

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Информационно-измерительная техника и технологии»

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплине
«Материаловедение и технология материалов»

В 2-х частях

Часть 1

Минск 2003

УДК 621

В данном пособии приведено описание лабораторных работ по курсу «Материаловедение и технология материалов» в соответствии с учебной программой для студентов специальностей приборостроительного профиля. Приведены теоретические основы, описание установок, порядок выполнения лабораторных работ и обработки результатов эксперимента.

Составители:

Е.Ф.Карпович, Т.В.Колонтаева

Рецензенты:

кафедра физики твердого тела БГУ,
кафедра технологии стекла и керамики БНТУ

© Карпович Е.Ф., Колонтаева Т.В.,
составление, 2003

Введение

В процессе изучения курса «Материаловедение и технология материалов», наряду с лекциями и практическими занятиями, большую роль играет лабораторный практикум. Без овладения навыками использования анализа поведения материалов в различных условиях невозможен направленный синтез новых материалов и обоснованное использование их на практике.

Выполнение лабораторных работ позволит закрепить теоретические положения основных разделов науки о материалах, ознакомиться с современными методиками научного исследования и проанализировать полученные экспериментальные результаты. В итоге можно выполнить небольшое, полностью завершённое научное исследование.

В учебном пособии (часть 1) приведены лабораторные работы, отражающие изучение основных физико-химических свойств конструкционных материалов и их структуры.

Особенностью изложенного материала является наличие достаточно обширной теоретической части, что позволяет студентам самостоятельно подготовиться к занятиям. В пособии приводится список дополнительной литературы, который будет способствовать более детальному изучению работ.

Целью пособия является ознакомление с различными металлическими и неметаллическими конструкционными материалами, используемыми в приборостроении и приобретение студентами четких представлений о многообразной природе физико-химических явлений, происходящих в материалах при различных условиях в процессе их синтеза и эксплуатации.

После выполнения лабораторной работы предусматривается оформление отчета, который включает:

- 1) титульный лист;
- 2) основные теоретические положения;
- 3) порядок выполнения работы с представлением результатов в виде таблиц и графических зависимостей;
- 4) анализ полученных результатов и выводы.

При проведении лабораторных работ необходимо строго придерживаться требований техники безопасности.

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

Цель работы: изучить диаграмму состояния «железо-углерод», ознакомиться с микроструктурой железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов), порошковых композиционных материалов.

Теоретическая часть

При изменении концентрации компонентов в сплавах, а также в процессе их охлаждения или нагрева (при условии постоянного внешнего давления) в этих сплавах происходят существенные фазовые и структурные изменения, которые можно наглядно проследить с помощью **диаграмм состояния**, представляющих собой графическое изображение состояния сплавов. Диаграммы строятся для равновесного состояния сплавов. **Равновесное состояние** – стабильное состояние, не изменяющееся во времени, и характеризующееся минимумом свободной энергии системы.

Диаграммы состояния обычно строят экспериментально. Для их построения используют термический метод. С его помощью получают кривые охлаждения сплавов. По остановкам и перегибам на этих кривых, обусловленным тепловыми эффектами превращений, определяют температуры самих превращений. С помощью диаграмм состояния определяют температуры плавления и полиморфных превращений в сплавах, сколько фаз и какие фазы имеются в сплаве данного состава при данной температуре, а также количественное соотношение этих фаз в сплаве. Дополнительно к термическому методу для изучения превращений в твердом состоянии привлекается исследование микроструктуры с использованием оптического и электронного микроскопов, рентгеноструктурный анализ, изучение физических свойств сплавов и т.д.

В двойных сплавах по вертикали откладывается температура, а по горизонтали – концентрация компонентов. Каждая точка на оси абсцисс соответствует определенному содержанию одного и другого компонента с учетом того, что общее содержание компонентов в каждой точке этой оси соответствует 100%. Поэтому по мере уве-

личения количества одного компонента сплава, должно снижаться содержание в сплаве другого компонента.

Вид диаграммы состояния определяется характером взаимодействий, которые имеют место между компонентами сплавов в жидком и твердом состояниях. Предполагается, что в жидком состоянии между компонентами существует неограниченная растворимость, т.е. они образуют однородный жидкий раствор (расплав). В твердом состоянии компоненты могут образовать механические смеси из чистых компонентов, неограниченные твердые растворы, ограниченные твердые растворы, устойчивые химические соединения, неустойчивые химические соединения, а также испытывать полиморфные превращения.

Механические смеси образуются, если элементы, входящие в состав сплава, при затвердевании из жидкого состояния не растворяются друг в друге и не взаимодействуют. По структуре смесь представляет собой неоднородное тело. На шлифе видны кристаллиты разных компонентов, образующих механическую смесь. Химический анализ определяет также разные компоненты. Различимы два типа кристаллических решеток.

Твердые растворы – фазы, в которых один из компонентов (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы других (растворяемых) компонентов располагаются в его решетке, искажая ее. Химический анализ твердого раствора показывает наличие двух элементов, а рентгеноструктурный – один тип решетки растворителя. По структуре – однородные зерна. Если оба компонента имеют однотипные кристаллические решетки, и их атомные диаметры отличаются не более чем на 8 – 15 %, то возможна неограниченная растворимость (например, золото и серебро).

Химические соединения образуются, если элементы, составляющие сплав, взаимодействуют друг с другом. По структуре они представляют собой однородные твердые тела. Свойства химических соединений отличаются от свойств образующих их элементов. Они имеют постоянную температуру плавления. Кристаллическая решетка химического соединения отличается от решеток исходных компонентов. В химическом соединении сохраняется определенное соотношение атомов элементов, т.е. имеется химическая формула соединения.

Диаграмма состояния системы «железо-углерод»

Железо и его сплавы с углеродом

Железо – серебристо-белый металл, плотность $7,86 \text{ г/см}^3$. Температура плавления $1539 \text{ }^\circ\text{C}$. Чистое лабораторное железо содержит не более $10^{-4} \%$ примесей, технически чистое железо – $0,15 \%$ примесей. Согласно диаграмме фазового равновесия железа, возможны 6 состояний железа: газообразное, четыре конденсированных (жидкое и 3 кристаллические полиморфные модификации) и плазма.

Полиморфизм – свойство вещества или материала изменять свою кристаллическую решетку при изменении температуры. Кристаллические формы $\alpha\text{-Fe}$ и $\gamma\text{-Fe}$ существуют при нормальном атмосферном давлении. Появление третьей $\varepsilon\text{-Fe}$ возможно лишь при действии значительных давлений и повышенных температур.

Углерод – неметаллический элемент. В природе встречается в виде двух модификаций: алмаза и графита (т.е. углерод также обладает полиморфизмом). Плотность углерода $2,25 \text{ г/см}^3$. Температура плавления $3500 \text{ }^\circ\text{C}$. Атомы углерода обладают высокой диффузионной подвижностью из-за их малого атомного радиуса.

В обычных условиях углерод находится в виде модификации графита с гексагональной слоистой решеткой. Модификацию углерода в виде алмаза при обычных температурах и давлениях получить невозможно.

Диаграмма состояния сплава «железо-углерод» представлена на рис. 1.1. Линия, ограничивающая область жидкой фазы, называется **ликвидус**. При достижении линии ликвидуса (при охлаждении) начинается процесс кристаллизации – выделение твердой фазы. Линия, ниже которой компоненты находятся только в твердом состоянии, называется **солидус**. При достижении линии (при охлаждении) солидуса процесс кристаллизации полностью завершается. Между линиями ликвидуса и солидуса в равновесии сосуществуют жидкая и твердая фазы.

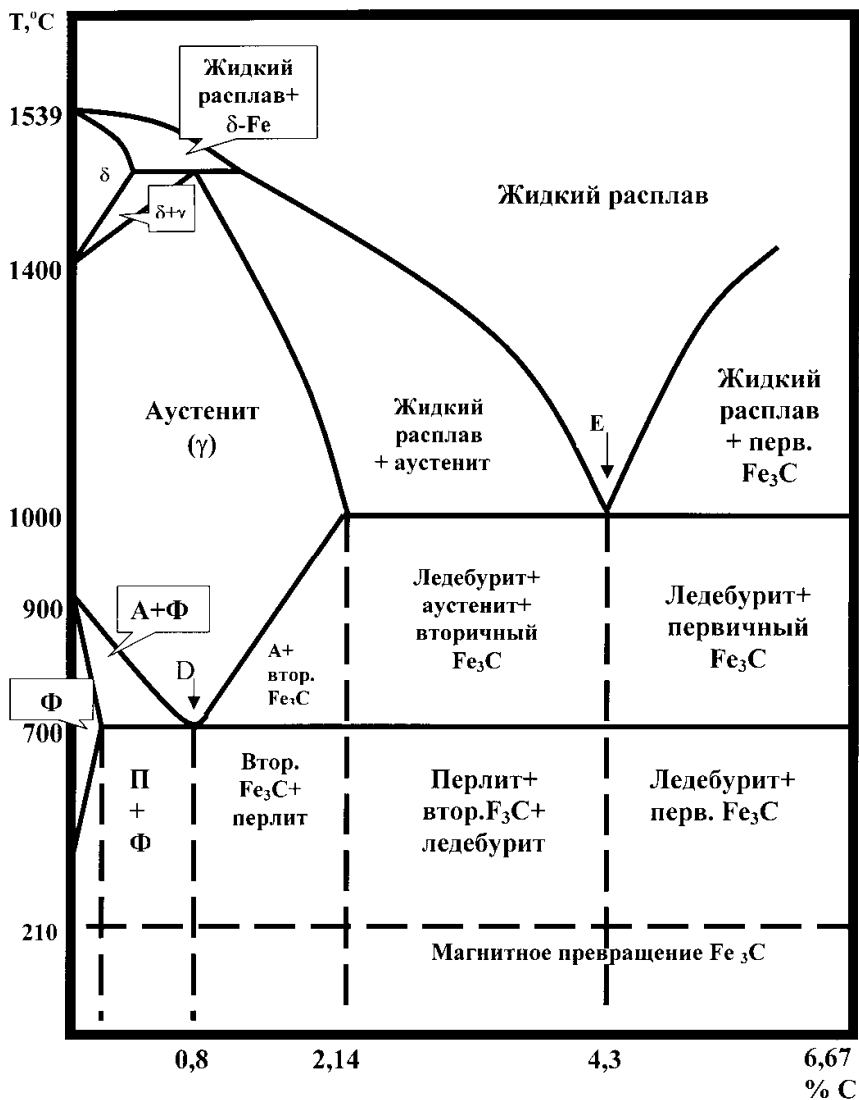


Рис. 1.1. Диаграмма состояния «железо-углерод»

Основными фазами в системе являются:

1) **жидкий расплав** углерода в железе. Характеризуется ближним порядком в расположении атомов с преобладанием металличе-

ской связи. Строение жидкого расплава зависит от концентрации углерода. По мере увеличения концентрации снижается вязкость и поверхностное натяжение, т.к. ионы углерода разрыхляют структуру жидкого расплава;

2) **феррит (Ф)** – твердый раствор внедрения углерода в α -железо (кристаллическая решетка – кубическая объемно-центрированная). Катионы углерода внедряются в решетку растворителя – железа. Феррит – мягкая, пластичная фаза. Микроструктура феррита – гранулированные зерна, сотообразные светлые, различной величины;

3) **аустенит (А)** – твердый раствор внедрения углерода в γ -железо (кристаллическая решетка – кубическая гранецентрированная). Максимальная растворимость углерода в γ -Fe больше, чем в α -Fe из-за наличия более крупных межузельных пор, в которых более свободно размещаются атомы углерода. Аустенит пластичен, но более прочный, чем феррит. Микроструктура аустенита – полиэдрическая в виде светлых зерен;

4) **цементит (Ц)** – химическое соединение железа с углеродом Fe_3C (карбид железа), содержит 6,67 % углерода. Цементит анизотропен – его свойства зависят от направления измерения. Характеризуется высокой твердостью, легко царапает стекло, очень хрупок, имеет почти нулевую пластичность. Различают первичный и вторичный цементит. Первичный цементит кристаллизуется при охлаждении из жидкой фазы. Вторичный кристаллизуется из аустенита. Микроструктура первичного цементита – белые иглы. Микроструктура вторичного цементита – белые поля или сетки;

5) **графит** – углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах, в свободном состоянии. Растворимость железа в графите очень мала. Графит имеет гексагональную слоистую кристаллическую решетку. Мягкая фаза, обладает низкой прочностью. Микроструктура графита – темные образования различной формы и размера;

6) **ледебурит (Л)** – механическая смесь аустенита и цементита, содержащая 4,3 % углерода. Ледебурит хрупок, обладает хорошими литейными свойствами, большой прочностью. Микроструктура – смесь мелких округлых или вытянутых темных зерен в белой цементитной основе;

7) **перлит (П)** – механическая смесь феррита и цементита, содержащая 0,8 % углерода. Твердая и прочная фаза. Микроструктура перлита – темные зерна пластинчатого строения.

Таким образом, изменяя температуру и содержание углерода, можно получить различный не только химический, но и фазовый состав сплавов с разнообразными физико-химическими и механическими свойствами и микроструктурой.

На основе диаграммы состояния «железо-углерод» синтезируются железоуглеродистые сплавы – стали и чугуны.

Стали

Стали – сплавы железа с углеродом, содержащие до 2,14% углерода. Кроме того, в состав сплава обычно входят марганец, кремний, сера и фосфор. Некоторые элементы могут быть введены специально для улучшения физико-химических свойств (легирующие элементы).

По структуре стали делятся на:

- 1) **доэвтектоидные**, содержащие до 0,8 % углерода (состав П+Ф);
- 2) **эвтектоидные стали**, содержащие 0,8 % углерода (П);
- 3) **заэвтектоидные**, содержащие более 0,8 % углерода (П+втор.Ц).

Точка **D** – **эвтектоидная точка** (при охлаждении из аустенита образуется механическая смесь феррита и цементита). Эвтектоидное превращение происходит не из жидкости, а из твердого раствора.

В зависимости от химического состава различают стали углеродистые и легированные. В свою очередь **углеродистые стали** могут быть:

- 1) малоуглеродистыми (содержание углерода менее 0,25%);
- 2) среднеуглеродистыми (содержание углерода составляет 0,25 – 0,60%);
- 3) высокоуглеродистыми, в которых концентрация углерода превышает 0,60%.

Легированные стали подразделяют на:

- 1) низколегированные – содержание легирующих элементов до 2,5%;
- 2) среднелегированные – от 2,5 до 10% легирующих элементов;
- 3) высоколегированные – содержат свыше 10% легирующих элементов.

По назначению стали бывают:

- 1) конструкционные, предназначенные для изготовления строительных и машиностроительных изделий;

2) инструментальные, из которых изготовляют режущий, мерительный, штамповый и прочие инструменты. Эти стали содержат более 0,65% углерода;

3) с особыми физическими свойствами, например, с определенными магнитными характеристиками или малым коэффициентом линейного расширения (электротехническая сталь, инвар);

4) с особыми химическими свойствами, например, нержавеющие, жаростойкие или жаропрочные стали.

В зависимости от содержания вредных примесей (серы и фосфора) стали подразделяют на:

1. Стали обыкновенного качества, содержание до 0,06% серы и до 0,07% фосфора.

2. Качественные – до 0,035% серы и фосфора каждого отдельно.

3. Высококачественные – до 0,025% серы и фосфора.

4. Особо высококачественные, до 0,025% фосфора и до 0,015% серы.

По степени удаления кислорода из стали, т.е. по степени ее раскисления, различают:

1) спокойные стали, т.е. полностью раскисленные, обозначаются буквами “сп” в конце марки;

2) кипящие стали – слабо раскисленные, маркируются буквами “кп”;

3) полуспокойные стали, занимающие промежуточное положение между двумя предыдущими; обозначаются буквами “пс”.

В зависимости от нормируемых показателей (предел прочности σ , относительное удлинение $\delta\%$, предел текучести δ_t , изгиб в холодном состоянии), сталь каждой группы делится на категории, которые обозначаются арабскими цифрами.

Стали обыкновенного качества обозначают буквами “Ст” и условным номером марки (от 0 до 6) в зависимости от химического состава и механических свойств. Чем выше содержание углерода и прочностные свойства стали, тем больше ее номер. Для указания категории стали к обозначению марки добавляют номер в конце соответствующий категории, первую категорию обычно не указывают.

Например: Ст1кп2 – углеродистая сталь обыкновенного качества, кипящая, № марки 1, второй категории, поставляется потребителям по механическим свойствам (группа А).

Качественные стали маркируют следующим образом: в начале марки указывают содержание углерода в сотых долях процента для

сталей, содержащих до 0,65% углерода или в десятых долях процента для индустриальных сталей, которые дополнительно снабжаются буквой "У".

