

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Допущено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности непрерывной образовательной
программы высшего образования
«Ядерные физика и технологии»



Минск
«Адукацыя і выхаванне»
2025

УДК 621.039.1(075.8)
ББК 31.4я73
К65

Авторы: И. И. Чернов, М. С. Стальцов, А. В. Тенишев, В. В. Углов, Н. Н. Черенда

Рецензенты: кафедра материаловедения в машиностроении БНТУ (заведующий кафедрой доктор технических наук, профессор *В. М. Константинов*); заведующий отделением физики плазмы и плазменных технологий Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси доктор физико-математических наук, член-корреспондент НАН Беларуси *В. М. Асташинский*

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

ISBN 978-985-34-0229-2

© Оформление. Республиканское
унитарное предприятие
«Издательство “Адукацыя
і выхаванне”», 2025

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗ	— активная зона
АТЭЦ	— атомная теплоэлектроцентраль
АЭС	— атомная электростанция
БН	— натриевый реактор на быстрых нейтронах
БОР-60	— быстрый опытный реактор мощностью 60 МВт
ВВЭР	— водо-водяной энергетический реактор
ВВЭР-СКД	— водо-водяной энергетический реактор с водой сверхкритического давления
ВВЭРД	— водо-водяной энергетический реактор под давлением (корпусной)
ВВЭРК	— водо-водяной энергетический реактор кипящий
ВТГР	— высокотемпературный газоохлаждаемый реактор
ВТРО	— высокотемпературное радиационное охрупчивание
ВХР	— водно-химический режим
ГБР	— газовый реактор на быстрых нейтронах
ГГР	— газографитовый реактор
ГНЦ	— главный насос циркуляционный
ГПУ	— гексагональная плотно упакованная (структура, решетка)
ГЦК	— гранецентрированная кубическая (структура, решетка)
ГЦТ	— гранецентрированная тетрагональная (структура, решетка)
ДРР	— деформация радиационного роста
ДУО	— дисперсное упрочнение оксидами
ЖМ	— жидкий металл
ЖМТ	— жидкометаллический теплоноситель
ЖСР	— жидкосолевой реактор
ЗГР	— замедленное гидридное растрескивание
ИНПА	— индуцированная напряжением преимущественная абсорбция точечных дефектов (SIPA — stress-induced preferential absorption)
КМ	— конструкционный материал
КРН	— коррозионное растрескивание под напряжением
КТР	— коэффициент термического расширения
ЛГО	— локальная глубина окисления
ЛЭ	— легирующий элемент

МИР	—	материаловедческий исследовательский реактор, г. Дмитровград
МКК	—	межкристаллитная коррозия
МР	—	материаловедческий реактор, г. Москва
МРС	—	магнетронные распылительные системы
НВАЭС	—	Ново-Воронежская атомная электростанция
НТРО	—	низкотемпературное радиационное охрупчивание
ОЦК	—	объемно центрированная кубическая (структура, решетка)
ПД	—	продукт деления
РБМК	—	реактор большой мощности канальный
РБН	—	реактор на быстрых нейтронах
РЗМ	—	редкоземельные металлы
СБР	—	свинцовый реактор на быстрых нейтронах
СУЗ	—	система управления и защиты
СФС	—	структурно-фазовое состояние
т.а.	—	выгорание ядерного топлива в ат. % (т.а. — тяжелые атомы)
ТВС	—	тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ	—	тепловыделяющий элемент
ТУ	—	технические условия
ТЯР	—	термоядерный реактор
ХД	—	холодная деформация
ЯТ	—	ядерное топливо
ЯЭУ	—	ядерная энергетическая установка
BWR	—	Boiling Water Reactor (реактор кипящий типа ВВЭРК)
CANDU	—	Canada Deuterium Uranium (канадский дейтериевый реактор)
LOCA	—	Loss of Coolant Accident (авария с потерей теплоносителя)
MOX	—	mixed-oxide fuel (смешанное уран-плутониевое оксидное топливо)
pH	—	водородный показатель (уровень кислотности водного раствора)
ppm	—	parts per million (частей на миллион)
PWR	—	Pressurized Water Reactor (реактор корпусной типа ВВЭРД)
$\tau_{1/2}$	—	период полураспада

