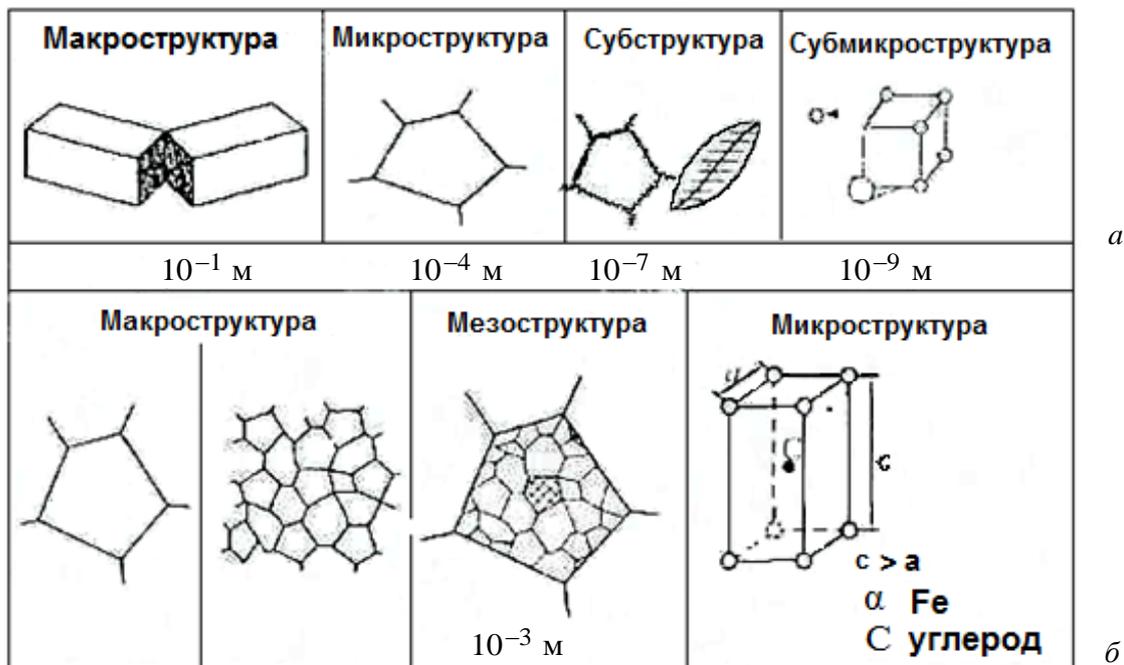


Рис. 2. Иерархия структур материалов по Л.И. Тушинскому: *a* – традиционная классификация; *б* – новый подход (интеграция химии, физики, механики и материаловедения)

Данные классификации традиционно базируются на систематизации структур металлов (без попыток привязки к ним структур неметаллов, типа полимеров), положение наноструктур, в которых определено недостаточно четко. Поэтому уточненную классификацию уровней структурной организации металлических и неметаллических материалов можно представить следующим образом:

- микроструктура, включая три подуровня: электронно-ядерный, молекулярный и наноструктуру, первые два из которых образуют тонкую структуру;

- мезоструктура;

- макроструктура.

Данная классификация применима и для керамических материалов, так как их микроструктура (в том числе электронно-ядерная) во многом подобна полимерной (преимущественно ковалентное связывание ядер), и металлической (поликристалличность).

Размерные характеристики перечисленных выше уровней для металлов и полимеров, а также образующие их элементы приведены в приложении А. Из таблицы видно:

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

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

Лабораторная работа № 1

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СОЛЕЙ

Цель работы: исследование процесса кристаллизации на примере водных растворов солей.

Оборудование и реактивы: микроскоп Levenhuk 910, стеклянная палочка, предметное стекло, насыщенный водный раствор соли.

Основные теоретические сведения

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 расплавов образуются так называемые металлические стекла, обладающие специфическими физико-механическими свойствами.

Атомные остовы в кристаллическом твердом теле располагаются в пространстве строго закономерно, периодически повторяясь в трех измерениях через строго определенные расстояния, образуя 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.

Процесс образования кристаллической решетки и возникновения кристаллов при переходе вещества из жидкого состояния в твердое – кристаллизация. 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. 1.1) стремится попасть в более устойчивое положение 2, так как потенциальная энергия в положении 2 меньше, чем в положении 1.



Рис. 3. 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 различно для жидкого и кристаллического состояний. Схематически характер зависимости свободной энергии жидкого и твердого состояний от температуры показан на рис. 1.2.

Выше температуры T_s меньшей свободной энергией обладает вещество в жидком состоянии, ниже – вещество в твердом состоянии. Следовательно, выше температуры T_s вещество должно находиться в жидком состоянии, а ниже – 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, при которой процесс кристаллизации (плавление) невозможен, так как при данной температуре $F(Z)_{\text{ж}} = F_{\text{кр}}$. Другими словами, процесс кристаллизации (плавления) не может идти, так как при равенстве обеих фаз это не будет сопровождаться уменьшением свободной энергии.

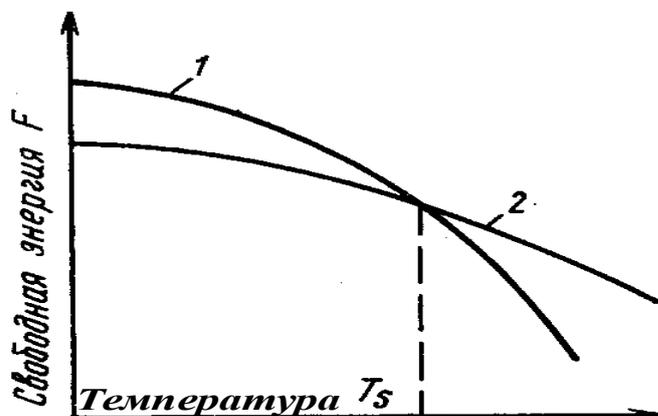


Рис. 1.2. Зависимость свободной энергии жидкого 1 и кристаллического 2 состояний в зависимости от температуры

Для начала кристаллизации необходимо, чтобы процесс был термодинамически выгоден системе и сопровождался уменьшением свободной энергии системы. Из кривых, приведенных на рис. 5, видно, что это возможно только тогда, когда жидкость будет охлаждена ниже точки T_s . Температура, при которой начинается кристаллизация, может быть названа фактической температурой кристаллизации.

Разница между равновесной T_s и реальной T_n температурами кристаллизации называется степенью переохлаждения и обозначает 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 достигать 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 1, изображаемой в координатах «температура – время», процессу кристаллизации соответствует горизонтальный участок (рис. 1.3).

По окончании кристаллизации, т. е. после полного перехода в твердое состояние, температура снова начинает снижаться, и твердое кристаллическое вещество охлаждается.

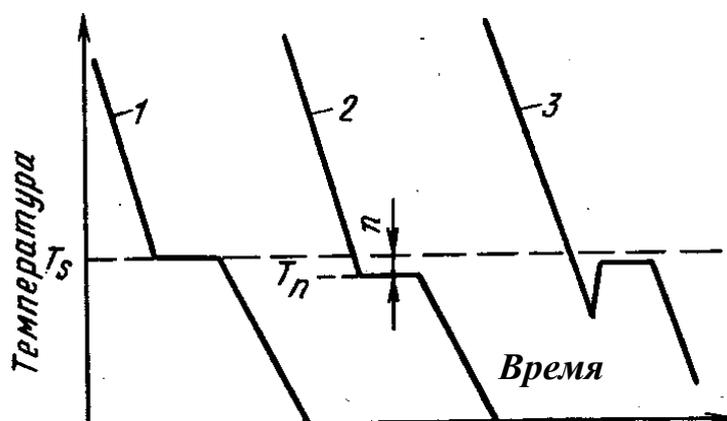


Рис. 1.3. Кривые охлаждения при кристаллизации

В случае кривой 2 (рис. 1.3) 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 бóльшего размера будут центрами кристаллизации, а зародыши меньшего размера окажутся неустойчивыми и вновь рассосутся 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 неправильной в момент окончания процесса кристаллизации.

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

Критический размер зародыша связан с термодинамическими параметрами соотношением:

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

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. 1.4 приведены зависимости от степени переохлаждения для числа центров кристаллизации и скорости роста. 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 число центров достигло бы максимума. Поэтому для металлов кривые обрываются уже при малых степенях переохлаждения (сплошные линии).

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 получаются более мелкими.

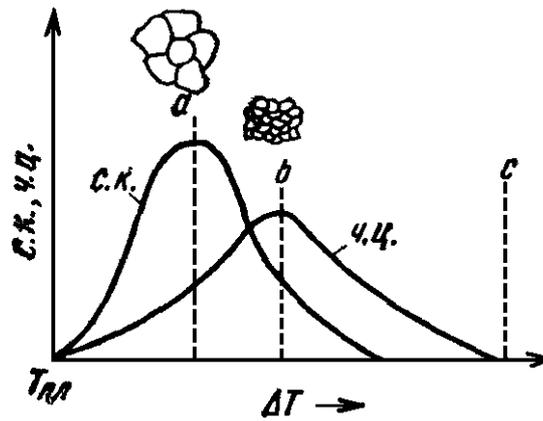


Рис. 1.4. Влияние степени переохлаждения на число центров кристаллизации и скорость роста кристаллизации

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 получаются 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 могут быть определены по формуле:

$$n = \sqrt{\frac{\text{ч. ц.}}{\text{с. р.}}}$$

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. 1.5). Наибольшая скорость роста кристаллов наблюдается по плоскостям и направлениям решетки, имеющим 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 дана в табл. 1.1.

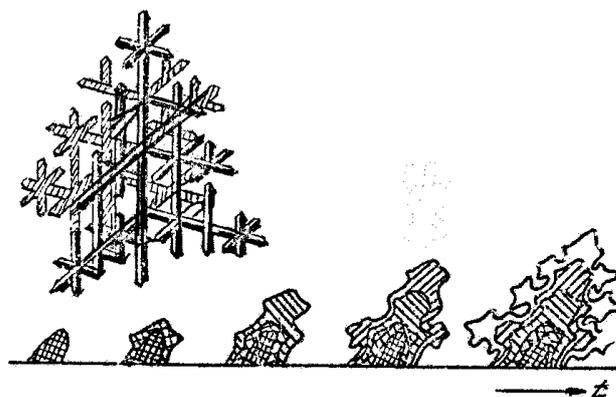
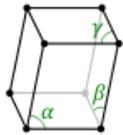
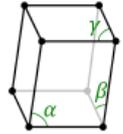
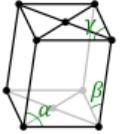
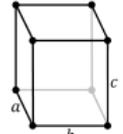
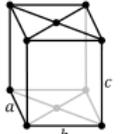
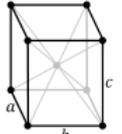
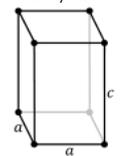
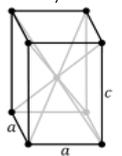
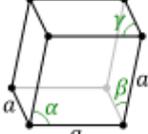
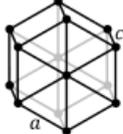
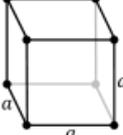
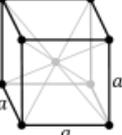
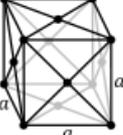


Рис. 1.5. Схема роста дендрита

Таблица 1.1

Типы кристаллических решеток

Кристаллографическая система	Решётки Браве			
	простая	базоцентрированная	объемноцентрированная	гранецентрированная
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, основание – параллелограмм) $a \neq b \neq c; \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ S_b	$\alpha \neq 90^\circ; \beta, \gamma = 90^\circ$ 		—	—
Ромбическая (ромбоэдр) $a \neq b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ Fe_3C, S_a		$a \neq b \neq c$ 		
Тетрагональная (прямой параллелепипед) $a = b \neq c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ TiO_2, Sn_b	$a \neq c$ 	—	$a \neq c$ 	—
Тригональная (ромбоэдрическая) (равносторонний ромбоэдр) $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma < 120^\circ,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ As, Bi	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ 	—	—	—
Гексагональная (призма, основание – шестиугольник) $a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ;$ $\gamma = 120^\circ$ 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.

Условия отвода теплоты при кристаллизации значительно влияют на форму зерен. Это видно на примере кристаллизации стального слитка (рис. 1.6).

Кристаллизация стального слитка идет в три стадии. Сначала на поверхности слитка образуется зона 1 мелких кристаллов – это результат влияния холодной металлической формы, которая обеспечивает в первые моменты затвердевания слитка большую скорость охлаждения металла. Затем растут большие кристаллы (область 2), вытянутые по направлению отвода теплоты. Их называют столбчатыми кристаллами. Наконец, в середине слитка, где наблюдается наименьшая степень переохлаждения, образуются равноосные кристаллы больших размеров (область 3).

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.

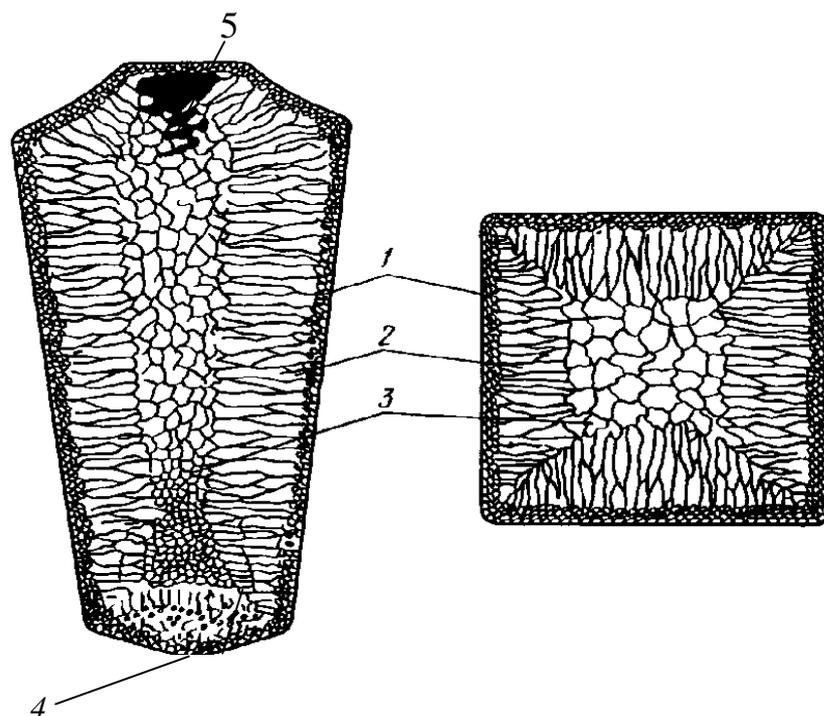


Рис. 1.6. Схема строения слитка спокойной стали: 1 – слой мелкоглобулярных кристаллов; 2 – область столбчатых кристаллов; 3 – равноосные дендриты; 4 – шлак; 5 – шлак

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.

Рабочее задание

1. Проведите эксперимент по кристаллизации водных растворов солей. Зафиксируйте движения фронта кристаллизации. Графическим дифференцированием и методом нормали определите скорости кристаллизации для трех моментов времени. Объясните, почему изменилась скорость кристаллизации.

2. По излому слитков изучите, как на кристаллизацию металлов влияет скорость охлаждения его в холодной и горячей формах. Зарисуйте структуру излома и укажите причину изменения характера кристаллизации в зависимости от скорости охлаждения.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

В данной лабораторной работе изучается процесс кристаллизации солей из водных растворов с помощью микроскопа. 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).

Каплю раствора нанесите на стеклянную пластину, которую поместите на предметный столик микроскопа. Передвигая стеклянную пластину с каплей, установите край капли на начало шкалы окуляра, совмещая при этом линию шкалы радиусом капли. После настройки начинайте отсчет времени и снимите показания шкалы с интервалом времени 1 мин. Данные эксперимента запишите в табл. 1.2. Количество измерений должно быть не менее 10. Опыт считается завершенным, если получены три одинаковых значения размера кристалла в течение трех последних измерений.

Таблица 1.2

Результаты эксперимента

Номер измерения	Измеряемые величины		Расчетная величина
	Время, мин	Положение фронта, кристаллизации $X_{ш}$, деления шкалы	Истинное положение фронта кристаллизации X_o , мм

Чтобы определить размер объекта (мм), подсчитайте число делений шкалы, которое укладывается в измеряемом участке объекта, и это число ($X_{ш}$) разделите на 56 (кратность увеличения микроскопа):

$$X_o = X_{ш} / 56.$$

По данным табл. 1.1 постройте график зависимости положения фронта кристаллизации от времени.

Графическим дифференцированием и методом нормали определите первую производную – скорость кристаллизации в крутой, средней и пологой частях кривой (рис. 1.7).

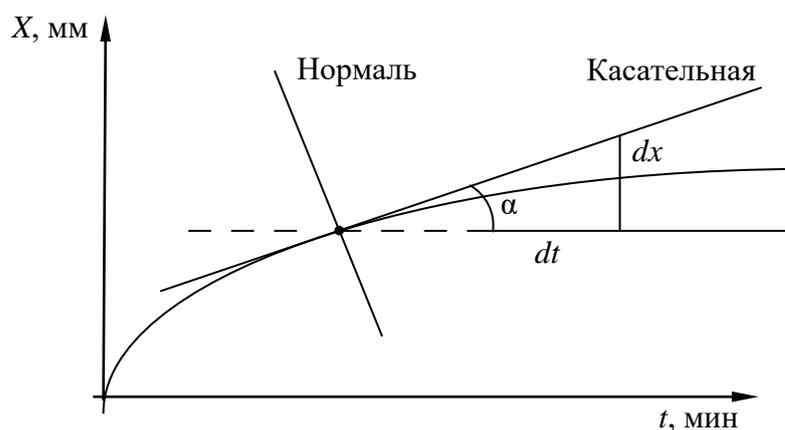


Рис. 1.7. График первой производной

Проведите касательные через каждую из трех произвольно выбранных точек (например, 2-я, 5-я, и 8-я минуты) и найдите производные в этих точках. Геометрический смысл производной заключается в том, что значение функции $X = f(t)$ в заданной точке – тангенс угла наклона касательной в этой точке: $dx/dt = \text{tg}\alpha$ (рис. 1.7).

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

$$V_{\text{кр}} = \frac{\Delta X \cdot M_x}{\Delta t \cdot M_t}$$

Так, если по оси ординат 20 мм чертежа соответствует 0,1 (X_0), то $M_x = 0,1/20 = 0,005$. Если по оси абсцисс 10 мм чертежа соответствует 1 мин (t), то $M_t = 1/10 = 0,1$ мин/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.

Контрольные вопросы и задания

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?

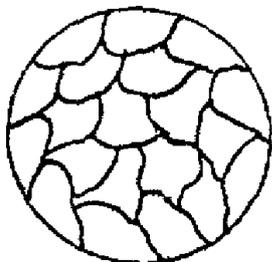
5. Как влияют посторонние примеси в расплаве на размеры кристаллов?

6. Какие условия влияют на образование вытянутых древовидных кристаллов (дендритов)?

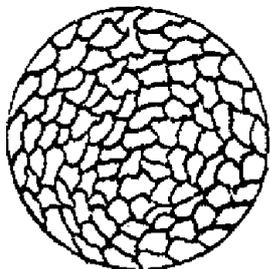
7. Какими условиями кристаллизации определяется неоднородность дендритного строения металла в сечении слитка или отливки?

8. Каковы причины изменения скорости кристаллизации соли из раствора?

9. Две одинаковые детали из алюминиевого сплава (силумина) были отлиты в землю:



и кокиль:



Опишите:

а) влияние на величину зерна скорости кристаллизации и числа центров кристаллизации, зарождающихся в единице объёма в единицу времени;

б) модифицирование и его влияние на величину зерна.

Лабораторная работа № 2

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы: знакомство с методами металлографического анализа металлических материалов и контроля качества конструкционных материалов.

Оборудование, материалы и реактивы: металлографический микроскоп и микроскринер; макрошлифы образцов для механических испытаний, исследований сварных соединений и видов изломов; 5%-й раствор азотной кислоты.