Например: СТ45 – сталь углеродистая качественная, спокойная, содержит 0,45% С.

У7 – углеродистая инструментальная, качественная сталь, содержащая 0,7% С, спокойная (все инструментальные стали хорошо раскислены).

Легирующие элементы, входящие в состав стали, обозначают русскими буквами: А – азот, К – кобальт, Т – титан, Б – ниобий, М – молибден, Ф – ванадий, В – вольфрам, Н – никель, Х – хром, Г – марганец, П – фосфор, Д – медь, С – кремний.

Если после буквы, обозначающей легирующий элемент, стоит цифра, то она указывает содержание этого элемента в процентах. Если цифры нет, то сталь содержит 0,8 – 1,5% легирующего элемента.

Например: 14Г2 – низколегированная качественная сталь, спокойная, содержит приблизительно 14% углерода и до 2,0% марганца.

03Х16Н15М3Б – высоколегированная качественная сталь, спокойная содержит 0,03% С, 16,0% Cr, 15,0% Ni, до 3,0% Mo, до 1,0% Nb.

Высококачественные и особо высококачественные стали маркируют так же, как и качественные, но в конце марки высококачественной стали ставят букву А, (эта буква в середине марочного обозначения указывает на наличие азота, специально введенного в сталь), а после марки особо высококачественной – через тире букву "Ш".

Например: У8А – углеродистая инструментальная высококачественная сталь, содержащая 0,8% углерода;

30ХГС-Ш – особо высококачественная среднелегированная сталь, содержащая 0,30% углерода и от 0,8 до 1,5% хрома, марганца и кремния каждого.

Отдельные группы сталей обозначают несколько иначе.

Шарикоподшипниковые стали маркируют буквами "ШХ", после которых указывают содержание хрома в десятых долях процента (ШХ 6).

Быстрорежущие стали (сложнолегированные) обозначают буквой "Р", следующая за ней цифра указывает на процентное содержание в ней вольфрама (Р18).

Автоматные стали обозначают буквой "А" и цифрой, указывающей среднее содержание углерода в сотых долях процента (А12).

Чугуны

Чугунами называют сплавы железа с углеродом, содержащие более 2,14% углерода. Они содержат те же примеси, что и сталь, но в большем количестве.

Чугуны, в отличие от сталей, заканчивают кристаллизацию образованием эвтектики, обладают низкой способностью к пластической деформации и высокими литейными свойствами.

В зависимости от состояния углерода в чугуне, различают:

1) **чугун**, в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде карбида (белый чугун);

2) **чугун**, в котором углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в виде графита (серый, высокопрочный, ковкий чугуны).

Белый чугун не содержит графита, весь углерод связан в цементите Fe_3C . Белые чугуны, в зависимости от содержания углерода, делятся на:

1) доэвтектические – содержание углерода до 4,3% . Структура состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита;

2) эвтектические – содержание углерода 4,3%. Структура состоит из ледебурита;

3) заэвтектические – содержание углерода более 4,3 %. Структура состоит из ледебурита и первичного цементита.

Точка **С** – **эвтектическая**. Эвтектическое превращение происходит из жидкости. Образующаяся эвтектика называется ледебуритом. В точке С одновременно в равновесии сосуществуют три фазы: жидкий расплав, аустенит и цементит.

Серые чугуны содержат углерод в свободном состоянии в виде графита пластинчатой формы. Под микроскопом графит будет наблюдаться в виде темных кривых полос на светлом фоне. По сравнению с металлической основой, графит имеет низкую прочность. Места его залегания можно рассматривать как нарушения сплошности. Серый чугун имеет низкие характеристики механических свойств при испытаниях на растяжение. Однако серый чугун имеет и ряд преимуществ: позволяет получать дешевое литье, имеет хорошую обрабатываемость резанием, высокие демпфирующие свойства.

Серый чугун маркируется двумя буквами СЧ и двумя цифрами, соответствующими минимальному значению временного сопротивления при растяжении в МПа.

Например: СЧ10 – серый чугун с пределом прочности при растяжении 100 МПа.

По мере округления графитных включений их отрицательная роль как надразов металлической основы снижается, и механические свойства чугунов растут. Округленная форма графита достигается модифицированием. При использовании в качестве модификатора магния в количестве до 0,5% получают высокопрочный чугун.

Высокопрочный чугун содержит углерод в свободном состоянии в виде шаровидных включений графита. Под микроскопом наблюдаются округлые темные зерна разного размера на светлом фоне. Из высокопрочных чугунов изготавливают ответственные детали. Маркируется высокопрочный чугун буквами ВЧ и цифрой, характеризующей величину временного сопротивления.

Например: ВЧ 35 – высокопрочный чугун с пределом прочности при растяжении 350 МПа.

Ковкий чугун содержит углерод в свободном состоянии в виде графита хлопьевидной формы. Ковкий чугун получают из белого путем графитизирующего отжига (длительный отжиг при температуре 1000°С). Под микроскопом наблюдается хлопьевидная фаза на светлом фоне.

Ковкий чугун маркируется буквами КЧ и двумя числами: первое – предел прочности при растяжении, второе – относительное удлинение.

Например: КЧ 35–10 – ковкий чугун с пределом прочности 350 МПа и относительным удлинением 10 %.

Микроструктура чугуна состоит из металлической основы и графитных включений. Свойства чугуна зависят от свойств металлической основы и характера включений графита.

Металлическая основа может быть:

- 1) перлитная (темная основа под микроскопом);
- 2) феррито-перлитная (чередование светлых и темных участков под микроскопом)
- 3) ферритная (светлая основа под микроскопом).

Структура металлической основы определяет твердость чугуна.

Графитизацией называется процесс выделения графита при кристаллизации или охлаждении сплавов железа с углеродом. Графитизация является диффузионным процессом и протекает медленно. Процесс графитизации состоит из нескольких стадий:

- 1) образование центров графитизации;

- 2) диффузия атомов углерода к центрам графитизации;
- 3) рост выделений графита.

Композиционные материалы, полученные методом порошковой металлургии

Методы порошковой металлургии позволяют получать принципиально новые материалы, которые сложно или невозможно получить другими способами: многослойные композиции, различные комбинации металлических и неметаллических компонентов, пористые материалы с широким диапазоном контролируемой пористости, изделия из тугоплавких металлов. Порошковая металлургия дает возможность свести к минимуму отходы металла в стружку, упростить технологию изготовления деталей и снизить трудоемкость производства.

Технологический процесс изготовления изделий из порошков включает в себя: получение порошков, подготовку шихты, формование, спекание, горячее прессование и штамповку. Размеры частиц порошка обычно составляют 0,1 мкм – 0,1 мм. Более крупные частицы называют гранулами, более мелкие – пудрой. Металлические порошки получают физико-механическими и химико-металлургическими способами. В основе физико-механических способов лежат методы механического измельчения металлов в твердом и жидком состояниях. К ним относятся дробление и размол стружки в мельницах, распыление расплавленного металла струей сжатого воздуха, газа или жидкости, грануляция при литье металла в жидкость. К химико-металлургическим способам относятся способы восстановления металлов из оксидов, электролитическое осаждение металлов из водных растворов солей и т.д.

При формовании заготовок из порошков определенного химического состава прессованием им придают форму и размеры готовых деталей, после чего направляют на спекание. При спекании непрочные прессованные заготовки превращаются в прочное спеченное тело. Для получения более высоких характеристик механических и служебных свойств материалов и повышения точности размеров после формования и спекания дополнительно производят горячее прессование. Пористость повышает окисляемость порошковых материалов. Поры, наполненные газом, снижают теплопроводность,

что ухудшает прокаливаемость пористых материалов по сравнению с компактными. Чем выше требования по прочности, тем меньше должна быть пористость металла.

Исследование структуры сплавов

При изучении строения металла или сплава различают макроструктуру, видимую невооруженным глазом и микроструктуру, определяемую металлографическими методами, т.е. с использованием различных микроскопов.

Изучение структуры сплавов в данной работе осуществляется с помощью оптического микроскопа. Изображение формируется в отраженном свете.

Для микроанализа изготавливают образцы с полированной поверхностью – **микрошлифы**. Для получения микрошлифа поверхность образца шлифуют, полируют. Для исследования металлической основы микрошлиф подвергают химическому травлению определенными реактивами. Например, для сталей используют реактив Ржешотарского – спиртовой раствор азотной кислоты (5 мл азотной кислоты и 100 мл этилового спирта).

В результате анализа оценивается форма включений, их размер, распределение, количество графита, легирующих элементов, количество перлита, феррита и т.д.

Экспериментальная часть

1. Используя образцы–микрошлифы порошковых материалов, рассмотреть и графически изобразить структуру материалов под микроскопом. Сравнить структуру с описанием в альбоме.

2. Используя образцы–микрошлифы сталей и вспомогательный альбом с фотографиями, изучить и графически изобразить их структуру. Определить содержание углерода в образцах и фазовый состав по диаграмме состояния, приведенной в теоретической части.

3. Используя образцы–микрошлифы чугунов и вспомогательный альбом с фотографиями, изучить и графически изобразить их структуру. Определить вид чугуна, форму графитных включений, тип металлической основы. У белых чугунов определить содержание углерода. По диаграмме состояния определить фазовый состав белых чугунов.

4. Изучить диаграмму состояния «железо-углерод». Идентифицировать линии ликвидуса, солидуса, эвтектоидную и эвтектическую точки, линии фазовых переходов, температуры плавления железа, цементита и т.д.

5. По результатам проведенной работы сформулировать выводы.

Лабораторная работа №2

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: изучить механические свойства конструкционных материалов и методы оценки свойств.

Теоретическая часть

Механические свойства материалов зависят от вида напряженного состояния (создаваемого в образцах при испытании), условий и характера нагружения, скорости, температуры и состояния внешней среды. Целью механических испытаний материалов является определение именно тех или иных свойств или их совокупности, которые с наибольшей полнотой будут характеризовать надежность работы соответствующих изделий в заданных условиях службы. Совокупность таких механических свойств можно назвать конструктивной прочностью.

В качестве критериев оценки принимают разные сочетания механических свойств. Выделяют следующие группы критериев:

1. Оценки прочностных свойств материалов, определяемые часто и независимо от особенностей изготавливаемых из них изделий и условий их службы. Обычно эти прочностные свойства определяют в условиях растяжения при статическом нагружении.

2. Оценки свойств материалов, непосредственно связанных с условиями службы изделий, и определяющие их долговечность и надежность.

3. Оценки прочности конструкции в целом, определяемые при стендовых и эксплуатационных испытаниях.

Первые две группы критериев оценки свойств определяются на образцах, тогда как последние – на готовых деталях и конструкциях.

К основным механическим свойствам материалов относятся:

- 1) **прочность** – способность материала сопротивляться разрушению под действием нагрузки;
- 2) **пластичность** – способность материала необратимо изменять форму и размеры без разрушения при действии нагрузки;
- 3) **хрупкость** – способность материала разрушаться без защитного поглощения энергии;
- 4) **вязкость** – способность материала до момента разрушения необратимо поглощать механическую энергию;
- 5) **упругость** – способность материала восстанавливать форму и размеры после снятия нагрузки;
- 6) **твердость** – способность материала сопротивляться проникновению в него другого тела в поверхностном слое.

Диаграмма растяжения

Статические испытания – испытания, при которых прилагаемая к образцу нагрузка возрастает медленно и плавно. Чаще всего применяют испытания на растяжение, которые позволяют по результатам одного опыта установить несколько важных механических характеристик материала, а именно: временное сопротивление (предел прочности); предел пропорциональности; предел текучести (физический или условный); относительное удлинение после разрыва; относительное сужение поперечного сечения после разрыва.

Построение диаграммы растяжения является основной задачей испытаний на растяжение. Для этих испытаний используются цилиндрические образцы из исследуемого материала определенного диаметра и длины. Полученные диаграммы являются зависимостью между нагрузкой, действующей на образец, и его удлинением. На рис. 2.1 представлена типичная для углеродистой стали диаграмма растяжения.

Зона **OA** носит название **зоны упругости** (после снятия нагрузки $R_{\text{пл}}$ образец восстанавливает свои размеры и форму). Для нагрузки $R_{\text{пл}}$ (усилие предела пропорциональности) удлинение образца пропорционально усилию растяжения. На этом участке материал подчиняется закону Гука.

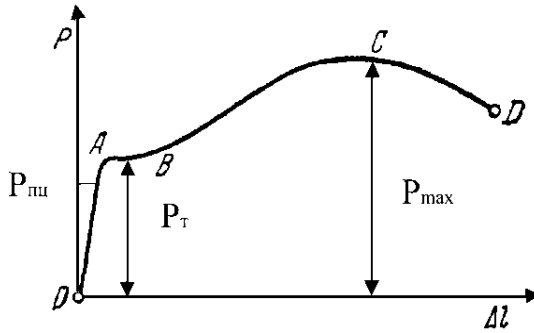


Рис. 2.1. Диаграмма растяжения образца

Удлинения Δl на участке **ОА** очень малы, и прямая **ОА**, будучи вычерченной в масштабе, совпадала бы в пределах ширины линии с осью ординат. Величина нагрузки, для которой остается справедливым закон Гука, зависит от размеров образца и физических свойств материала.

Модуль упругости E характеризует жесткость материала (сопротивляемость материала упругой деформации, т.е. смещению атомов из положения равновесия в решетке). Модуль упругости практически не зависит от структуры материала, а определяется силами межатомной связи. Модуль упругости зависит от направления, т.е. является анизотропной величиной, а также зависит от температуры.

Предел пропорциональности представляет собой отношение усилия $P_{пц}$ к начальной площади поперечного сечения образца S_0 .

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{S_0}.$$

Зона **АВ** называется **зоной общей текучести**, а участок **АВ** диаграммы – **площадкой текучести**. Здесь происходит существенное изменение длины образца без заметного увеличения нагрузки.

Предел текучести (физический) – напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки. Физический предел текучести σ_{τ} определяется по формуле

$$\sigma_m = \frac{P_m}{S_0}.$$

В большинстве случаев при испытании на растяжение и сжатие площадка **AB** не обнаруживается (для алюминия и отожженной меди, для высококачественных легированных сталей). В этом случае за предел текучести принимается условно величина напряжения, при котором остаточная деформация составляет 0,2% (рис. 2.2).

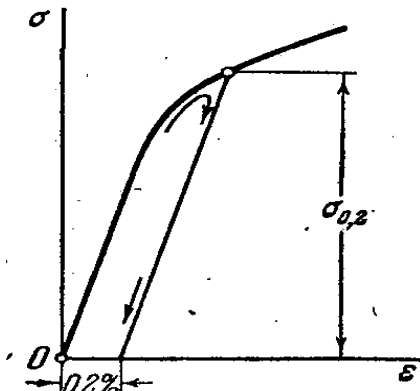


Рис. 2.2. Схема определения условного предела текучести

Условный предел текучести обозначается через $\sigma_{0.2}$. Предел текучести легко поддается определению и является одной из основных механических характеристик материала. Из точки на оси абсцисс, соответствующей остаточному удлинению 0,2% от начальной длины, проводим прямую, параллельную начальному участку диаграммы. Точка пересечения с диаграммой соответствует напряжению условного предела текучести.

Зона **BC** (рис. 2.1) называется **зоной упрочнения**. Здесь удлинение образца сопровождается возрастанием нагрузки, но неизмеримо более медленным (в сотни раз), чем на упругом участке. В стадии упрочнения на образце намечается место будущего разрыва и начинает образовываться так называемая **шейка** – местное сужение образца (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Образование шейки при растяжении образца

По мере растяжения образца утонение шейки прогрессирует. Когда относительное уменьшение площади сечения сравнивается с относительным возрастанием напряжения, сила **P** достигнет максимума (точка **C**, рис. 2.1). В дальнейшем удлинение образца происходит с уменьшением силы, хотя среднее напряжение в поперечном сечении шейки и возрастает. Удлинение образца носит в этом случае местный характер, и поэтому участок кривой **CD** называется **зоной местной текучести**. Точка **D** соответствует разрушению образца. У многих материалов разрушение происходит без заметного образования шейки.

Предел прочности, или временное сопротивление σ_B – отношение максимальной силы P_{\max} (рис. 2.1), которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения:

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{S_0}.$$

Разрушение является заключительной стадией деформирования (нагружения) образца и представляет собой процесс разделения его на части под действием нагрузки. На атомном уровне разрушение – разрыв межатомных связей с образованием новых поверхностей. Различают два основных вида разрушения: вязкое и хрупкое.

Хрупкое разрушение происходит путем отрыва, когда плоскость разрушения перпендикулярна напряжениям, в данном случае пластическая деформация отсутствует. Скорость распространения хрупкой трещины с острым углом раскрытия велика. Хрупкое разрушение является самопроизвольным процессом, не требует подвода энергии извне, его называют «катастрофическим».