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные технологии стали неотъемлемой частью жизни не только отдельно взятого человека, но и всего общества в целом. В том числе ведущие роли в становлении нового технологического уклада отводятся ядерной — в настоящее время и термоядерной — в будущем энергетике. Ядерную энергетику настоящего следует отнести к «зеленой энергетике», поскольку она не потребляет кислорода при выработке электроэнергии и тепла. Разрабатываются и используются технологии, позволяющие снизить энергоемкость, а также материалоемкость производства товаров и создавать конструкционные материалы нового типа с изначально заложенными в них свойствами. Следовательно, развитие производительных сил общества требует использования все новых видов конструкционных материалов с определенным набором свойств.

В связи с этим важной причиной создания новых материалов со специфическими свойствами является ускоренное развитие высокотехнологичных отраслей традиционной и ядерной энергетики, военной промышленности, авиационной и космической техники, химической промышленности, медицинской техники, приборостроения, микроэлектроники и т. д.

Материалы, которые используются в технике, можно разделить (условно) на два класса — конструкционные материалы, несущие физическую нагрузку и обеспечивающие жаропрочные свойства для длительного использования конструктивных элементов при повышенных температурах и заданном напряжении, и функциональные материалы, работающие в ненагруженном или слабонагруженном состоянии, но обладающие определенным физическим свойством для обеспечения работоспособности данного конструктивного элемента. Иногда материалы одновременно являются и конструктивными, и функциональными. Например, оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) реактора на тепловых нейтронах, выполненные из циркониевого сплава, несут механическую нагрузку (как конструкционный материал) и имеют малое сечение захвата тепловых нейтронов (как функциональный материал), при этом топливная составляющая в ТВЭЛАХ водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), реакторов большой мощности канальных (РБМК), канадских дейтериевых реакторов (CANDU), реакторов на быстрых нейтронах (РБН) является чисто функциональным материалом. Однако в газографитовых реакторах (ГГР), работающих на природном уране,

металлический урановый стержень является одновременно материалом, несущим нагрузку, т.е. и конструкционным, и функциональным, дающим тепло при делении ^{235}U , который составляет всего около 0,71 % в природном уране. В таких реакторах в отличие, например, от ВВЭР оболочку твэла, выполненную из малолегированного магниевого сплава, нельзя считать конструкционным материалом, несущим физическую нагрузку, а следует считать функциональным материалом, предотвращающим контакт топлива с теплоносителем.

Естественной является сильная зависимость свойств материалов от воздействия внешних факторов: механических нагрузок, температуры, агрессивных коррозионных сред, радиационных полей и т.д. В связи с этим для обеспечения сохранения работоспособности материалов в рабочих условиях необходимо знание принципов их создания и изменения свойств при различном внешнем воздействии.

В данном учебном пособии рассмотрены основные конструкционные материалы, использующиеся в современных ядерных реакторах: циркониевые сплавы для активной зоны (АЗ) реакторов на тепловых нейтронах (ВВЭР, РБМК и CANDU), корпусные стали ВВЭР, жаропрочные коррозионно-стойкие стали аустенитного класса для АЗ РБН, коррозионно-стойкие хромистые стали как перспективные конструкционные материалы для замены высокораспухающих аустенитных сталей.

Цель данного учебного пособия — ознакомить студентов с физическими принципами создания основных реакторных конструкционных материалов, обладающих заданными свойствами, а также областями их использования в ядерных энергетических установках (ЯЭУ).

Авторы выражают благодарность рецензентам за советы и рекомендации при подготовке данного учебного пособия к изданию.