Основные теоретические сведения

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 бывают конструкционные и инструментальные. Быстрорежущая сталь – разновидность инструментальной стали.

По химическому составу стали подразделяют на углеродистые и легированные, которые, в свою очередь, классифицируют по содержанию углерода или легирующих элементов в ней (низко-, средне- и высоколегированные).

По содержанию углерода различают:

а) низкоуглеродистые (до 0,25 % С) – это достаточно мягкие, пластичные, хорошо деформируемые в холодном и горячем состоянии стали;

б) среднеуглеродистые (0,3...0,55 % С) – широко распространённый конструкционный материал для деталей, работающих в условиях обычных силовых нагрузок;

в) высокоуглеродистые (0,6...1,4 % С), обладающие высокой твердостью.

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

По структуре различают аустенитную, ферритную, мартенситную, бейнитную или перлитную стали. Если в структуре преобладают две и более фаз, сталь дифференцируют как двух- и многофазную.

С увеличением содержания углерода в стали возрастает количество фаз, имеющих более высокую твердость, – перлит, цементит. Следовательно, изменяются механические свойства: возрастают твердость, предел прочности и текучести; уменьшается относительное удлинение, относительное сужение и ударная вязкость (рис. 2.1).

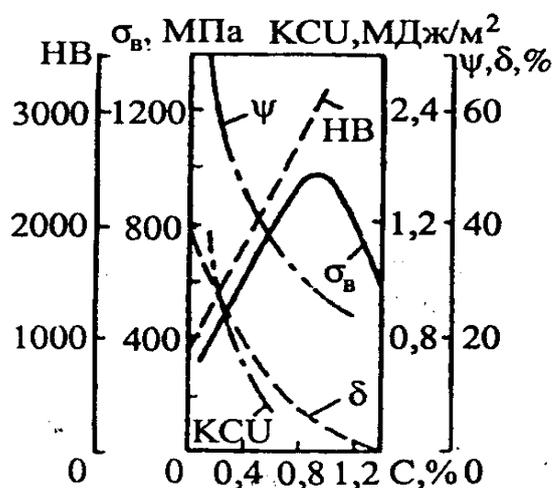


Рис. 2.1. Влияние углерода на свойства горячекатаных сталей

Твердые и хрупкие частицы цементита повышают сопротивление движению дислокаций (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.

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).

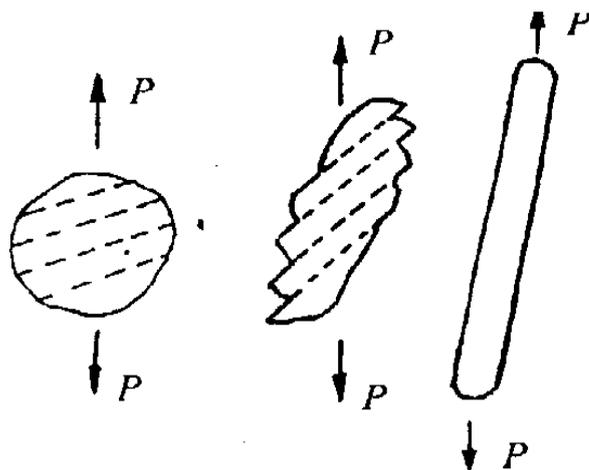


Рис. 2.2. Схема пластической деформации отдельного зерна металла

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.

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).

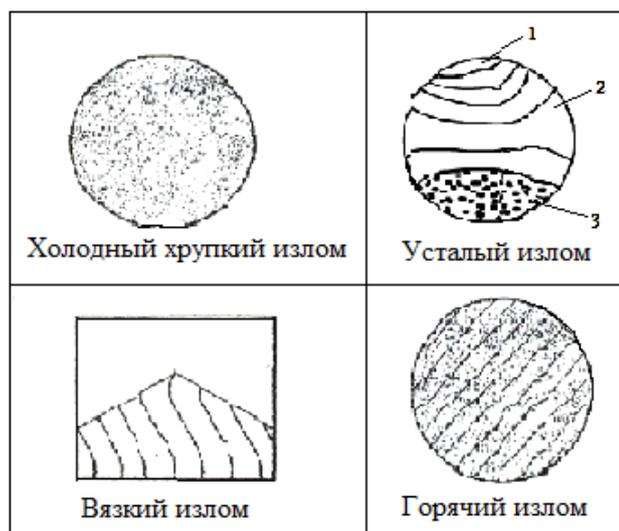


Рис. 2.3. Примеры изломов: 1 – очаг разрушения; 2 – зоны усталости; 3 – долом

Очаг разрушения 1 примыкает к поверхности и имеет небольшие размеры. Зону усталости 2 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 3.

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 (неравномерные ширина шва по его длине и высота шва, 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 натекания 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);

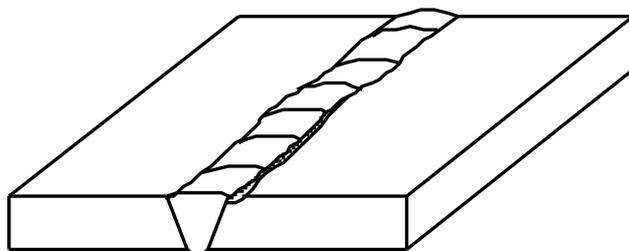


Рис. 2.4. Подрез

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.

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

Также особого внимания требуют следующие дефекты:

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

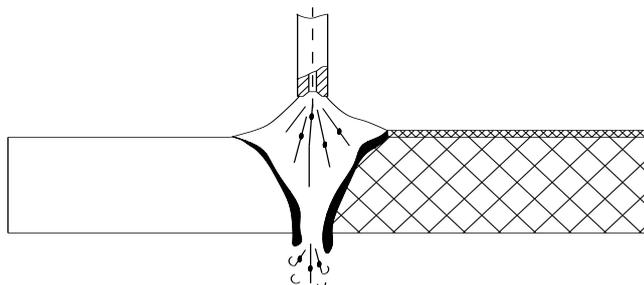


Рис. 2.5. Прожог

б) брызги металла – дефект в виде затвердевших капель металла на поверхности сварного соединения;

в) смещение сваренных кромок – дефект в виде несовпадения сваренных кромок по высоте из-за некачественной сборки сварного соединения;

г) занижение размеров сечения сварного шва – отклонение размеров сварного шва от минимально допустимых значений;

д) вогнутость корня – дефект в виде углубления на поверхности обратной стороны сварного одностороннего шва;

д) 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.

Значительно сложнее выявлять мелкие внутренние изъяны и особенно дефекты структуры (рис. 2.6).

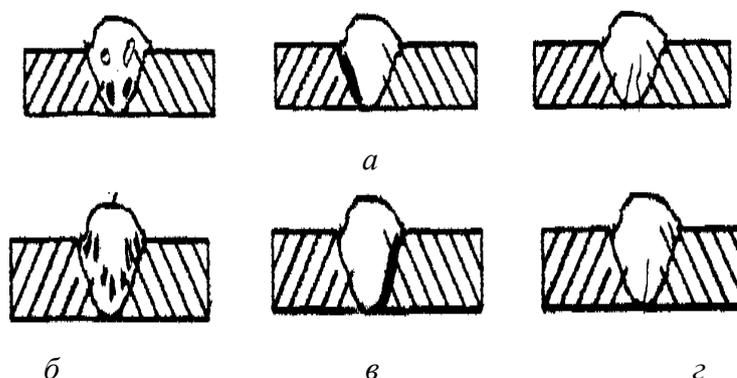


Рис. 2.6. Типичные внутренние дефекты: а – поры и газовые раковины; б – шлаковые включения; в – непровары; г – трещины

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, возникающей 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 (рис. 2.6, *б*) – 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 (рис. 2.6, *в*) – 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;

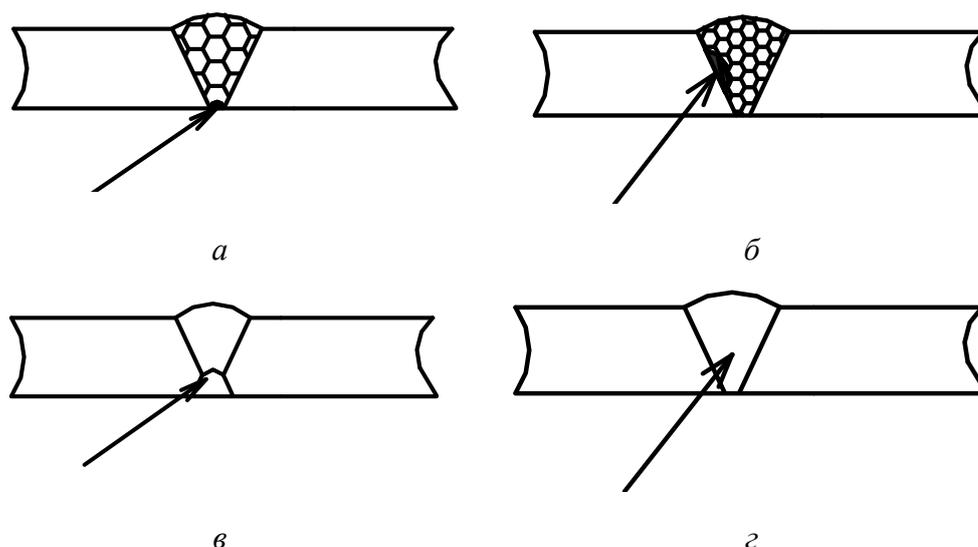


Рис. 2.7. Непровары: *а* и *в* – в корнях одностороннего стыкового и двустороннего швов; *б* – по кромке между основным и наплавленным металлом; *г* – между слоями

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).

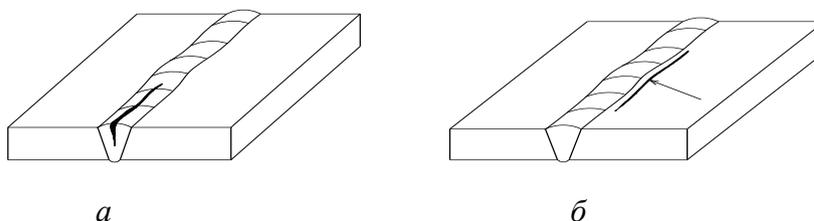


Рис. 2.8. Продольная горячая (а) и холодная (б) трещины в около шовной зоне

Причины трещин:

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

Термины и соответствующие им определения различных видов трещин сварных приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Трещины сварные

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 в 60...2000 крат. 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 (рис. 2.9–2.12). Реактив растворяет металл прежде всего по границам зерен.

1. Сталь 10 (рис. 2.11, а).

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»).

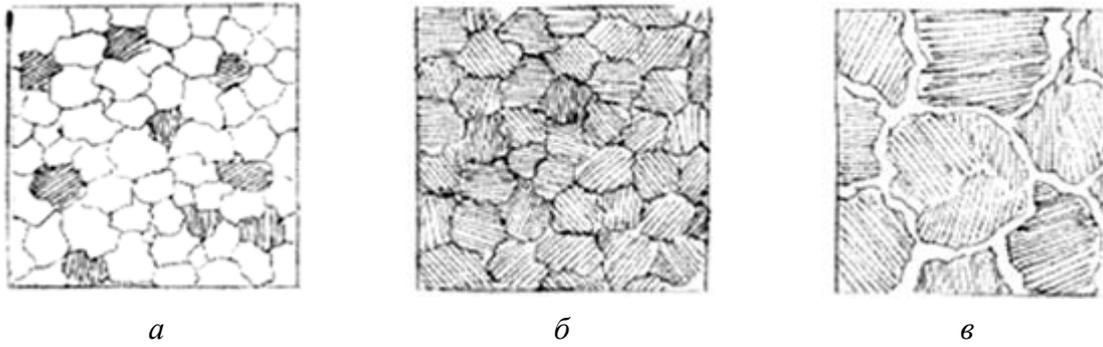


Рис. 2.9 Микроструктуры сталей: *a* – доэвтектоидной (феррит + перлит);
б – эвтектоидной (перлит); *в* – заэвтектоидной (перлит + цементит вторичный)

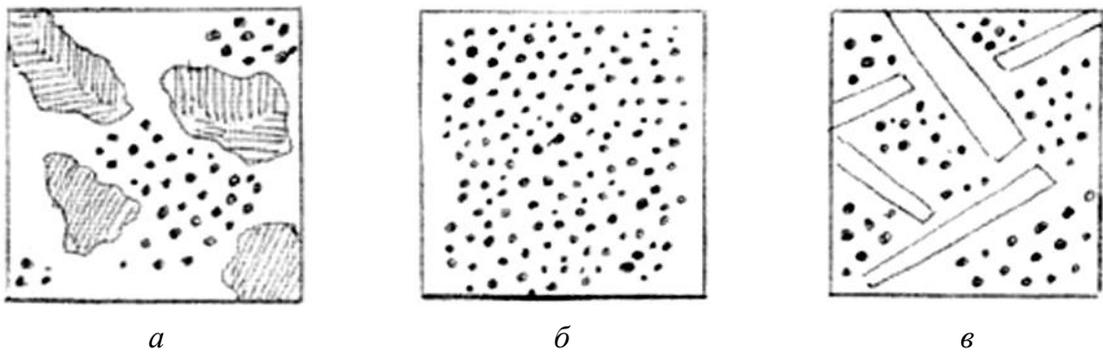


Рис. 2.10 Микроструктура чугунов: *a* – доэвтектического (ледебурит + перлит +
+ цементит вторичный); *б* – эвтектического (ледебурит); *в* – заэвтектического
(ледебурит + цементит первичный)

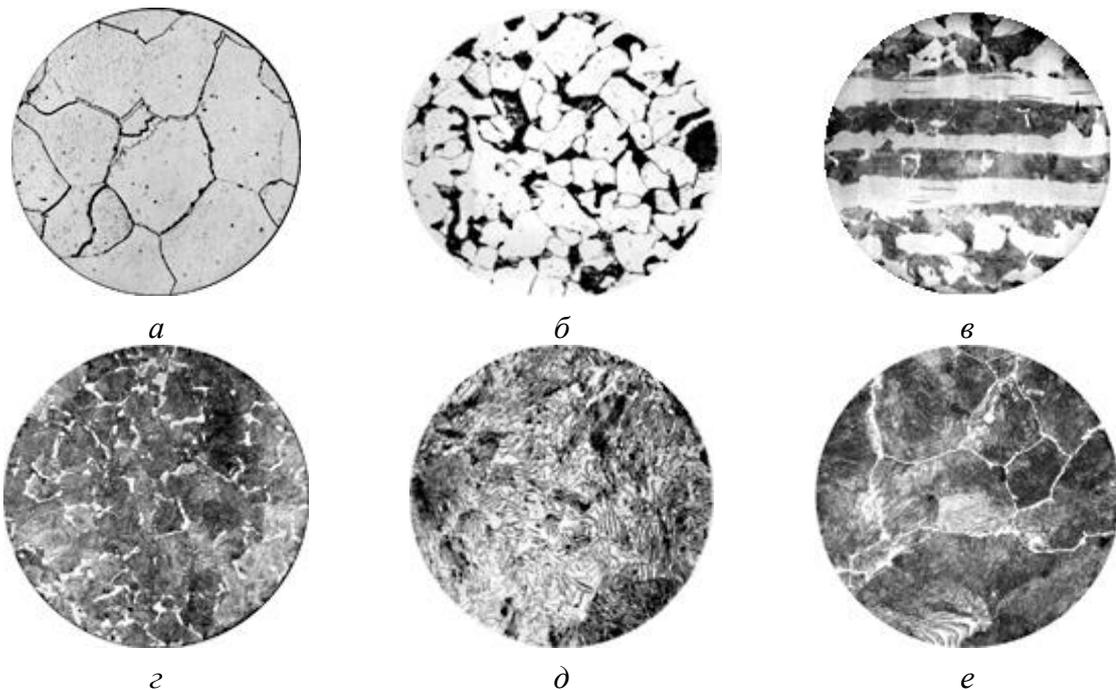


Рис. 2.11. Фотографии мезоструктуры сталей: *a* – Ст10; *б* – Ст20; *в* – Ст45; *г* – Ст70;
д – Ст80; *е* – сталь У12

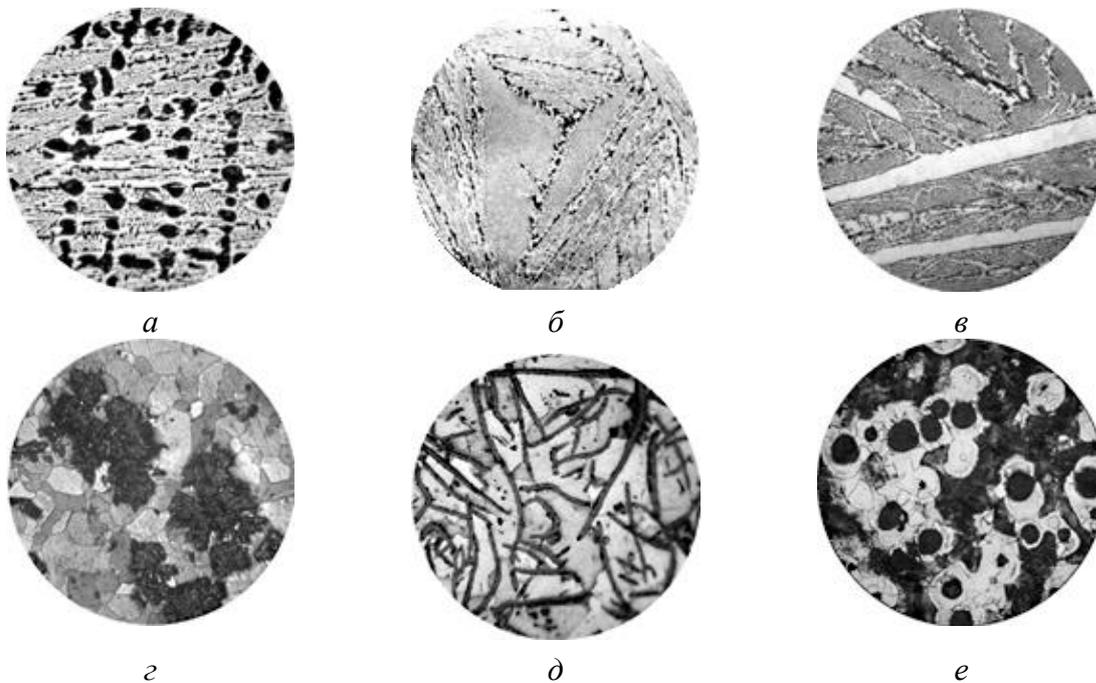


Рис. 2.12. Фотографии микроструктур чугунов: *а* – доэвтектический; *б* – эвтектический; *в* – заэвтектический; *г* – КЧ35-10; *д* – СЧ15; *е* – ВЧ60-5

2. Сталь 20 (рис. 2.11, б).

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 (рис. 2.11, в).

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 (рис. 2.11, г).

Структурные составляющие: перлит, феррит.

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

5. Сталь 80 (рис. 2.11, д).

Структурные составляющие: перлит.

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

6. Сталь У12 (рис. 2.11, е).

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.

Белые чугуны:

1. Доэвтектический (рис. 2.12, а).

Структурные составляющие: ледебурит, перлит.

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

2. Эвтектический (рис. 2.12, б).

Структурные составляющие: ледебурит.

Описание: Ледебурит

3. Заэвтектический (рис. 2.12, в).

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. КЧ35-10 (рис. 2.12, г).

Структурные составляющие: феррит, графит хлопьевидный.

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

5. СЧ15 (рис. 2.12, д).

Структурные составляющие: феррит, графит крабовидный.

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

6. ВЧ60-5 (рис. 2.12, е).

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.

Рабочее задание

1. Произведите визуальный анализ поверхности изломов образцов, зарисуйте и охарактеризуйте их.

2. Выполните доступный глазу макроанализ сварных швов, зарисуйте обнаруженные дефекты и охарактеризуйте их.

3. По макроструктуре, выявленной травлением, охарактеризуйте обнаруженные внутренние дефекты и качество сварки.

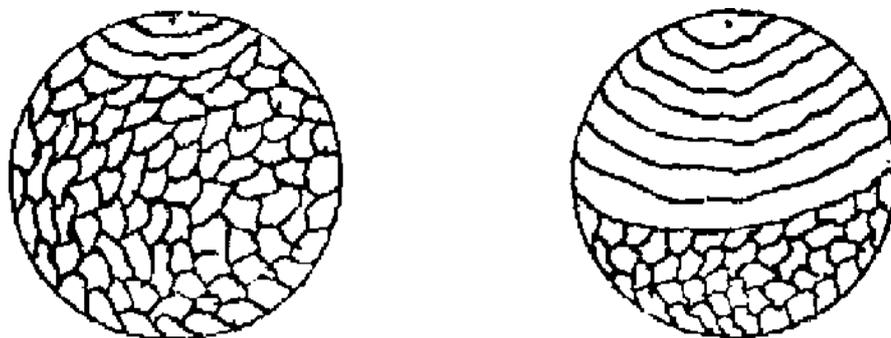
4. Пользуясь правилом рычага, визуалью по микроструктуре определите содержание углерода в доэвтектоидной стали. Для этого визуалью определите количество перлитной составляющей структуры стали в поле зрения окуляра в %, а затем по формуле:

$$C = \frac{\% \text{перлита} - 0,8}{100}$$

подсчитайте содержание углерода в анализируемой стали.

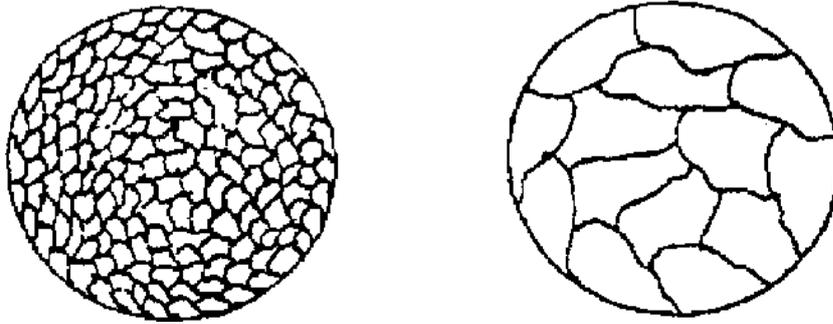
Контрольные вопросы и задания

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?
8. Два коленчатых вала были разрушены в процессе эксплуатации в области шатунных шеек. Какие виды изломов изображены на рисунке ниже?



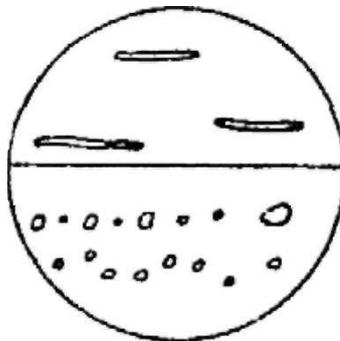
Опишите вид и строение изломов, характер нагружения коленчатых валов. Укажите причины разрушения.

9. Качество нагрева металла под штамповку контролируется по излому. Опишите изображенные на рисунке изломы:



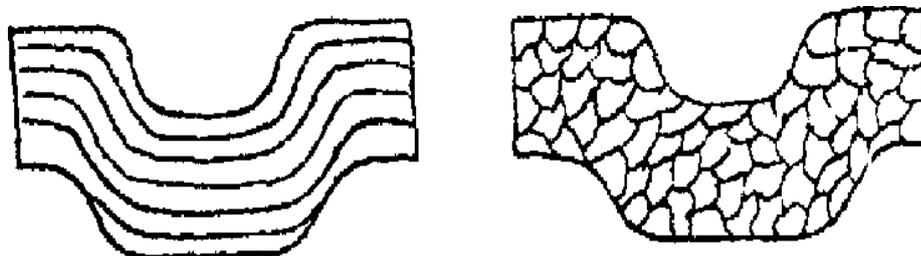
и укажите, как основные факторы (температура и время нагрева, химический состав стали) влияют на рост зерна.

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



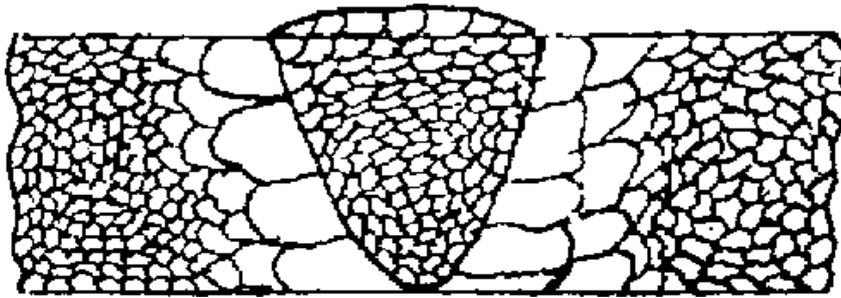
Опишите виды неметаллических включений, встречающихся в сталях, и укажите причины попадания их в металл. Объясните, какое влияние неметаллические включения оказывают на механические свойства. Назовите радикальные средства уменьшения неметаллических включений в металле.

11. Два коленчатых вала имеют различную макроструктуру:



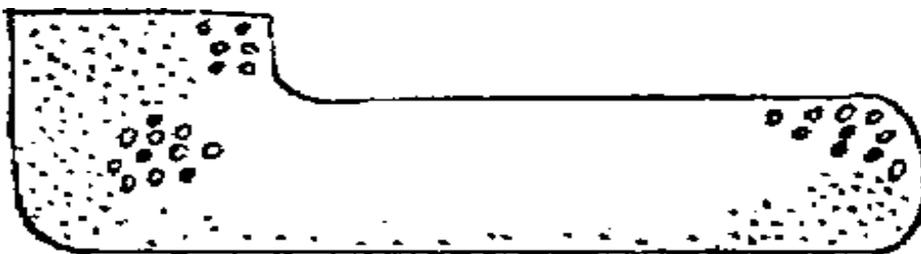
Опишите строение макроструктуры. Укажите способы получения коленчатых валов с данными макроструктурами и методы выявления макроструктуры.

12. После сварки плавящимся электродом шов приобрёл следующую макроструктуру:



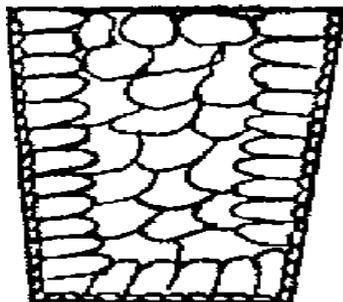
Опишите макроструктуру и укажите причину неоднородного строения шва и околошовной зоны.

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



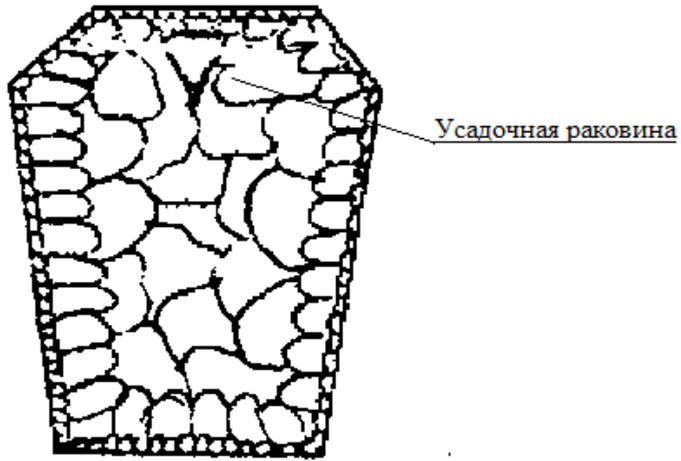
Назовите возможные причины образования пористости в литых деталях. Опишите, как пористость влияет на свойства отливок. Укажите способы предупреждения образования пористости.

14. Стальной слиток после полного охлаждения имеет следующую макроструктуру:



Опишите макроструктуру стального слитка, зональную и дендритную ликвации.

15. Стальной слиток после полного охлаждения имеет макроструктуру, представленную ниже на рисунке. Опишите макроструктуру стального слитка, зональную и дендритную ликвации. 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.

Оборудование и материалы: микроскоп, набор микрошлифов сталей.

Основные теоретические сведения

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, 3ОХГС-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 (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Классификация легированных сталей

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

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

По содержанию легирующих элементов (по степени легированности) стали делят на низко- (суммарное содержание легирующих элементов меньше 2,5 %), средне- (от 2,5 до 10 % легирующих элементов), и высоколегированные (более 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 *S*-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_1 невелика, поэтому при охлаждении на воздухе (скорость охлаждения на рис. 3.1 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.

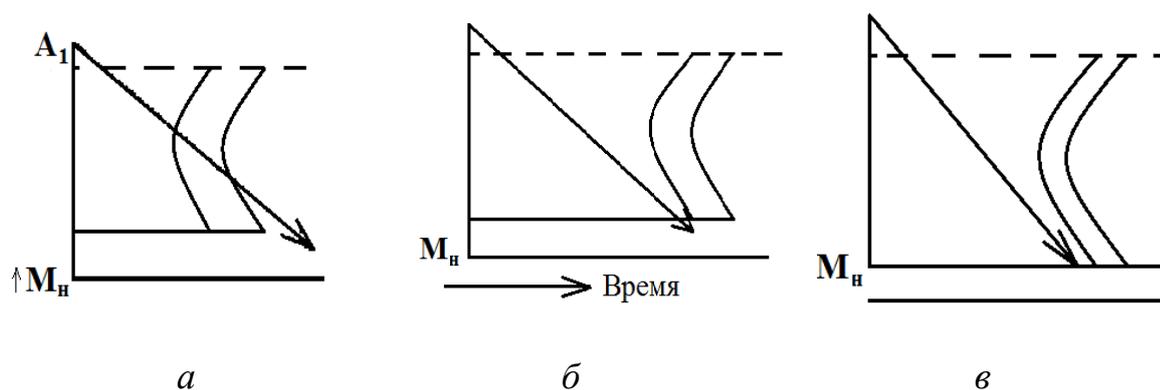


Рис. 3.1. Диаграммы изотермического распада переохлажденного аустенита сталей перлитного (*a*), мартенситного (*б*) и аустенитного (*в*) классов

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

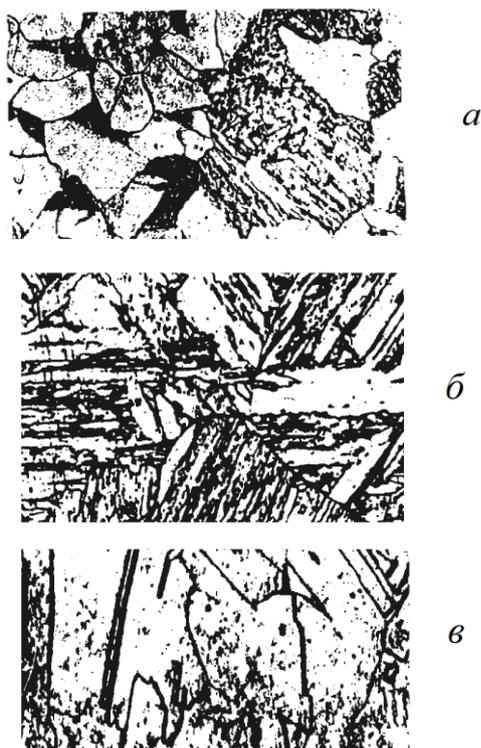


Рис. 3.2. Мезоструктуры легированных сталей: *а* – перлитного класса (15ХМ: перлит и феррит); *б* – мартенситного класса (18ХН4ВА: мартенсит); *в* – аустенитного класса (12Х18Н10Т: зерна аустенита с двойниками скольжения)

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 1 000 МПа, относительное удлинение 10Х и ударную вязкость 1,2 МДж/м². Ее структура после нормализации – мартенсит (рис. 3.2, *б*).

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 12Х18Н10Т, 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 имеется 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, а 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.

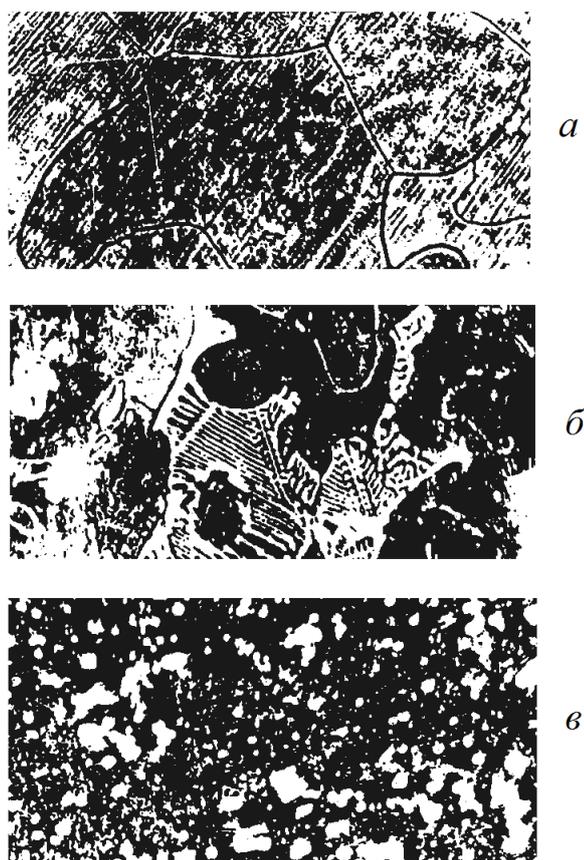


Рис. 3.3. Структуры легированных сталей: *а* – α -сталь ферритного класса (зерна кремистого феррита); *б* – β -сталь ледебуритного класса Р18 литая (ледебуритная эвтектика, остаточный аустенит и продукты распада аустенита (троосторбит)); *в* – γ -сталь Р18 кованая и термически обработанная (мартенсит 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 Р18 следующего химического состава: углерода – 0,7...0,8 %; хрома – 3,8...4,4 %; вольфрама – 17...19 %; ванадия – 1...1,4 %. 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 эвтектика 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.

Рабочее задание

1. Рассмотрите под микроскопом все шлифы из набора и зарисуйте их мезоструктуру.

2. Определите структурный класс стали и на каждом рисунке стрелками укажите структурные составляющие.

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: изучение основных свойств и области применения меди, алюминия и сплавов на их основе, а также сплавов на основе олова и свинца; освоение методики определения мезоструктуры цветных металлов и сплавов, расшифровки марки цветных металлов и сплавов.

Оборудование и материалы: микроскоп, набор микрошлифов.

Основные теоретические сведения

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 располагается 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 высокопластичных металлов с решеткой ГЦК.

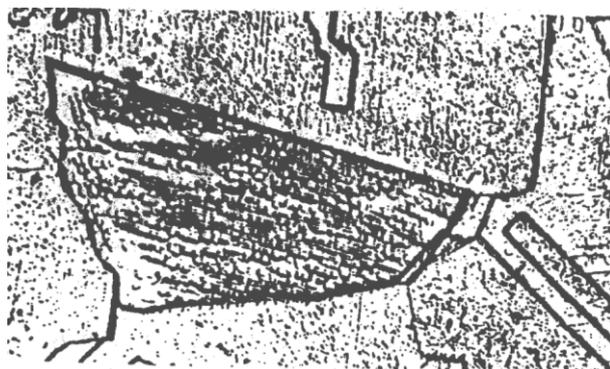


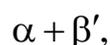
Рис. 4.1. Структура отожженной меди

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.

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:



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, и 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 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 классифицируют 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 $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$, пластичность оловянных бронз резко снижается.



Рис. 4.3. Структура бронзы БрОФ10-1 в литом состоянии: дендриты α -твердого раствора (белого цвета) и эвтектоид $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ (темный) между ними

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

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.

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 $\gamma' = 2,72$ г/см³ (он почти в 3 раза легче стали, у которой $\gamma' = 7,8$ г/см³), 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 магния в алюминии и α -твердого раствора меди, а также включений химических соединений CuAl_2 , Al_2CuMg (рис. 4.4).

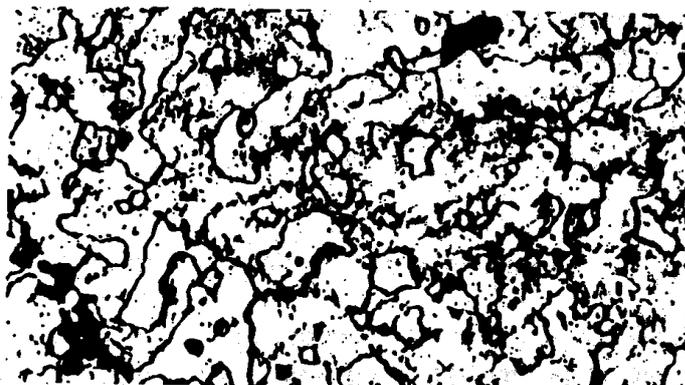


Рис. 4.4. Структура отожженного дюралюмина Д1: белые зерна α -твердого раствора и включения интерметаллидов CuAl_2 (темные точечные внутри зерен и твердого раствора)

Максимальную прочность дюралюмины приобретают после термической обработки, заключающейся в закалке и старении. Так, для сплава Д16 предел прочности в отожженном состоянии равен 200 МПа; после закалки – 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 ч.

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 %, у модифицированного – $\sigma_B = 180$ МПа, $\delta = 10$ %. Структура не модифицированного силумина показана на рис. 4.5, модифицированного – на рис. 4.6.



Рис. 4.5. Структура немодифицированного силумина Al_2 : грубая эвтектика ($\alpha + \text{Si}$) с крупными игольчатыми включениями кремния



Рис. 4.6. Структура модифицированного силумина Al_2 : 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 чугуны, бронзы 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.

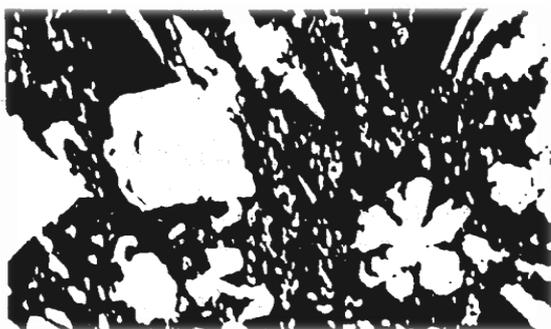


Рис. 4.7. Структура баббита Б83

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 .

Рабочее задание

1. Рассмотрите под микроскопом все шлифы. Зарисуйте наблюдаемую структуру и стрелками на зарисовках укажите структурные составляющие сплавов.

2. По структуре определите состояние сплавов: литой (модифицированный или немодифицированный), деформированный или отожженный.

3. Изучите маркировку цветных металлов и сплавов, приведите примеры марок наиболее распространенных в технике.

Контрольные вопросы

1. Назовите принципы классификации цветных металлов.

2. Расскажите, что такое латунь. Как маркируются латуни? Назовите области применения латуни?

3. Расскажите, что такое бронза. Как маркируются бронзы? Назовите области применения бронзы?

4. Укажите, какие из применяемых алюминиевых сплавов являются литейными.

5. Какие сплавы меди и алюминия используются в качестве проводниковых материалов в электроэнергетике.

6. Какие металлы используются для подшипников скольжения?

Лабораторная работа № 5

ДИАГРАММА Fe-C И СТРУКТУРА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Цель работы: изучение теории процессов, происходящих в железоуглеродистых сплавах при охлаждении и нагреве; определение по диаграмме состояния Fe-C фазовых и структурных состояний сталей и чугунов.

Основные теоретические сведения

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).

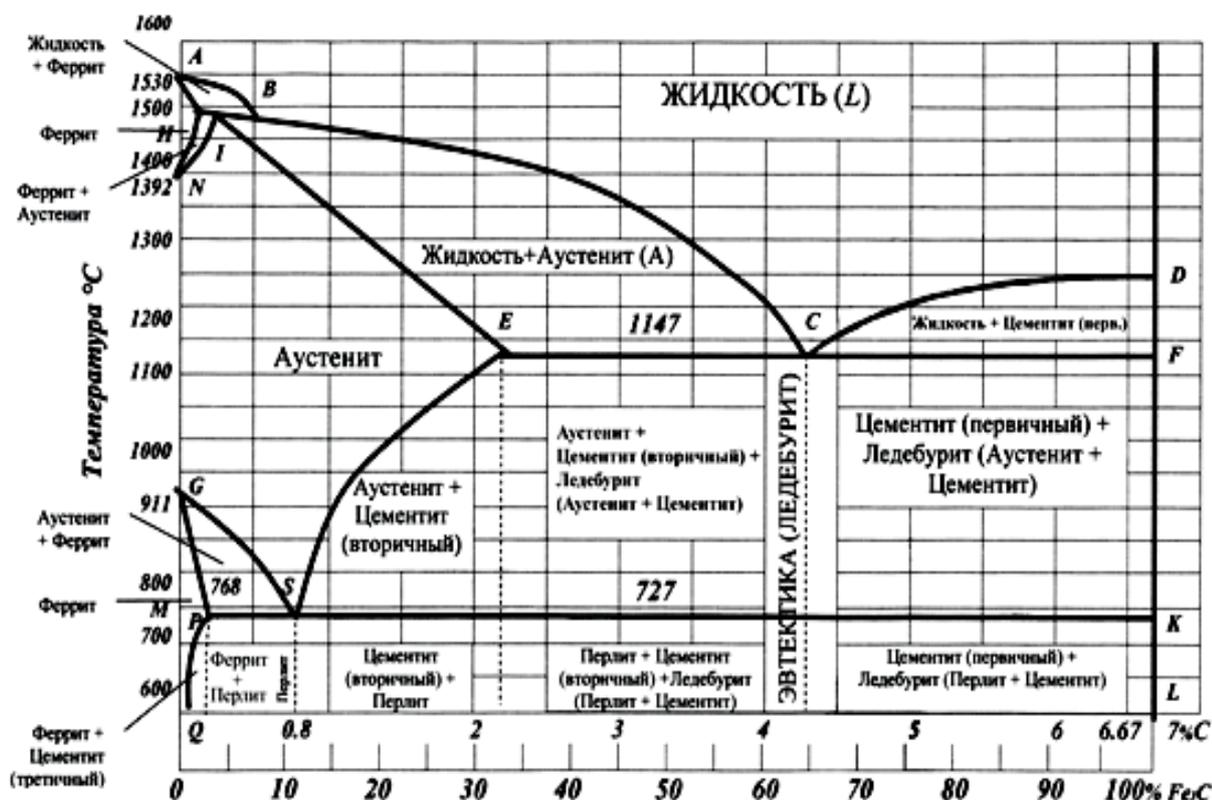


Рис. 5.1. Диаграмма состояния Fe-C или Fe-Fe₃C

Компоненты

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

Железо – серебристо-светлый, мягкий металл с плотностью $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$. 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 1 539 °С и имеет две модификации: Fe_α и Fe_γ. Fe_α существует при температурах до 911 °С и в интервале от 1 392 до 1 539 °С, имеет объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку с периодом 0,286 нм (при температуре 20...25 °С). Важной особенностью Fe_α является его ферро-магнетизм ниже температуры 768 °С, называемой точкой Кюри.

Модификация Fe_γ существует в интервале температур от 911 до 1 392 °С, имеет кубическую гранцентрированную решетку (ГЦК), 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 ($T_{пл} = 3\,500\text{ °С}$). 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 Fe₃C – цементита (стали и белые чугуны).

Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов

Структуры могут быть одно-, двух- 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. P, см. рис. 5.1), в высокотемпературной модификации Fe_α – 0,1 % при температуре 1 499 °С (т. H, см. там же). При комнатной температуре в феррите содержится 0,01 % C. Характеризуется низкой прочностью ($\sigma_B = 250\text{ МПа}$) и твердостью 63...130 HB, высокой пластичностью (относительное удлинение $\delta = 40\%$). На диаграмме состояния феррит занимает область GPQ. Образуется из аустенита (рис. 5.2).

Аустенит – твердый раствор внедрения углерода в Fe_γ с ГЦК-решеткой. Максимальная растворимость равна 2,14 % при температуре 1 147 °С (т. E, см. рис. 5.1), что практически на два порядка выше, чем в феррите. Аустенит пластичен, но прочнее феррита (HB 160...200). Аустенит парамагнитен (рис. 5.3).

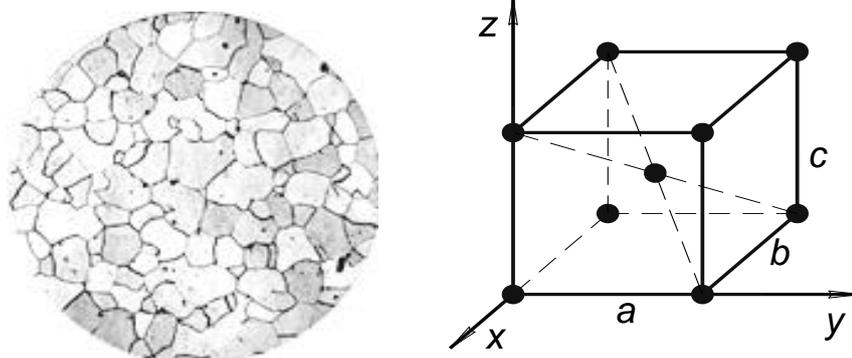


Рис. 5.2. Феррит

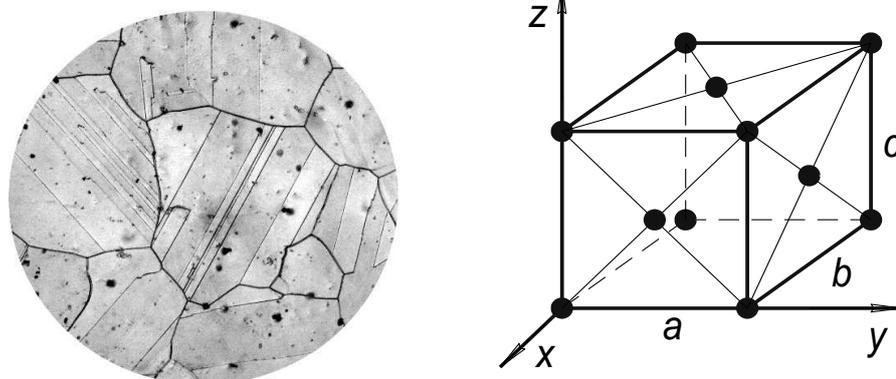


Рис. 5.3. Аустенит

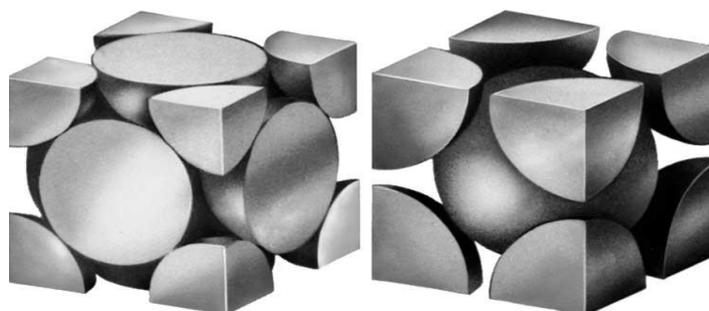


Рис. 5.4. Феррит и аустенит

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:

- а) первичный цементит Ц_I , образующийся при кристаллизации из жидкости в виде больших светлых кристаллов;
- б) вторичный цементит Ц_{II} – выделяется из аустенита в виде сетки по границам зерен;
- в) третичный цементит Ц_{III} – выделяется из графита в виде мелких зерен.

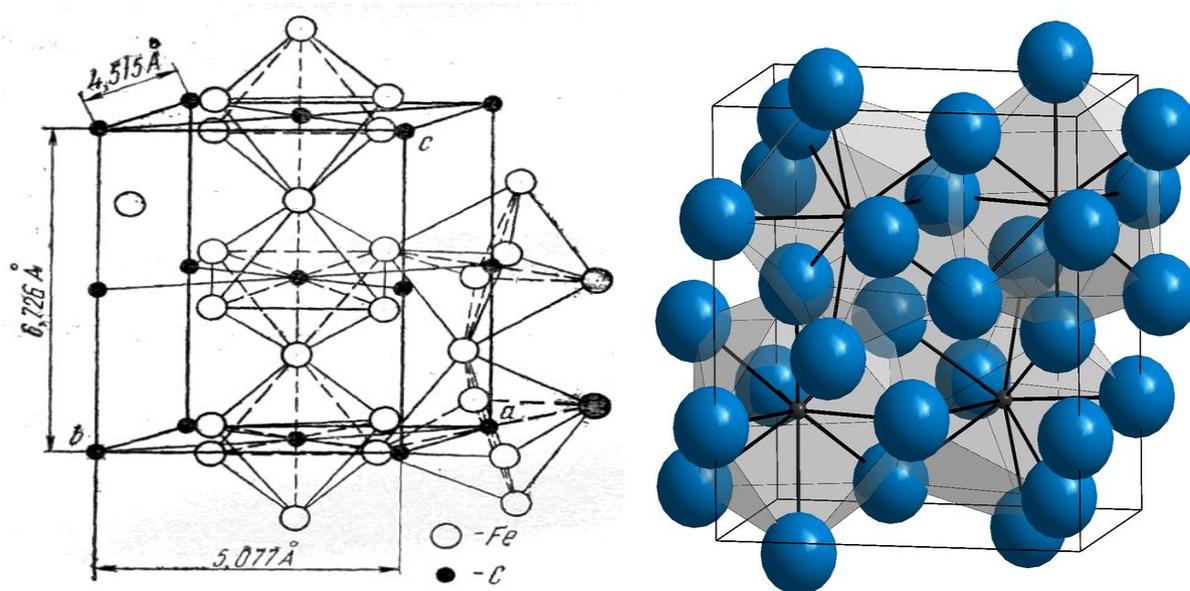


Рис. 5.5. Кристаллическое строение цементита

В зависимости от условий кристаллизации и последующей обработки цементит может иметь различную форму: равноосное зёрно, сетка по границам зёрен, пластина, видманштеттова структура.

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.

К двухфазным составляющим относят перлит и ледебурит.

Перлит – механическая смесь (эвтектоид) феррита и цементита ($\Phi + \Psi$), 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: $\sigma_{\text{в}} = 800\dots 900\text{ МПа}$, $\delta \leq 16\%$, $180\dots 220\text{ НВ}$.

Ледебурит – механическая смесь (эвтектика) в области температур от $1\ 147$ до $727\text{ }^\circ\text{C}$ состоит из аустенита и цементита ($A + \Psi$), а ниже $727\text{ }^\circ\text{C}$ – из перлита и цементита ($\Pi + \Psi$). 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 (см. рис. 5.1, табл. 5.2) характеризует строго определенный состав сплава при соответствующей температуре. Точка A ($1\ 539\text{ }^\circ\text{C}$) отвечает температуре плавления железа, точка D ($\approx 1\ 250\text{ }^\circ\text{C}$) – температуре плавления цементита, точки N ($1392\text{ }^\circ\text{C}$) и G ($910\text{ }^\circ\text{C}$) – полиморфному превращению $\text{Fe}\alpha \leftrightarrow \text{Fe}\gamma$.

Линия AB (см. рис. 5.1) 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 $1\ 147\text{ }^\circ\text{C}$ (линия ECF – эвтектики) состав жидкой фазы любого сплава, расположенного между точками E и F диаграммы, будет соответствовать точке C ($4,3\%$ С). При этой температуре оставшаяся часть жидкой фазы состава $4,3\%$ углерода кристаллизуется с образованием эвтектики – механической смеси кристаллов аустенита и цементита, называемой ледебуритом.

Ниже линии GS происходит полиморфное превращение аустенита в феррит.

Таблица 5.1

Виды критических точек сплавов

Название точки (значение)	Фазовое превращение при охлаждении (нагревании)	Примечания
Ликвидус	$L \leftrightarrow ТВ$ Начало выпадения твердой фазы в жидком расплаве (конец расплавления твердой фазы)	Для чистых компонентов и эвтектических сплавов точки ликвидус и солидус совпадают
Солидус	$L \leftrightarrow ТВ$ Конец выпадения твердой фазы в жидком расплаве (начало расплавления твердой фазы)	
Сольвус (точка вторичной кристаллизации)	$ТВ \leftrightarrow ТВ + ТВ_{II}$ 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 – 1 150 °С
Точка полиморфного превращения (точка перекристаллизации)	$ТВ_{\alpha} \leftrightarrow ТВ_{\beta}$ Переход высокотемпературной аллотропической формы в низкотемпературную (переход низкотемпературной аллотропической формы в высокотемпературную)	Для сплавов перекристаллизация проходит в интервале температур

Таблица 5.2

Значения точек на диаграмме железо – цементит

Обозначение точки на диаграмме	Температура, °С	Концентрация углерода %
<i>A</i> – температура плавления чистого железа	1 539	0
<i>H</i> – предельная концентрация углерода в высокотемпературном феррите	1 499	0,1
<i>N</i> – температура аллотропического превращения железа	1 392	0
<i>D</i> – температура плавления цементита	1 600	6,67
<i>E</i> – наибольшая концентрация углерода в аустените	1 147	2,14
<i>C</i> – точка эвтектики	1 147	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

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 $Ц_2$.

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

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

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

Линия ECF характеризует эвтектическое превращение, суть которого в том, что из жидкости концентрации т. C ($4,3\% C$) кристаллизуется механическая смесь двух фаз – аустенита концентрации, т. E ($2,14\% C$) и цементита: $Ж_c - A_f + Ц$.

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

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 $0,10-0,15\% C$ 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.

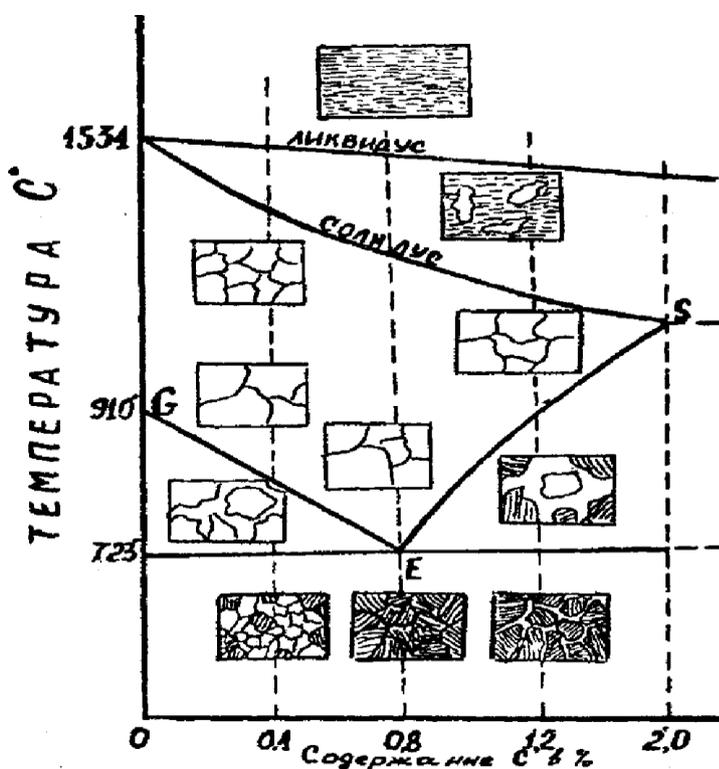


Рис. 5.6. Фрагмент диаграммы железо Fe-C

Структура эвтектоидной стали (0,8 % C) 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, которые получили широкое распространение в технике за счет превосходных литейных свойств. Они могут быть доэвтектическими и заэвтектическими, а разделяет их эвтектический чугун (4,31 % С). Структура чугуна доэвтектического – перлит, вторичный цементит и ледебурит, заэвтектического – первичный цементит с ледебуритом. Чугуны с такой структурой называют белыми. Они тверды, хрупки и трудно обрабатываются резанием, поэтому производятся для последующей переработки. Цементит в составе чугуна 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).

Путем модифицирования удается получить отливки чугуна с глобулярным графитом. Такой чугун называют высокопрочным, который сочетает в себе присущую чугунам технологичность в литье и обработке резанием с прочностными свойствами стали, заменяя успешно стальные отливки, поковки и цветные сплавы.

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.

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 , кгс/мм ²	<i>НВ</i>
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

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 (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Механические свойства серых чугунов

Чугун	σ_B , МПа	<i>НВ</i>	Структура металлической основы
Сч15	150	163...229	Феррит
Сч25	250	180...250	Феррит + перлит
Сч40	400	207...285	Перлит
Сч45	450	229...289	Перлит

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. Кривая охлаждения показана на рис. 5.7.

Итак, до температуры, соответствующей точке *I*, следует простое охлаждение жидкого сплава. От точки *I*, 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.

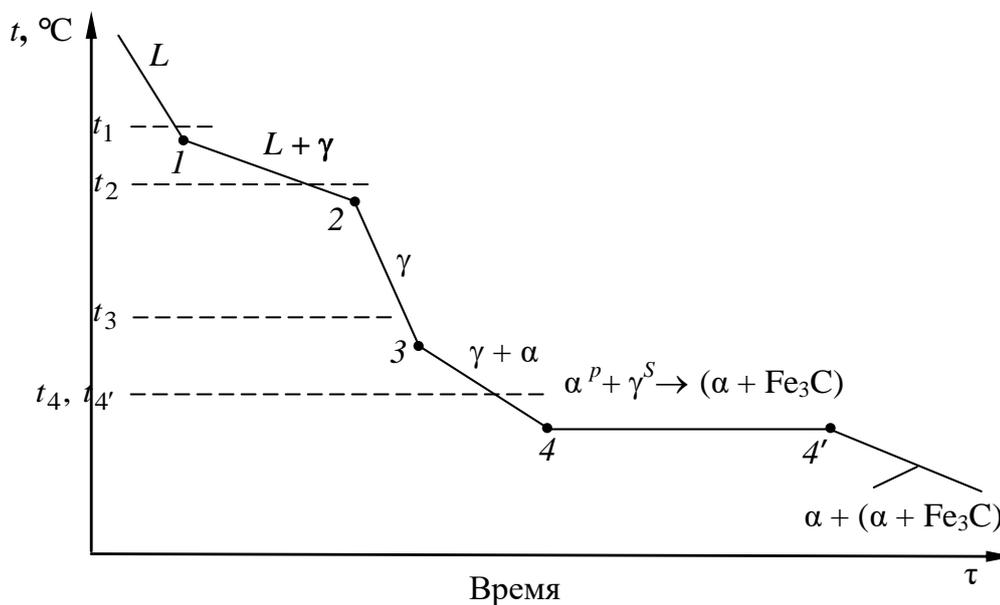
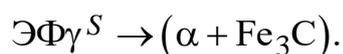


Рис. 5.7. Кривая охлаждения сплава (0,5% С) и образования его равновесной ферритно-перлитной структуры

По достижении температуры, соответствующей точке 3 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 (см. рис. 5.1). Поскольку в интервале температур от *t*. 3 до *t*. 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, соответствующей точке 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 из феррита и перлита структуры.

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, а).

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, б).

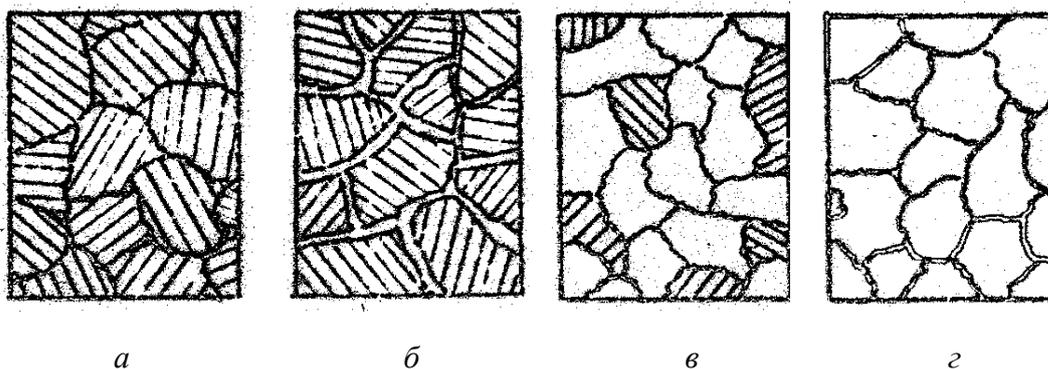


Рис. 5.8. Схемы структур эвтектоидной (а), заэвтектоидной (б) и доэвтектоидной (в), и чистого железа (г)

К технически чистому железу относят сплавы, содержащие не более 0,02 % С. Под микроскопом структура технически чистого железа (рис. 5.8, г) 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 ликвидировать 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.

ГОСТ оговаривает содержание серы (S) и фосфора (P) как вредных примесей, ухудшающих качество стали:

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

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 обыкновенного качества 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. Степень раскисления обозначается добавлением индексов: в спокойных сталях – «сп», в полуспокойных – «пс», кипящих – «кп», а категория нормируемых свойств (кроме первой) указывается последующей цифрой. Содержание кремния в их составе различно: в спокойных сталях колеблется от 0,12 до 0,30; в полуспокойных – от 0,05 до 0,17; в кипящих – менее 0,07. Спокойными и полуспокойными производят стали Ст1...Ст6, кипящими – Ст1...Ст4. Сталь Ст0 по степени раскисления не разделяют.

С увеличением номера марки прочность стали увеличивается, а пластичность – уменьшается (табл. 5.5).

Таблица 5.5

Механические свойства углеродистых сталей обыкновенного качества (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	
Ст0	> 310	–	23	Ст4	420...540	240...270	24
Ст1	320...420	–	34	Ст5	500...640	260...290	20
Ст2	340...440	200...230	32	Ст6	600	320	13
Ст3	380...490	210...250	27				

Углеродистые стали обыкновенного качества предназначены для изготовления различных металлоконструкций, а также слабонагруженных деталей машин и приборов.

В машиностроении применяют углеродистые качественные стали (табл. 5.6). Маркируются эти стали двузначными цифрами 05, 08, 20 и 75, обозначающими среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Таблица 5.6

**Химический состав и механические свойства
углеродистых качественных сталей**

Сталь	С, %	Cr, %	НВ после отжига или высокого отпуска	σ_B	σ_T	δ	Ψ	КСУ ⁺²⁰
				МПа		%		МДж/м ²
				не менее				60
08	0,05...0,01	0,10	131	330	200	33		
10	0,07...0,14	0,15	143	340	210	31	55	—
15	0,12...0,19	0,25	149	380	230	27	55	—
20	0,17...0,24	0,25	163	420	250	25	55	—
30	0,27...0,35	0,25	179	500	300	21	50	0,8
40	0,37...0,45	0,25	217	580	340	19	45	0,6
50	0,47...0,55	0,25	241	640	380	14	40	0,4
60	0,57...0,65	0,25	255	690	410	12	35	—
70	0,67...0,75	0,25	269	730	430	9	30	—

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 опишите их.

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

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Анализ 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 в соответствии со своим вариантом¹ (табл. 5.7). При выполнении расчётных задач в перитектической области диаграммы используйте данные, представленные на рис. 5.9.

Таблица 5.7

Варианты индивидуальных заданий

Номер варианта	C, %	Температура, °C	Номер варианта	C, %	Температура, °C
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

¹ Номер варианта указывается преподавателем.

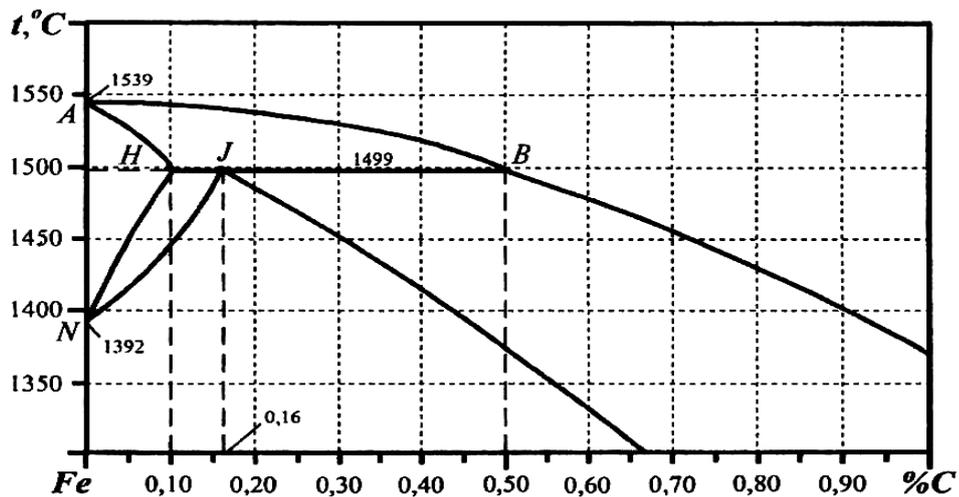


Рис. 5.9. Фрагмент диаграммы железо-углерод

Расчёт 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 % С при 600 °С (рис. 5.10).

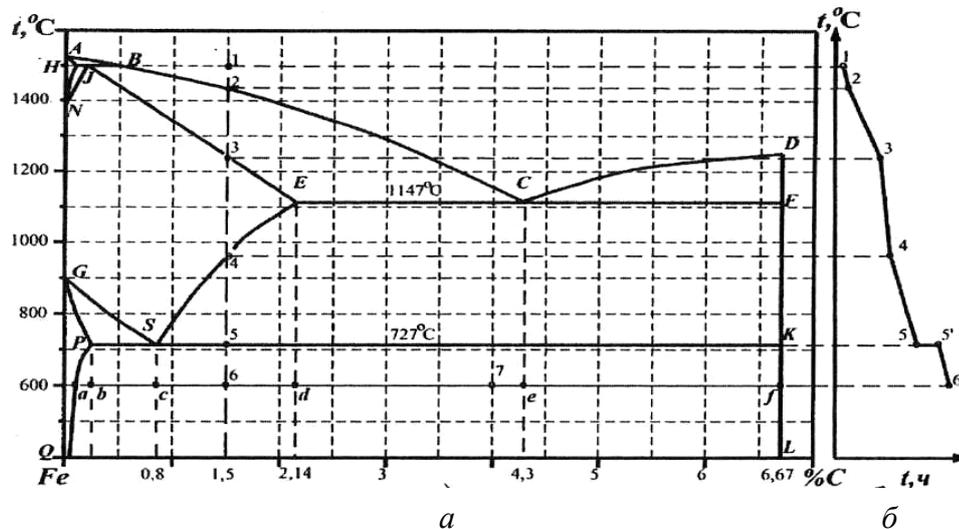


Рис. 5.10. Схема для изучения превращений, происходящих в стали с 1,5 % С при медленном охлаждении: *а* – диаграмма состояния; *б* – кривая кристаллизации сплава

Содержание структурных составляющих определяются последовательно по мере их образования в процессе охлаждения сплава посредством правила отрезков для двух сосуществующих фаз или структурных составляющих по коноде *abcdbef*. Величину отрезков будем измерять в процентах углерода. Считаем, что концентрация в точке *а* 0,01 % С.

Определим в точке *b*:

– фазовый состав:

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

$$\Psi = \frac{ab}{af} \cdot 100 \% - 77,6 = 22,4 \%;$$

– количество структурных составляющих:

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

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

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

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

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

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

Контрольные вопросы и задания

1. Какие зерна имеют металлические сплавы?
2. Что такое диаграмма состояния железо-углерод и где она используется?
3. Дайте общую характеристику 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 чугуны отличаются от сталей по микроструктуре?
8. Что такое феррит, аустенит, цементит, перлит?
9. Сколько углерода может раствориться в феррите?
10. В структуре каких сталей присутствует вторичный цементит?
11. При каких условиях вторичный цементит в заэвтектоидных сталях образует сплошную прослойку (сетку) по границам зерен перлита, и как это отражается на свойствах стали?
12. Какие структурные составляющие содержатся в структуре железоуглеродистых сплавов с содержанием углерода до 0,02 %?
13. Как изменится структура доэвтектоидных сталей с увеличением содержания углерода?
14. Как по количеству перлита определить приблизительно содержание углерода в стали?
15. Как и почему изменяются свойства углеродистых сталей в равновесном состоянии с увеличением содержания углерода?
16. Зарисуйте и опишите структуру стали марки У12 (1,2 % С). Определите количественное соотношение и состав фаз при нормальной температуре.
17. Структура стали состоит из 30 % перлита, остальное – феррит. Зарисуйте микроструктуру стали. Определите содержание углерода в ней.
18. Зарисуйте и опишите мезоструктуру технического железа с содержанием 0,01 % С. Определите количественное соотношение и состав фаз при нормальной температуре.
19. Зарисуйте и опишите мезоструктуру стали с содержанием углерода 0,02 %. Определите количественное соотношение и состав фаз при температуре 727 °С.
20. Структура стали состоит из 70 % перлита, остальное – феррит. Зарисуйте структуру стали, определите содержание углерода в ней.
21. Структура стали состоит из одного перлита. Зарисуйте микроструктуру стали. Определите количество цементита.
22. 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.
23. Зарисуйте и опишите структуру стали марки 70 (0,7 % С). Определите количество перлита, феррита и цементита в стали.

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

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

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

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

Лабораторная работа № 6

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ

Цель работы: освоение методики определения основных механических характеристик металлических материалов.

Основные теоретические сведения

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.

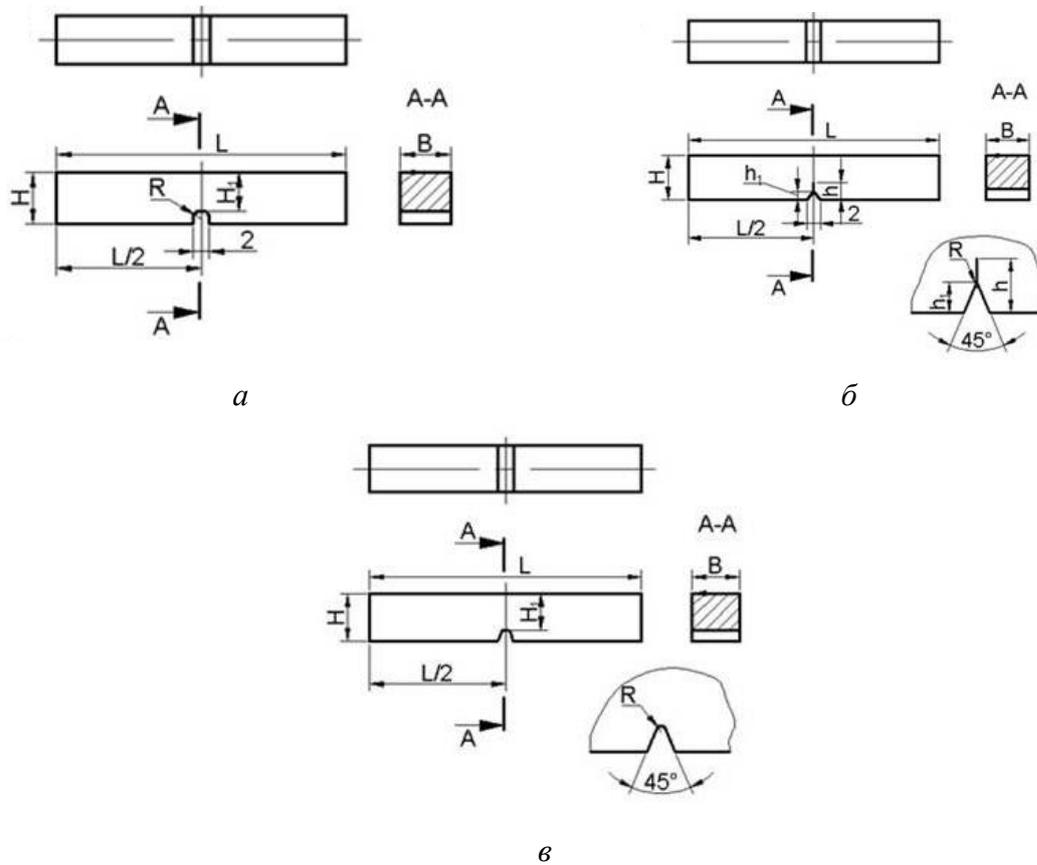


Рис. 6.1. Образцы с концентраторами: *a* – концентратор вида *U*; *б* – концентратор вида *T* (усталостная трещина); *в* – концентратор вида *V*

Ударная вязкость

Ударной вязкостью $KС$ называется отношение работы K , необходимой для разрушения образца, к площади поперечного сечения S_0 в месте надреза. Ударную вязкость $KС$ оценивают по формуле, Дж/м² (кгс·м/см²):

$$KС = K/S_0.$$

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

$$KС = h_1 - h_2,$$

где h_1 и h_2 – высоты подъема груза до и после разрушения образца, мм.

Начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, м^2 (см^2),

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

где H – начальная высота рабочей части образца, м (см); B – начальная ширина образца, м (см); h – глубина концентратора, мм. Параметры H и B измеряют с абсолютной погрешностью не более $\pm 0,05$ мм.

Описание лабораторного оборудования

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.

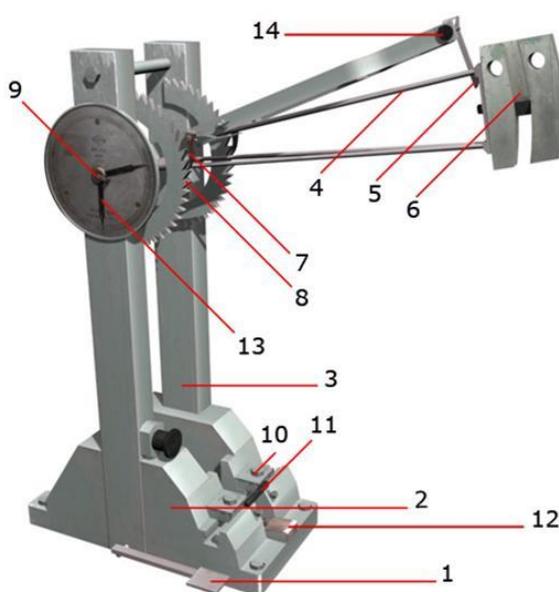


Рис. 6.2. Маятниковый копер МК-30А

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. 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.

Рабочее задание

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

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Ознакомьтесь с руководством пользователя имитационным виртуальным тренажером «Сопротивление материалов», перейдя по ссылке <https://lms.kgeu.ru/course/view.php?id=2790§ion=2>. Затем следуйте приведенным ниже указаниям.

1. Один из испытываемых предварительно измеренных образцов установите на опоры 10 маятникового копера МК-30А (см. рис. 6.2) надрезом в противоположную сторону от ножа маятника.

2. При каждом испытании стрелку шкалы 13 устанавливайте в положение «0», положение другой стрелки при этом будет соответствовать уровню подъема маятника с грузом.

3. Освободите маятник 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. В этом случае работа, затраченная на разрушение образца, будет равна разности энергии маятника до и после удара.

4. Зарисуйте исследуемые образцы до и после механических испытаний.

6. Заполните протокол испытаний на ударный изгиб (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Результаты испытаний

№	Материал образца	Тип образца	Температура испытания, °С	<i>B</i>	<i>H</i>	<i>h</i>	S_0 , см ²	<i>K</i> , Дж	<i>KC</i> , Дж/см ²
				см					
	Ст.3	U	20						

7. При проведении расчетов используйте следующее соотношение:

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

8. Оформите отчет о проделанной работе.

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 Вы знаете?
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.

Основные теоретические сведения

При испытании образцов из пластических материалов (мягкой стали, меди и др.) на сжатие (рис. 7.1) из-за сильной деформации (сплющивания) не удастся довести их до разрушения. Опыт приходится остановить, не определив величины наибольшей разрушающей нагрузки.



Рис. 7.1. Деформация стального образца при сжатии

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 пределы пропорциональности и текучести, а также модуль упругости E имеют приблизительно такие же значения, как и при растяжении. Хрупкие материалы (чугун, камень, бетон и др.) разрушаются при сжатии (рис. 7.2), 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.

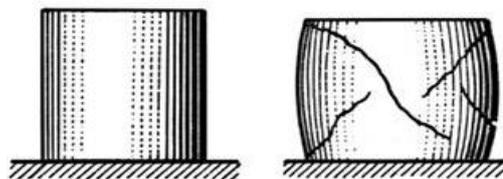


Рис. 7.2. Деформация чугунного образца при сжатии

Испытание деревянных образцов представляет интерес вследствие того, что прочность этого материала, имеющего волокнистую структуру, неодинакова вдоль и поперек волокон (анизотропный материал). Для испытаний применяют деревянные кубики (рис. 7.3).

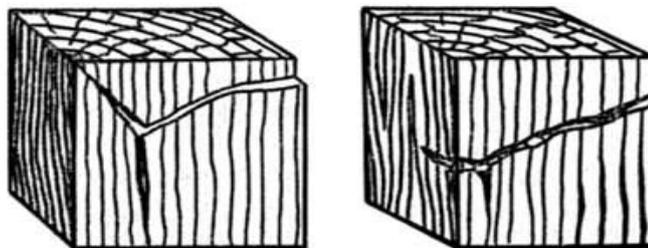


Рис. 7.3. Деревянные образцы, разрушенные при сжатии волокон

Прочность дерева на сжатие вдоль волокон обычно в 8...10 раз больше, чем поперек волокон. Образцы до и после сжатия выглядят как показано на рис. 7.4.

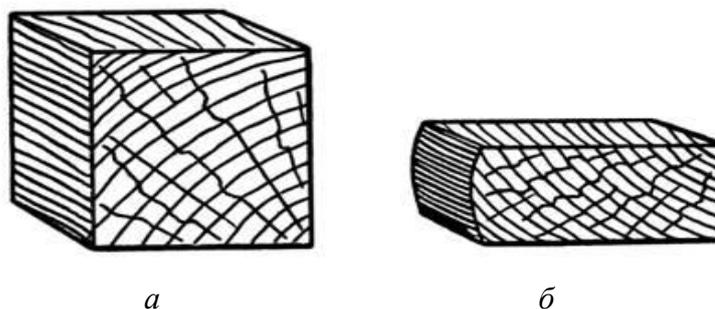


Рис. 7.4. Деревянный образец до (а) и после (б) сжатия поперек волокон

Описание оборудования, входящего в состав имитационного виртуального тренажера «Сопротивление материалов»

Пресс гидравлический ПСУ-10

Гидравлический пресс ПСУ-10 (рис. 7.5) предназначен для испытания стандартных образцов строительных материалов на сжатие, а также поперечного изгиба кирпича.

По конструкции силовозбуждающего устройства пресс относится к типу гидравлических и включает в себя три отдельных агрегата: собственно пресс (рис. 7.5), пульт управления (рис. 7.6) и силоизмеритель СИ-2, панель управления которого представлена на рис. 7.7.

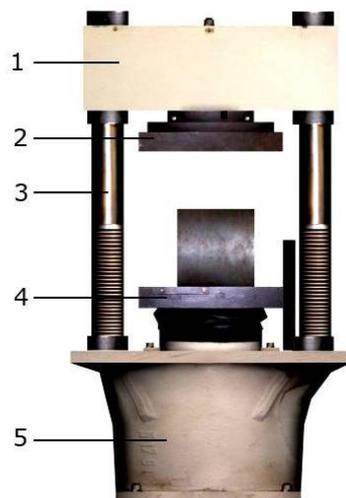


Рис. 7.5. Общий вид гидравлического пресса ПСУ-10: 1 – поперечина; 2 и 4 – опорная верхняя и нижняя плиты; 3 – колонны; 5 – станина

Собственно пресс (см. рис. 7.5) 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.

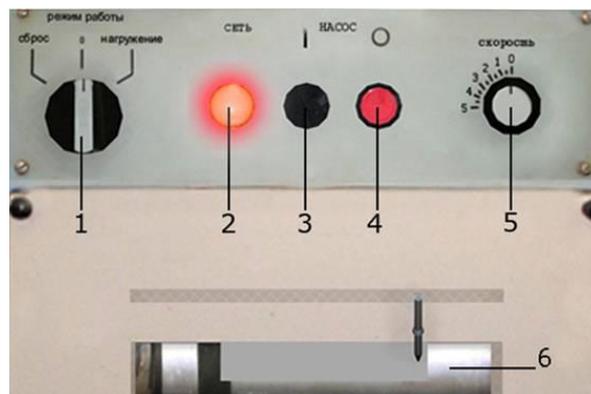


Рис. 7.6. Панель управления прессом: 1 – переключатель режимов работы пресса («0» – нерабочее состояние; «СБРОС» – состояние сброса нагрузки пресса и возврата нижней плиты в нижнее положение; «НАГРУЖЕНИЕ» – состояние нагрузки пресса, (нижняя плита перемещается вверх)); 2 – лампочка индикации сети; 3 – кнопка включения насоса, подающего жидкость в гидроцилиндр пресса; 4 – кнопка выключения насоса; 5 – переключатель скорости нагружения пресса; 6 – динамограф



Рис. 7.7. Панель силоизмерителя СИ-2: 1–3 и 5 – соответственно кнопки включения прибора, уровня защиты напряжения, режимов отображения напряжения и уровней защиты скорости нагружения; 4 – ручка ручной настройки СИ-2; 6, 7 – числовое табло

Силоизмеритель предназначен для отображения нагрузки и скорости нагружения пресса. Включение уровня защиты напряжения (кнопка 2, рис. 7.7) обеспечивает автоматическое выключение пресса при достижении напряжения, выше указанного.

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

Включение уровня защиты скорости нагружения (кнопка 5) обеспечивает автоматическое выключение пресса при скорости нагружения выше, указанной.

Рабочее задание

Определите ударную вязкость материала при сжатии и предел прочности.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Ознакомьтесь с руководством пользователя имитационным виртуальным тренажером «Сопротивление материалов», перейдя по ссылке <https://lms.kgeu.ru/course/view.php?id=2790§ion=2>. Затем следуйте приведенным ниже указаниям.

1. Возьмите со стола (рис. 7.8) образец и установите его между плитами.

2. При помощи тумблера сети (рис. 7.9) включите пресс в сеть (загорится лампочка «СЕТЬ» на пульте управления прессом).

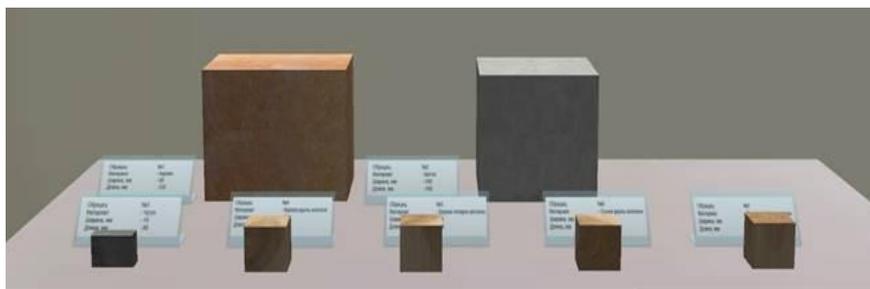


Рис. 7.8. Стол с образцами



Рис. 7.9. Тумблер включения сети

3. Установите соответствующий режим работы на пульте управления: «НАГРУЖЕНИЕ» – ход пресса вверх; режим «0» – работа вхолостую и передвижения пресса не будет; режим «СБРОС» используется при разгрузке образца (обратный ход плиты пресса).

4. Включите прибор СИ-2 (силоизмеритель).

5. На СИ-2 с помощью кнопок выставьте уровень защиты в килоньютонках (кН). При уровне защиты ниже усилия пресса пресс автоматически выключается. Если такое произошло, то для включения пресса нажмите на кнопку «НАСОС».

6. Выставьте на СИ-2 скорость нагружения – разница между нагрузкой в данный момент и предыдущей. Если скорость нагружения больше установленной, то пресс автоматически выключается.

7. 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. Повторное нажатие на кнопку соответствует переходу в режим реального времени (загорится лампочка «ПУСК»).

8. Установите скорость нагружения прессом (от 0 до 5 передач). Нажмите кнопку «НАСОС». Нижняя плита пресса начнет подниматься. Доведя образец до верхней плиты, пресс начнет раздавливать образец. Из динамографа начнет выходить динамограмма (рис. 7.10) и на шкалах СИ-2 появятся данные испытания.

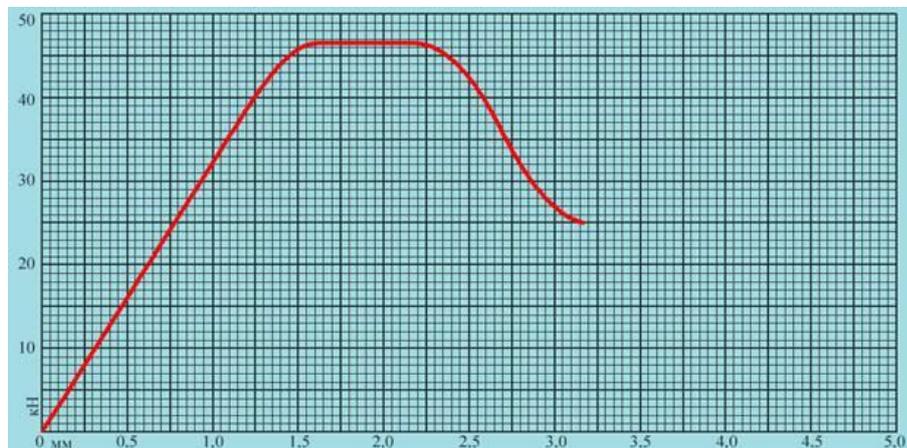


Рис. 7.10. Пример диаграммы (процесс сжатия)

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

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

10. Снимите диаграмму и положите ее на стол. Внимательно рассмотрите ее (один щелчок на диаграмме переводит ее в вертикальное положение, повторный щелчок убирает ее обратно на стол).

11. Возьмите новый образец и повторите испытания.

12. 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, Н;
 A_0 – площадь поперечного сечения образца до начала испытания, см².

13. Занесите данные испытаний в протокол (табл. 7.1).

14. При проведении расчетов используйте следующее соотношение:

$$1 \text{ кгс} = 9,8 \text{ Дж}; 1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н}; 1 \text{ Н} \approx 0,10197162 \text{ кгс};$$

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

Результаты испытаний

Образец	$A_0, \text{см}^2$	$F_{\text{вс}}, \text{Н}$	$\sigma_{\text{вс}}, \text{МПа}$

15. Зарисуйте исследуемые образцы до и после механических испытаний.

Контрольные вопросы

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

Лабораторная работа № 8

ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы: изучение методики проведения испытаний на растяжение для определения механических свойств различных материалов.

Основные теоретические сведения

Действие силы вызывает деформацию твердого тела, и в нем возникают напряжения. Напряжение σ , Па (МПа), является удельной величиной и определяется как отношение силы F , действующей на тело, к площади его сечения A_0 :

$$\sigma = F/A_0.$$

Здесь:

$$A_0 = \pi d_0^2 / 4,$$

где d_0 – начальный диаметр образца, мм.

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 (рис. 8.1) под действием постепенно возрастающей нагрузки складывается из трех последовательно накладываемых одна на другую стадий.

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

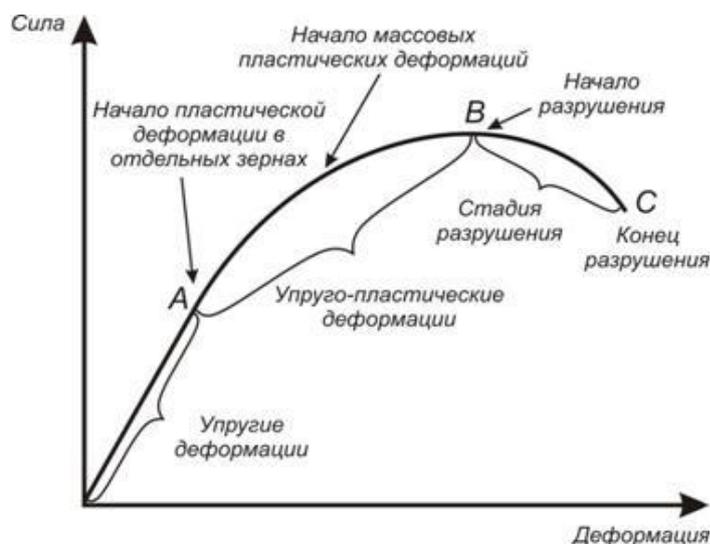


Рис. 8.1. Схема процесса деформации

Диаграмма растяжения

Вид диаграммы растяжения зависит от природы и структурного состояния материала (рис. 8.2).

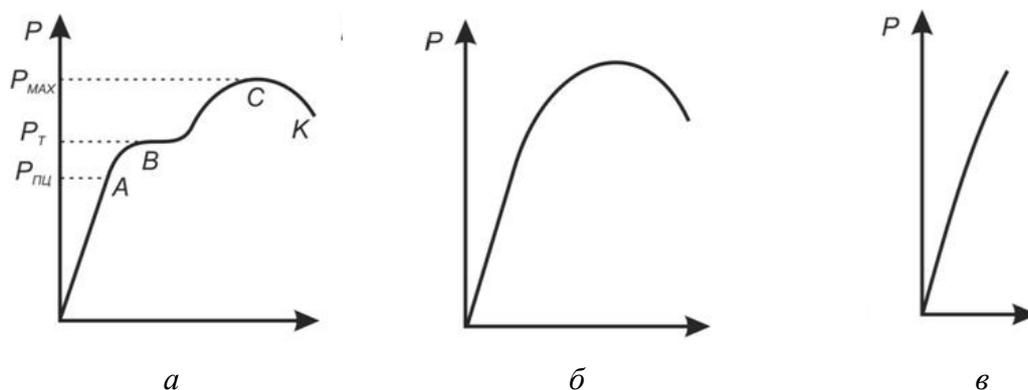


Рис. 8.2. Виды диаграмм растяжения различных материалов: *а* – для большинства металлов в пластичном состоянии с постепенным переходом из упругой области в пластическую (медь, бронза, легированные стали); *б* – для некоторых металлов в пластичном состоянии со скачкообразным переходом в пластическую область (малоуглеродистая сталь, некоторые отожженные бронзы); *в* – для хрупких материалов (чугун, стекло, закаленная и неотпущенная сталь, силумин)

Рассмотрим стадии растяжения малоуглеродистой стали (рис. 8.2, *а*).

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 A соответствует нагрузке при пределе пропорциональности $P_{\text{пц}}$. 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 B), 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 C 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 K , 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, т. е. соблюдается закон Гука:

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга – это структурно нечувствительная величина).

$$\sigma_{\text{пц}} = P_{\text{пц}}/F_0,$$

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

Предел упругости σ_y – наибольшее напряжение, до которого в материале не обнаруживаются признаков пластической деформации:

$$\sigma_y = P_y / F_0.$$

Физический предел текучести σ_T – это наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без увеличения растягивающей нагрузки:

$$\sigma_T = P_T / F_0.$$

Если на кривой деформации отсутствует четко выраженная площадка текучести (рис. 8.2, б), 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) σ_B – это условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествовавшей разрыву образца:

$$\sigma_B = P_B / F_0,$$

где F_B – нагрузка, соответствующая точке B , кгс.

Показатели пластичности

Относительное удлинение после разрыва δ – это отношение приращения расчетной длины образца ($l_k - l_0$) после разрушения (рис. 8.3) 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 длину.

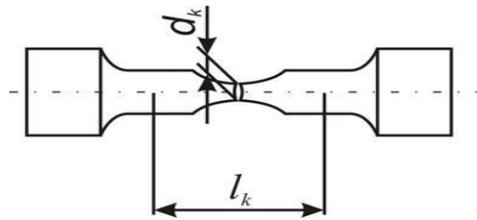


Рис. 8.3. Образец после испытания на растяжение

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.

Описание оборудования, входящего в состав имитационного виртуального тренажера «Сопротивление материалов»

Испытательная машина УММ-5 имеет диаграммный аппарат (рис. 8.4), 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.

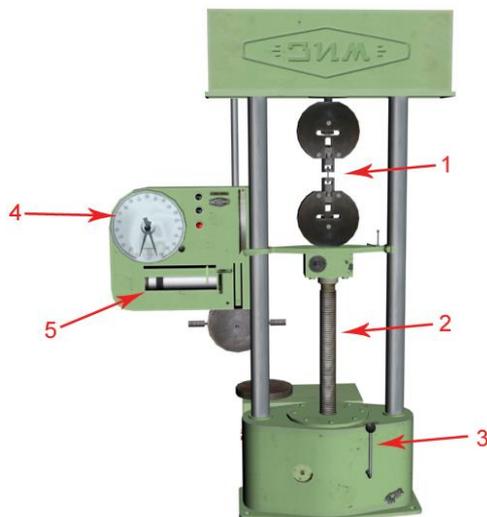


Рис. 8.4. Общий вид испытательной машины УММ-5: 1 – место установки образца («кулачки»); 2 – вращающийся винт; 3 – рукоятка переключения передач (используется три передачи); 4 – шкала динамометра; 5 – место выхода динамограмм

Рабочее задание

Проведите испытание образцов из различных материалов на растяжение и определите показатели прочности и пластичности.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Ознакомьтесь с руководством пользователя имитационным виртуальным тренажером «Сопротивление материалов», перейдя по ссылке <https://lms.kgeu.ru/course/view.php?id=2790§ion=2>. Затем следуйте приведенным ниже указаниям.

1. Возьмите со стола (рис. 8.5) образец.

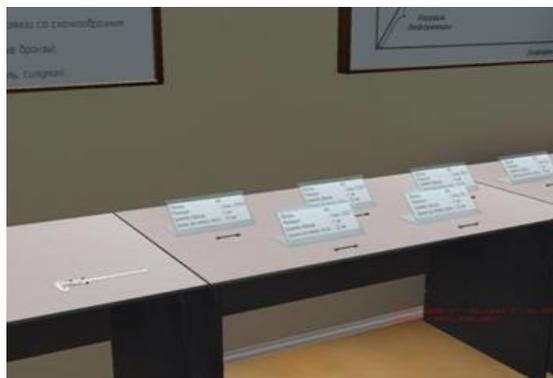


Рис. 8.5. Стол с образцами

2. Установите образец между кулачками (рис. 8.6).



Рис. 8.6. Зажатый образец

3. Включите УММ-5 («красная» кнопка – включить, «белая» кнопка – выключить).

4. Установите передачу (рис. 8.7).

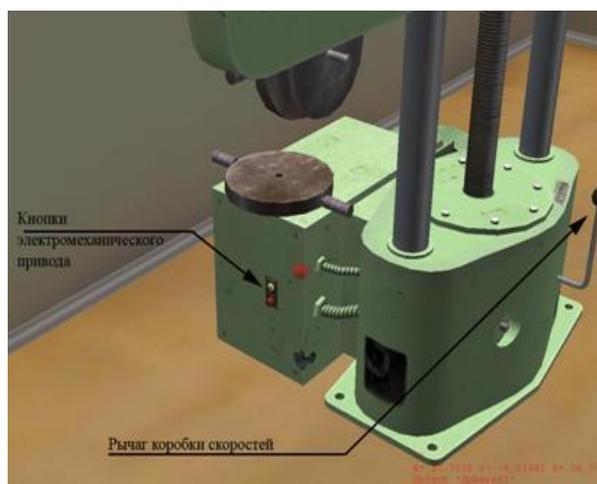


Рис. 8.7. Кнопки электромеханического привода и рычаг коробки скоростей

5. Нажмите кнопку «ВНИЗ». Образец начнет растягиваться, на шкале динамографа отразятся соответствующие значения (рис. 8.8). Управление пассивной стрелкой 3 происходит рукояткой 1, расположенной в центре (вращая рукоятку, можно вращать стрелку). Во время работы из диаграммного аппарата «выезжает» лист с диаграммой (рис. 8.9).

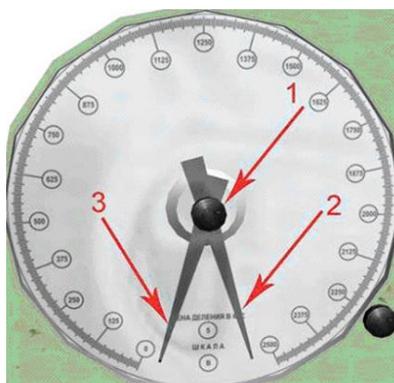


Рис. 8.8. Шкала динамографа: 1 – рукоятка управления пассивной стрелкой; 2 – активная стрелка (связана с замером); 3 – пассивная стрелка

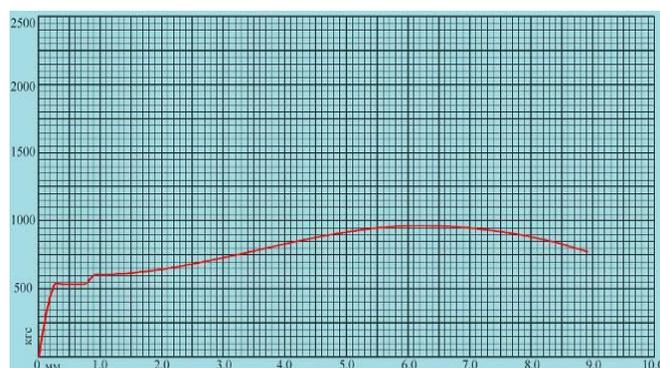


Рис. 8.9. Пример диаграммы разрыва образца

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

7. 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, производя тем самым 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).

11. Сломанный образец выкиньте в урну.

12. Нижний кулачок поднимите (кнопка «ВВЕРХ») так, чтобы можно было поместить новый образец.

13. Пассивную стрелку 3 (рис. 8.8) динамографа установите в нулевое положение. Испытания повторите.

14. Зарисуйте исследуемые образцы до и после механических испытаний. Подтвердите изменение соответствующих параметров расчетами.

15. Занесите результаты испытаний на растяжение образцов из различных материалов в протокол (табл. 8.1) и зарисуйте диаграммы растяжения. Определите механические свойства испытанных материалов и сравните их с табличными значениями.

Таблица 8.1

Протокол испытаний на растяжение

Показатели		Образец		
		№ 1	№ 2	№ 3
Материал образца				
Диаметр образца, мм	до испытания d_0			
	после испытания d_k			
Площадь поперечного сечения, мм ²	до испытания F_0			
	после испытания F_k			
Длина расчетной части, мм	до испытания l_0			
	после испытания l_k			
Нагрузки, соответствующие пределу текучести, кгс:	физическому P_T			
	условному $P_{0,2}$			
	пределу прочности P_{max}			

Показатели		Образец		
		№ 1	№ 2	№ 3
Предел текучести, МПа	физический σ_T			
	условный $\sigma_{0,2}$			
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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: изучение методик и приобретение навыков определения твердости материалов.

Оборудование и материалы: твердомеры; два штангенциркуля (возле каждого твердомера); отсчетный микроскоп МПБ-2; куски шлифовальной бумаги средней зернистости.

Основные теоретические сведения

Под твердостью понимается свойство поверхностного слоя материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора) определенной формы и размеров. О твердости судят по площади полученного отпечатка или по глубине вдавливания индентора. 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 Бринелля (рис. 9.1): индентор – шарик диаметром 2,5; 5 или 10 мм. При измерении твердости по Бринеллю (*HB*) стальной шарик диаметром D вдавливают в испытуемый образец под приложенной определенной время нагрузкой P , после снятия нагрузки измеряют диаметр отпечатка. Диаметр отпечатка получается тем меньше, чем выше сопротивление материала образца деформации, производимой индентором. Число твердости по Бринеллю (*HB*) есть отношение нагрузки P , действующей на шаровой индентор диаметром D , к площади F шаровой поверхности отпечатка:

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}. \quad (9.1)$$

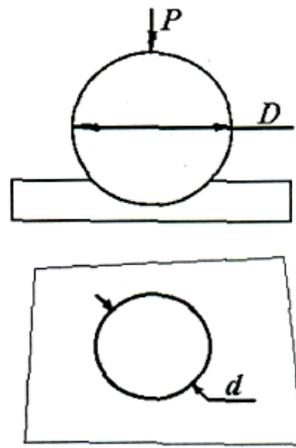


Рис. 9.1. Схема определения твердости по Бринеллю: P – усилие вдавливания; D и d – диаметры шарика и полученного отпечатка, измеренные после удаления индентора

Рекомендуемые нагрузки и диаметры шариков для определения HB различных металлических материалов приведены в табл. 9.1. Рекомендуемое время выдержки образца под нагрузкой для сталей – 10 с, для цветных металлов и сплавов – 30 с (при $P/D^2 = 10$ и 30) или 60 с (при $P/D^2 = 2,5$).

Таблица 9.1

Нагрузки и диаметры шариков, рекомендуемые для испытаний твердости по Бринеллю

P/D^2	Нагрузка P , Н			Примечание
	10 мм	5 мм	2,5 мм	
30	30 000	1 500	1 875	Материалы с HB 130...450 (стали, чугуны, высокопрочные сплавы на основе титана, никеля, меди, алюминия)
10	10 000	2 500	625	Материалы с HB 35...130 (алюминиевые сплавы, латуни, бронзы)
5	5 000	1 250	312,5	Алюминий, магний, цинк, латуни
2,5	2 500	625	156,25	Подшипниковые сплавы
1,25	1 250	312,5	78,125	Свинец, олово, припой
0,5	500	125	31,25	Мягкие металлы при повышенных температурах

Для достаточно пластичных материалов ее физический смысл соответствует условному пределу прочности при растяжении. Для многих металлов и сплавов существует линейная связь между HB и σ_B :

$$\sigma_B = x \cdot HB,$$

где x – коэффициент пропорциональности, зависящий от степени равномерной деформации и упругих констант материала (табл. 9.2).

Таблица 9.2

Значения коэффициента x для различных материалов

Материал	d/D	x
Чугуны	0,4	0,15
Литейные алюминиевые сплавы	0,45	0,25
Деформируемые литейные сплавы	0,4	0,38
Титановые сплавы	0,4	0,3
Высокопрочные сплавы	0,33	0,33
Малоуглеродистые стали	0,45	0,33
Аустенитные стали и латуни	0,4	0,45

По методу Бринеля можно испытывать материалы с твердостью от HB от 8 до 450. При большей твердости образца шарик-индентор остаточно деформируется на величину, превышающую стандартизованный допуск, и показания твердости искажаются. Для таких образцов, в частности для сталей после ТО, следует использовать метод Роквелла.

Твердость по методу Роквелла определяется глубиной вдавливания алмазного конуса с углом при вершине 120° в три этапа (рис. 9.2). В результате остается усилие P_0 для обеспечения контакта с образцом.

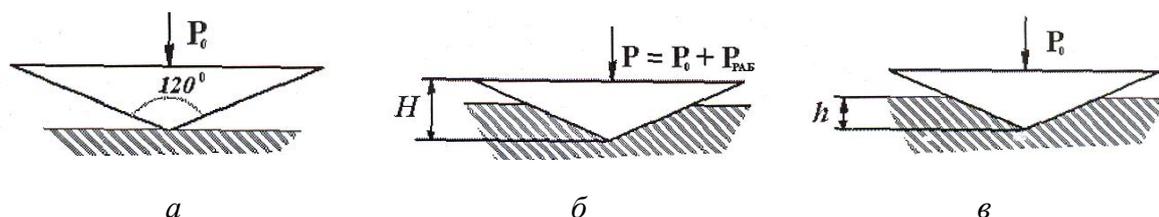


Рис. 9.2. Схема определения твердости по Роквеллу: a – предварительное малое усилие P_0 для обеспечения контакта с образцом (100 Н); b – основное нагружение усилием

$$P = P_0 + P_{раб}; \text{ в – снятие рабочего усилия } P_{раб}$$

О твердости материала судят по глубине вдавливания h , измеряемого на последнем (3-м) этапе нагружения. Чем больше глубина вдавливания h , тем меньше число твердости HR . Для повышения универсальности существуют три шкалы:

Шкала	Обозначения	Тип индентора	Общая нагрузка, кгс	Допускаемые величины твердости по шкале
<i>A</i>	<i>HRA</i>	Алмазный конус	60	70...85
<i>B</i>	<i>HRB</i>	Стальной шарик	100	25...100
<i>C</i>	<i>HRC</i>	Алмазный конус	150	22...68

Существенное значение имеет толщина испытуемого образца. Например, при 61 *HRC* минимальная толщина составляет 0,8 мм. Из рассмотренной методики определения твердости по Роквеллу следует, что это еще более условная характеристика, чем *HB*. Наличие различных шкал твердости, определяемое без геометрического подобия отпечатков, условный и безразмерный численный результат испытания, сравнительно низкая чувствительность делают метод Роквелла лишь средством упрощенного технического контроля.

Измерение твердости методом Викерса. Методы Бринелля и Роквелла малопригодны для измерения твердости тонких образцов из-за высоких усилий $9,8 \text{ Н} < P_{\text{раб}} < 1200 \text{ Н}$. Индентор в методе Викерса (рис. 9.3) – четырехгранная пирамида с углом при вершине 136° .

Число твердости по Викерсу:

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

где D – диагональ отпечатка; k – размерный коэффициент.

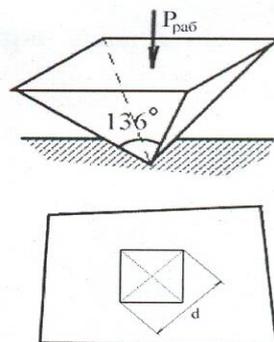


Рис. 9.3. Схема определения твердости по Викерсу

Недостаток метода – дополнительные измерения и расчеты.
Достоинство метода – возможность измерять тонкие образцы.

Описание лабораторного оборудования

Твердомеры, входящие в состав имитационного виртуального тренажера «Сопротивление материалов»

Твердомер по Бринеллю

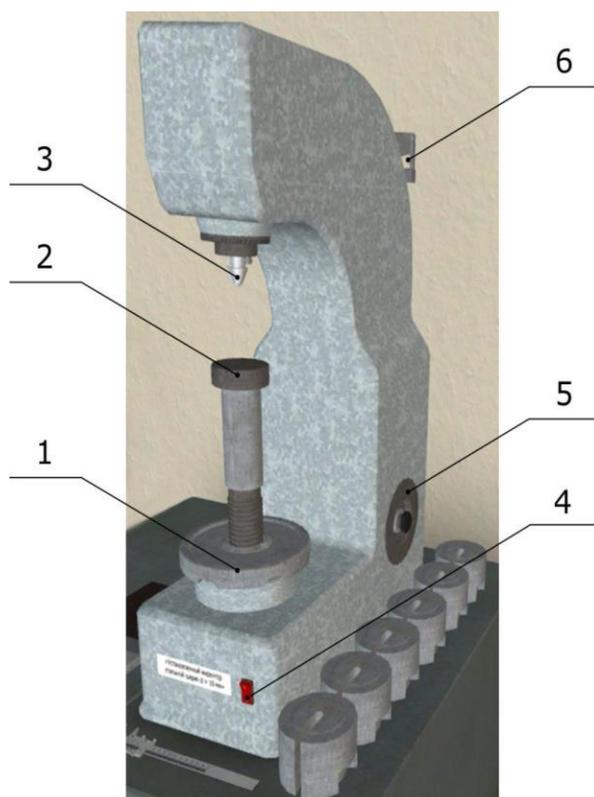


Рис. 9.4. Прибор для измерения твердости методом Бринелля: 1 – поворотный диск; 2 – стол; 3 – стальной шарик; 4 – кнопка включения нагрузки; 5 – диск для регулировки нагрузки; 6 – подвеска для грузов (рядом на столе лежат 6 грузов); индентор – стальной шарик $d = 10$ мм

Образцы, используемые для измерения твердости методом Бринелля:

- сталь низкоуглеродистая горячекатаная;
- чугун серый СЧ10;
- деформируемый алюминиевый сплав дуралюмин Д1;
- медный сплав – латунь Л90;
- деформируемый сплав на основе титана ВТ-3 в отожженном состоянии.

Твердомер по Роквеллу

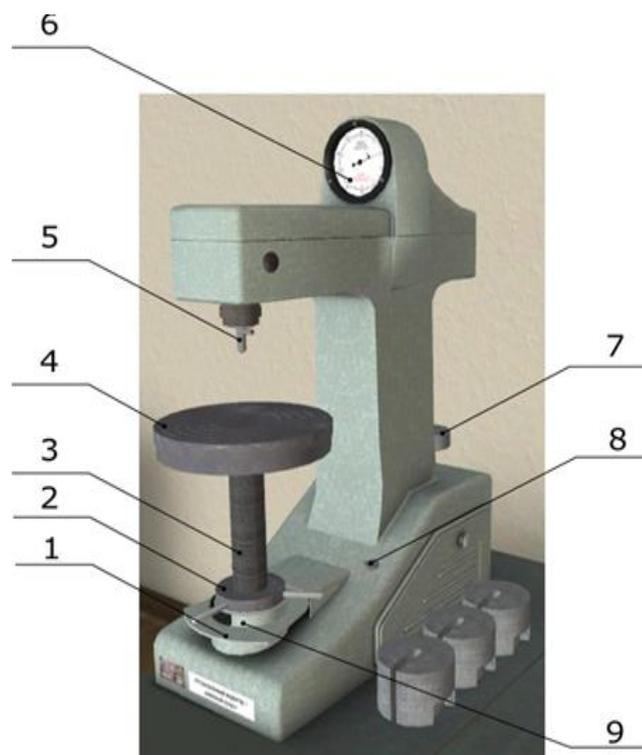


Рис. 9.5. Прибор для измерения твердости методом Роквелла: 1 – рычаг создания нагрузки; 2 – поворотный диск; 3 – подъемный винт; 4 – стол; 5 – алмазный конус; 6 – шкала нагрузки; 7 – подвеска для грузов (рядом на столе лежат 3 груза); 8 – тумблер включения прибора; 9 – маховик, регулирующий ось вращения стрелки для шкалы С;
индентор – алмазный конус

Образцы, используемые для измерения твердости методом Роквелла:

- сталь шарикоподшипниковая ШХ15 после термообработки;
- сталь рессорно-пружинная 60С2 без термообработки;
- сталь углеродистая инструментальная У7 после закалки и среднего отпуска;
- сталь легированная инструментальная ХВГ после термообработки;
- образец стали «HRC 42-45».

Твердомер по Роквеллу (стационарный)

Основные технические характеристики твердомера (рис. 9.6):

- предварительная нагрузка – 98,1 Н (10 кг);
- общая нагрузка – 588,4 Н (60 кг), 980,7 Н (100 кг) и 1 471 Н (150 кг);
- шкалы по Роквеллу: *HRA*, *HRB*, *HRC*;
- диапазон измерений: 20 – 88 *HRA*, 20 – 100 *HRB* и 90 *HRC*.

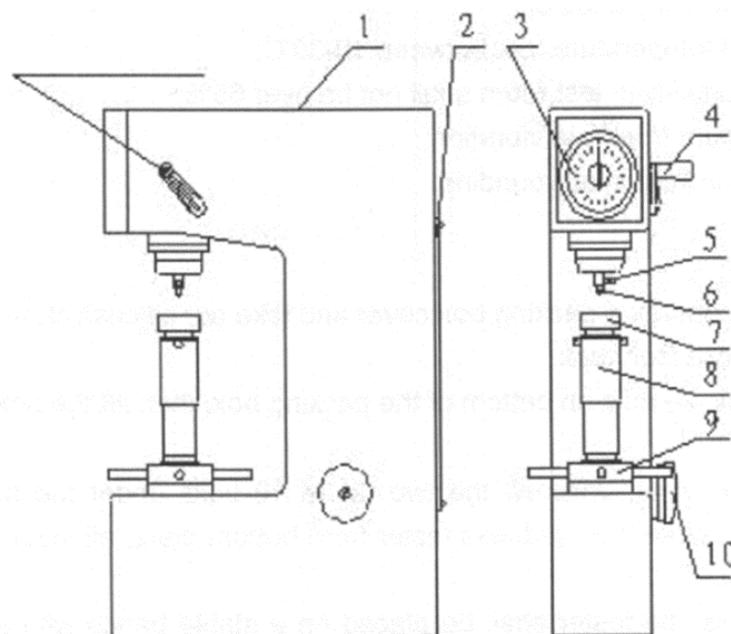


Рис. 9.6. Общий вид твердомера: 1 – верхняя крышка; 2 – задняя крышка; 3 – градусная панель; 4 – ручка; 5 – стопорный винт индентора; 6 – индентор; 7 – испытательный столик; 8 – крышка подъемного винта; 9 – подъемный мехнизм; 10 – маховик

Необходимые для испытания образцов на твердость параметры приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Шкала, индентор, испытательное давление и применимый диапазон для испытания твердости по Роквеллу

Шкала	Индентор	Начальное давление, Н	Комбинированное давление, Н	Примечания
1	2	3	4	5
A	Алмазный индентор конический (угол – 120°; сферический радиус в вершине – 0,2 мм)	98,07	588,4	Твердый сплав, карбид для поверхности закаленная сталь, твердая сталь
D			980,7	Тонкий стальной лист, закаленная сталь
C			1 471,0	Закаленная сталь, закаленная сталь, твердый чугун
F	Шариковый индентор (диаметр 1,5875 мм)		588,4	Чугун, алюминий, магниевый сплав, подшипниковый сплав, отожженный медный сплав, лист мягкой стали
B			980,7	Мягкая сталь, алюминиевый сплав, медный сплав, ковкий чугун, отожженная сталь

1	2	3	4	5
<i>G</i>			1 471,0	Фосфорное железо, бериллиевая бронза, ковкий чугун
<i>H</i>	Шариковый индентор (диаметр 3,175 мм)		588,4	Алюминий, цинк, свинец и т. д.
<i>E</i>			980,7	Подшипниковый сплав, олово, твердые пластмассы и другие мягкие материалы
<i>K</i>			1 471,0	

Рабочее задание

Определите твердость различных образцов материалов методами Бринелля и Роквелла с использованием:

- а) имитационного виртуального тренажера «Сопротивление материалов»;
- б) реального (стационарного) твердомера.

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Определение твердости с использованием имитационного виртуального тренажера «Сопротивление материалов»

Ознакомьтесь с руководством пользователя имитационным виртуальным тренажером «Сопротивление материалов», перейдя по ссылке <https://lms.kgeu.ru/course/view.php?id=2790§ion=2>. Затем следуйте приведенным ниже указаниям.

Определение твердости по методу Бринелля (см. рис. 9.4)

1. Наждачную бумагу примените к образцу, которая анимировано в воздухе несколькими движениями по испытуемой поверхности зачистит материал. Затем кликните на стол, бумага и образец вернутся на место.

2. К любому из образцов примените штангенциркуль – штангенциркуль установится на замер длины. Затем для замера ширины кликните на штангенциркуль и снова на образец. Повторите эти действия для измерения высоты. Данные зафиксируйте. Положите штангенциркуль на место.

3. Зачищенный образец положите на столик прибора.

4. Установите необходимое количество нагрузки на подвеску прибора: для стали, чугуна или титанового сплава нагрузка составляет 3 000 кгс; для латуни или алюминия – 1 000 кгс.

5. Вращая поворотный диск (маховик) по часовой стрелке, поднимите стол до соприкосновения шарика с поверхностью испытуемого образца.

6. Включите прибор. Если при включении нагрузка выбрана неверно, то прибор не включится и будет выведено сообщение: «Для данного образца нагрузка выбрана не верно». Если нагрузка выбрана правильно, шарик начнет движение вниз.

7. Произойдет выдержка материала под нагрузкой: стали – 10 с, цветного металла или сплава цветных металлов – 30 с. После указанного времени прибор автоматически выключится.

8. Вращением маховика опустите стол для извлечения образца.

9. Извлеките образец и положите его на стол.

10. Откройте тубус с отсчетным микроскопом МПБ-2. Примените микроскоп к образцу. Кликните левой кнопкой мыши на верхнюю часть прибора – справа сверху отобразится меню с видом в окуляр прибора с отпечатком на образце. Данные зафиксируйте. Уберите меню, кликнув на нем.

11. Снимите МПБ-2 с образца, поместите его в футляр.

12. Повторите испытания для остальных образцов.

13. Рассчитайте твердости всех образцов по формуле 9.1.

14. Занести данные испытаний в табл. 9.4.

Таблица 9.4

Результаты замеров твердости по методу Бринелля

№ п/п	Материал	$K = \frac{P}{D^2}$, кгс/мм ²	D, мм	P, кгс	Выдержки под нагрузкой	Толщина образца, мм	$d_{ср}$ отпечатка,	HB	σ_B , кгс/мм ²

Определение твердости по методу Роквелла (см. рис. 9.5)

1. Наждачную бумагу примените к образцу, которая анимировано в воздухе несколькими движениями по испытуемой поверхности зачистит материал. Затем кликните на стол, бумага и образец вернуться на место.

2. Штангенциркуль примените к любому из образцов – штангенциркуль установится на замер длины. Затем для замера ширины кликните на штангенциркуль и снова на образец. Повторите эти действия для измерения высоты. Данные зафиксируйте. Положите штангенциркуль на место.

3. Образец положите на столик прибора. Включите прибор при помощи тумблера включения.

4. Установите необходимое количество нагрузки на подвеску прибора (все 3 груза).

5. Вращая поворотный диск (маховик) по часовой стрелке, поднимите стол до соприкосновения конуса с поверхностью испытуемого образца. Если при соприкосновении нагрузка выбрана не верно, то дальнейший подъем не произойдет, будет выдаваться сообщение «Для данного образца нагрузка выбрана не верно».

6. После соприкосновения начнет двигаться маленькая стрелка шкалы нагрузки по часовой стрелке до пересечения с маленькой красной точкой. После пересечения красной точки дальнейший подъем столика невозможен.

7. Вращением маховика 9 (см. рис. 9.5), регулирующего ось вращения стрелки, установите шкалу прибора так, чтобы большая стрелка смотрела на «0» шкалы *C* (см. там же).

8. Нажмите на рычаг 1 (см. рис. 9.5). По истечении 2 с зафиксируйте данные по твердости (шкала *C*).

9. Опустите столик, извлеките образец и положите его на стол, выключите прибор.

10. Повторите измерения для других образцов.

11. Занести данные испытаний твердости по Роквеллу в табл. 9.5.

Таблица 9.5

Результаты замеров твердости по методу Роквелла

№	Материал	Тип шкалы	Тип индентора	Нагрузка, кгс	Твердость

Определение твердости реальным (стационарным) твердомером по Роквеллу

1. Ознакомьтесь с устройством твердомера (см. рис. 9.6). Выберите шкалу, соответствующую грубой твердости материала (см. табл. 9.3), подлежащего испытанию. Поверните маховик 10 выбора давления по часовой стрелке, чтобы установить общее давление.

2. При использовании конусного индентора нажмите на конусную головку средним пальцем и осторожно вдавите ее в отверстие на стержне индентора до упора головки на опорную поверхность, затем слегка затяните стопорный винт индентора 4 и установите образец на испытательном столике 7.

3. Поверните поворотное колесо по часовой стрелке, чтобы поднять подъемный винт вверх, убедившись, что испытываемый образец медленно соприкасается с индентором, пока короткий указатель на градусной шкале не изменится с черной точки на красную. К этому времени длинный указатель должен пройти три оборота и указывать на «С» (положение «В» – в случае определения *HRB*), указывая тем самым, что начальное испытательное давление 98,07 Н достигнуто. Отклонение длинного указателя не должно превышать 5°, в противном случае указателю не должно быть разрешено повернуть назад, вместо этого должно быть изменено контрольное место для перезапуска операции.

4. Вращайте диск градуировки, чтобы установить указатель в положение «С» (или положение «В» в случае определения *HRB*).

5. Медленно отодвиньте рукоятку приложения давления назад и убедитесь, что основное давление должно быть полностью приложено в течение 2–8 с. Общий промежуток времени удержания давления составляет 5 с, после чего через 2–3 с равномерно потяните ручку подачи давления, чтобы снять основное давление и осталось только начальное давление.

6. Значение, указанное длинным указателем на стоградусной панели в это время должно быть взято как определенное значение твердости образца (в случае определения *HRB* значение должно быть считано из внутреннего круга).

7. Поверните подъемное колесо против часовой стрелки, чтобы опустить испытательный материал. Повторите вышеуказанную процедуру в различных местах.

8. Для каждого образца должно быть проверено не менее 5 испытаний (первое испытание не учитывается). Количество контрольных точек может быть разумно уменьшено в случае проверки партии.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под твердостью материала?
2. Назовите достоинства испытаний на твердость.
3. Перечислите основные способы определения твердости материалов.
4. Что такое инденторы? Из каких материалов они выполняются?
5. Назовите требования, предъявляемые к испытываемой поверхности и толщине образца.

Лабораторная работа № 10

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы: изучение основ термической обработки углеродистых сталей.

Оборудование и материалы: электропечь лабораторная ЭКПС, стационарный твердомер по Роквеллу, стальные образцы, бачки с водой и минеральным маслом, электрическое точило ТЭ-125/200.

Основные теоретические сведения

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 на 30...50 °С до оптимальных температур:

- а) доэвтектоидных – до температуры $A_3 + (30...50) \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 10.1);
- б) эвтектоидной и заэвтектоидных – до температуры $A_1 + (30...50) \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 10.1).

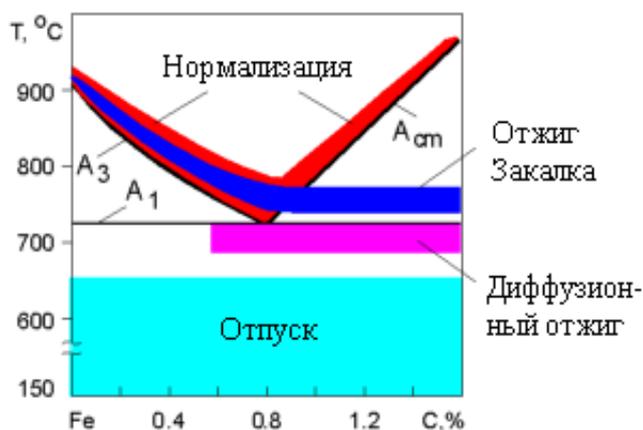


Рис. 10.1. Оптимальный интервал температур нагрева углеродистых сталей для проведения ТО

В результате фазовой перекристаллизации стали приобретают структуру мелкозернистого аустенита, причем в заэвтектоидных сталях сохраняются еще и включения вторичного цементита.

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 мин, к которым прибавляется по 1 мин 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 она равна ее диаметру.

Для случаев штучной садки заготовок при термической обработке в лабораторных печах требуемую длительность прогрева можно рассчитать, пользуясь табл. 10.1.

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 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).

Таблица 10.1

Нормы длительности прогрева штучных заготовок стали

Рабочая температура, °С	Форма заготовки		
	круг	квадрат	пластина
	на 1 мм радиуса	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

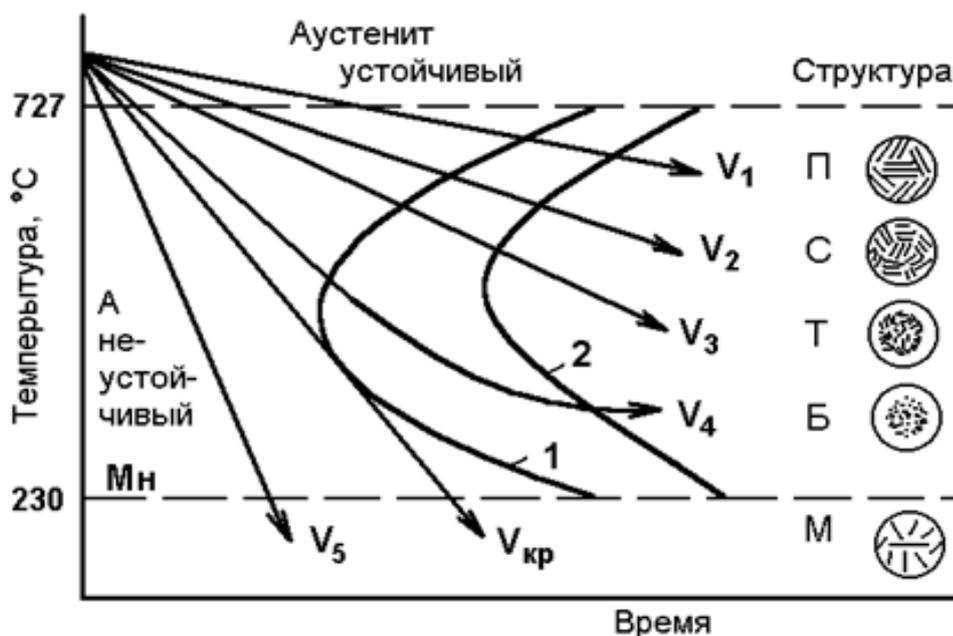


Рис. 10.2. Диаграмма изотермического распада аустенита эвтектоидной стали: 1 – кривая начала диффузионного распада аустенита; 2 – кривая конца диффузионного распада аустенита; $V_{кр}$ – критическая скорость охлаждения (П – перлит, С – сорбит, Т – троостит, М – мартенсит); M_n – линия начала мартенситного превращения

Из рис. 10.2 видно, что при относительно небольших скоростях охлаждения V_1, V_2, V_3 в районе температур 727...550 °С происходит диффузионное перлитное превращение – распад аустенита на структуры перлитного типа: перлит, сорбит или троостит (см. рис. 10.3).

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 троостит + мартенсит (рис. 10.3).

При более высоких скоростях охлаждения, равных или больших $V_{кр}$, диффузионный распад аустенита подавляется и он переохлаждается до интервала температур $M_H \dots M_K$, где M_H и M_K – соответственно температуры начала и конца мартенситного превращения (см. там же). По мере охлаждения от температуры 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 закалки.

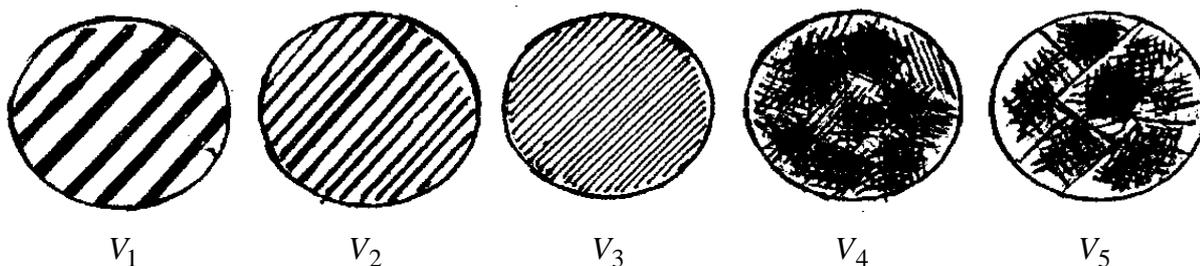


Рис. 10.3. Схемы структур аустенитного зерна после непрерывного охлаждения с разной скоростью

Мартенситное превращение происходит в интервале температур M_H и M_K . 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 – $M_K < 0$ °С. 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 °С превышающих критическую точку A_1 (см. рис. 10.1), 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 (см. там же) 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_1 (см. рис. 10.1).

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

Отжиг на мелкое зерно является разупрочняющей (смягчающей) ТО. Он заключается в нагреве сталей до оптимального интервала температур (см. рис. 10.1), выдержке и медленном охлаждении (обычно с печью;

скорость охлаждения V_1 (см. рис. 10.2)). 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 температуры A_1 , но ниже A_3 , и полной перекристаллизации не происходит (см. рис. 10.1). При низком отжиге сплав нагревается ниже температуры A_1 (см. рис. 10.1) на $30...40\text{ }^\circ\text{C}$ и охлаждается с печью. Перекристаллизации не происходит. Снимаются напряжения, уменьшается количество дислокаций. Низкий отжиг часто называется рекристаллизационным отжигом. Диффузионный отжиг (гомогенизация) применяется для устранения ликвации, т. е. разности химического состава стали по сечению слитка литой заготовки. Металл длительно ($20...24\text{ ч}$) нагревают до $950...1100\text{ }^\circ\text{C}$, выдерживают. Для уменьшения зерна затем делают улучшение или закалку.

Нормализация доэвтектоидных сталей проводится так же, как отжиг на мелкое зерно, но сталь охлаждается ускоренно со скоростью V_2 на спокойном воздухе (скорость V_2 , см. рис. 10.2). 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. В отличие от отжига процесс ведут от температуры $A_{c_m} + (30...50)\text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 10.1) При этой ТО зерна аустенита и, соответственно, зерна перлита оказываются крупными, поэтому после нее необходимо выполнить отжиг на мелкое зерно.

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 (скорость V_3), например в горячей воде или струей сжатого воздуха. Образующиеся пластинчатые структуры сорбита или троостита с небольшим количеством избыточного феррита или без него (см. рис. 10.2) придают стали более высокую прочность, твердость и износостойкость по сравнению с этими свойствами в нормализованном состоянии.

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 $A_1 \dots A_3$ (см. рис. 10.1), 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 закаливаемостью 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 ее конкретная величина определяет возможность получения при закалке материала с установленным значением твердости на определенной глубине. Полная прокаливаемость,

т. е. 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 % С (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 *HV* до 140...180 *HV*, 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 – 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 *S*-образной кривой. Следовательно, по этому методу можно закаливать 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.

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 (см. рис. 10.1), довольно продолжительной выдержке (в среднем от 30 мин до 2–3 ч) 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 высокодисперсных 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.

Рабочее задание

1. Изучите теоретический материал по теме «Структурные превращения, происходящие при нагреве и охлаждении железо-углеродистых сплавов с различной скоростью».

2. Заполните табл. 10.3.

Таблица 10.3

Химический состав исследуемой марки стали

Марка стали	C	Mn	Si	S	P

Примечание – Образцы имеют $d = 20-25$ мм и $h = 20-30$ мм, исходное состояние – отожженное.

3. Начертите фрагмент диаграммы состояния Fe-C сплавов.

4. Проведите фигуративную прямую для марки стали, подлежащей ТО, и отметьте на ней температуры, до которых предстоит нагревать опытные образцы.

5. Заполните протокол термической обработки опытных образцов (табл. 10.4). Твердость образцов определите на стационарном твердомере по методу Роквелла в соответствии с указаниями, приведенными в лабораторной работе № 9.

Таблица 10.4

Протокол термической обработки образцов (марка стали)

№ п/п	Твердость <i>HRC</i>		Температура нагрева	τ , мин	Охлаждающая среда	Предполагаемая структура
	до ТО	после ТО				

Методические указания по выполнению лабораторной работы

1. По фрагменту диаграммы определите оптимальную температуру нагрева стали 45 для получения структуры мелкозернистого аустенита.

2. Нагрейте муфельную печь до этой температуры.

3. Загрузите 3 образца в нагретую печь и выдержите их в течение 15 мин.

4. Охладите один образец на спокойном воздухе, другой – в холодной воде, третий – в минеральном масле.

5. Зачистите каждый образец с двух сторон для удаления окалины.

6. Измерьте их твердость на приборе Роквелла и среднее значение из трех испытаний запишите в протокол (табл. 10.4).

7. Установите в муфельных печах заданные температуры отпуска: 200; 400 и 600 °С.

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

9. Зачистите образцы с двух сторон, измерьте их твердость и среднее значение из трех измерений также занесите в протокол (табл. 10.4).

10. Постройте графики зависимости твердости от скорости охлаждения $HRC = f(U_{\text{охл}})$ и температуры отпуска $HRC = f(T_{\text{отп}})$.

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

12. Сделайте выводы о характере изменения твердости стали в зависимости от скорости охлаждения и температуры отпуска в различных средах.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое термическая обработка?
2. Какие виды термической обработки Вы знаете?
3. Что такое обработка холодом?
4. Что такое старение?
5. Поясните, как скорость охлаждения влияет на структуру стали.
6. Что такое время выдержки? Расскажите 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?
11. Объясните, для чего применяется отжиг после холодной пластической деформации. Как выбрать режима отжига?
12. В чем заключаются энергетические условия процесса кристаллизации. Объясните, почему превращения происходят при строго определенных температурах.
13. Какую роль играют несовершенства структуры кристаллов. Какую роль играют дислокации в вопросах прочности и пластичности материала.
14. Вычертите диаграмму состояния железо-карбид железа, спишите превращения и постройте кривую нагревания в интервале температур от 0 до 1 600 °С с применением правила фаз для сплава, содержащего 0,3 % С.
15. Расскажите, в чем заключается отжиг. Каковы цель и назначение диффузионного, изотермического отжига?
16. 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.
17. В каких отраслях промышленности применяют титан и его сплавы?

ГЛОССАРИЙ

Вязкое разрушение – разрушение металла, происходящее после значительной предварительной пластической деформации.

Жаропрочность – способность металлов и сплавов сохранять при повышенных температурах прочность, т. е. противостоять механическим нагрузкам.

Жаростойкость (окалиностойкость) – способность металлов и сплавов противостоять окислению (окалинообразованию) при нагреве до высоких температур.

Закаливаемость – способность стали к повышению твердости при закалке.

Износостойкость – свойство металла оказывать сопротивление поверхностному износу.

Критическая температура хрупкости – температура перехода металла от вязкого разрушения к хрупкому и наоборот.

Наклеп – поверхностное упрочнение металла при пластической деформации в холодном состоянии.

Относительное сужение – отношение абсолютного сужения, т. е. уменьшения площади поперечного сечения образца после разрыва к первоначальной площади его поперечного сечения, выраженное в процентах.

Относительное удлинение – отношение абсолютного удлинения, т. е. приращения расчетной длины образца после разрыва к его первоначальной расчетной длине, выраженное в процентах.

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.

Пластичность – свойство металлов менять свою форму и размеры без разрушения под действием внешних сил.

Ползучесть – свойство металлов медленно и непрерывно деформироваться (ползти) в течение длительного времени при постоянной нагрузке и повышенных температурах.

Предел выносливости – наибольшая величина максимального напряжения цикла, не вызывающего разрушения практически при очень большом числе циклов (10⁷ и более).

Предел длительной прочности – напряжение, вызывающее разрушение при данной температуре за данный интервал времени.

Предел ползучести – напряжение, вызывающее деформацию заданной величины за определенный промежуток времени при заданной температуре.

Предел прочности при растяжении – напряжение, равное отношению наибольшей нагрузки, предшествовавшей разрушению образца, к первоначальной площади сечения образца.

Предел текучести (условный) при растяжении – напряжение, при котором образец получает остаточное удлинение, равное 0,2 % первоначальной расчетной длины.

Предел текучести (физический) при растяжении – напряжение, при котором образец деформируется (течет) без заметного увеличения нагрузки.

Прокаливаемость – способность стали воспринимать закалку на определенную глубину.

Прочность – способность металлов выдерживать напряжения, не разрушаясь под действием приложенных сил.

Разгаростойкость – сопротивление стали термической усталости.

Синеломкость – хрупкость, возникающая при нагреве стали в интервале температур синего цвета побежалости (300 °С).

Твердость – способность металла противодействовать вдавливанию в него более твердого металлического или алмазного наконечника.

Теплостойкость – способность рабочей кромки стального инструмента сохранять в эксплуатации (при нагреве) структуру и свойства, необходимые для резания или деформирования.

Термическая усталость – склонность стали к образованию поверхностной сетки трещин при многократном нагреве и охлаждении.

Ударная вязкость – способность металла оказывать сопротивление действию ударных нагрузок.

Усталость – разрушение металла под действием повторно-переменных напряжений (циклов).

Хладноломкость – склонность некоторых металлов и сплавов при понижении температуры переходить от вязкого разрушения к хрупкому.

Хрупкое разрушение – разрушение металла, происходящее без заметной пластической деформации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник / В. Б. Арзамасов, А. Н. Волчков, В. А. Головин и [др.]; под редакцией В. Б. Арзамасова и А. А. Черепихина. – Москва: Издательский центр «Академия», 2007. – 538 с.
2. Материаловедение. Технология конструкционных материалов: учебное пособие / под редакцией В. С. Чередниченко. – 3-е изд., стер. – Москва : Омега-Л, 2007. – 751 с.
3. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология металлов : учебник / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин ; под общей редакцией Г. П. Фетисова. – Москва : Высшая школа, 2006. – 862 с.
5. Ржевская, С. В. Материаловедение : учебник для вузов / С. В. Ржевская. – 4-е изд. – Москва : Логос, 2004. – 424 с.
6. Шубина, Н. Б. Материаловедение : учебник / Н. Б. Шубина. – Москва : КноРус, 2020. 281 с. – URL:<https://book.ru/book/934308> (дата обращения: 28.01.2022). – Текст : электронный.
7. Сироткин, О. С. Основы материаловедения : учебное пособие / О. С. Сироткин. – Москва : КноРус, 2021. – 261 с. – URL: <https://book.ru/book/936623> (дата обращения: 28.01.2022). – Текст: электронный.
8. Черепихин, А. А. Материаловедение : учебник / А. А. Черепихин, И. И. Колтунов, В. А. Кузнецов. – Москва : КноРус, 2020. – 237 с. – URL: <https://book.ru/book/932568> (дата обращения: 28.01.2022). – Текст : электронный.
9. Сапунов, С. В. Материаловедение : учебное пособие / С. В. Сапунов. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 208 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/56171> (дата обращения: 28.01.2022). – Текст : электронный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Классификация основных уровней структурной организации металлических и полимерных материалов

Размерный интервал структуры	Структурные элементы	
	в металлах	в полимерах
Микроструктура		
Тонкая	Электронно-ядерная	
	~ 1...5 Å (1...5·10 ⁻¹⁰ м)	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)
	Молекулярная	
	~ 5...10 Å (0,5...1·10 ⁻⁶ м)	Молекулы в металлах отсутствуют Фрагменты макромолекул (атомные группировки) и единичные межзвенные (ван-дер-ваальсовы (ВДВ) и водородные) связи (0,0005...0,001 мкм)
Наноструктура		
~ 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
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.)
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.		

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Общие указания по выполнению лабораторных работ.....	6
Правила техники безопасности.....	7
Общая характеристика уровней структурной организации материалов.....	8
Лабораторная работа № 1. Кристаллизация металлов и солей	11
Лабораторная работа № 2. Металлографический метод исследования ...	25
Лабораторная работа № 3. Структура, маркировка и классификация легированных сталей	42
Лабораторная работа № 4. Структура, свойства цветных металлов и сплавов на их основе.....	49
Лабораторная работа № 5. Диаграмма Fe-C и структура железоуглеродистых сплавов	58
Лабораторная работа № 6. Испытание материалов на ударную вязкость	81
Лабораторная работа № 7. Испытание материалов на сжатие.....	86
Лабораторная работа № 8. Испытание материалов на растяжение	93
Лабораторная работа № 9. Определение твердости материалов	102
Лабораторная работа № 10. Основные виды термической обработки углеродистых сталей.....	113
Глоссарий.....	125
Список литературы	127
Приложение А	128

Учебное издание

**Сироткин Олег Семенович, Бунтин Артем Евгеньевич,
Сироткин Ростислав Олегович**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Практикум

Кафедра материаловедения и технологии материалов КГЭУ

Редактор И. В. Краснова
Компьютерная верстка И. В. Красновой

Подписано в печать 01.03.2022.
Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 7,55. Уч.-изд л. 4,6.
Заказ № 397/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51