Вязкое разрушение происходит путем сдвига под действием касательных напряжений. При вязком разрушении материал претерпевает упругую и пластическую деформацию. Вязкое разрушение обусловлено малой скоростью развития трещины и требует постоянного подвода энергии извне. Большинству реальных материалов одновременно присущи и вязкое и хрупкое разрушение, но говорят обычно о преобладающем.

По внешнему виду излома можно определить вид разрушения материала. Если излом имеет блестящую поверхность и «ручьистый» узор под микроскопом, то механизм разрушения – хрупкий.

Если излом матовый, волокнистый по структуре без металлического блеска и имеет чашечное строение, то разрушение вязкое.

При испытании на растяжение определяются **характеристики пластичности** материала — относительное удлинение при разрыве δ и относительное сужение при разрыве ψ .

Относительное удлинение при разрыве представляет собой величину средней остаточной деформации, которая образуется к моменту разрыва на определенной стандартной длине образца.

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

Относительное сужение поперечного сечения ψ , %, вычисляется по формуле

$$\psi = \frac{S_o - S_k}{S_o} \cdot 100\% .$$

Все сказанное выше о свойствах материалов относилось к испытаниям в так называемых нормальных условиях, но диапазон температур, в пределах которого реально работают конструкционные материалы, выходит далеко за рамки указанных нормальных условий. В широких пределах изменяются температуры, скорости нагружения и время действия внешних сил. Существуют нагрузки, весьма медленно меняющиеся и быстро меняющиеся. Есть нагрузки, действующие годами, а есть такие, время действия которых исчисляется миллионными долями секунды. Понятно, что в зависимости от указанных обстоятельств, механические свойства материалов будут проявляться по-разному.

По-разному ведут себя пластичные и хрупкие материалы при испытании на сжатие. Для малоуглеродистой стали диаграмма сжатия образца имеет вид кривой, показанной на рис. 2.4, а. Здесь, как и для растяжения, обнаруживается площадка текучести с последующим переходом к зоне упрочнения. В дальнейшем, однако, нагрузка не падает, как при растяжении, а резко возрастает. Происходит это в результате того, что площадь поперечного сечения сжатого образца увеличивается; сам образец вследствие трения на торцах принимает

бочкообразную форму (рис. 2.4, б). Довести образец пластического материала до разрушения практически не удастся. Испытуемый цилиндр сжимается в тонкий диск, и дальнейшее испытание ограничивается возможностями машины. Поэтому предел прочности при сжатии для такого рода материалов не может быть найден.

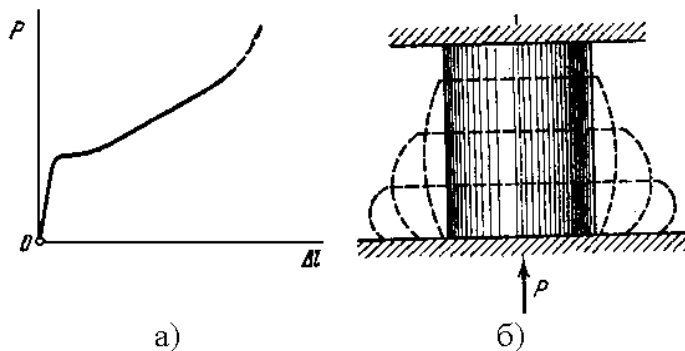


Рис. 2.4. Диаграмма сжатия пластичного материала (а) и схема его нагружения (б)

Иначе ведут себя при испытании на сжатие хрупкие материалы. Разрушение образца происходит с образованием трещин по наклонным или продольным плоскостям (рис. 2.5).

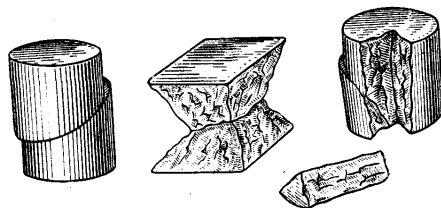


Рис. 2.5. Разрушение хрупких материалов при сжатии

Существуют материалы, способные воспринимать при растяжении большие нагрузки, чем при сжатии. Это обычно материалы, имеющие волокнистую структуру – дерево и некоторые типы пластмасс. Этим свойством обладают и некоторые металлы, например магний. Деление материалов на пластичные и хрупкие является условным. В зависимости от условий испытания многие хрупкие материалы способны вести себя как пластичные, а пластичные как хрупкие.

Одной из основных технологических операций, позволяющих изменять в нужном направлении механические свойства материала, является термообработка. Известно, например, что закалка резко повышает прочностные характеристики стали и одновременно снижает ее пластические свойства.

Определение твердости материалов

Твердость – способность материала оказывать сопротивление деформации в поверхностном слое при местных контактных воздействиях.

Преимущества измерения твердости

1. Между твердостью пластичных материалов и другими механическими свойствами существует количественная зависимость.

2. Измерение твердости по технике выполнения значительно проще, чем определение прочности (не требует специальных образцов, выполняется непосредственно на проверяемых деталях в короткое время).

3. Измерение твердости не влечет за собой разрушение проверяемой детали и позволяет проводить сплошной контроль деталей.

4. Твердость можно измерять на деталях небольшой толщины, а также в тонких слоях.

Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия наконечника:

1) **способ вдавливания** – вдавливание наконечника. Характеризует сопротивление пластической деформации;

2) **способ царапания** – царапание поверхности. Характеризует сопротивление разрушению (для большинства металлов путем среза);

3) **способ отскока** – ударом или же по отскоку наконечника. Характеризует упругие свойства.

Наибольшее применение получило измерение твердости вдавливанием. В результате вдавливания достаточно большой нагрузкой поверхностные слои материала, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Особенность происходящей при этом деформации заключается в том, что она протекает только в небольшом объеме, окруженным недеформированным металлом. В таких условиях

возникают, главным образом, касательные напряжения, а доля растягивающих напряжений незначительна по сравнению с другими видами испытаний.

Выбор формы, размеров наконечника и величины нагрузки зависит от целей испытания, структуры, ожидаемых свойств, состояния поверхности и размеров образца. Наиболее широкое распространение получили методы определения твердости вдавливанием по Бринеллю, по Роквеллу, по Виккерсу.

Измерение твердости по Бринеллю. В поверхность исследуемой детали вдавливается стальной шарик различного диаметра (2,5; 5 или 10 мм). Отпечаток имеет форму шарового сегмента (рис. 2.6). Измерению подлежит диаметр отпечатка d_{cp} в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

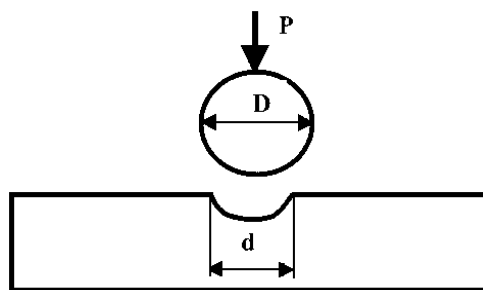


Рис. 2.6. Измерение твердости по Бринеллю

Твердость по Бринеллю – это отношение приложенной нагрузки к площади сферической поверхности отпечатка.

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d_{cp}^2} \right)}$$

Диаметр шарика и нагрузку выбирают так, чтобы диаметр отпечатка $d = (0,25 \dots 0,5)D$.

Для обозначения твердости по Бринеллю используют следующую запись: **200HB 5/750/20**. Испытания проводили с шариком диаметром $D = 5$ мм с усилием $P = 750$ кгс, продолжительность выдержки испытательного усилия $t = 20$ сек., расчетное значение твердости составило 200 единиц.

Измерение твердости по Роквеллу. В качестве индентора используют алмазный конус с углом при вершине 120° , или закаленный шарик небольшого диаметра $d = 1,588$ мм. Алмазный конус пригоден для измерения закаленных и твердых материалов. Шариковый индентор используется для измерения твердости мягких материалов.

Принципиальное отличие измерения твердости по Роквеллу от метода по Бринелю состоит в том, что измеряют глубину отпечатка, а не диаметр. Варьирование усилий вдавливания и вида наконечника позволяет использовать 9 шкал определения твердости материалов (шкалы А, В, С и т.д.). Нагружение образца производят в два этапа. Вначале на образец подается предварительная нагрузка (P_0). Индикатор погружается на величину h_0 . Далее прикладывается основная нагрузка P_1 . Таким образом, общее усилие составляет $(P_0 + P_1)$, общая глубина $(h_1 + h_2)$.

В обозначение твердости по Роквеллу входит указание величины и название шкалы измерения, например 75 HRA. Шкала А используется для очень твердых материалов, твердых сплавов и для очень тонких слоев (0,3...0,5 мм).

Измерение твердости по Виккерсу. В качестве наконечника используется четырехгранная алмазная пирамида с углом между противоположными гранями при вершине $\alpha = 136^\circ$. Отпечаток представляет собой четырехугольник. Измерению подлежат диагонали отпечатка d_1 и d_2 (рис. 2.7). По среднему арифметическому диагоналей и углу при вершине пирамиды определяют твердость по Виккерсу, которая обозначается HV

$$HV = \frac{2P \sin \alpha / 2}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

где $d = (d_1 + d_2)/2$ – среднее арифметическое значение.

Метод определения твердости по Виккерсу дает высокую точность при измерении тонких слоев, т.к. диагонали отпечатка примерно в 7 раз больше его глубины, поэтому даже при небольшой глубине проникновения пирамиды отпечаток получается достаточно точным. Образцы должны иметь полированную поверхность. Толщина образца должна быть больше в 1,5 раза диагонали отпечатка.

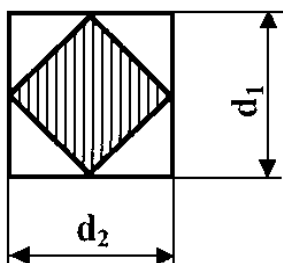


Рис. 2.7. Определение твердости по Виккерсу

Определение твердости по шкале Мооса

В минералогической практике для определения твердости пользуются грубой, но традиционной и достаточно удобной шкалой Мооса, в которой 10 стандартных минералов расположены в ряд по степени возрастающей твердости. Если испытываемый материал можно поцарапать минералом с твердостью “ $n + 1$ ”, а сам он царапает минерал с твердостью “ n ”, значит его твердость “ H ” по Моосу имеет значение “ $n < H < n + 1$ ”. Если нет в распоряжении стандартной шкалы твердости, то можно еще грубее, но достаточно наглядно определять твердость, сравнивая испытуемый материал со стеклом, лезвием ножа и т.п., как показано в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Твердость	Минерал	Возможная замена	Черта	Отличительные свойства
1	2	3	4	5
1	Тальк $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$	Грифель карандаша	белая	Блеск неметаллический, жирный, перламутровый. Цвет от светло-зеленого, до белого
2	Гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Мягкая алюминиевая проволока	белая	Блеск неметаллический, стеклянный, перламутровый, шелковистый. Бесцветный, белый, сероватый, желтоватый

1	2	3	4	5
3	Кальцит CaCO_3	Медная монета	белая	Блеск неметаллический, стеклянный, перламутровый. Бесцветный, белый, реже желтый, зеленый, голубой, синий. Вскипает под действием HCl
4	Флюорит CaF_2	Железная проволока	бесцветная	Блеск неметаллический, тусклый. Цвет разнообразный
5	Апатит $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{F}, \text{OH})_2$	Стекло	белая	Блеск неметаллический, стеклянный, иногда жирноватый. Цвет зеленый, бурый, белый
6	Ортоклаз $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	Лезвие перочинного ножа	черты не дает	Блеск неметаллический, стеклянный, перламутровый. Цвет желтоватый, розоватый
7	Кварц SiO_2	Напильник	черты не дает	Блеск неметаллический, стеклянный, в изломе жирноватый. Бесцветный, белый
8	Топаз $\text{Al}_2[\text{SiO}_4](\text{F}, \text{OH})_2$	-	черты не дает	Блеск неметаллический, стеклянный, Прозрачный. Цвет голубой, синий, розовый, красный
9	Корунд (наждак)	-	черты не дает	Блеск неметаллический, стеклянный. Очень твердый. Тёмный, непрозрачный
10	Алмаз	не представлен		

Еще проще запомнить, что кристаллы с твердостью по Моосу меньше 2 царапаются ногтем, меньше 5 – царапаются перочинным ножом, а с твердостью больше 7 сами царапают стекло.

В коллекции представлены минералы в соответствии со шкалой твердости. Нумерация образцов соответствует значению твердости по Моосу. В качестве корунда представлена его разновидность – наждак (корунд с примесями магнетита, гепатита и кварца). Образец с твердостью 10 (алмаз) не представлен.

Экспериментальная часть

1. Испытания на растяжение.

1.1. Получить цилиндрические образцы из стали, испытанные на растяжение.

1.2. Произвести с помощью штангельциркуля необходимые измерения длин и диаметров образцов. Данные занести в табл 2.2.

Т а б л и ц а 2.2

Усилие P , кгс	Длина образца L_k , мм	Диаметр образца D_k , мм	Площадь поперечного сечения S_k , мм ²	Изменение длины ΔL , мм	Свойства		
					σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %

1.3. Определить основные механические характеристики, а именно предел прочности материала, относительное удлинение и относительное сужение по формулам, приведенным в теоретической части работы.

1.4. Построить диаграмму растяжения образцов стали в координатах $P-\Delta L$.

1.5. Ознакомиться с диаграммами растяжения различных конструкционных материалов, выданными преподавателем, выделить основные зоны, определить механические характеристики.

2. Определение твердости материалов.

2.1. Определение твердости по Бринеллю:

а) испытуемый образец устанавливают на столике прибора для измерения твердости;

б) установить величину нагружающего усилия и время действия нагрузки;

в) нанести отпечаток на образец, опустить столик прибора, снять образец;

г) используя микроскоп, измерить диаметр полученного отпечатка и рассчитать твердость по Бринеллю.

2.2. Определение твердости по Виккерсу:

а) определить длины диагоналей отпечатка на образце бронзы, установленном на предметном столике микроскопа;

б) рассчитать значение твердости по Виккерсу.

2.3. Изучение влияния содержания углерода в стали на ее твердость:

а) измерить диаметры отпечатков полученных образцов для сталей СТ20, СТ45, У8;

б) определить значения твердости по Бринелю, пользуясь справочными таблицами;

в) построить графическую зависимость твердости от содержания углерода и объяснить ее.

3. По результатам работы сформулировать выводы.

Лабораторная работа №3

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: изучить особенности процесса кристаллизации материалов на примере солей и металлов, определить влияние различных факторов на структуру закристаллизованного материала, ознакомиться с методикой термического анализа.

Теоретическая часть

Всякое вещество может находиться в одном из трех агрегатных состояний: твердом, жидком и газообразном. Переход из одного состояния в другое происходит при определенной температуре, называемой температурой плавления, кристаллизации, кипения или сублимации.

Твердые кристаллические тела имеют правильное строение, при котором атомы и ионы находятся в узлах кристаллических решеток (так называемый ближний порядок), а отдельные ячейки и блоки определенным образом ориентированы по отношению друг к другу (дальний порядок). В жидкостях определенная ориентировка распространяется не на весь объем, а лишь на небольшое число атомов, образующих сравнительно устойчивые группировки, или флуктуации (ближний порядок). С понижением температуры устойчивость флуктуаций увеличивается, и они проявляют способность к росту.

По мере увеличения температуры твердого тела растет подвижность атомов в узлах решетки, амплитуда колебаний увеличивается и

при достижении определенной температуры, называемой температурой плавления, решетка разрушается с образованием жидкой фазы.

Противоположная картина наблюдается при охлаждении жидкости (расплава) и ее последующем затвердевании. При охлаждении подвижность атомов снижается, и вблизи температуры плавления образуются группировки атомов, в которых атомы упакованы, как в кристаллах. Эти группировки являются центрами кристаллизации или зародышами, на которых впоследствии вырастает слой кристаллов. При достижении температуры «плавления-затвердевания» вновь образуется кристаллическая решетка, и металл переходит в твердое состояние. Переход металла из жидкого состояния в твердое при определенной температуре называется **кристаллизацией**.

Кристаллические тела характеризуются **анизотропией** – зависимостью свойств от направления. Аморфные тела (например, стекло) являются **изотропными** – их свойства не зависят от направления.

Рассмотрим термодинамические условия кристаллизации. Энергетическое состояние любой системы характеризуется определенным запасом внутренней энергии, которая складывается из энергии движения молекул, атомов и т.д. Свободной энергией является такая составляющая внутренней энергии, которая в изотермических условиях может быть превращена в работу. Величина свободной энергии изменяется при изменении температуры, плавлении, полимерных превращениях и т.д.

Согласно второму закону термодинамики, всякая система стремится к минимальному значению свободной энергии. Любой самопроизвольно текущий процесс идет только в том случае, если новое состояние более устойчиво, т.е. обладает меньшим запасом свободной энергии. Например, шарик стремится скатиться вниз по наклонной плоскости, понизив при этом свою свободную энергию. Самопроизвольное возвращение шарика вверх по наклонной плоскости невозможно, так как при этом произойдет увеличение его свободной энергии.

Процесс кристаллизации подчиняется этому же закону. Металл затвердевает, если меньшей свободной энергией обладает твердое состояние, и плавится в том случае, когда меньшей свободной энергией обладает жидкое состояние. Изменение свободной энергии жидкого и твердого состояния при изменении температуры показана

но на рис. 3.1. Температурные изменения свободной энергии различны для жидкого и твердого состояний вещества.

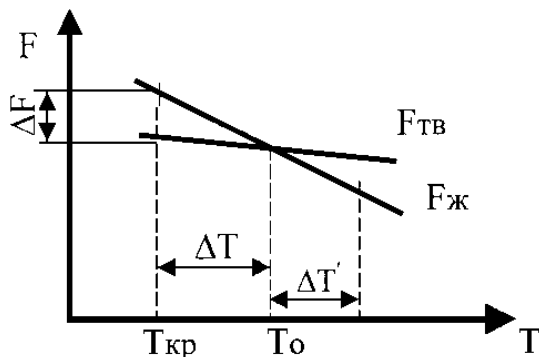


Рис. 3.1. Термодинамическое условие кристаллизации

Различают теоретическую и фактическую температуру кристаллизации.

T_0 — теоретическая, или равновесная температура кристаллизации, при которой $F_{ж} = F_{тв}$. При этой температуре равновероятно существование металла как в жидком, так и в твердом состояниях. Реальная же кристаллизация начнется тогда, когда этот процесс будет термодинамически выгоден системе, при условии $\Delta F = F_{ж} - F_{тв}$, для чего необходимо некоторое переохлаждение. Температура, при которой практически идет кристаллизация, называется **фактической температурой кристаллизации** $T_{кр}$. Разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации называется **степенью переохлаждения**: $\Delta T = T_0 - T_{кр}$. Чем больше степень переохлаждения ΔT , тем больше разность свободных энергий ΔF , тем интенсивнее будет идти кристаллизация.

Подобно тому, как при затвердевании необходимо переохлаждение до фактической температуры кристаллизации, так и при плавлении необходим перегрев для достижения реальной температуры плавления.

Механизм процесса кристаллизации

Д.К.Черновым было установлено, что процесс кристаллизации состоит из двух элементарных процессов:

- 1) зарождение центров кристаллизации;
- 2) рост кристаллов из этих центров.

При температурах, близких к температуре затвердевания, в жидком металле образуются небольшие группировки атомов, так называемые флуктуации, в которых атомы упакованы так же, как в твердых кристаллах. Из части этих флуктуаций образуются зародыши, или центры кристаллизации. С увеличением степени переохлаждения возрастает число центров кристаллизации, образующихся в единицу времени. Вокруг образовавшихся центров кристаллизации начинают расти кристаллы. Одновременно в жидкой фазе образуются новые центры кристаллизации. Увеличение общей массы затвердевшего металла происходит как за счет возникновения новых центров кристаллизации, так и за счет роста существующих. Взаимным ростом кристаллов объясняется неправильная форма зерен. Реальные твердые кристаллы неправильной формы называются **кристаллитами**.

Суммарная скорость кристаллизации зависит от двух элементарных процессов. Она определяется скоростью зарождения центров кристаллизации (**СЗ**) и скоростью роста кристаллов из этих центров (**СР**). **Скорость зарождения центров** – это количество зародышей, появляющихся в единицу времени в единице объема. **Скорость роста кристалла** – линейное перемещение растущей грани кристалла за единицу времени.

Величины **СЗ** и **СР** зависят от степени переохлаждения (рис. 3.2). При равновесной температуре $\Delta T = 0$ и $СЗ = 0$, $СР = 0$. С увеличением ΔT растет разность свободных энергий $\Delta F = F_{ж} - F_{тв}$, и при хорошей подвижности атомов **СЗ** и **СР** растут и достигают максимума. Последующее уменьшение **СЗ** и **СР** объясняется снижением подвижности атомов при снижении температуры. При малых значениях коэффициента диффузии затруднена перестройка атомов жидкости в кристаллическую решетку твердого тела. При очень сильном переохлаждении **СЗ** и **СР** равны нулю и жидкость не кристаллизуется, а превращается в аморфное тело.

Для реальных металлов, как правило, реализуются лишь восходящие ветви кривых **СЗ** и **СР**, и с ростом ΔT увеличиваются скорости обоих процессов.

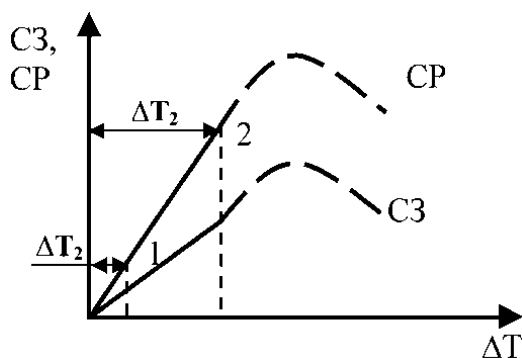


Рис. 3.2. Влияние степени переохладения на СЗ и СК

Если раньше аморфное состояние достигалось лишь для солей, силикатов, органических веществ, то в настоящее время с использованием специальных приемов достигаются высокая скорость охлаждения (более 10^6 °C/c) и стеклообразное состояние металла. Металлы в стеклообразном состоянии характеризуются особыми физико-механическими свойствами. Микроструктура такого металла — плотная хаотическая упаковка твердых шаров. Такой металл со структурой переохлажденной жидкости термодинамически неустойчив по отношению к кристаллическому состоянию. При нагреве металлические стекла кристаллизуются. Прочность этих материалов больше, чем у высокопрочной стали, по своим магнитным свойствам они превосходят трансформаторные стали, их применение дает большой экономический эффект.

Зародышами кристаллизации могут быть флуктуации атомов основного металла, примеси, различные твердые частицы. Самопроизвольное образование зародышей (**гомогенная** или **самопроизвольная кристаллизация**) встречается лишь в тщательно очищенных от примесей жидких металлах. Зародыши появляются на флуктуациях плотности или неравномерности распределения энергии.

В реальных условиях процессы кристаллизации и характер образующейся структуры в значительной степени зависят от имеющихся готовых центров кристаллизации. Возникновение центра кристаллизации упрощается, если удастся снизить межфазную поверхностную энергию. Когда зародыши образуются не случайно, а под влиянием специально введенных примесей, то имеет место **несамопро-**

извольная или **гетерогенная кристаллизация**. К началу кристаллизации центры находятся в жидком металле в виде твердых включений. При кристаллизации атомы металла откладываются на активированной поверхности примеси, как на готовом зародыше. Наличие готовых центров кристаллизации приводит к уменьшению размера кристаллов при затвердевании. В жидком металле могут присутствовать и растворенные примеси, измельчающие структуру.

Зарождение гомогенных центров кристаллизации требует значительного расхода энергии. Для того чтобы зародыш обладал достаточной термодинамической и физической прочностью, он должен достичь соответствующего критического размера $r_{кр}$. Графически эта зависимость имеет вид, представленный на рис. 3.3.

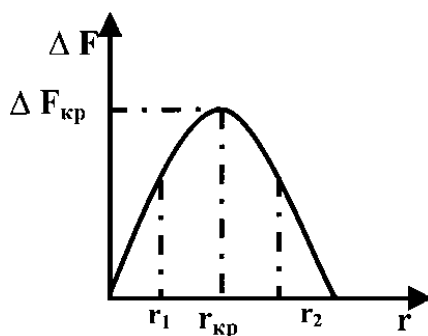


Рис. 3.3. Изменение свободной энергии системы с появлением кристаллов

При $r < r_{кр}$ (r_1) зародыши не образуются, потому что ΔF положительна. Стремление системы к уменьшению энергии может быть реализовано только при уменьшении радиуса, т.е. при растворении зародыша в расплаве. Если размер зародыша $r_2 > r_{кр}$, его роль в процессе кристаллизации становится определяющей, поскольку в этот момент $\Delta F < 0$. Это означает начало самопроизвольного процесса кристаллизации.

От соотношения скоростей зарождения и развития зависит размер зерен. При малом переохлаждении, например при заливке металла в земляную форму с малой теплопроводностью или подогретую металлическую форму, скорость роста велика, скорость зарождения сравнительно мала. В этом случае в объеме образуется сравнительно небольшое количество крупных кристаллов.

При увеличении ΔT в случае заливки жидкого металла в холодные металлические формы скорость зарождения возрастает, что приводит к образованию большого количества мелких кристаллов.

Размер зерна определяется не только степенью переохлаждения. Важную роль играют температуры нагрева и разлива металла, его химический состав и особенно присутствие посторонних примесей. В реальных условиях самопроизвольное зарождение кристаллов в жидком металле затруднено. Источником образования зародышей служат различные твердые частицы: неметаллические включения, оксиды.

Чем больше примесей, тем больше центров, тем мельче зерна. Иногда в металл специально вводят вещества, которые при кристаллизации способствуют измельчению зерна. Эту операцию называют **модифицированием**. Модификаторами для стали являются алюминий, ванадий, титан, для чугуна – магний.

При кристаллизации реальных слитков и отливок важную роль играет направление отвода тепла. Кристаллизация начинается от стенок формы или изложницы. В направлении отвода тепла, т.е. перпендикулярно к стенке формы, кристалл растет быстрее, чем в других направлениях. При этом образуются оси первого порядка. Одновременно на их ребрах происходит зарождение и рост перпендикулярных им осей второго порядка, затем третьего и т.д. В результате образуется разветвленный древовидный кристалл, называемый **дендритом** (рис. 3.4).

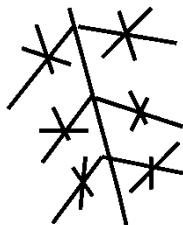


Рис. 3.4. Схема дендритного кристалла

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. При недостатке жидкого металла для заполнения межосных пространств, кристалл сохраняет дендритную форму. В некоторых случаях дендриты состоят только из осей I порядка.

Так как при затвердевании имеет место так называемая **избирательная кристаллизация**, т.е. в первую очередь затвердевает более чистый металл, а границы зерен обогащены примесями. Неоднородность химического состава в пределах дендрита называется **дендритной ликвацией**.

Термический анализ

Процесс кристаллизации сопровождается выделением определенного количества теплоты (теплоты кристаллизации) и поэтому при охлаждении металла зависимость изменения температуры от времени охлаждения может выглядеть следующими образом (рис. 3.5).

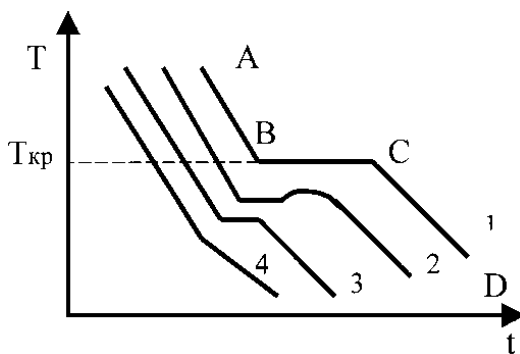


Рис. 3.5. Виды кривых охлаждения

Когда кристаллизуется чистый элемент, отвод теплоты, происходящий вследствие охлаждения, компенсируется теплотой кристаллизации. На кривой охлаждения выделяют **критические точки**. Участок **AB** на кривой 1 соответствует охлаждению жидкого металла, участок **BC** – процессу кристаллизации, участок **CD** – охлаждению твердого металла.

Вид кривых определяется соотношением между количеством выделяющейся в процессе кристаллизации теплоты $Q_{\text{крист}}$ и скоростью отвода теплоты от металла при охлаждении $Q_{\text{охл}}$.

Если $Q_{\text{крист}} = Q_{\text{охл}}$, то температура в процессе кристаллизации вплоть до ее окончания будет постоянной (кривая 1).

Если $Q_{\text{крист}} > Q_{\text{охл}}$, то в процессе кристаллизации будет происходить разогрев (кривая 2).

Если $Q_{\text{крист}} < Q_{\text{охл}}$, то при кристаллизации будет происходить понижение температуры, и тем быстрее, чем меньше $Q_{\text{крист}}$ и больше $Q_{\text{охл}}$ (кривые 3, 4).

Рассмотренные случаи относятся к **первичной кристаллизации** – процессу образования кристаллов из жидкого состояния. Существует также понятие **вторичная кристаллизация** – образование кристаллов одного типа из кристаллов другого типа в твердом виде. Это относится к материалам, которые, в зависимости от температуры, могут существовать в разных кристаллических формах - полиморфных модификациях. **Полиморфизм** – способность вещества изменять свою структуру при изменении температурных условий. В результате полиморфного превращения атомы кристаллического тела, имеющие решетку одного типа, перестраиваются таким образом, что образуется решетка другого типа. Это происходит вследствие того, что образование новой модификации сопровождается уменьшением свободной энергии, т.е. процесс энергетически выгоден системе. В условиях равновесия полиморфное превращение протекает при постоянной температуре. Кривая охлаждения имеет вид, представленный на рис. 3.6.

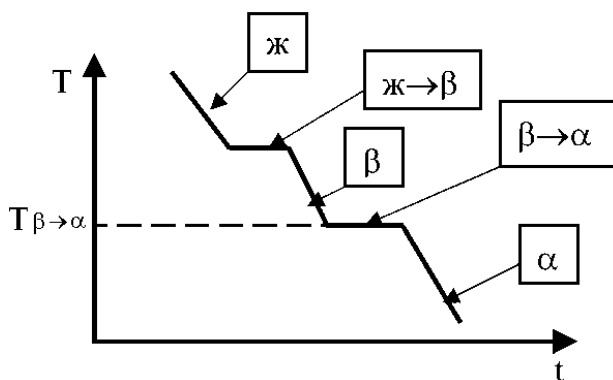


Рис. 3.6. Кривая охлаждения материала, обладающего полиморфизмом

Как и при первичной кристаллизации, для протекания полиморфного превращения необходимо некоторое переохлаждение (или перегрев) относительно равновесной температуры для возникновения разности свободных энергий между исходной и образующейся новой модификацией.

Строение слитка спокойной стали

Зерна (дендриты), образующиеся в стальном слитке, могут иметь различную форму, размеры и ориентировку. Строение стального слитка впервые описано Д.К.Черновым в 1878 г.

Схема строения слитка спокойной стали приведена на рис. 3.7. Структура слитка состоит из трех зон: наружной мелкозернистой зоны 1, зоны столбчатых кристаллов 2 и зоны равноосных кристаллов 3.

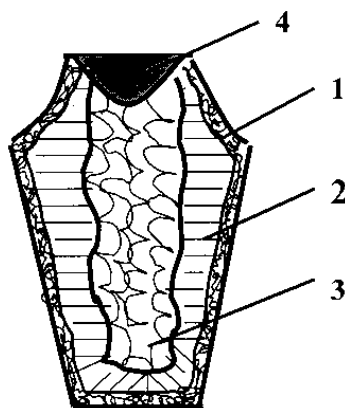


Рис. 3.7. Структура металлического слитка

Наружная мелкозернистая зона 1 состоит из неориентированных в пространстве мелких кристаллов. Ее образование обусловлено резким перепадом температур между жидким металлом и холодными стенками формы-изложницы. Металл в этой зоне сильно переохлаждается, в нем образуется большое число центров кристаллизации, и он приобретает мелкозернистое строение. Эта зона обладает высокими механическими свойствами, поэтому ее стараются сохранить при последующих обработках материала.

После образования корковой зоны условия теплоотвода меняются, температурный градиент в прилегающем слое жидкого металла падает и снижается степень переохлаждения. В результате из сравнительно небольшого числа центров кристаллизации в направлении отвода тепла, т.е. перпендикулярно к стенке изложницы, начинают расти столбчатые кристаллы (зона 2). Развитие их в сторону сдерживается соседними дендритами.

Третья зона – зона равноосных кристаллов. В центре слитка нет определенной направленности отвода тепла. Здесь зародышами обычно являются различные твердые частицы, оттесненные при кристаллизации к центру слитка. В этой зоне обычно скапливаются примеси, газы, которые уменьшают плотность металла и механические свойства.

Относительное распределение в объеме слитка столбчатой и равноосной зон очень важно. В зоне столбчатых кристаллов металл более плотный, но в местах их стыка он имеет малую прочность. Кристаллизация, при которой зоны столбчатых кристаллов стыкуются, называется **транскристаллизацией**. В местах контакта зон транскристаллизации возникают «плоскости слабины», т.е. плоскости по которым кристаллы будут слабо связаны между собой, в этих местах возникают трещина.

Основными дефектами слитка являются усадочная раковина 4, усадочная пористость и ликвация. Усадочная пористость обычно образуются вблизи усадочной раковины и по оси слитка. Образование усадочной раковины и усадочной пористости обусловлено тем, что все металлы, за некоторым исключением (висмут, например), имеют в твердом состоянии меньший удельный объем, чем в жидком.

Экспериментальная часть

1. Провести термический анализ металла.
 - 1.1. Включить печь, в которую помещен образец металла.
 - 1.2. Произвести нагревание (плавление) образца до температуры, указанной лаборантом.
 - 1.3. Снимать показания измерительного прибора через каждые 60 сек. Перевод показаний производится с помощью градуировочной таблицы.
 - 1.4. При достижении конечной температуры эксперимента выключить печь и произвести процесс охлаждения (кристаллизацию) металла.
 - 1.5. Снимать показания измерительного прибора через каждые 60 сек.
 - 1.6. Построить кривые нагревания и охлаждения в координатах «температура – время» на одном графике.
 - 1.7. Определить критические точки агрегатных превращений и степень переохлаждения.

2. Изучить процесс кристаллизации на примере солей металлов.
- 2.1. Нанести капли насыщенных растворов солей на предметное стекло и разместить на предметном столике микроскопа.
- 2.2. Рассмотреть и графически изобразить структуры солей, полученные через определенный период времени в процессе естественного испарения воды. Определить типы кристаллических образований, последовательность образования зон, их количество.
3. По экспериментальным результатам сформулировать выводы.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: изучить теплофизические свойства материалов. Определить температурный коэффициент линейного расширения сплава.

Теоретическая часть

Для ряда отраслей приборостроения необходимо применение материалов со строго регламентированными тепловыми свойствами. К основным теплофизическим свойствам относятся: нагревостойкость, холодостойкость, теплопроводность, термостойкость, теплоемкость, тепловое расширение.

Нагревостойкостью называют способность материалов без повреждения и без допустимого ухудшения других практически важных свойств надежно выдерживать действие повышенной температуры (кратковременно или в течение времени, которое сравнимо с нормальным временем эксплуатации). Величину нагревостойкости оценивают по соответствующим значениям температуры, при которой появились изменения свойств (например, электрических для неорганических диэлектриков). Нагревостойкость органических диэлектриков часто определяют по началу механических деформаций. Если ухудшение свойств обнаруживают только после длительного воздействия повышенной температуры – за счет медленно протекающих химических процессов, то это так называемое **тепловое старение материала**. Помимо воздействия температуры, существенное влияние на скорость старения могут оказывать: повыше-

ние давления воздуха, концентрация кислорода, различных химических реагентов и т.д.

Для ряда хрупких материалов (стекла, керамики) важна стойкость по отношению к резким сменам температуры – тепловым импульсам. Способность выдерживать теплосмены называется **термостойкостью**. При быстром нагреве или охлаждении поверхности материала, за счет создания температурного перепада между наружным и внутренним слоями материала и неравномерного теплового расширения или сжатия, могут образоваться трещины. Термостойкость оценивается по количеству теплосмен, которое выдержал образец материала без заметного изменения свойств.

В результате испытаний определяют стойкость материала к тепловым воздействиям, причем стойкость эта в различных случаях может быть неодинаковой. Например, материал, легко выдерживающий кратковременный нагрев до некоторой температуры, может оказаться неустойчивым по отношению к тепловому старению при длительном воздействии даже более низкой температуры или материал, выдерживающий длительный нагрев до высокой неизменной температуры, при быстром охлаждении растрескивается, меняет свои свойства. Испытание на действие повышенной температуры иногда необходимо проводить с одновременным воздействием повышенной влажности воздуха (тропический климат).

Когда аппаратура рассчитана на работу в условиях пониженных температур, важна ее **холодостойкость** – способность материала без повреждения и без недопустимого ухудшения других практически важных свойств надежно выдерживать воздействие низких температур, например, от -60°C и ниже. При низких температурах, как правило, электрические свойства изоляционных материалов улучшаются, однако, многие материалы, гибкие и эластичные при обычных температурах, при низких становятся весьма хрупкими и жесткими, что приводит к ненадежности работы.

Все твердые тела в той или иной степени способны проводить тепло. Одни хуже, другие лучше. **Теплопроводность** – это свойство материалов проводить тепло от более нагретых частей тела к менее нагретым, приводящее к выравниванию температуры.

Принципиально существуют следующие способы передачи тепловой энергии в веществе:

1) **излучение** – все тела, какова бы ни была их температура, излучают энергию. Это может быть чисто термическое явление (тепловое излучение) и люминесценция (фосфоресценция и флюоресценция), которая имеет нетермическое происхождение;

2) **конвекция** – прямая передача тепла, связанная с движением жидкостей и газов;

3) **теплопроводность** – передача тепла вследствие взаимодействия атомов или молекул вещества. В твердых телах перенос тепловой энергии осуществляется в основном по этому способу.

Основной закон теплопроводности Фурье гласит, что плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры. Закон справедлив для изотропных тел (свойства не зависят от направления). Анизотропные твердые тела характеризуются коэффициентами теплопроводности в направлении главных осей.

В общем случае теплопроводность в твердых телах осуществляется двумя механизмами – движением носителей тока (электронов, главным образом) и упругими тепловыми колебаниями атомов решетки. Максимальный коэффициент теплопроводности имеют алюминий, золото, медь, серебро. Кристаллы с более сложным строением решетки имеют более низкую теплопроводность, т.к. степень рассеивания тепловых упругих волн там больше. Снижение теплопроводности наблюдается также при образовании твердых растворов, т.к. при этом возникают дополнительные центры рассеивания тепловых волн. В гетерофазных (многофазных) сплавах коэффициент теплопроводности складывается из теплопроводностей образующихся фаз. Теплопроводность соединений всегда значительно ниже, чем теплопроводность образующих их компонентов.

Теплоемкость – это свойство самого вещества, оно не зависит от структурных особенностей конкретного изделия, его пористости и плотности, размеров кристаллов и других факторов. Теплоемкость – это количество теплоты, соответствующее изменению температуры единицы количества вещества на 1°C .

Тепловое расширение – увеличение объема и линейных размеров тел с изменением температуры. Оно свойственно практически всем материалам.

Хотя прочность сил связи в твердом теле очень велика, существуют возможности движения элементарных частиц (атомов, ионов). Как в аморфных телах, так и в кристаллических, атомы вибрируют

около центра равновесия. При этом амплитуда колебаний возрастает с ростом температуры. Практика показывает, что и удельный объем большинства веществ возрастает при увеличении температуры, т.е. имеет место тепловое расширение. Явление термического расширения, однако, связано не с увеличением амплитуды колебательного движения атомов, а с его асгармоничностью. Для понимания сущности явления необходимо рассмотреть силовое взаимодействие при образовании химической связи между атомами, а также зависимость потенциальной энергии системы от межатомного расстояния. Любой вид химической связи предполагает баланс сил притяжения и отталкивания между атомами. При сближении атомов вначале доминируют силы притяжения. Сближение атомов до некоторого предела уменьшает энергию системы, т.е. обеспечивает ей большую устойчивость. При достаточно малом межатомном расстоянии, однако, проявляются силы отталкивания, препятствующие дальнейшему сближению атомов. Действие этих сил возрастает с уменьшением межатомного расстояния, что соответствует увеличению энергии системы. При некотором значении межатомного расстояния силы отталкивания и притяжения уравниваются, после чего дальнейшее сближение требует приложения внешней силы, что соответствует положительным значениям результирующей силы $F_{рез}$.

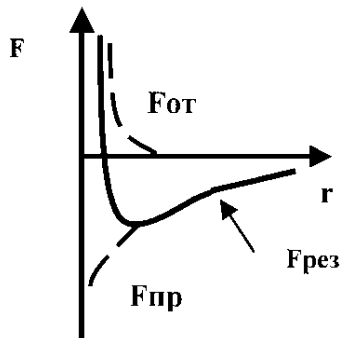


Рис. 4.1. Схема силового взаимодействия между разноименно заряженными частицами

Потенциальная яма характеризуется сильно выраженной асимметрией. Допустим, при некоторой температуре колеблющийся атом обладает определенной энергией. В этом случае он совершает

колебания относительно центра, отклоняясь поочередно «влево – вправо». Так как смещения от положения равновесия должны быть одинаковы, то повышение энергии системы вызывает смещение центра колебаний вдоль оси межатомного расстояния. Таким образом, среднее расстояние между атомами растёт по мере повышения температуры, что соответствует термическому расширению тела.

Таким образом, в основе явления термического расширения твердых тел лежит агармоничность колебательного движения его атомов, а степень отклонения тепловых колебаний от гармонического закона, т.е. величина термического расширения тела, во многом определяется степенью асимметрии потенциальной ямы. Как правило, в веществах с ионным характером связи потенциальная яма характеризуется значительной шириной и асимметрией. Этот факт и определяет существенный рост средних межатомных расстояний при их нагревании, или значительное тепловое расширение ионных соединений.

Наоборот, в веществах с преимущественно ковалентным характером связи (бориды, нитриды, карбиды) потенциальная яма имеет форму заостренной впадины, в связи с чем степень ее симметричности выше. Поэтому увеличение расстояния между атомами при нагреве сравнительно невелико, что соответствует их относительно небольшому тепловому расширению. Металлы обладают, как правило, повышенным тепловым расширением, т.к. металлическая связь, в общем, является более слабой, чем ионная и ковалентная. Наконец, органические полимеры характеризуются очень большим расширением при нагреве, обусловленным слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, действующими между молекулами, в то время как внутри молекул действуют мощные ковалентные силы.

Количественно тепловое расширение материалов оценивается следующими величинами:

1. Температурным коэффициентом линейного расширения при данной температуре (ТКЛР), соответствующим относительному удлинению образца при бесконечно малом изменении температуры.
2. Температурным коэффициентом объемного расширения, характеризующим трехмерное расширение вещества.

Важным практическим следствием является необходимость использования данных по ТКЛР, полученных в конкретном температурном интервале, в котором работает материал. Нельзя сравнивать

температурные коэффициенты расширения материалов, измеренные при различных температурах.

У изотропных материалов (кристаллы с кубической решеткой, стекла) ТКЛР одинаков во всех направлениях. Большинство кристаллических веществ, однако, анизотропны (расширение различно вдоль различных осей). Наиболее сильно это явление выражено, например, у слоистых материалов (графит), когда химические связи обладают выраженной направленностью. В результате у графита расширение вдоль слоя оказывается намного меньше, чем перпендикулярно ему. У некоторых подобных материалов с сильно выраженной анизотропией величина ТКЛР в одном из направлений может оказаться даже отрицательным. Например, кордиерит $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$, у которого при тепловом расширении вдоль одной оси наблюдается расширение кристалла, а вдоль другой оси – сжатие, соответствующее сближению слоев структуры. Это явление используется в технологии: в поликристаллическом материале хаотическое распределение кристаллов приводит к взаимной ориентации их положительного и отрицательного расширения. В итоге получают материал с низкой величиной ТКЛР, отличающийся очень высокой термостойкостью. В то же время в таких материалах на границах зерен могут возникать значительные напряжения, что отражается на их механической прочности. Для полифазных материалов на границе двух соприкасающихся фаз с разными ТКЛР на фазу с большим коэффициентом расширения будут действовать напряжения сжатия и растягивающие – на фазу с малым ТКЛР (при нагреве). При охлаждении напряжения меняют знаки. При превышении критических значений напряжений возможно появление трещин и даже разрушение материала.

Таким образом, ТКЛР является структурно чувствительным свойством и чутко реагирует на изменения структуры материала, например на наличие полиморфных превращений в нем. В связи с этим на кривых расширения многофазных материалов могут наблюдаться перегибы, их монотонный характер нарушается.

Если расширение тела в данном температурном интервале происходит равномерно, то графически расширение выразится прямой (рис. 4.2.), а средний коэффициент линейного расширения будет численно равен тангенсу угла наклона этой прямой к оси температуры, отнесенного к относительному изменению длины образца.

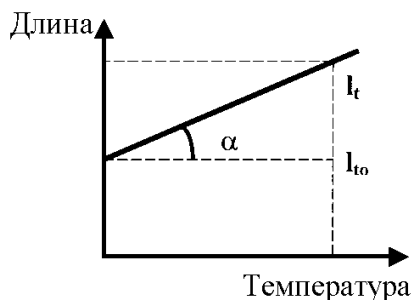


Рис. 4.2. Равномерное расширение тела при нагревании

Однако не всегда расширение образца происходит равномерно. Изучение особенностей теплового расширения в различных температурных интервалах позволяет также делать косвенные выводы о температуре и характере различных структурных превращений в материале. В таких случаях зависимость теплового расширения от температуры будет выражаться не прямой линией, а более сложной зависимостью (рис. 4.3).

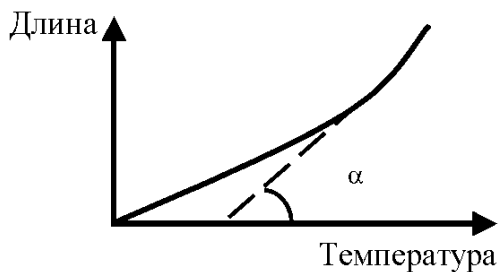


Рис. 4.3. Неравномерное расширение тела при нагревании

Для нахождения величины коэффициента расширения в отдельных точках кривой расширения нужно провести касательную к оси температур через точку кривой, соответствующей температуре измерения. Величина коэффициента линейного расширения будет выражаться тангенсом угла наклона касательной к оси температур.

Величина термического расширения тел при нагревании прежде всего зависит от природы данного материала, т.е. от его химико-минералогического состава, строения пространственной решетки, прочности химической связи и т.д. Так, величина ТКЛР керамики

определяется, прежде всего, характером кристаллической фазы, стекла – химическим составом, а ситалла – характером кристаллической фазы, химическим составом остаточной стекловидной фазы и их соотношением.

Сложную температурную зависимость расширения дают стеклообразные материалы. Вначале, до так называемой температуры стеклования, близкой к температуре размягчения, расширение идет пропорционально температуре. При температуре, превышающей температуру стеклования, скорость удлинения резко возрастает. Этот участок соответствует переходному интервалу от хрупкого к высоковязкому состоянию, в котором происходят процессы структурной перестройки стекла, а температура стеклования считается границей хрупкого состояния. После достижения максимума удлинение начинает уменьшаться, что связано с усадкой образца стекла в результате его размягчения.

ТКЛР является технической характеристикой материала и вычисляется по формуле

$$\alpha = \frac{l_T - l_0}{l_0(T - T_0)} 10^{-7} \text{ град}^{-1},$$

где l_0 – длина тела при начальной температуре T_0 ;

l_T – длина тела, нагретого до температуры T .

ТКЛР – изменение длины при изменении температуры на 1 градус, отнесенное к исходной длине образца. Материалы с низким ТКЛР применяют в качестве деталей высокоточных приборов и оборудования, которые не должны изменять размеры при нагреве. При жестком соединении частей прибора, например, в спае металла со стеклом, необходимо выбирать материалы с близкими значениями ТКЛР, иначе при охлаждении в месте соединения деталей будут возникать напряжения, и в хрупком стекле могут образоваться трещины, и спай не будет вакуумно-плотным. Близость ТКЛР необходима также для слоев микросхем, подвергающихся изменению температуры при технологических операциях или в процессе работы, иначе может произойти разрушение слоев схемы.

Коэффициент термического расширения играет большую роль также при оценке термостойкости материалов: чем ниже ТКЛР, тем выше термостойкость.

Существуют сплавы металлов, которые не подчиняются общим закономерностям тепловых свойств. Такими сплавами являются сплавы железа с никелем Fe-Ni. Сплав, содержащий 36 % никеля, имеет значение ТКЛР близкое к нулю и носит название **инвар** (лат. «неизменный»).

Инженеры пользуются еще одним тепловым свойством, а именно **тепловым коэффициентом модуля упругости** (ТКМУ). В любых твердых телах, в том числе металлах, при нагреве наблюдается уменьшение модуля упругости, который является мерой сил межатомных связей. Для сплава Fe-Ni это свойство имеет аномальную зависимость: модуль ТКМУ растет или остается постоянным при повышении температуры. Максимальным ТКМУ обладает тот же инвар с 36% никеля. Подбор определенного химического состава позволяет разработать сплавы, ТКМУ которых практически не зависят от температуры. Эти сплавы называются **элинварами**.

Стали с определенным тепловым расширением служат для изготовления **термобиметаллов**, когда слой с низким тепловым расширением (пассивный слой) путем прокатки надежно соединяют с другим слоем, обладающим более высоким тепловым расширением (активный слой). Биметаллические пластины используют в качестве терморегулятора в приборостроении.