Для улучшения содержания учебного издания авторы будут признательны всем читателям за отмеченные недостатки, замечания и предложения, которые можно отправлять на электронные адреса: ПChernov@mephi.ru; uglov@bsu.by

1 ТИПЫ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

Материалы, используемые в ядерных реакторах, можно условно разделить на два класса: конструкционные и функциональные.

Конструкционные материалы (КМ) обеспечивают прочность конструктивных элементов реактора, т. е. несут механическую нагрузку. К таким материалам относятся сплавы циркония, алюминия, магния в АЗ реакторов на тепловых нейтронах и стали в реакторах на быстрых нейтронах. Кроме того, в ГГР и РБМК в качестве КМ используется ядерный графит.

Существует множество видов классификации ЯЭУ. Теоретически возможно более 100 разных типов реакторов, различающихся количеством тепловых контуров, видом ядерного топлива (ЯТ), замедлителем, теплоносителем, назначением и т. д. Тем не менее определяющей является классификация по числу контуров: технологическая схема атомной электрической станции (АЭС) зависит от типа реактора, вида теплоносителя и замедлителя, а также от ряда других факторов, она может быть одноконтурной, двухконтурной и трехконтурной (рис. 1.1).

В одноконтурных реакторах (реакторе кипящем типа водо-водяного энергетического реактора под давлением (ВВЭРД) (BWR) в дальнем зарубежье, реакторе водяном кипящем мощностью 50 МВт (ВК-50) и РБМК в России) (см. рис. 1.1, *а*) пароводяная смесь после АЗ (1) направляется в барабан-сепаратор для отделения пара, из которого насыщенный пар поступает в турбину (6). После турбины отработавший пар идет в конденсатор (8), а оттуда насосом (9) подается обратно в реакторный контур. Циркуляция теплоносителя в реакторном контуре может быть *принудительной* с помощью насосов 9 или *естественной*.

На АЭС с РБМК применяется только принудительная циркуляция. Все оборудование на одноконтурной АЭС работает в радиационных условиях, так как контуры теплоносителя и рабочего тела совмещены и активированная вода в виде пара поступает на турбину. Это усложняет эксплуатацию и ремонт оборудования. Однако схема такой станции проста и параметры рабочего тела равны параметрам теплоносителя.

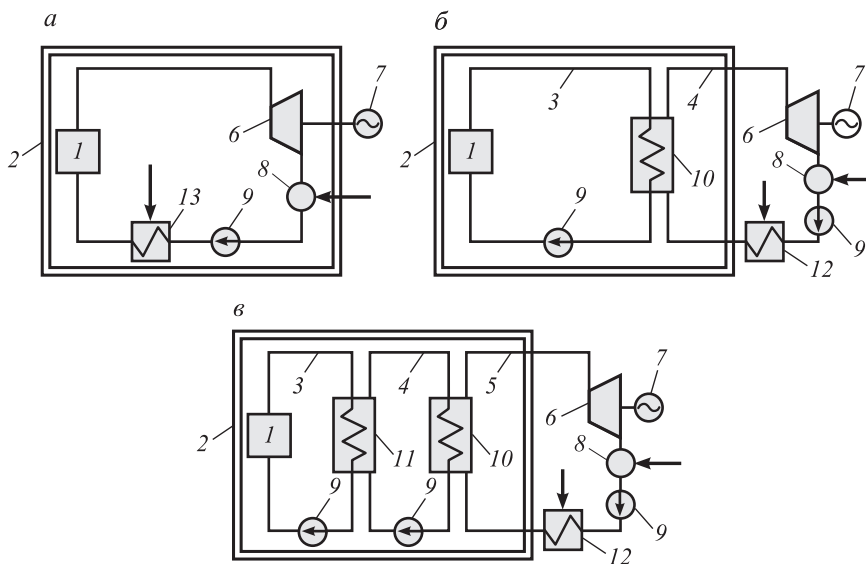


Рис. 1.1. Технологические схемы АЭС:

а – одноконтурная; б – двухконтурная; в – трехконтурная; 1 – реактор с первичной биологической защитой; 2 – вторичная биологическая защита; 3 – первый контур теплоносителя; 4 – второй контур; 5 – третий контур; 6 – турбина; 7 – генератор; 8 – конденсатор (или газоохладитель); 9 – насосы (или компрессоры); 10 – парогенератор; 11 – теплообменник; 12 – регенеративный подогреватель высокого давления; 13 – регенеративный подогреватель низкого давления

На двухконтурной АЭС с ВВЭРД или реакторами корпусными типа ВВЭРД (PWR) (см. рис. 1.1, б) контур теплоносителя работает в радиационных условиях (первый контур). Теплоноситель – вода (без кипения) с помощью главных насосов циркуляционных (ГНЦ) (9) подается в АЗ (1) и далее поступает в парогенератор (10), где отдает тепло рабочему телу второго контура. Поскольку вода практически *несжимаема*, то для безопасной работы реактора на контуре циркуляции теплоносителя устанавливают компенсатор давления, поддерживающий давление в первом контуре постоянным.

Для двухконтурной АЭС с *газовым* теплоносителем (ГГР, высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР)) компенсатор давления отсутствует. Пар, вырабатываемый в парогенераторе, направляется на турбину (6), после конденсации отработавшего пара в конденсаторе (8) насосом (9) конденсат подается обратно в парогенератор (10).

Передача тепла в парогенераторе через поверхность *требует перепада температур* между теплоносителем и рабочим телом. Чтобы не допустить кипения в реакторе, необходимо создать давление в пер-

вом контуре существенно выше давления во втором контуре. По этой причине параметры рабочего тела на двухконтурной АЭС с ВВЭР *всегда ниже* параметров теплоносителя.

На двухконтурной АЭС с газовым теплоносителем давление рабочего тела *превышает* давление теплоносителя, так как у газов *отсутствует зависимость давления от температуры*, а у воды давление и температура жестко связаны.

На трехконтурных АЭС (реакторы на быстрых нейтронах с электрической мощностью 600 МВт (БН-600), с электрической мощностью 800 МВт (БН-800)) (см. рис. 1.1, в) в качестве теплоносителя используют натрий. Если реактор двухконтурный (натрий в первом контуре, вода — во втором), то при образовании дефекта в теплообменнике химическая реакция взаимодействия натрия с водой протекает очень быстро и сопровождается взрывом. Это может привести к выбросу радиоактивности из первого контура. Поэтому для предотвращения таких ситуаций первый контур с радиоактивным Na разделяют от контура рабочего тела промежуточным контуром с *нерадиоактивным* Na.

Радиоактивный Na в первом контуре насосом (9) прокачивается через АЗ (1) и подается в промежуточный теплообменник (11). В промежуточном контуре нерадиоактивный Na насосом (9) подается в промежуточный теплообменник (11), затем поступает в парогенератор (10). В первом и в промежуточном контурах натрий не изменяет своего агрегатного состояния, поэтому в этих контурах необходимы компенсаторы давления. В третьем контуре пар после парогенератора (10) направляется в турбину (6) и после конденсации пара в конденсаторе (8) насосом (9) конденсат (вода) возвращается в парогенератор (10).

У жидкометаллического теплоносителя (ЖМТ), как и у газового, отсутствует зависимость между давлением и температурой. Поэтому давление рабочего тела (пара) будет *выше* давления натрия. При разуплотнении парогенератора (10) вода может попадать в натрий и может произойти бурная реакция, *но не с радиоактивным натрием*.

Кроме классификации АЭС по числу контуров можно также подразделять ЯЭУ по другим признакам:

- по обогащению топлива: на уране природном (например, ГГР, CANDU), слабообогащенном (до 5 %) (например, ВВЭР, РБМК), среднеобогащенном (15–25 %) (реакторы на быстрых нейтронах), высокообогащенном (до 90 % и выше) (например, исследовательские реакторы);

- по типу теплоносителя: с водой под давлением, кипящей водой, органическим, жидкометаллическим, газовым теплоносителем;

- по типу реактора и энергии нейтронов: корпусные, каналные, на тепловых нейтронах; на быстрых нейтронах, т. е. реакторы, не использующие замедлителей; на промежуточных нейтронах; охлаждаемые теплоносителем, не находящимся под давлением (например, реакторы бассейного типа);

- по типу замедлителя: с легководным, тяжеловодным, графитовым и другими замедлителями;

- по параметрам пара и типу турбин: с турбинами на насыщенном и перегретом паре и др.

Классификация реакторов по назначению:

- реакторы для выработки электрической энергии (ВВЭР и др.);
- термоэлектрические или термоэмиссионные ядерные реакторы с прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую (например, ядерно-энергетическая термоэмиссионная установка «Топаз», другие спутниковые реакторы и т. п.);

- реакторы для производства высокопотенциальной тепловой энергии, непосредственно используемые в химической или металлургической промышленности для осуществления различных химических реакций, опреснения морской воды или получения энергоносителей, например водорода (ВТГР и др.);

- реакторы для производства наряду с электричеством тепловой энергии для теплоснабжения, предназначенные для промышленной и бытовой теплофикации (атомная теплоэлектроцентраль (АТЭЦ) и др.);

- исследовательские ядерные реакторы (служат источниками нейтронного и гамма-излучения для научных и технических целей, в частности, облучения реакторных материалов в материаловедческих целях);

- промышленные ядерные реакторы, используемые для производства делящегося плутония и радиоактивных изотопов;

- облучательные ядерные реакторы, предназначенные для обработки материалов нейтронным или гамма-излучением в целях улучшения их свойств;

- термоядерные реакторы, использующие излучение для ускорения химических реакций;

- реакторы — источники нейтронов для активационного анализа нуклидного состава материалов;

- реакторы для биомедицинских целей и обработки пищевых продуктов;

- импульсные реакторы-гамма-лазеры, в которых энергия излучения, включая энергию осколков деления, используется для накачки энергии в активное вещество лазеров (так называемые лазеры

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	3
ПРЕДИСЛОВИЕ	5
1. ТИПЫ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ	7
2. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	12
3. ЦИРКОНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ	16
3.1. Текстура и ползучесть изделий из циркония и его сплавов.	21
3.2. Влияние легирования на структуру, механические свойства и жаропрочность циркония	23
3.3. Коррозионная стойкость циркония и его сплавов	40
3.3.1. Взаимодействие циркония с кислородом	43
3.3.2. Коррозия циркония на воздухе, в воде и паре	44
3.3.3. Влияние примесей и легирующих элементов на коррозионную стойкость циркония	47
3.3.4. Влияние структурно-фазового состояния на коррозию циркониевых сплавов	54
3.3.5. Влияние внешних факторов на коррозию циркониевых сплавов.	57
3.4. Взаимодействие циркония и его сплавов с водородом	60
3.4.1. Замедленное гидридное растрескивание	64
3.4.2. Локальное гидрирование	67
3.5. Коррозионное растрескивание под напряжением	68
3.6. Радиационная стойкость циркония и его сплавов	70
3.6.1. Радиационное упрочнение и охрупчивание	70
3.6.2. Радиационное формоизменение	72
3.7. Перспективы разработки толерантного ядерного топлива с циркониевой оболочкой применительно к условиям аварии типа аварии с потерей теплоносителя	84
3.7.1. Характеристика стадий протекания аварии типа аварии с потерей теплоносителя.	85
3.7.2. Методы создания оболочек твэлов для толерантного топлива с использованием нанесения покрытий	88

4. НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ ПЕРЛИТНОГО КЛАССА (КОРПУСНЫЕ СТАЛИ ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА).....	94
4.1. Маркировка легированных конструкционных сталей.....	95
4.2. Химический состав и структура перлитных сталей.....	97
4.3. Термическая обработка перлитных сталей.....	106
4.4. Коррозионная стойкость перлитных сталей.....	108
4.5. Взаимодействие перлитных реакторных сталей с водородом... ..	110
4.6. Радиационная стойкость перлитных сталей.....	112
4.7. Восстановление свойств облученных корпусных сталей.....	123
5. ЖАРОПРОЧНЫЕ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА.....	126
5.1. Сплавы систем Fe – Cr – Ni и Fe – Cr – Mn.....	127
5.2. Влияние легирования на структуру и свойства аустенитных сталей.....	129
5.3. Коррозионная стойкость аустенитных сталей.....	134
5.3.1. Коррозионная стойкость в воде и паре.....	134
5.3.2. Межкристаллитная коррозия.....	136
5.3.3. Коррозионное растрескивание под напряжением.....	141
5.3.4. Коррозионная стойкость в жидкометаллических теплоносителях.....	145
5.3.5. Коррозионная стойкость при взаимодействии с продуктами деления ядерного топлива.....	148
5.4. Радиационная стойкость аустенитных сталей.....	148
5.4.1. Радиационное упрочнение и охрупчивание.....	148
5.4.2. Радиационное распухание.....	152
6. КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ ХРОМИСТЫЕ СТАЛИ.....	156
6.1. Сплавы системы Fe – Cr.....	156
6.2. Влияние легирования на структуру и свойства хромистых сталей.....	158
6.3. Коррозионная стойкость хромистых сталей.....	167
6.3.1. Коррозия в воде и паре.....	167
6.3.2. Коррозия в жидкометаллических теплоносителях.....	167
6.3.3. Совместимость хромистых сталей с ядерным топливом... ..	170
6.4. Радиационная стойкость хромистых сталей.....	171

6.4.1. Изменение механических свойств хромистых сталей под облучением	171
6.4.2. Радиационное набухание хромистых сталей	174

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ	177
--	------------

ЛИТЕРАТУРА	183
-------------------------	------------

Конструкционные материалы активных зон ядерных энергетических установок : учебное пособие / И. И. Чернов [и др.]. – Минск : Адукацыя і выхаванне, 2025. — 189 с. : ил.
ISBN 978-985-34-0229-2.

Приведены данные о конструкционных материалах для ядерных энергетических установок. Кратко представлены типы атомных реакторов, изложены сведения по эксплуатационным требованиям к конструкционным материалам ядерных энергетических установок. Детально рассмотрены циркониевые сплавы, применяемые в ядерных энергетических установках, а также низколегированные стали перлитного класса, жаропрочные коррозионно-стойкие стали аустенитного класса и коррозионно-стойкие легированные и высоколегированные хромистые стали. Проанализированы способы создания, изменения свойств при различном внешнем воздействии и области применения разных реакторных конструкционных материалов.

Адресовано студентам учреждений высшего образования по специальности «Ядерная физика и технологии».

УДК 621.039.1(075.8)
ББК 31.4я73

Учебное издание

Чернов Иван Ильич
Стальцов Максим Сергеевич
Тенишев Андрей Вадимович и др.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Учебное пособие

Редактор *Т. К. Хваль*. Художественный редактор *В. А. Ярошевич*.
Компьютерная верстка *Н.В. Шабуни*. Корректор *Т. К. Хваль*.

Подписано в печать 16.05.2025. Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 12,0.
Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 200 экз. Заказ 611.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Адукацыя і выхаванне”».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/19 от 02.08.2013. Ул. Будённого, 21, 220070, г. Минск.

Производственное дочернее унитарное предприятие «Типография Федерации профсоюзов
Беларуси». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/18 от 26.11.2013. Пл. Свободы, 23-94,
220030, г. Минск.