

А. К. Федотов

Физическое материаловедение

В 3 частях

Часть 2. Фазовые превращения
в металлах и сплавах

*Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений
высшего образования
по физическим и техническим
специальностям*



Минск
«Вышэйшая школа»
2012

Рецензенты: кафедра химии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (заведующий кафедрой доктор химических наук, профессор *И.В. Боднарь*); заведующий отделом криогенных исследований Государственного научно-производственного объединения «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению» доктор физико-математических наук *С.Е. Демьянов*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства

ISBN 978-985-06-2063-7(Ч.2)
ISBN 978-985-06-1924-2

© Федотов А.К., 2012
© Оформление УП «Издательство
“Вышэйшая школа”», 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Все материалы, обеспечивающие создание и эффективную работу энергетических установок (включая ядерно-энергетические), подвергаются разного рода внешним воздействиям. Эти воздействия возникают уже на первичной стадии формирования материала – в процессе его получения (синтеза) и при последующей обработке с целью придания структуры и свойств, необходимых для превращения материала в готовое изделие. Поэтому подготовка физиков и инженеров-технологов, специализирующихся в области энергоматериаловедения по направлению «ядерные энергетические установки», приводит к необходимости среди других разделов современной науки и инженерии давать студентам глубокие знания в области технологии получения, функционирования и диагностики материалов со специальными теплофизическими и иными свойствами. Например, без таких знаний невозможно проектировать, создавать и обеспечивать эффективную эксплуатацию ядерных энергетических установок (ЯЭУ), а также котлов, паропроводов, парогенераторов и многих других узлов и систем современных АЭС (в их тепловых и электрических контурах, системах передачи тепловой и электрической энергии, системах хранения ядерных отходов и др.).

Значительная часть узлов в ЯЭУ и в тепловом контуре АЭС функционирует в условиях интенсивных термических воздействий. Под *термическими воздействиями* понимают любые изменения температуры в виде нагрева или охлаждения, возникающие при отводе от системы (среды, материала, изделия) или при подводе к ней тепловой энергии в течение определенного времени и по определенному закону (например, с определенными скоростями). Более того, в ряде случаев материалы, из которых изготовлены те или иные узлы ЯЭУ и теплового контура АЭС, подвергаются не только термическим, но одновременно и радиационным воздействиям. Все это может приводить к существенному изменению структуры, фазового состава и многих физических свойств материалов, в том числе вследствие интенсификации в них процессов тепло- и массопереноса.

Применительно к твердым кристаллическим средам, при изучении многих явлений и процессов переноса под влиянием термических и иных воздействий в стандартных учебниках по

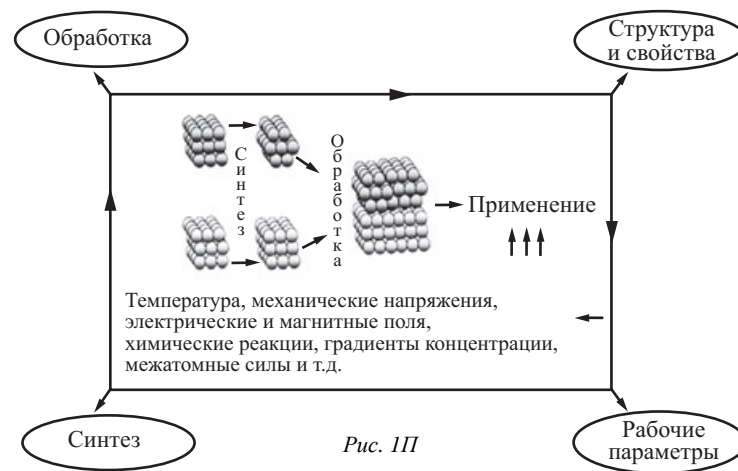
теплофизике, как правило, абстрагируются от атомно-кристаллической структуры объектов исследования, рассматривая твердое тело как сплошную среду. Однако при изучении влияния термических воздействий (в том числе совместно с радиационными) на процессы тепло- и массопереноса в кристаллических материалах и изменения их микроструктуры и свойств нельзя не учитывать их атомно-кристаллическое и электронное строение. Это обусловлено тем, что термические воздействия могут приводить, например, к интенсивному образованию дефектов кристаллической решетки и изменению агрегатного либо фазового состояния материала (превращение кристалла в расплав или пар, кристаллизация, рекристаллизация и др.). Кинетику данных процессов, в том числе определяющих изменение свойств и фазовые превращения в материалах и изделиях, невозможно описать без учета такой главной особенности кристаллического материала как его кристаллическая решетка и наличие в ней дефектов (искажений).

Кроме того, поскольку существует глубокая взаимосвязь между изменением состояния кристаллического материала в результате того или иного внешнего воздействия (термического, механического, радиационного, их комбинаций) и изменением его свойств, для изучения влияния этих воздействий на фазовое состояние, тепловые и другие функциональные свойства кристаллических материалов необходимо иметь полное представление об их атомной и электронной структуре.

Вышеизложенное означает, что необходимость изучения вопросов тепло- и массообмена в ядерно-энергетических системах требует разработки специального учебного пособия по основам материаловедения для студентов, обучающихся по данному направлению.

Принципы построения учебного пособия

Структурная схема учебного пособия вытекает из представленной на рис. 1П взаимосвязи между процессом «конструирования» (получения, выращивания, синтеза) материала, его последующих обработок разными методами (термическим, механическим, термохимическим, химико-термическим и др.) с целью придания последнему нужной структуры и свойств, что превращает материал в готовое изделие с определенными рабочими параметрами, необходимыми для конкретных практических применений.



Согласно схеме, для того, чтобы создать («сконструировать») материал с заданными свойствами, обеспечивающими оптимальные рабочие параметры будущего изделия, надо знать, каким образом структура и свойства материала откликаются на внешние воздействия, при которых ему придется работать. Этот отклик на внешние воздействия будет определять как технологию синтеза (изготовления) материала, так и методы его последующей обработки для получения изделия с нужными рабочими параметрами в процессе его работы в том или ином устройстве.

В соответствии со схемой изложения учебного материала в ч. 1 пособия, ч. 2 посвящена изучению отклика кристаллического материала как термодинамической системы на термические, механические, термомеханические, химико-термические и другие воздействия. В этой части изучаются разные виды технологий получения (синтеза) конструкционных и функциональных материалов, а также влияние вышеупомянутых (в том числе совместных) воздействий на фазовое (в том числе, агрегатное) состояние кристаллических материалов, их структуру и свойства. На основе данных представлений рассматривается влияние дальнего и ближнего порядка на процессы фазовых превращений в конденсированных веществах, а также на свойства кристаллических твердых тел. В этой части раскрываются основные связи между фазовым состоянием, структурой, свойствами материалов и теми физическими процессами, которые могут протекать в них при внешних воздействиях как на ста-

дии создания материалов, так и в процессе их эксплуатации в системах с большим тепловыделением (АЭС, ТЭС, энергетических агрегатах и др.).

Такая структура пособия обусловлена следующими соображениями.

Автор убежден, что современный специалист в области материаловедения (в области материалов для энергетики вообще и ядерной энергетики, в частности) не должен ограничиваться лишь знаниями, касающимися характеристик и номенклатуры тех материалов, которые используются в конкретных (достаточно узких) практических применениях. Выпускник современного вуза (технического либо классического университета), независимо от того, является ли он технологом или исследователем, опираясь на глубокие знания в области физики твердых тел (ее основы изложены в ч. 1) должен освоить базовые принципы «конструирования» материалов, которые формируют ту или иную структуру (на ее атомном, нано-, микро- и макроуровнях) и придают те или иные функциональные свойства материалам, будь то механическая прочность, электропроводность или магнитные свойства.

Таким образом, основной целью учебного пособия в целом является подготовка студентов к осознанному пониманию тех структурно-фазовых превращений и изменений свойств твердых кристаллических материалов, которые происходят при различных внешних воздействиях (температура, давление, радиация и др.).

Отметим, что при изложении материала во 2-й ч. пособия большое внимание будет уделено физике процессов, определяющих формирование структуры кристаллических материалов в результате термических и механических воздействий; установлению взаимосвязи свойств материалов не только с их атомным строением, но также и с их нано-, микро- и макроструктурой. Существенное внимание будет уделено изложению особенностей основных видов диаграмм состояния сплавов и, в этой связи, базовых физико-технологических принципов «конструирования» (синтеза, выращивания, формирования) кристаллических материалов с нужными функциональными свойствами. Кроме того, в пособии будет дано описание свойств ряда технически важных видов сплавов (например, сталей, чугунов, латуней, бронз и других базовых конструкционных материалов), используемых в об-

щем и энергетическом машиностроении, при создании ТЭС и АЭС станций, а также приборов и устройств, обеспечивающих их безопасное и рациональное функционирование.

Для обеспечения повышения энергоэффективности в энергетическом машиностроении, разработки новых энергосберегающих технологий, а также при реализации ядерно-энергетических технологий широко применяются сложные материалы разных типов, которые должны обладать набором особых функциональных свойств. Значительная часть материалов такого рода формируется не только на основе чистых металлов и упомянутых выше базовых металлических сплавов или их композиций. Изложение способов получения, структуры и основных свойства некоторых специальных материалов – специальных сплавов, композиционных материалов типа металл – диэлектрик, металл – полимер и других, а также материалов, получаемых в виде керамик, из разного рода порошковых композиций, будут включены в ч. 3 пособия.

Для использования таких материалов необходимо глубокое понимание взаимосвязи между методами и способами их формирования, составом, фазовой структурой и физико-химическими свойствами, что будет обеспечено учебным материалом, изложенным в двух первых частях данного пособия.

Предлагаемое учебное пособие создано на базе системы специальных лекционных курсов «Введение в физику твердого тела», «Основы материаловедения», «Энергоматериаловедение», «Специальные материалы для энергетики и энергосбережения», «Материалы со специальными теплофизическими свойствами» и «Диффузия в конденсированных средах», читавшихся заведующим кафедрой энергофизики Белорусского государственного университета, профессором А.К. Федотовым для студентов специализаций «Энергофизика», «Теплофизика», «Физика полупроводников», «Новые материалы» и др.

Конечно, создать достаточно краткое, но отвечающее всем сформулированным выше требованиям, учебное пособие – задача весьма трудная и отчасти неблагодарная, поскольку часто требует совмещать трудносовместимые вещи. С одной стороны, необходимо дать достаточно подробное изложение материала, которое было бы хорошо иллюстрировано и понимаемо студентами с разным уровнем исходной подготовки в области физики (а она весьма существенно различается в классических и технических университетах). С другой стороны, изложение материала

не должно быть слишком длинным, так как по многим вопросам, излагаемым в данном учебном пособии, есть учебники и учебные пособия, в том числе доступные в интернете.

Пособие также содержит проверочные тесты и задачи, выполнение которых позволит студенту вести самоконтроль изучаемого материала.

При подготовке данной книги автор руководствовался длительным (более чем 25-летним) опытом в чтении курсов по физике твердого тела, физическому материаловедению и ряду смежных вопросов, а также почти полувековой работой в области физического материаловедения в Институте физики твердого тела НАНБ, в Белорусском государственном университете, в Венском техническом университете (Австрия), в Университете Ланчжоу (КНР) и других организациях.

В создание читаемых курсов и, как следствие, данного пособия внесло вклад систематическое обсуждение многих вопросов материаловедения с моими учителями – академиком Н.Н. Сиротой и профессором Н.Ф. Куниным, а также со многими коллегами по работе – В.М. Анищиком, А.В. Мазаником, В.Г. Шепелевичем, С.Е. Демьяновым, В.В. Угловым и многими другими, за что автор им очень благодарен. Особую признательность хотел бы выразить рецензентам данного пособия – доктору физико-математических наук С.Е. Демьянову и доктору химических наук И.В. Боднару – за их полезные замечания и предложения, которые существенно улучшили пособие.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Роль материалов в современной энергетике

Как отмечалось в ч. 1 «Физика твердого тела» данного учебного пособия, для обеспечения экономического благосостояния любого современного общества необходимо получать энергию, преобразовывать ее из одних форм в другие, передавать на расстояние и потреблять множеством способов. Для осуществления каждой из вышеупомянутых стадий необходимы материалы, обладающие соответствующими функциональными характеристиками (свойствами). Именно поэтому жизнь современного индустриального общества постоянно сопровождается непрерывным развитием науки о материалах – материаловедения – и зависит от нее.

Материал – вещественный объект с заданным функциональным назначением. Поэтому для выполнения своих функций он должен обладать определенным составом, атомной структурой, микроструктурой и свойствами. Материалы могут иметь различное агрегатное состояние: твердое, жидкое, газообразное. Функции, которые выполняют материалы, разнообразны: это и обеспечение оптимального протекания электрического тока (например, в проводниковых и полупроводниковых материалах), и сохранение определенной формы при механических нагрузках (в конструкционных материалах), и обеспечение непротекания электрического тока (в диэлектрических электроизолирующих материалах), и превращение электрической энергии в тепловую (в материалах с высоким электросопротивлением) и др.

Обычно материал выполняет несколько функций, например диэлектрик или алюминиевая жила в электрическом кабеле обязательно испытывают какие-то механические нагрузки, а значит, они одновременно являются конструкционными материалами.

Физическое материаловедение – наука, занимающаяся изучением взаимосвязи между составом, атомной и микроструктурой, физико-химическими свойствами материалов и их поведением при различных внешних воздействиях – тепловых, электрических, магнитных, химических и других, а также при сочетании этих воздействий. Стихийными материаловедами были еще древние люди, научившиеся делать каменные наконечники или топоры из определенных камней со слоистой

структурой, а затем медные и железные орудия труда. Технический прогресс во многом основан на материаловедении. В свою очередь, он дает новые возможности, методы, приборы для развития материаловедения, что позволяет создавать новые материалы.

Рассмотрим пример с вычислительной техникой. Первые вычислительные устройства (например, счеты) делались из дерева, камня или металла. Первые компьютеры были на вакуумных электронных лампах и имели сравнительно скромные возможности. Размер их был примерно со спортивный зал, размер единичного элемента для хранения и обработки информации составлял несколько сантиметров. После открытия полупроводников размеры элементов памяти и самого компьютера уменьшились примерно в 10 раз. По мере исследования полупроводников их размер уменьшался, пока не произошел качественный скачок после открытия интегральных схем, когда размер элементов достиг сначала нескольких микрометров, а сейчас уже нескольких десятков нанометров.

Человечество научилось использовать множество природных материалов для своих нужд, в том числе энергетических. Однако еще больше материалов получают искусственными способами, что ведет к непрерывному созданию и усовершенствованию различных способов получения материалов, которые объединены общим названием – технология материалов.

В данном учебном пособии рассматриваются в основном материалы, связанные с энергетикой и энергосбережением. Однако значительная их часть может быть использована и в других областях современной техники и технологии материалов. В общем случае классификация материалов включает в себя три основные разновидности материалов – металлические, неметаллические (неорганические и органические), композиционные.

Основные материалы, которые используются в энергетике (в том числе, ядерной), можно разделить на несколько классов, например по их функциональному назначению.

1. Материалы, обеспечивающие жесткость, статическую и циклическую прочность энергетических устройств – двигателей, машин, механизмов, турбин, котлов и др.

2. Износостойкие материалы (стойкость к истиранию).

3. Материалы с высокими упругими свойствами (пружины, демпферы и т.д.).

4. Материалы с малой плотностью и высокой удельной прочностью (авиационные двигатели).

5. Материалы, устойчивые к воздействию высокой температуры и агрессивных рабочих сред (жаростойкие, жаропрочные, коррозионностойкие).

6. Материалы специального назначения (проводниковые, магнитные, диэлектрические, оптические и др.).

Кроме функционального назначения, материалы могут классифицироваться по конструкционным критериям (прочность, долговечность, коррозионные свойства и т.п.) и возможностью переработки в готовое изделие или полуфабрикат (обрабатываемость резанием, сваркой, давлением и т.п.).

По геометрическим признакам материалы и вещества принято классифицировать по виду изготавливаемых из них полуфабрикатов – листов, профилей, гранул, порошков, проволоки и т.п.

Металлические сплавы принято также классифицировать по основному компоненту. По этому признаку различают черную и цветную металлургию. К материалам черной металлургии относят стали, чугуны и другие сплавы на основе железа, легированные разными металлами. К материалам цветной металлургии принадлежат алюминий, медь, цинк, свинец, никель, олово и сплавы на их основе.

Технические материалы часто принято классифицировать по их отраслевому назначению – для энергетики, приборостроения, машиностроения, судостроения, авиастроения и т.д.

При выборе материала, необходимого для изготовления той или иной технической детали, изделия или конструкции, учитывают экономическую целесообразность его применения исходя из затрат на производство (включая энергозатраты) и уровня его запасов. Содержание наиболее технически важных элементов в земной коре следующее: кремния – 25,7 %, алюминия – 7,5 %, железа – 4,7 %, магния – 1,94 %, титана – 0,58 %, хрома – $3,3 \cdot 10^{-2}$ %, цинка – $2 \cdot 10^{-2}$ %, никеля – $1,8 \cdot 10^{-2}$ %, меди – $1 \cdot 10^{-2}$ %, свинца – $8 \cdot 10^{-4}$ %, олова – $6 \cdot 10^{-4}$ %, бериллия – $5 \cdot 10^{-4}$ %, серебра – $4 \cdot 10^{-6}$ %, золота – $5 \cdot 10^{-7}$ %.

Таран, Ю.И. Структура эвтектических сплавов / Ю.И. Таран, В.И. Мазур. М., 1978.

Уманский, Я.С. Физика металлов / Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков. М., 1978.

Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов [и др.]. М., 2002.

Физическое материаловедение. Т. 2 / под ред. Р.У. Кана, И.П. Хаазена. М., 1986.

Фольмер, М. Кинетика образования фаз / М. Фольмер. М., 1986.

Френкель, Я.И. Введение в теорию металлов / Я.И. Френкель, М., 1972.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|------------|
| Предисловие | 3 |
| Введение..... | 9 |
| Глава 1. Фазовые превращения в однокомпонентных кристаллических материалах..... | 12 |
| 1.1. Термодинамика фазовых превращений в материалах | 12 |
| 1.2. Плавление кристаллических твердых тел..... | 36 |
| 1.3. Кристаллизация твердых тел | 47 |
| 1.4. Закалка кристаллических материалов | 89 |
| 1.5. Сублимация и десублимация | 100 |
| 1.6. Изменение структуры при термических воздействиях ... | 107 |
| Глава 2. Фазовые равновесия и превращения в многокомпонентных кристаллических материалах при термических воздействиях | 135 |
| 2.1. Виды кристаллических сплавов..... | 136 |
| 2.2. Фазовые равновесия в сплавах | 153 |
| 2.3. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов..... | 162 |
| 2.4. Диаграммы состояния трехкомпонентных сплавов..... | 179 |
| 2.5. Диаграмма равновесия системы железо – углерод..... | 192 |
| 2.6. Термическая обработка сплавов..... | 209 |
| Глава 3. Структура и свойства прикладных сплавов..... | 227 |
| 3.1. Стали и чугуны: классификация, свойства, структура ... | 227 |
| 3.2. Сплавы меди: диаграммы состояния, структура и свойства | 246 |
| 3.3. Сплавы алюминия: диаграммы состояния, структура и свойства | 270 |
| 3.4. Сплавы титана: диаграммы состояния, структура и свойства | 283 |
| 3.5. Сплавы железа, никеля и кобальта: структура и свойства..... | 292 |
| Приложения к главе 1..... | 305 |
| <i>Приложение 1.1.</i> Методы выращивания монокристаллов..... | 305 |
| <i>Приложение 1.2.</i> Деформация кристаллических материалов | 316 |
| <i>Приложение 1.3.</i> Способы определения количественных характеристик прочности кристаллических материалов | 335 |
| | 445 |

| | |
|---|-----|
| <i>Приложение 1.4.</i> Некоторые общие вопросы термодинамики зарождения новой фазы при гомогенной и гетерогенной кристаллизации | 345 |
| Приложения к главе 2 | 351 |
| <i>Приложение 2.1.</i> Способы выражения концентрации компонентов в бинарных сплавах | 351 |
| <i>Приложение 2.2.</i> Структура и свойства расплавов | 352 |
| Приложения к главе 3 | 355 |
| <i>Приложение 3.1.</i> Основные требования к конструкционным материалам | 355 |
| <i>Приложение 3.2.</i> Конструкционная прочность материалов и критерии ее оценки | 360 |
| <i>Приложение 3.3.</i> Обработка металлов давлением | 377 |
| Контрольные вопросы и задания | 388 |
| <i>Глава 1</i> | 388 |
| 1.1. Термодинамика фазовых превращений. | 388 |
| 1.2. Плавление кристаллических твердых тел. | 389 |
| 1.3. Кристаллизация твердых тел | 390 |
| 1.4. Закалка однокомпонентных материалов | 393 |
| 1.5. Сублимация и десублимация | 393 |
| 1.6. Структурные превращения | 394 |
| <i>Глава 2</i> | 395 |
| 2.1. Виды кристаллических сплавов. | 395 |
| 2.2. Фазовые равновесия в сплавах. | 396 |
| 2.3. Диаграммы состояния двухкомпонентных сплавов. | 396 |
| 2.4. Диаграммы состояния трехкомпонентных сплавов | 399 |
| 2.5. Диаграмма равновесия системы железо – углерод. | 402 |
| 2.6. Термическая обработка сплавов. | 409 |
| Контрольные вопросы и задания к приложению (глава 1) | 412 |
| <i>Приложение 1.1.</i> Методы выращивания монокристаллов | 412 |
| <i>Приложение 1.2.</i> Деформация кристаллических материалов | 412 |
| Тесты и задачи | 415 |
| Тесты и задачи к приложениям | 431 |
| Литература | 442 |

Учебное издание

Федотов Александр Кириллович

ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В 3 частях. Часть 2

Фазовые превращения в металлах и сплавах

Учебное пособие

Редактор *А.В. Новикова*

Художественный редактор *Т.В. Шабунько*

Технический редактор *Н.А. Лебедевич*

Корректор *Е.З. Липень*

Компьютерная верстка *Ю.Н. Трусевич*

Подписано в печать 18.04.2012. Формат 84×108/32. Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс». Офсетная печать. Усл. печ. л. 23,52. Уч.-изд. л. 23,83.
Тираж 400 экз. Заказ 966.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Высшая школа”».
ЛИ № 02330/0494062 от 03.02.2009. Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.
e-mail: market@vshph.com http://vshph.com

Филиал № 1 открытого акционерного общества «Красная звезда».
ЛП № 02330/0494160 от 03.04.2009. Ул. Советская, 80, 225409, Барановичи.

Федотов, А. К.

- Ф33 Физическое материаловедение : учеб. пособие. В 3 ч.
Ч. 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах /
А. К. Федотов. – Минск : Выш. шк., 2012. – 446 с. : ил.
ISBN 978-985-06-2063-7.

Рассмотрены основные виды фазовых превращений в кристаллических твердых телах, которые необходимо знать специалисту-материаловеду, имеющему дело с явлениями и процессами, протекающими в конденсированных кристаллических средах при разных видах термических, механических и иных воздействий, в том числе реализуемых в ядерно-энергетических технологиях.

Изложены базовые принципы «конструирования» материалов, на основе которых формируют ту или иную структуру и придают те или иные функциональные свойства кристаллическим материалам.

Для студентов, специализирующихся в области теплофизики кристаллических материалов, проблем энергоэффективности и радиационного материаловедения. Будет полезно аспирантам, инженерам и исследователям.

УДК [669.017 + 669.04/.05](075.8)
ББК 34.2я73