Нагрев такой пластины приводит к ее искривлению, позволяющему замкнуть электрическую цепь. Основным свойством термобиметаллов является **термочувствительность** – способность изгибаться при изменении температуры.

Описание кварцевого dilatометра, используемого для измерения температурного коэффициента линейного расширения

Прибор (рис. 4.4) состоит из горизонтальной трубчатой печи 1, кварцевой трубки 2 и индикаторной головки 3. Температура в печи измеряется проградуированной хромель-алюмелевой термопарой. Образец 4 помещается в кварцевую трубку. Запаянный конец трубки должен плотно соприкасаться с торцом образца. К образцу подводится термопара. Другая сторона трубки – открытая, закрепляется в металлической стойке 6. С открытого конца в трубку вставляется тонкий кварцевый стержень 5 такого же диаметра, что и образец.

Другой конец стержня соединяется со стержнем индикаторной головки. Индикаторная головка укреплена на металлической стойке. Плотный контакт стержня с образцом осуществляется при помощи давления пружины индикатора. При расширении образец давит через кварцевый стержень на индикатор.

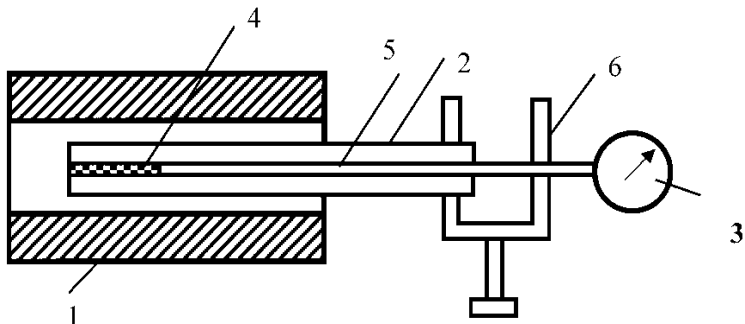


Рис. 4.4. Схема кварцевого дилатометра

На расширение образца и перемещение кварцевого стержня указывает стрелка индикатора. К величине расширения образца, измеренного индикатором по перемещению стрелки, прибавляется поправка на расширение кварца, которая приведена в табл. 4.1.

Таблица 4.1

№	Температурный интервал	ТКЛР кварцевого стекла, 10^{-7} гр^{-1}
1	0–20	3,83
2	25–100	5,02
3	25–200	5,79
4	25–300	6,00

Введение поправки на расширение кварца необходимо в связи с тем, что держатель образца – трубка изготавливается из кварцевого стекла и закрепляется жестко с одной стороны. Образец начальной длины при нагревании расширяется не только в сторону стержня, передающего расширение на индикатор, но и в противоположном направлении в сторону свободного конца кварцевой трубки на некоторую величину за счет расширения самой трубки, поэтому в результате измерения необходимо внести поправку на расширение кварцевого стекла.

Экспериментальная часть

1. Ознакомится с устройством дилатометра.
2. Поместить трубку с образцом бронзы в трубчатую печь.
3. Включить печь и комбинированный прибор для снятия показаний.
4. Провести установку индикатора на нуль.
5. Через одинаковые промежутки времени (например, через 20°C) снимать показания индикатора, пользуясь градуировочной таблицей.
6. Опытные данные занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

№	Температура, °С	Показания индикатора, мм	Поправка на расширение кварца, гр ⁻¹	Удлинение образца, Δl, мм	ТКЛР, гр ⁻¹

7. Рассчитать температурный коэффициент линейного расширения образца для трех температурных интервалов (25–100, 25–200, 25–300°C) по формуле

$$\alpha = \frac{nK}{(T_k - T_n)l_0} + \alpha_{кв},$$

где α – коэффициент линейного расширения;

n – показания индикатора;

k – цена деления индикатора;

$(T_2 - T_1)$ – разность температур (комнатной и конечной) для выбранного интервала;

l – начальная дина образца;

$\alpha_{кв}$ – поправка на расширение кварца.

8. Построить и объяснить графическую зависимость удлинения образца от температуры.

9. Проанализировать полученные результаты для бронзы, представляющей собой сплав меди и олова, учитывая, что $\alpha_{\text{меди}} = 160 \cdot 10^{-7} \text{ гр}^{-1}$, $\alpha_{\text{олова}} = 230 \cdot 10^{-7} \text{ гр}^{-1}$.

10. Ознакомиться с кривыми расширения для неметаллических материалов, выделить характерные зоны, объяснить процессы, происходящие в материалах при нагревании.

11. По результатам работы сформулировать выводы.

Лабораторная работа №5

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: ознакомиться с различными пористыми материалами и технологией их изготовления. Определить водопоглощение полимерных, композиционных и стеклокерамических материалов и сделать сравнительный анализ полученных результатов.

Теоретическая часть

Все материалы в большей или меньшей степени обладают **водопоглощением**, т.е. способностью поглощать в себя влагу из окружающей среды и **влагопроницаемостью**, т.е. способностью пропускать сквозь себя воду. Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара.

На водопоглощение материала существенное влияние оказывает его структура и химическая природа. Большую роль играют наличие и размер капиллярных промежутков внутри материала, в которые проникает влага. Сильнопористые материалы, в частности волокнистые, обладают большим водопоглощением. Определение водопоглощения по увеличению массы увлажняемого образца дает некоторое представление о способности материала поглощать влагу.

Любой пористый конструкционный материал (металлический, керамический, стеклокерамический или полимерный) – это, как правило, сочетание твердого вещества с пустотами – порами. Объем пор, их размеры и характер распределения оказывают значительное влияние на ряд свойств изделий и материалов. Так, например, механическая прочность керамики зависит не только от общей пористости, но и от размера пор, равномерности их распределения. Бесспорно, что с увеличением пористости прочность керамики уменьшается за счет увеличения дефектности структуры и снижения прочности связей.

Установлено, что объем пор, заполненных водой, определяет морозостойкость изделий; количество, размер и характер распределения пор во многом определяют шлакоустойчивость футеровки печей; пористость влияет на теплопроводность материалов.

Поры в материалах имеют разнообразную форму, очертания, могут быть неравномерно распределены по объему, поэтому полную характеристику пористости получить чрезвычайно трудно, даже при использовании современных поромеров. Несмотря на разнообразие форм, поры можно подразделить на:

1. **Закрытые поры** – недоступные для проникновения в них жидкости и газа.

2. **Открытые** – поры, доступные для проникновения.

Открытые поры в свою очередь делятся на:

1) **тупиковые** – поры, заполняемые жидкостью и газом, открытые с одной стороны;

2) **каналообразующие** – открытые с обоих концов поры, создающие поровые каналы.

Влагопроницаемость материала обуславливается, прежде всего, каналообразующими порами при наличии на их открытых концах перепадов давления. Пористость и проницаемость – важные характеристики текстуры для всех типов технических материалов.

Поскольку прямые методы измерения пористости материалов чрезвычайно сложны, то этот показатель часто оценивается путем определения других свойств, непосредственно зависящих от пористости. К таким показателям относится плотность материала и водопоглощение.

Ознакомимся с некоторыми определениями.

Истинная плотность – отношение массы материала к его объему без учета пор.

Кажущаяся плотность – это отношение массы тела ко всему занятому им объему, включая поры.

Относительная плотность – отношение кажущейся плотности к истинной плотности. Она представляет объемную долю твердого вещества в материале.

Водопоглощение – это отношение массы воды, поглощенной материалом при полном насыщении, к массе сухого образца (выражают в процентах).

Измерив вышеуказанные характеристики, можно оценить общую, открытую и закрытую пористость керамики.

Истинная (общая) пористость – суммарный объем всех пор открытых и закрытых, выраженный в % к общему объему материала. Эта величина обозначается $\Pi_{\text{и}}$ и численно равна сумме закрытой и открытой пористости.

Кажущаяся (открытая) пористость – это отношение объема всех открытых пор тела (заполняемых водой при кипячении) ко всему объему материала, включая объем всех пор. Величину обозначают P_0 и выражают в %.

Закрытая пористость – это отношение объема всех замкнутых пор тела к его объему, включая объем всех пор, обозначают ее через P_3 и выражают в %.

Водопоглощение полимерных материалов

В самом общем случае процесс поглощения влаги полимером начинается с набухания и сопровождается увеличением объема и потерей механических и диэлектрических свойств. Вначале, когда молекулы воды, проникая в полимеры, заполняют пустоты и поры, процесс набухания не вызывает значительного изменения общего объема и свойств. По мере развития процесса начинают разрушаться более слабые межмолекулярные связи, а затем разрушаются химические связи.

При невысоких температурах и небольшом времени контакта воды с полимером набухание имеет ограниченный характер и распространяется на небольшую глубину. Однако это тоже приведет к некоторому изменению физико-механических свойств. Влияние контакта полимерного материала с водой будет сказываться в большей степени на свойствах, обусловленных состоянием поверхности материала, а именно на твердости, сопротивлении изгибу и удельном поверхностном электрическом сопротивлении, измерение которого позволяет точнее определить изменение стабильности полимеров.

В композиционных материалах, которыми и являются пластмассы, водостойкость определяется как природой полимера, так и наполнителя.

Пластмассы – это неметаллические материалы на основе природных или синтетических высокомолекулярных соединений (смолы, полимеров).

Природными смолами являются вещества биологического происхождения (канифоль, битум, шеллак, янтарь), которые нашли применение как электрорадиоматериалы для изготовления композитов, пропиточных и покрывных лаков.

Синтетическими смолами являются полимеры, получаемые химическими реакциями полимеризации или поликонденсации. **Полимеризацией** называется реакция взаимного соединения мономеров за счет двойных связей. Полимеризация приводит к образованию высокомолекулярного соединения (полимера). При поликонденсации, кроме полимера, образуются побочные продукты.

Своеобразие свойств полимеров обусловлено их структурой. Различают следующие типы полимерных структур (рис. 5.1): линейную а), линейно-разветвленную б), лестничную в) и пространственную г) с громоздкими молекулярными группами.

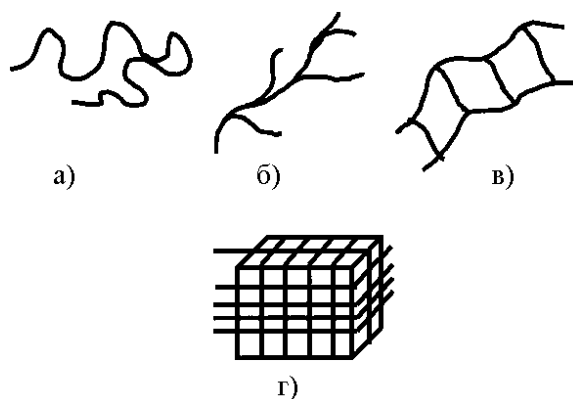


Рис. 5.1. Типы структур полимеров

Классификация пластмасс

Пластмассы можно классифицировать по различным признакам, например, по составу, отношению к нагреванию и растворителям и т.д.

По составу пластмассы делятся на:

- 1) ненаполненные. Представляют собой смолу в чистом виде.
- 2) наполненные (композиционные). Содержат, кроме смолы, наполнители, пластификаторы, стабилизаторы, отвердители и специальные добавки.

Наполнители добавляют в количестве 40-70% (по массе) для повышения механических свойств, уменьшения усадки и снижения стоимости материала (стоимость наполнителя ниже, чем стоимость смолы). Однако наполнитель повышает гигроскопичность пластмасс и ухудшает электрические характеристики.

Пластификаторы (глицерин, касторовое или парафиновое масло) вводят в количестве 10-20% для уменьшения хрупкости и улучшения формуемости.

Стабилизаторы (сажа, сернистые соединения, фенолы) вводят в количестве нескольких процентов для замедления старения, что стабилизирует свойства и удлиняет срок эксплуатации. Старение – самопроизвольное необратимое изменение важнейших эксплуатационных характеристик материала в процессе эксплуатации и хранения, происходящее в результате сложных физико-химических процессов.

Отвердители вводят также в количестве нескольких процентов для соединения полимерных молекул химическими связями.

Специальные добавки – смазки, красители, для уменьшения статических зарядов, для уменьшения горючести, для защиты от плесени.

При изготовлении поро- и пенопластов добавляются порообразователи – вещества, которые при нагреве размягчаются, выделяя большое количество газов, вспенивающих смолу.

По отношению к нагреванию и растворителям пластмассы делятся на термопластичные и термореактивные.

Термопластичные полимеры (термопласты) – полимеры которые могут многократно размягчаться при нагреве и твердеть при охлаждении без изменения свойств. В этих полимерах между молекулами действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса, и нет химических связей. Термопласты обладают также растворимостью в растворителях.

Термореактивные полимеры (реактопласты) при нагревании до определенной температуры расплавляются и в результате химических реакций при этой же температуре при охлаждении твердеют (как говорят, «запекаются»), превращаясь в жесткое, неплавящееся и нерастворимое вещество. В этом случае, наряду со слабыми силами Ван-дер-Ваальса, действуют прочные химические связи между молекулами, называемые поперечными. Их возникновение и составляет суть процесса отверждения полимера.

По убывающему влиянию наполнителя пластмассы разделяют на следующие виды:

1) **с листовым наполнителем** (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит, древестно-слоистый пластик);

2) **с волокнистым наполнителем** (волокнит, асбоволокнит, стекловолокнит);

3) с **порошковым наполнителем** (фенопласты, аминопласты, эпоксидные пресс-порошки);

4) **без наполнителя** (полиэтилен, полистирол);

5) с **газовоздушным наполнителем** (пенопласты).

Гетинакс состоит из двух или более слоев прочной, нагревостойкой, пропиточной бумаги, обработанной терморезистивной фенолформальдегидной смолой резольного типа (бакелитом). С целью повышения нагревостойкости в некоторые марки гетинакса дополнительно вводят кремнийорганические вещества, а для повышения клеящей способности – эпоксидные смолы. Гетинакс – дешевый материал, используемый в РЭА для изготовления различного рода плоских электроизоляционных деталей и оснований печатных плат.

Нагревостойкость гетинакса – 135°C. Недостатки: легкость расслаивания вдоль листов наполнителя, гигроскопичность (это ухудшает электроизоляционные свойства). Для защиты от влаги поверхность покрывают лаками.

Текстолит – прессованный материал на основе листов хлопчатобумажной ткани, пропитанной, как и гетинакс, бакелитом. Он легче обрабатывается, чем гетинакс, имеет более высокие водостойкость, прочность при сжатии и ударную вязкость. Текстолит дороже гетинакса в 5–6 раз. Нагревостойкость 150°C.

Стеклотекстолит – материал, состоящий из двух или более слоев бесщелочной стеклоткани, пропитанной различными терморезистивными смолами.

Стеклотекстолит, по сравнению с гетинаксом и текстолитом, обладает повышенной влагостойкостью, нагревостойкостью и лучшими электрическими и механическими параметрами, но хуже обрабатывается механически. Стеклотекстолит имеет хорошую демпфирующую способность (способность гасить вибрации) и превосходит в этом отношении стали, сплавы титана. По тепловому расширению он близок к сталям. Нагревостойкость – 185°C. Стеклотекстолит находит широкое применение, так как в нем сочетаются малый вес, высокая прочность, нагревостойкость и хорошие электрические свойства.

Древесно-слоистый пластик – материал с наполнителем в виде опилок или шпона.

Листовые фольгированные пластмассы имеют специальное назначение и применяются для изготовления плат с печатным монтажом. Они представляют собой слоистую пластмассу, облицован-

ную с одной или двух сторон медной фольгой, полученной электролитическим путем. Такой способ получения фольги обеспечивает однородный состав и шероховатую поверхность с одной стороны, что улучшает сцепление фольги с диэлектриком при приклеивании.

Композиционные пластмассы с наполнителем в виде хлопчатобумажных волокон и тканей, а также на основе древесных материалов могут иметь высокое водопоглощение за счет наполнителя. Согласно ГОСТу 4650-73, водопоглощение полимерных материалов определяется при нахождении образца в воде в течение 24 ч при комнатной температуре (либо при кипячении в течение 30 мин).

Таблица 5.1

№	Вид пластмассы	Водопоглощение, %
1	Полиэтилен	0,01
2	Полистирол	0,05
3	Фторопласт-4	0
4	Органическое стекло	0,3
6	Полиуретан	0,1–2,0
8	Текстолит	1,5
9	Гетинакс	1,0–2,5

Свойства пластмасс

1. Малая плотность. Большинство пластмасс имеют плотность от 0,9 до 1,5 т/м³, самые легкие – полиэтилен и полистирол, а самый тяжелый – фторопласт.

2. Пластмассы стойки к долговременному действию промышленных агрессивных сред и применяются для изготовления защитных покрытий на металлы. Пластмассы не подвержены электрохимической коррозии. Есть пластмассы, стойкие к действию концентрированных кислот и щелочей. Большинство пластмасс безвредны в санитарном отношении.

3. Под действием окружающей среды пластмассы медленно стареют, то есть необратимо изменяют свои свойства.

4. Большинство полимеров может длительно работать лишь при температурах ниже 100°С. Выше этой температуры, как правило, происходит быстрое старение материала.

5. Высокие теплоизоляционные свойства. Пластмассы плохо проводят теплоту, сильно расширяются при нагреве и имеют значительную теплоемкость. Теплопроводность пластмасс в сотни раз меньше, чем у металлов. Наименьшую теплопроводность имеют пористые пластмассы. Коэффициент теплового расширения полимеров в 10–30 раз больше, чем у металлов.

6. Механические свойства широкого диапазона. Пластмассы характеризуются вязкоупругим поведением полимеров под нагрузкой. Деформация полимера – это сумма упругой, высокоэластичной и вязкотекучей деформаций. Пластмассы имеют низкие модули упругости (малую жесткость), хуже сопротивляются растяжению, чем сжатию, хорошо сопротивляются усталости.

7. Хорошие технологические свойства. Пластмассы технологичны, т.е. просты в изготовлении, коэффициент использования высок (безотходные технологии).

Пористые керамические и стеклокерамические материалы

Керамическая технология предусматривает следующие основные этапы:

- 1) получение исходных порошков,
- 2) консолидация порошков, т.е. изготовление компактных материалов;
- 3) обработка и контроль изделий.

При производстве высококачественной керамики с высокой однородностью структуры используют порошки исходных материалов с размером частиц до 1 мкм.

Измельчение производится механическим путем с помощью мельющих тел, а также путем распыления измельчаемого материала в жидком состоянии, осаждением на холодных поверхностях из парогазовой фазы и другими методами. Для сверхтонкого помола (частицы менее 1 мкм) наиболее перспективны вибрационные мельницы.

Консолидация керамических материалов состоит из процессов формования и спекания. Различают три основные группы методов формования.

1. Прессование под действием сжимающего давления, при котором происходит уплотнение порошка за счет уменьшения пористости.

2. Пластичное формование выдавливанием прутков и труб через мундштук (экструзия) формовочных масс с пластификаторами, увеличивающими их текучесть.

3. Шликерное литье для изготовления тонкостенных изделий любой формы, в котором для формования используют жидкие суспензии порошков.

При спекании отдельные частицы порошков превращаются в монолит и формируются окончательные свойства керамики. Процесс спекания сопровождается уменьшением пористости и усадкой. Применяются печи для спекания при атмосферном давлении, установки горячего изостатического прессования, прессы горячего прессования. Температура спекания может составлять до 2000...2200°C.

Обработка керамики и контроль являются основными составляющими в балансе стоимости керамических изделий. По некоторым данным, стоимость исходных материалов и консолидации составляет всего лишь 11% (для металлов 43%), в то время как на обработку приходится 38% (для металлов 43%), а на контроль 51% (для металлов 14%). К основным методам обработки керамики относятся термообработка и размерная обработка поверхности. Термообработка керамики производится с целью кристаллизации межзеренной стеклофазы. При этом на 20...30% повышается твердость и вязкость разрушения материала.

Большинство керамических материалов с трудом поддается механической обработке. Поэтому основным условием керамической технологии является получение при консолидации практически готовых изделий. Для доводки поверхностей керамических изделий применяют абразивную обработку алмазными кругами, электрохимическую, ультразвуковую и лазерную обработку.

Для контроля керамических деталей чаще всего используют рентгеновскую и ультразвуковую дефектоскопию.

Пористые керамические и стеклокерамические материалы используются в качестве фильтров различного назначения. Широко их применение в области медицины в качестве имплантатов, т.к. их химический и фазовый состав гарантирует высокую биосовместимость с человеческим организмом. Наличие контролируемой пористости обеспечивает хорошее срастание тканей с имплантатом и отсутствие коррозии.

Пористое пеностекло имеет малую плотность, низкую теплопроводность, высокое звукопоглощение за счет введения в стекольную массу газотвердых веществ с последующим вспениванием.

Для оценки пористости керамических и стеклокерамических материалов применяются различные методы (порометры газовые и жидкостные, капиллярная дефектоскопия и др.).

Пористые металлические материалы

Для изготовления фильтрующих элементов обычно применяют ткани, керамику, а также сетчатые фильтры из различных материалов. Их недостатками являются низкая коррозионная стойкость, недостаточная механическая прочность, низкая термостойкость и жаропрочность. В большинстве случаев они не допускают высоких перепадов давлений и с трудом поддаются регенерации.

Высокопористые порошковые металлические материалы, благодаря жесткому пространственному каркасу, имеют более высокую прочность. Они выдерживают резкие колебания температур, легко обрабатываются, свариваются и паяются. Вследствие высокой пористости они имеют хорошую проницаемость для жидкостей и газов при достаточно тонкой фильтрации (до 30 мкм). Эти материалы легко регенерируются, и при этом почти полностью восстанавливают свои первоначальные свойства. Они не засоряют фильтрующиеся жидкости или газы материалами фильтра.

Технология изготовления металлических пористых элементов зависит от формы и размеров. Фильтры небольших размеров изготавливают спеканием свободно засыпанного порошка. Для более крупных фильтров применяют холодное прессование и последующее спекание. Для получения тонких пористых лент применяют прокатку.

Экспериментальная часть

1. Определить водопоглощение полимерных материалов
 - 1.1. Взвесить образцы полимерных материалов до испытания (масса m_1).
 - 1.2. Образцы поместить в химический стакан с водой, довести до кипения и выдержать при температуре кипения 30 мин.
 - 1.3. Извлечь образцы из химического стакана, промокнуть фильтровальной бумагой и взвесить (масса m_2).

1.4. Результаты измерений занести в табл. 5.2.

1.5. Определить водопоглощение каждого образца по формуле

$$B = [(m_2 - m_1) / m_1] \cdot 100.$$

Т а б л и ц а 5.2

№	Наименование материала	Масса образца до испытания m_1	Масса образца после испытания m_2	Водопоглощение образца, %
1	Текстолит малослойный			
2	Текстолит многослойный			
3	Стеклотекстолит			
4	Гетинакс			
5	Древесно-слоистый пластик			

2. Определить водопоглощение и открытую пористость стеклокерамических материалов.

2.1. Взвесить образцы стеклокерамических материалов. Измерить размеры образцов, необходимые для вычисления объема с помощью штангельциркуля.

2.2. Поместить образцы в химический стакан, довести до кипения и выдержать при температуре кипения 60 мин.

2.3. Извлечь образцы из химического стакана, взвесить. **Внимание!** Образцы не следует тщательно промокать, т.к. из относительно крупных пор удалится вода.

2.4. Определить водопоглощение каждого образца по вышеприведенной формуле.

2.5. Определить кажущуюся плотность образцов, используя формулу

$$\rho_k = m_1/V.$$

2.6. Вычислить кажущуюся (открытую) пористость P_k

$$P_k = B \cdot \rho_k / \rho_{\text{воды}}.$$

2.7. Результаты вычислений занести в табл 5.3.

Таблица 5.3

№	Наименование материала	Масса m_1	Масса m_2	Водопоглощение $V, \%$	Кажущаяся плотность $\rho_k, \text{г/см}^3$	Открытая пористость $P_k, \%$
1	Стеклокерамические образцы					
2	Техническая керамика					
3	Керамические фильтры					

3. По экспериментальным результатам провести сравнительный анализ и сформулировать выводы.

Лабораторная работа №6

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ФАЗЫ В СПЛАВЕ

Цель работы: освоить методы определения объемной доли фазы в сплаве (планиметрический, точечный метод и метод случайных секущих). Применить статистические методы обработки параметров структуры.

Теоретическая часть

Стереология – наука о трехмерной количественной интерпретации двумерных структур и изображений. Она включает методы микроскопического исследования, позволяющие количественно оценить геометрические параметры пространственного микроскопического строения материалов. Оценку микроскопического строения проводят строго количественно, посредством натуральных, т.е. реально существующих в пространственной структуре, геометрических параметров. Использование статистических методов анализа позволяет проводить оценку этих параметров вполне объективно и с любой точностью.

Любое материальное тело занимает некоторый объем в пространстве и, следовательно, является трехмерным. Внутреннее строение тела, в том числе и строение сплавов, также трехмерно. Однако непосредственно наблюдать внутреннее строение непрозрачных объектов невозможно и поэтому мы вынуждены ограничиваться изучением двумерной структуры. Рассматривая ее как самостоятельный объект анализа, мы можем непосредственно оценить плоскостную микроструктуру качественно (описательно), полуколичественно – при помощи условных баллов, определяемых сравнением структуры со стандартными шкалами, или же количественно – путем измерения или подсчета определенных геометрических параметров (например, числа зерен на единице площади микрошлифа).

Сплав – материал, полученный при сплавлении двух или более металлов или других веществ.

Гетерогенной называется физико-химическая система, внутри которой отделяются одни части системы от других и есть поверхность раздела, на которой происходит скачкообразное изменение свойств хотя бы одной из частей системы (монокристалл в контакте с расплавом).

Гомогенной называется физико-химическая система, внутри которой нет ни одной поверхности раздела, на которой происходило бы скачкообразное изменение хотя бы одного из свойств системы (монокристалл).

Фаза – это гомогенная система, находящаяся в равновесии, или совокупность гомогенных частей системы, одинаковых по составу и по всем физическим и химическим свойствам и ограниченных от других частей системы поверхностью раздела.

Компонентами системы называют химические элементы или соединения, из которых может быть построена фаза. В **однокомпонентных** системах реализуются фазы, постоянные по химическому составу, которые могут находиться в разных агрегатных состояниях: в твердом, жидком и газообразном.

В **многокомпонентных** системах реализуются фазы как постоянные, так и, главным образом, переменные по химическому составу (растворы). Такие фазы реализуются в твердом, жидком и газообразном состоянии.

Свойства материалов определяются их химическим составом и структурой. Под термином **структура** понимается форма, размеры

и распределение фаз, распределение легирующих элементов, форма и размеры зерен и субзерен, дефекты кристаллической решетки, их комплексы и др. Структура материала во многом зависит от технологии его получения и дальнейшей обработки посредством термических, механических, химических, физических, а также комбинированных воздействий, что позволяет изменять свойства материалов в широких пределах. В связи с этим необходима объективная количественная оценка структуры геометрическими параметрами.

При изучении строения материала различают **макроструктуру** – строение, видимое невооруженным глазом, и **микроструктуру** – строение, определяемой металлографическими методами, т.е. с использованием различных типов микроскопов. Макроструктуру изучают путем просмотра поверхности специально подготовленных образцов – продольных или поперечных макрошлифов (темплетов) или изломов – невооруженным глазом, а также с помощью лупы. при увеличении до 30 раз. Это позволяет контролировать большую поверхность и получать общее представление о качестве материала и о наличии в нем определенных пороков поле различных видов технологического процесса изготовления деталей (нарушение сплошности, пористость, раковины, трещины, дендритное строение, ликвацию, структурную неоднородность, вид излома и т.д.). Макроанализ является, как правило, является предварительным этапом исследования структуры. Изучение обычно начинают с рассмотрения специально приготовленного образца (микрошлифа) в нетравленном виде. В этом случае можно изучать неметаллические включения, мелкие поры, некоторые структурные составляющие (например, графит в чугуне). Микроскопические исследования специально подготовленных образцов позволяют также изучить такие структурные особенности как форма, размер, распределение фаз и неметаллических включений, размер зерна.

Двумерная структура шлифов, наблюдаемая в микроскопе, образуется при пересечении пространственной структуры плоскостью шлифа.

Элементы пространственной структуры могут быть трехмерными (зерна, субзерна, выделения фазы, поры), двумерными (границы зерен и субзерна, межфазные поверхности), одномерными (ребра частиц, дислокации) и точечными (вершины частиц). На секущей плоскости (двумерная структура) следами вышеперечисленных структур будут сечения, линии и точки, соответственно (рис. 6.1).

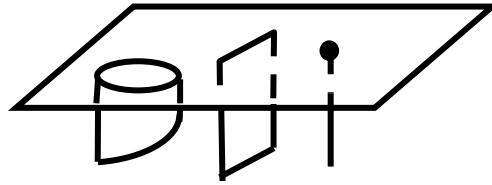


Рис. 6.1. Следы пространственных структур на секущей плоскости (на шлифе)

Параметры двумерной структуры, определяемые на плоскости шлифа, и параметры пространственной структуры взаимосвязаны. Установление указанных связей является одной из задач металлографии, так как геометрические параметры двумерной структуры могут быть определены с необходимой точностью. Ниже будет установлено соотношение для определения объемной доли фазы в сплаве по параметрам структуры, наблюдаемой на шлифе.

Пусть имеется материал, пространственная структура которого состоит из выделений α -фазы в матричной β -фазе, в виде куба единичного объема (рис. 6.2).

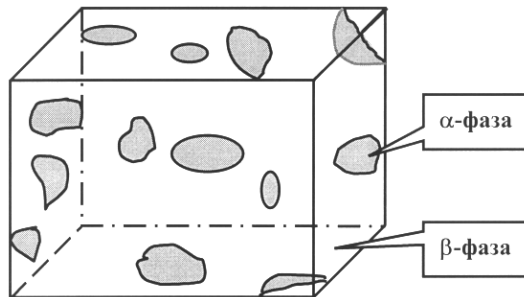


Рис. 6.2. Пространственная структура, состоящая из выделений α -фазы в матричной β -фазе

Необходимо определить долю α -фазы в сплаве ΣV_α (суммирование ведется по всем частицам α -фазы в единице объема). Если параллельно передней грани куба провести большое число Z равноотстоящих плоскостей, то получится набор из плоскопараллельных пластин толщиной $\delta = 1/Z$ единичной площади. Если площади, занимаемые сечениями частиц α -фазы на сечении плоскопараллель-

ных пластин равны $\Sigma F_{\alpha 1}, \Sigma F_{\alpha 2}, \dots$, а Z – достаточно велико, то объем α -фазы в этих пластинах равен $\delta(\Sigma F_{\alpha 1}), \delta(\Sigma F_{\alpha 2}), \delta(\Sigma F_{\alpha 3}), \dots$ соответственно.

Суммарный объем α -фазы в единичном кубе, совпадающий с долей объема α -фазы в сплаве, равен

$$\Sigma V_{\alpha} = \delta \sum_{i=1}^z (\Sigma F_{\alpha i}) = \frac{\sum_{i=1}^z (\Sigma F_{\alpha i})}{z} = \Sigma F_{\alpha}, \quad (6.1)$$

где ΣF_{α} – средняя величина площади сечений выделений α -фазы на единице площади плоскости сечения.

Таким образом, доля объема фазы в объеме сплава, а также доля площади сечений частиц этой фазы на шлифе численно равны.

На двумерную структуру можно нанести случайным образом большое число точек N , часть которых попадает на сечения α -фазы N_{α} , т.е.

$$\Sigma F_{\alpha} = \frac{N_{\alpha}}{N}. \quad (6.2)$$

Таким образом, объединяя соотношения (6.1) и (6.2), можно определение доли объема α -фазы ΣV_{α} заменить определением долей площадей сечений частиц на шлифе ΣF_{α} или подсчетом числа случайных точек на шлифе N_{α} :

$$\Sigma V_{\alpha} = \Sigma F_{\alpha} = \frac{N_{\alpha}}{N}. \quad (6.3)$$

Методы определения объемной доли фазы в сплаве

В основе методов определения объемной доли фазы сплава (или структурной составляющей) лежит соотношение (6.3), т.е. на шлифе сплава проводятся подсчеты площадей сечений частиц исследуемой фазы или числа точек, находящихся на данных сечениях. Соответственно различают планиметрический и точечный метод определения объемной доли фазы сплава, а также метод случайных секущих.

Планиметрический метод. Измерение площадей сечений исследуемой фазы проводится на определенном участке шлифа, который, как правило, ограничен квадратом или прямоугольником (рис. 6.3). При этом некоторые сечения частиц фаз полностью находятся в квадрате (прямоугольнике), а некоторые будут пересекаться ограничивающим контуром. Если измеряемые сечения частиц фазы имеют форму круга, то суммируются площади только тех сечений, центры которых находятся внутри периметра ограничивающего контура. При других формах сечения принимается, что ограничивающий контур, проходящий через сечение, делит его пополам. Если сечение попадает в прямой угол ограничивающего контура, то при подсчете площади сечения учитывается только его четвертая часть.

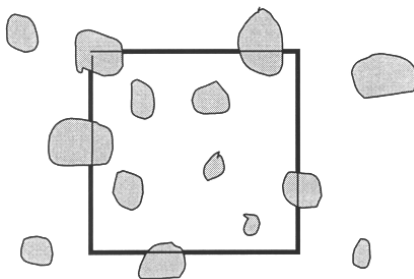


Рис. 6.3. Подсчет суммарной площади сечений частиц фазы

Для определения объемной доли фазы в сплаве суммарную площадь сечений, находящихся внутри ограниченного контура, делят на всю площадь, ограниченную контуром. Для получения надежных результатов рассмотренную процедуру повторяют в различных участках шлифа.

Точность определения доли объема фазы зависит от количества измеренных сечений частиц. Абсолютная ошибка, определенная при небольшом содержании фазы, может быть оценена по формуле

$$\varepsilon \leq \frac{t \sum V_{\alpha}}{\sqrt{Z}} \sqrt{\left[\frac{\sigma(F)}{\bar{F}} \right]^2 + 1},$$

где ε – абсолютная ошибка, выраженная в долях объема сплава;

t – нормированное отклонение;

ΣV_α – доля объема фазы;

\bar{F} – средняя площадь сечений частиц;

$\sigma(F)$ – среднее квадратичное отклонение;

Z – число измеренных сечений.

Площадь каждого сечения оценивают числом полных и неполных квадратов сетки, которые размещаются в пределах контура данного сечения. При простой и не очень сложной конфигурации сечений микрочастиц их площадь можно определять наложением на сечение различных по форме контуров, площадь которых заранее известна (например, эталонной фигуры – круга).

Точечный метод. Точечный метод применим для анализа высокодисперсных структур, когда линейный метод анализа не может быть использован вследствие весьма малых длин получающихся отрезков, которые поэтому нельзя измерить с достаточной точностью. Исследуемая двумерная структура сначала покрывается множеством точек, а затем подсчитывается число попавших точек на сечения частиц определяемой фазы (рис. 6.4). Точки можно располагать на площади шлифа случайно и в определенном порядке. Например, если из 100 точек, расположенных на шлифе, 17 попали на сечения частиц исследуемой фазы, то объемная доля фазы составит 0,17.

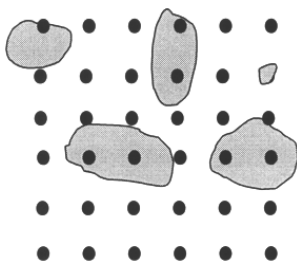


Рис. 6.4. Определение объемной доли фазы точечным методом

Точность полученного результата при применении точечного метода определяется общим числом использованных точек и количеством объемной доли исследуемой фазы в сплаве. Если содержание структурной составляющей мало, то количество точек резко возрастает, и удобнее воспользоваться планиметрическим методом.

Абсолютная погрешность определения, выраженная в долях объема сплава, равна

$$\varepsilon = t \sqrt{\frac{\sum V_{\alpha} (1 - \sum V_{\alpha})}{Z}},$$

где Z – общее число используемых точек;

$\sum V_{\alpha}$ – доля объема фазы.

Метод случайных секущих. Метод случайных секущих, благодаря своей простоте, широко используется при проведении количественного анализа структуры материалов. При выводе основной формулы этого метода не сделано никаких произвольных допущений и ограничений относительно формы линий или контуров. Поэтому метод случайных секущих для плоскости является математически строгим и универсальным. Он позволяет измерять удельную протяженность линий любой системы с необходимой точностью.

Случайные секущие, пересекаясь с частицами и поверхностями, образуют следы в виде отрезков и точек соответственно. Измерения длин отрезков, а также подсчет точек значительно проще измерений площадей и могут быть механизированы и автоматизированы. Изучая следы случайных секущих, расположенных на шлифе, можно количественно рассчитать многие параметры структуры, а именно объемную долю второй фазы, распределения частиц по размеру, величину удельной поверхности межфазной границы и т.д. Ниже рассмотрены примеры применения метода случайных секущих при проведении количественного анализа структуры двухфазного сплава.

Определение объемной доли второй фазы. Пусть единичный куб сплава разбит на одинаковые прямоугольные параллелепипеды, как показано на рис. 6.5 и их число составляет $N = 1/\delta^2$. Внутри каждого прямоугольного параллелепипеда проводится секущая единичной длины.

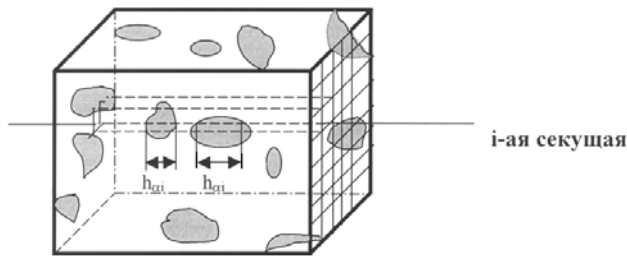


Рис. 6.5. Определение объемной доли второй фазы

Если $\Sigma h_{\alpha i}$ – сумма длин отрезков i -й секущей, проходящей через α -фазу, то ее объем $\Sigma V_{\alpha i}$, заключенный в соответствующем параллелепипеде, в силу малости ребра δ равен $\delta^2 \Sigma h_{\alpha i}$. Поэтому объемная доля α -фазы $\Sigma V_{\alpha i}$ равна соответственно

$$\Sigma V_{\alpha} = \sum_i (\delta^2 \Sigma h_{\alpha i}) = \frac{\Sigma (\Sigma h_{\alpha i})}{H} = \Sigma h_{\alpha},$$

где Σ – означает суммирование по всем N секущим;

Σh_{α} – средняя суммарная длина отрезков, проходящих по α -фазе, на единице длины секущих.

Соотношение показывает, что объемная доля второй фазы в сплаве равна доле длины секущей, проходящей через эту составляющую в объеме или на шлифе (рис. 6.6).

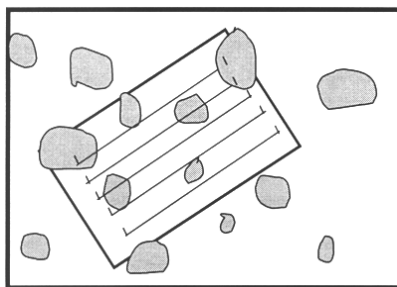


Рис. 6.6. Определение параметров сплава методом случайных секущих

Абсолютная ошибка определения объемной доли второй фазы рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = t \sqrt{\frac{\Sigma V_{\alpha} (1 - \Sigma V_{\alpha})}{x}},$$

где t – нормированное отклонение;

x – число измеренных хорд.

Удельная поверхность. Пространственные поверхности (межфазные и межзеренные границы и т.д.) могут иметь различную форму. Их следами на плоскости шлифа или на случайных секущих являются линии или точки. В объеме сплава проводятся большое количество линий (случайных секущих), располагая их беспорядочно. При этом среднее число пересечений случайных секущих с поверхностями данной системы границ в структуре, отнесенное к единице длины секущих (m), окажется пропорциональным величине суммарной поверхности границ в единице объема, т.е. величине абсолютной удельной поверхности. Между удельной поверхностью межфазных границ (суммарная площадь поверхностей межфазных границ в единице объема) ΣS и числом точек следов на единице длины секущей m существует математическое соотношение

$$\Sigma S = 2m, \text{ мм}^{-1}.$$

Формула справедлива для секущих любой формы.

Абсолютная ошибка $\varepsilon(\Sigma S)$ определения удельной поверхности рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{Kt}{\sqrt{x}} \Sigma S,$$

где t – нормированное отклонение;

x – общее число точек пересечений;

K – коэффициент, зависящий от структуры, формы секущей линии, от равномерности распределения секущих линий по площади шлифа. При анализе структуры по всей площади шлифа можно считать $K = 1$.

Распределение частиц по размеру. Основные методы определения распределения частиц по размерам разработаны для шаровидных или выпуклых частиц, имеющих одинаковую форму, случайную ориентацию и статистически одинаково распределенных в пространстве.

Распределение шаровидных частиц по размеру приводит к определенному распределению длин отрезков (хорд) случайных секущих. Изучая экспериментально распределение длин хорд случайных секущих, проведенных на шлифе, можно получить информа-

цию о распределении шаровидных частиц по их диаметрам. При переходе от распределения длин хорд к распределению диаметров частиц принимается, что:

- 1) распределение частиц по величине диаметров дискретно;
- 2) наибольшая хорда, измеренная на шлифе, равна наибольшему диаметру.

При разбивке хорд на размерные группы исходят из того, чтобы их число было достаточно большим (рекомендуется не менее 8), а также, чтобы интервал размерной группы содержал целые числа делений измерительной линейки. Если цена разбивки хорд по длине равна Δ , то число хорд U_j (в расчете на единицу длины случайной секущей, например на 1 мм), длины которых находятся в пределах от $(j - 1)\Delta$ до $j\Delta$, относятся к j -й размерной группе.

Формула, по которой рассчитывается число частиц j -й размерной группы в единице объема сплава N_j , имеет вид

$$N_j = \frac{4}{\pi\Delta^2} \left(\frac{U_j}{2j-1} - \frac{U_{j+1}}{2j+1} \right), \text{ мм}^{-3},$$

где U_j , U_{j+1} – число хорд на 1 мм секущей прямой в j -й и $(j+1)$ -й размерных группах.

Статистическое описание структуры

Структура материала представляет огромную совокупность однородных элементов, поэтому при ее оценке целесообразно использовать математическую статистику, основные положения которой приведены ниже.

Пусть необходимо определить по шлифу параметр структуры, истинная средняя величина которого для данного объема равна a_0 . Значения этого параметра, измеренные на шлифе могут существенно различаться. Проведя x измерений, получим x разных значений параметра $a_1, a_2, a_3, \dots, a_x$. Совокупность случайно полученных величин $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_x\}$ образуют выборку, а число x называется ее объемом.

Основным показателем, характеризующим величину параметра структуры, является его среднеарифметическое значение a :

$$\bar{a} = \frac{1}{x}(a_1 + a_2 + \dots + a_x).$$

Показателем, характеризующим однородность измеряемого параметра структуры, является его среднее квадратичное отклонение $\sigma(a)$

$$\sigma(a) = K \sqrt{\frac{a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_x^2}{x} - (\bar{a})^2},$$

где K – поправочный коэффициент, зависящий от объема выборки:

$$K = \sqrt{\frac{x}{x-1}}.$$

Степень однородности параметра структуры может быть оценена его дисперсией $D(a)$

$$D(a) = \sigma^2(a)$$

или коэффициентом вариации δ

$$\delta = \frac{\sigma(a)}{\bar{a}}.$$

При количественной оценке параметра структуры важно знать возможную погрешность полученного результата. Разница между истинной средней величиной параметра a_0 структуры и средней арифметической выборкой \bar{a} называется абсолютной статистической ошибкой ε

$$\varepsilon = (a_0 - \bar{a}).$$

Но поскольку истинная средняя величина параметра неизвестна, то ошибку определяют по формуле

$$\varepsilon = t\sigma(\bar{a}),$$

где $\sigma(\bar{a})$ – среднее выборочное квадратичное отклонение (или среднее квадратичное отклонение выборочной средней);

t – нормированное отклонение.

Значение $\sigma(\bar{a})$ может быть определено экспериментально или оценено теоретически. В первом случае проводится несколько повторных выборок, содержащих каждая по x измерений, и определяются для них средние значения \bar{a}_i (z – число различных выборок). Тогда

$$\sigma(\bar{a}) = K \sqrt{\frac{\bar{a}_1^2 + \bar{a}_2^2 + \dots + \bar{a}_z^2}{z} - (\bar{a}_o)^2},$$

где $\bar{a}_o = \frac{\bar{a}_1 + \bar{a}_2 + \dots + \bar{a}_z}{z}$ – средняя арифметическая всех выборочных средних.

Выполнение ряда повторных выборок занимает много времени и усилий, поэтому для определения $\sigma(\bar{a})$ используют то, что эта величина обратно пропорциональна квадратному корню из числа выполненных независимых измерений x , т.е.

$$\sigma(\bar{a}) = \frac{A}{\sqrt{x}},$$

где A – коэффициент, зависящий от характера структуры определяемого параметра, а также методики анализа.

Выражение для вычисления абсолютной ошибки ε приобретает вид

$$\varepsilon = \frac{At}{\sqrt{x}}.$$

Нормированное отклонение, входящее в выражение для абсолютной статистической ошибки, связано с доверительной вероятностью P полученного результата анализа следующей зависимостью:

$$P = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt .$$

Доверительная вероятность при абсолютной статистической ошибке ε показывает долю повторных выборок, результаты которых находились бы в пределах от $(\bar{a} - \varepsilon)$ до $(\bar{a} + \varepsilon)$.

Так как интеграл не берется в элементарных функциях, то значения доверительных вероятностей P для различных значений нормированного отклонения t приводятся в таблице. Например, значение доверительной вероятности $P = 0,5$ соответствует нормированному отклонению $t = 0,6745$. Абсолютная ошибка ε , следовательно, может быть различной в зависимости от величины доверительной вероятности P .

Описание тренажеров для проведения количественного анализа:

1. Для планиметрического и точечного методов.

Тренажер состоит из трех пластин. На **первой пластине (№1)** моделируется микроструктура сплава, наблюдаемая с помощью микроскопа на шлифе.

Вторая пластина (№2) является прозрачной и на ней нанесен ограничивающий контур в виде квадрата. Пластина №2 служит для определения объемной доли фазы планиметрическим методом. Для определения площадей сечений используются накладные шаблоны-сетки.

Третья пластина (№3), на которой нанесено 100 точек, служит для определения объемной доли фазы точечным методом.

При определении объемной доли фазы тем или другим методом на первую пластину (№1) накладывается соответствующая прозрачная пластина, после чего проводится обсчет структуры.

2. Для метода случайных секущих.

Тренажер состоит из двух пластин. На одной **пластине (№4)** моделируется структура шлифа сплава, содержащего шаровидные частицы.

На **пластине №5** – пластине нанесены 5 секущих линий с делениями, с указанием цены деления.

При количественном анализе структуры пластина с секущими линиями №5 многократно накладывается на различные участки пластины №4, и проводится обсчет структуры.

Экспериментальная часть

1. На выданной модели шлифа микроструктуры материала определить:

а) объемную долю указанной преподавателем фазы планиметрическим методом;

б) объемную долю фазы точечным методом;

в) объемную долю фазы и величину удельной поверхности межфазной границы с помощью метода случайных секущих.

Объем выборки указывается преподавателем.

2. Рассчитать среднеквадратичное отклонение σ , дисперсию D , коэффициент вариации δ и вероятную ошибку ε ($t = 0,6745$, $P = 0,5$) определения величины объемной доли фазы при использовании различных методов. Сделать сравнительный анализ результатов.

3. По результатам работы сформулировать выводы.

Литература

1. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Под общей ред. Б.Н.Арзамасова. – 2 изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
2. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.
3. Мозберг Р. К. Материаловедение. – М.: Высш. школа, 1991. – 447 с.
4. Травин О. В., Травина Н. Т. Материаловедение. – М.: Metallurgy, 1989. – 383 с.
5. Дриц М. Е., Москалев М. А. Технология конструкционных материалов и материаловедение. – М.: Высш. школа, 1990. – 447 с.
6. Технология конструкционных материалов / И.А.Арутюнова, А.М.Дальский, Т.М.Барсукова и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 448 с.
7. Ван Флек Л. Теоретическое и прикладное материаловедение. – М.: Атомиздат, 1975. – 471 с.
8. Композиционные материалы / Под ред. А.И.Монохина. – М.: Наука, 1981. – 292 с.
9. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. – М.: Metallurgy, 1978. – 391 с.
10. Пасынков В. В. Материалы электронной техники. – М.: Высш. школа, 1980. – 406 с.
11. Горелин С. С., Дашевский М. Я. Материаловедение полупроводников и металловедение. – М.: Высш. школа, 1980.
12. Справочник по электротехническим материалам. – М.: Высш. школа, 1974.

Содержание

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ.....	4
Лабораторная работа № 2. ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	16
Лабораторная работа № 3. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ.....	29
Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	40
Лабораторная работа № 5. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОРИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	51
Лабораторная работа № 6. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ФАЗЫ В СПЛАВЕ.....	62
Литература.....	77

Учебное издание

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплине
«Материаловедение и технология материалов»

В 2-х частях

Часть 1

Составители: КАРПОВИЧ Елена Федоровна
КОЛОНТАЕВА Татьяна Владимировна

Редактор В.В.Мохнач. Корректор М.П.Антонова
Компьютерная верстка Н.А.Школьниковой

Подписано в печать 28.08.2003.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 4,7. Уч.-изд. л. 3,6. Тираж 500. Заказ 599.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.
Лицензия ЛВ №155 от 30.01.2003. 220013, Минск, проспект
Ф.Скорины, 65.