

3. Han, J. H. A Review of Food Packaging Technologies and Innovations / J. H. Han // Innovations in Food Packaging / J. H. Han. – Academic Press, 2014. – Ch. 1. – P. 3–12.

4. Савицкая, Т. А. Биоразлагаемые композиты на основе природных полисахаридов / Т.А. Савицкая // Полимерные материалы и технологии. – 2018. – С. 12–13.

5. Benbettaieb, N. Bioactive edible films for food applications: mechanisms of anti-microbial and antioxidant activities / N. Benbettaieb, F. Debeaufort, T. Karbowiak // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2018. – Vol. 21, № 59. – P. 3431–3455.

МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ MATERIALS USED IN THE DESIGN OF FUEL ELEMENTS

В. И. Красовский^{1,2}, А. А. Будько^{1,2}

V. I. Krasovsky^{1,2}, A. A. Budko^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, БГУ

*²Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь
kfm@iseu.by, budko.anzhelika@gmail.com*

¹Belarusian State University, BSU

²International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

В данной работе рассматриваются конструкционные материалы, используемые для оболочек ТВЭЛ. Приведены основные требования к оболочкам ТВЭЛ и общая характеристика материалов.

This paper considers structural materials used for fuel element cladding. The basic requirements for fuel-element cladding and the general characteristics of materials are given.

Ключевые слова: тепловыделяющие элементы, материал оболочки, физические свойства, коррозионная стойкость.

Keywords: fuel elements, shell material, physical properties, corrosion resistance.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-292-295>

Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) являются преимущественно энергонапряженными частями ядерного реактора. Находясь в прямом контакте с топливом и теплоносителем, ТВЭЛ испытывают постоянные механические, тепловые и радиационные нагрузки. После окончания эксплуатации ТВЭЛ, при условии отказа от переработки, хранятся в специальных хранилищах в течение длительного времени. Хотя условия хранения значительно мягче в сравнении с условиями эксплуатации, время данного процесса также может привести к нарушению герметичности вследствие процессов коррозионного разрушения. В связи с этим, стабильность ТВЭЛ и их материалов всегда остается основополагающей для недопущения аварийных ситуаций.

Оболочка ТВЭЛ работает в очень сложных условиях в течение длительного времени при высоких параметрах теплоносителя и больших тепловых нагрузках; оболочка должна удовлетворять многим требованиям, быть механически надежной и обеспечивать постоянство формы, размеров и герметичность ТВЭЛ при длительной эксплуатации реактора; иметь необходимые физические свойства (температуры плавления, термическое расширение, теплоемкость, аллотропические превращения); обладать необходимой теплопроводностью, иметь коррозионную стойкость в теплоносителе под напряжением; быть радиационно-стойкой и химически стойкой к топливу; иметь устойчивый химический состав и структуру при эксплуатации.

Механическая надежность подразумевает правильную оценку механических свойств материала оболочки [1]. Все конструкционные материалы подвергаются воздействию облучения. Это необходимо учитывать при конструировании ТВЭЛ. Нужно стремиться к тому, чтобы материал оболочки после облучения имел необходимую пластичность, позволяющую без разрушения выдерживать ощутимую деформацию, низкий модуль упругости и высокую теплопроводность, чтобы оболочка могла деформироваться без возникновения высоких напряжений в ней. При выборе материала оболочки необходимо учитывать температуру плавления и рекристаллизации. Температура плавления определяет уровень рабочих температур в реакторе и дает возможность предусматривать поведение ТВЭЛ в аварийных ситуациях (прекращение охлаждения ТВЭЛ). При выборе материала оболочки необходимо точно знать его сплавы.

В водо-водяных реакторах с температурой эксплуатации до 215 °С в качестве материала оболочек твэлов широкое распространение получили сравнительно недорогие алюминий и его сплавы, обладающие отличными технологическими свойствами, малым сечением захвата нейтронов, высокой теплопроводностью и неплохой коррозионной стойкостью в воде. Невысокие механические свойства алюминия и его сплавов не позволяют использовать их в воде при значительных температурах и давлениях. (Алюминий имеет плотность 2,7 г/см³, температуру плавления 660 °С, распространённость в земной коре 8,8%). Высокотемпературные механические свойства алюминия при длительных испытаниях повышаются легированием медью, магнием, марганцем и другими элементами. Такие сплавы после термообработки с дисперсионным отверждением обладают высокими длительными механическими свойствами. Под действием облучения границы прочности и текучести алюминиевых сплавов сильно повышаются, а пластичность практически не изменяется; следовательно, нейтронное поле как бы улучшает механические свойства алюминиевых сплавов. Низкая стоимость и хорошие технологические и ядерные свойства сплавов алюминия делают проблему их применения в энергетических реакторах с температурой до 300–350 °С менее острой.

По совокупности своих ядерных и технологических свойств цирконий является одним из лучших материалов оболочек твэлов, охлаждаемых водой, паром и пароводяной смесью до 300–350 °С. Цирконий имеет плотность 6,45 г/см³, температуру плавления 1852 °С, распространённость в земной коре 1,7 · 10⁻⁷ %. Устойчивость циркония к воздействию газов при комнатной температуре очень высока, но при высоких температурах он легко взаимодействует с кислородом, азотом, водородом другими газами. Чистый цирконий вследствие низких механических свойств при 350–500 °С и нестабильной коррозионной стойкости в воде при температуре 300–350 °С и паре до 400 °С не может быть использован для оболочек твэлов, поэтому понадобилось создание сплавов на его основе, обладающих необходимой прочностью и коррозионной стойкостью. Некоторые из сплавов – ниобийсодержащие сплавы и циркалои – широко применяются в промышленности. Они успешно используются в качестве оболочек твэлов и других конструктивных деталей тепловыделяющих сборок в энергетических ядерных реакторах с водой под давлением при температуре до 350 °С. К числу особенно важных легирующих элементов, используемых в сплавах циркония, относятся ниобий и олово. Оба элемента обладают относительно малым сечением захвата тепловых нейтронов; ниобий существенно повышает прочностные характеристики как при комнатной температуре, так и при 500 °С.

Аустенитные нержавеющие стали успешно применяются в качестве материала, твэлов. Плотность составляет 7,87 г/см³, температура плавления 1539 °С. Широко распространенные аустенитные хромоникелевые стали располагают важными преимуществами перед цирконием, алюминием и их сплавами: высокой жаропрочностью и жаростойкостью вплоть до 600 °С, хорошей коррозионной стойкостью в воде вплоть до критических параметров, хорошей свариваемостью. Стали этих марок успешно применяются в качестве оболочек дисперсионных твэлов в ядерных реакторах. Поведение аустенитных сталей под облучением характеризуется радиационным упрочнением, высокотемпературным охрупчиванием, уменьшением пластичности и ударной вязкости. Воздействие облучения на аустенитные стали при температурах выше 350 °С уменьшается из-за частичного отжига радиационных дефектов.

Из рассмотренных данных видно, что твэлы с оболочкой из аустенитных нержавеющих сталей более широко используются в реакторах с водой под давлением и кипящих реакторах, где они показали себя как достаточно надежные. Наибольшую опасность для них в этих условиях представляет охрупчивание стали. