

А.К. Федотов В.М. Анищик
М.С. Тиванов

Физическое материаловедение

В 3 частях

Часть 3. Материалы энергетики
и энергосбережения

*Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений
высшего образования
по специальности «Физика (ядерные физика
и технологии)»*



Минск
«Вышэйшая школа»
2015

УДК 620.9:620.22(075.8)
ББК 31я73
Ф34

Рецензенты: кафедра «Машины и технология обработки металлов давлением» Белорусского национального технического университета (заведующий кафедрой доктор технических наук, профессор *К.Е. Белявин*); доктор технических наук, профессор, академик Национальной академии наук Беларуси *А.И. Гордиенко*

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

Федотов, А. К.

Ф34 Физическое материаловедение : учеб. пособие. В 3 ч. Ч. 3. Материалы энергетики и энергосбережения / А. К. Федотов, В. М. Анищик, М. С. Тиванов. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 463 с. : ил.

ISBN 978-985-06-2556-4.

В третьей части рассмотрены основные виды материалов, применяемых в ядерной, тепловой, возобновляемой и альтернативной энергетике, а также в целях повышения энергоэффективности и энергосбережения. Главное внимание уделяется изложению базовых принципов придания материалам специальных функциональных свойств и сохранения последних под влиянием термических, механических и радиационных воздействий.

Первая часть «Физическое материаловедение. Физика твердого тела» вышла в 2010 г., вторая часть «Физическое материаловедение. Фазовые превращения в металлах и сплавах» – в 2012 г.

Для студентов учреждений высшего образования по специальности «Физика (ядерная физика и технологии)». Будет полезно аспирантам, магистрантам, инженерам и исследователям, работающим в области физических исследований и контроля свойств специальных материалов.

УДК 620.9:620.22(075.8)
ББК 31я73

ISBN 978-985-06-2556-4 (ч. 3)
ISBN 978-985-06-1924-2

© Федотов А.К., Анищик В.М.,
Тиванов М.С., 2015
© Оформление. УП «Издательство
“Вышэйшая школа”», 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Материалы, обеспечивающие эффективную работу ядерных и теплоэнергетических установок обладают широким спектром функциональных свойств, которые не должны ухудшаться в условиях разного рода внешних воздействий. Применительно к ядерной энергетике к числу таких воздействий относятся не только термические, механические, химические воздействия, а также их комбинации, но и радиационные воздействия. В связи с этим среди других разделов современной науки и инженерии подготовка студентов-физиков и (или) инженеров-технологов, специализирующихся в области энерго-материаловедения по направлению «ядерные энергетические установки», вызывает необходимость давать им глубокие знания в области технологии получения, функционирования и диагностики материалов со специальными свойствами (механическими, тепловыми, прочностными, коррозионными, электрическими, магнитными, радиационными и др.). Без таких знаний невозможно проектировать, создавать и обеспечивать эффективную эксплуатацию ядерных, тепловых и электрических контуров атомных электростанций (АЭС): ядерных энергетических установок (ЯЭУ), теплоэнергетических агрегатов (котлов, паропроводов, парогенераторов, турбин и т.д.) и многих других узлов, устройств и систем современных АЭС, включая системы передачи тепловой и электрической энергии, хранения ядерных отходов, радиационной защиты и др.

Значительная часть узлов и агрегатов в ЯЭУ и тепловом контуре АЭС функционирует в условиях интенсивных термических и механических воздействий, на которые накладывається влияние радиационных полей. Все это может приводить к существенной интенсификации в них процессов тепло- и массопереноса и, как следствие, к интенсивному образованию (либо значительной перестройке) дефектов кристаллической структуры, изменению зеренной структуры и фазового состояния материала. Последнее, в свою очередь, может вызвать радикальные изменения физико-химических свойств материала, включая их полную деградацию и выход отдельных деталей и узлов из строя.

В данной части учебного пособия демонстрируется глубокая взаимосвязь между структурой и свойствами материалов,

которые используются собственно в энергетике (включая ядерную, тепло- и электроэнергетику), возобновляемой энергетике, а также способствуют повышению энергоэффективности применяемых технологий и энергосбережению (включая материалы, используемые в датчиках, преобразователях и сенсорах систем контроля). Изучение указанной взаимосвязи базируется на представлениях об атомно-электронной структуре, а также механизмах фазовых превращений в материалах, которые были изложены в предыдущих двух частях данного учебного пособия.

Настоящее издание стало возможным благодаря богатому опыту авторов в чтении курсов по физике твердого тела, физическому и радиационному материаловедению и ряду смежных вопросов. Она, в частности, создана на базе системы специальных лекционных курсов «Материалы ядерной техники», «Физическое материаловедение», «Энергоматериаловедение», «Специальные материалы для энергетики и энергосбережения», «Материалы со специальными теплофизическими свойствами», читавшихся сотрудниками физического факультета Белорусского государственного университета профессорами А.К. Федотовым и В.М. Анищиком, а также доцентом М.С. Тивановым для студентов кафедры физики твердого тела, кафедры физики полупроводников и кафедры энергофизики по специализациям «Физика твердого тела», «Радиационное материаловедение», «Энергофизика», «Теплофизика», «Новые материалы» и др., а также необходимых книг, приведенных в списке литературы.

При создании этой завершающей части учебного пособия по физическому материаловедению перед авторами стояла непростая задача. С одной стороны, предлагаемый студентам текст должен базироваться на тех физических принципах «конструирования» материалов с особыми функциональными свойствами, которые были изложены в предыдущих двух частях данного пособия. С другой стороны, он должен быть хорошо иллюстрирован и понятен студентами с разным исходным уровнем подготовки в области физики (она весьма существенно различается в классических и технических университетах). Кроме того, изложение материала должно быть достаточно лаконичным, поскольку количество учебников и учебных пособий, используемых для подготовки студентов в области материалов для энергетики и энергосбережения, весьма велико. В связи с этим относительная краткость описа-

ния свойств и областей применения специальных материалов в энергетике и энергосбережении, а также излагаемых принципов их создания выглядит вполне оправданной.

Учебное пособие содержит контрольные вопросы и задания разного типа, выполнение которых позволит читателю вести самоконтроль за изучаемым материалом.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

В ч. 1 данного учебного пособия указывалось, что обеспечение роста экономического благосостояния любого современного государства до сих пор вызывало непрерывное наращивание потребления энергии. Такой сценарий развития энергетики привел к ряду отрицательных последствий. В результате специалисты осознали наличие глобальной энергетической проблемы, что заставило их пересмотреть экстенсивный путь развития энергетики как единственный способ улучшения жизни человечества. По этой причине в XXI в. глобальная стратегия развития энергетики, а следовательно, и всей цивилизованной жизни на Земле строится, исходя из признания существования так называемой 3Э-трилеммы (рис. В.1), которая устанавливает взаимосвязь между развитием экономики, энергетики и экологии. При развитии цивилизации по стандартному капиталистическому пути для активизирования экономического развития (Э: Экономика) необходимо увеличивать расход (значит и производство) энергии (Э: Энергетика), что создает серьезные экологические проблемы (Э: Экология) вследствие увеличения выбросов вредных веществ в окружающую среду. И, наоборот, если политический выбор государств и мирового сообщества в целом на-

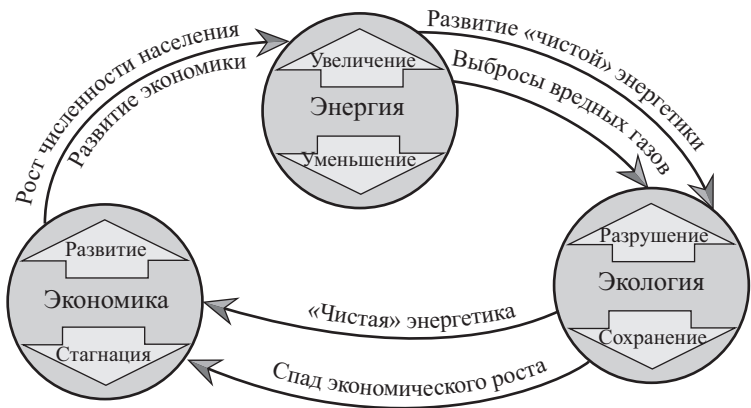


Рис. В.1. Диаграмма взаимосвязи между развитием экономики, энергетики и экологии

правляется на снижение вредных выбросов, развитие экономики тормозится. В этом и состоит суть 3Э-трилеммы!

Естественным способом разрешения данной трилеммы, который снижает нагрузку на экосистему Земли и не приводит к ухудшению уровня жизни людей, является повышение эффективности использования энергии, в том числе за счет *усовершенствования энергетических технологий*, включая развитие экологически чистых технологий производства, передачи, трансформации, хранения и применения энергии, а также *энергосбережения*. В результате такого подхода, начиная с 70-х гг. XX в. в развитых странах мира (в США, Канаде, Германии, Франции, Голландии и др.) отношение валового национального продукта (ВНП) в сопоставимых ценах к уровню потребления энергии стало непрерывно возрастать (тогда как в первой половине XX в. оно оставалось примерно постоянным).

Одна из причин, приведших к такой тенденции, состоит в перераспределении роли разных видов производства и услуг в экономике современных государств. К примеру, возникшие новые виды техники и технологий характеризуются сравнительно низкими уровнями потребления энергии. Это в первую очередь касается высокоинтеллектуальных информационно-коммуникационных технологий, таких как вычислительная техника, телекоммуникационное оборудование, мобильная телефония и многих других. В то же время именно доля данных продуктов выросла наиболее существенно на рынке продуктов и услуг. Сфера обслуживания как важный и быстро растущий сектор экономики также не является такой энергоемкой, как, например, обрабатывающая промышленность, транспорт, строительство, коммунальное или сельское хозяйство.

Другой очевидной причиной является то, что решению сформулированной 3Э-трилеммы способствует разработка новых или значительное улучшение потребительских свойств уже существующих материалов, без чего невозможно как создание современных энергоэффективных технологий, так и энергосбережение. *Материалы могут влиять не только на стоимость производства, передачи и трансформации энергии, но и на эффективность (рациональность) ее потребления*. Во многих секторах экономики эта эффективность все еще низка. Для жилищного и торгового секторов большинства государств характерна эффективность в 65–70%, которая следует из простого отношения тепла, испускаемого отопительными системами, к содержанию энергии в используемом то-

пливе. Однако общая термодинамическая эффективность отопления или кондиционирования зданий на самом деле оказывается еще ниже – 10–20%. В транспортном секторе этот показатель также равен 10–15%. Промышленный сектор является наиболее экономным потребителем энергии, поскольку здесь эффективность колеблется от 10 до 35%. В целом во всей экономике реальная эффективность потребления энергии во многих странах не превышает 20%.

Такая относительно низкая эффективность использования энергии при создании продукции и услуг объясняется как невысокими коэффициентами полезного действия (КПД) самих технологий (по крайней мере, большинства из них), так и потерями на пути применения произведенной энергии. Рассмотрим различные стадии процесса, при котором химическая энергия нефти преобразуется в механическую работу движения автомобиля. Стадии добычи сырой нефти и ее переработки для получения бензина и его последующей транспортировки относительно эффективны, поскольку в целом поглощают не более 20% всей энергии, содержащейся в нефти. В результате остаток равен 80%. Общая эффективность на стадии сжигания бензина в двигателе внутреннего сгорания автомобиля оставляет от 80% энергии не более 25–30%, так как КПД двигателя не превышает 30–35%. Возникающие при передаче вращения от двигателя на колеса и при взаимодействии колес с дорожным покрытием дополнительные механические потери приводят к тому, что в конечном счете лишь около 10% всей энергии, заключенной в сырой нефти, расходуется на перемещение автомобиля.

В связи с этим в мире постоянно идет борьба за увеличение эффективности производства и потребления энергии путем оптимизации конструкций энергетических установок и их частей, создания более энергоэффективных технологий использования энергии, в том числе за счет улучшения функциональных свойств специальных материалов. Например, для увеличения эффективности тепловых турбин необходимо повышать температуру пара. С этой целью следует использовать либо керамические лопатки на основе нитрида или карбида кремния, либо специальные композиционные материалы, которые могут выдерживать температуры свыше 1473 К.

Другая принципиальная возможность повышения КПД энергетических установок, например электрических систем, заключается в понижении рабочих температур (при замене

обычных электрических проводов из алюминия и меди на сверхпроводниковые, последние при низких температурах будут терять свойство электрического сопротивления). Сверхпроводящие кабели, в которых токнесущие сверхпроводящие жилы охлаждаются ниже критической температуры (при этом данный материал и становится сверхпроводником), могут заменить воздушные линии электропередач с грозоздкими мачтами и передавать энергию с меньшими потерями. Дополнительные затраты на их охлаждение окупаются на территории больших городов (на относительно небольших расстояниях) или там, где устройство воздушных линий электропередач запрещено.

Влияние материалов на использование энергии проявляется еще и в том, что они могут повышать надежность и безопасность производства и преобразования энергии. Надежность является результатом хорошего проектирования, тщательного анализа и предварительных испытаний и основывается на понимании того, как ведут себя применяемые материалы при рабочих условиях (температурах, давлении, радиации, механических и химических воздействиях и т.д.). Значение фактора безопасности в энергетике неуклонно возрастает, и в будущем она должна стать в полном смысле слова безаварийной.

Безопасная технология необходима для организации длительного хранения радиоактивных отходов. Общепринятая стратегия в данной области предусматривает три последовательные стадии. Сначала удаляемый материал инкорпорируется в относительно нерастворимое твердое вещество, которое затем заключается в герметичный высокопрочный контейнер, и лишь потом производится захоронение контейнеров в местах, где существует сухая и стабильная геологическая структура. Для первых двух стадий требуется разработка специальных материалов, которые не допускают утечек радиоактивных веществ, в том числе под влиянием влажности и механических воздействий.

Показано, что боросиликатное стекло прекрасно капсулирует радиоактивные отходы, т.е. может служить подходящим материалом для первой из описанных выше стадий. Идут поиски стабильных керамических материалов в качестве ловушек для радиоактивных атомов (например, в виде смеси минералов, включающих оксиды титана и циркония). Природные виды этих минералов абсолютно нерастворимы и, как установлено, могут удерживать атомы радиоактивных элементов,

включая уран и торий, в течение сотен миллионов лет. Однако проблема состоит в том, чтобы разработать материалы, пригодные для стабилизации смесей не только радиоактивных элементов, но и их соединений с другими химически активными элементами, входящими в различные виды отходов.

На второй стадии захоронения радиоактивных отходов нужно обеспечить непроницаемую преграду между отходами и окружающей геологической средой хранилища. В настоящее время в качестве материала для оболочек используют специальный титановый сплав, на поверхности которого в воздушной атмосфере образуется оксидная пленка, защищающая его от коррозии.

В данной части учебного пособия рассматриваются материалы, которые не только применяются собственно в энергетике (включая ядерную), но и способствуют повышению энергоэффективности используемых технологий и энергосбережению (в том числе применяемые в датчиках и сенсорах систем контроля). Настоящее издание состоит из четырех разделов – материалы ядерной энергетике; металлические материалы теплоэнергетики и энергосбережения; неметаллические материалы теплоэнергетики и энергосбережения; специальные материалы энергетике и энергосбережения. Такая структура обусловлена тем, что при реализации ядерно-энергетических технологий для обеспечения повышения энергоэффективности в тепло- и электроэнергетике и тепловых контурах ядерных станций, а также при разработке новых энергосберегающих технологий необходимо использовать материалы, которые должны обладать набором особых (часто взаимоисключающих друг друга) функциональных свойств.

Вклад материаловедения в повышение эффективности извлечения, преобразования, передачи, хранения и использования энергии является решающим для экономики. Можно надеяться, что дальнейшие достижения материаловедения обеспечат получение и потребление энергии в количествах, необходимых для непрерывного роста экономического благосостояния во всем мире (на фоне возрастания народонаселения Земли) и одновременно снижения экологической нагрузки на окружающую среду. Однако для этого нужно точно понимать, какие виды материалов требуются и какими свойствами они должны обладать. Следует отметить, что различные области энергетике предъявляют разные требования к новым материалам. В табл. В.1 они сгруппированы

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение.....	6
Список сокращений.....	14
Глава 1. Материалы ядерной энергетики.....	15
1.1. Общие требования к материалам ядерной энергетики. .	15
1.2. Ядерное топливо	18
1.2.1. Уран.....	19
1.2.2. Торий	30
1.2.3. Плутоний.....	32
1.3. Конструкционные материалы для ядерной энергетики .	37
1.3.1. Алюминий и его сплавы.....	38
1.3.2. Бериллий	43
1.3.3. Графит	46
1.3.4. Магний и его сплавы	51
1.3.5. Титан и его сплавы	54
1.3.6. Цирконий.....	59
1.3.7. Стали	67
Глава 2. Металлические материалы теплоэнергетики и энергосбережения.....	76
2.1. Конструкционные металлические материалы.....	76
2.2. Износостойкие металлы и сплавы	84
2.3. Материалы с высокими упругими свойствами.....	92
2.4. Металлические материалы с малой плотностью	102
2.5. Жаростойкие металлические материалы.....	109
2.5.1. Жаростойкость металлов	112
2.5.2. Жаростойкость сплавов	116
2.6. Жаропрочные металлические материалы	119
2.6.1. Способы повышения жаропрочности металлических материалов.....	123
2.6.2. Основные жаропрочные сплавы.....	126
2.7. Коррозионностойкие металлы и сплавы	131
2.7.1. Классификация коррозионных процессов	131
2.7.2. Виды электрохимической коррозии	134
2.8. Металлические материалы с особыми теплофизическими свойствами.....	141
2.8.1. Материалы с заданным температурным коэффициентом расширения	141
	461

2.8.2. Теплопроводность металлических материалов . . .	145
2.9. Металлические материалы с особыми магнитными свойствами	150
2.9.1. Магнитомягкие металлы и сплавы	153
2.9.2. Магнитотвердые сплавы	160
2.10. Металлические материалы с особыми электрическими свойствами	168
2.10.1. Высокопроводниковые металлические материалы . .	175
2.10.2. Электротехнические металлические сплавы	180
2.11. Сверхпроводящие материалы и их применение в энергетике	184
Глава 3. Неметаллические материалы теплоэнергетики и энергосбережения.	192
3.1. Общие сведения о неметаллических неорганических материалах	192
3.2. Неорганические стекла и стеклокерамики	196
3.2.1. Основные характеристики минеральных неорганических стекол	201
3.2.2. Производство силикатных стекол	202
3.2.3. Типы силикатных стекол	209
3.2.4. Физико-химические свойства и применение стекол . .	210
3.2.5. Стеклокерамики (ситаллы)	218
3.3. Керамические материалы	221
3.3.1. Общие сведения о керамических материалах	221
3.3.2. Керамические материалы на основе оксидов металлов	224
3.3.3. Свойства оксидных керамик	232
3.3.4. Цемент и бетон	243
3.3.5. Керметы	252
3.3.6. Специальные керамики	260
3.4. Органические материалы	274
3.4.1. Полимеры	274
3.4.2. Пластмассы	292
3.4.3. Высокоупругие полимерные материалы (каучуки и резины)	302
3.4.4. Клеящие полимерные материалы	310
3.4.5. Древесные материалы	314
3.5. Композиционные материалы	322
Глава 4. Специальные материалы энергетики и энергосбережения.	336
4.1. Материалы фотовольтаики	337
4.1.1. Фотовольтаический эффект и принцип работы солнечного элемента	337

4.1.2. Требования к фотоактивным материалам для создания солнечного элемента на основе полупроводникового <i>p-n</i> -перехода	347
4.1.3. Кристаллический кремний.	350
4.1.4. Аморфный кремний	364
4.1.5. Теллурид кадмия.	366
4.1.6. Твердые растворы $\text{Cu}(\text{In, Ga})(\text{S, Se})_2$	369
4.1.7. Иные виды фотовольтаических устройств	372
4.2. Материалы и устройства для теплового преобразования солнечной энергии	377
4.3. Термоэлектрические материалы в энергетике	383
4.3.1. Эффекты Зеебека, Пельтье и Томсона.	384
4.3.2. Природа термоэлектрического эффекта, термоэлектрическая добротность	391
4.3.3. Физика термоэлектричества в металлах и полупроводниках	394
4.3.4. Механизмы, определяющие значения термоэлектродвижущей силы	398
4.3.5. Способы достижения высокой термоэлектрической добротности	400
4.3.6. Применение термоэлектричества	406
4.4. Материалы водородной энергетики	413
4.4.1. Материалы для хранения водорода.	414
4.4.2. Материалы для топливных элементов	424
4.4.3. Водородная хрупкость	430
4.5. Материалы для аккумуляторов.	433
Контрольные вопросы и задания	442
Литература	456

Учебное издание

Федотов Александр Кириллович
Анищик Виктор Михайлович
Тиванов Михаил Сергеевич

ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В 3 частях

Часть 3. Материалы энергетики и энергосбережения

Учебное пособие

Редактор *И.В. Тургель*
Художественный редактор *Т.В. Шабунько*
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*
Корректор *Е.З. Липень*
Компьютерная верстка *Н.В. Шабуньки*

Подписано в печать 28.07.2015. Формат 84×108/32. Бумага офсетная. Гарнитура «Нимбус». Офсетная печать. Усл. печ. л. 24,36. Уч.-изд. л. 26,9. Тираж 400 экз.
Заказ 1341.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.
Пр. Победителей, 11, 220048, Минск.
e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Открытое акционерное общество «Типография “Победа”».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя и
распространителя печатных изданий № 2/38 от 29.01.2014. Ул. Тавлая, 11, 222310,
Молодечно.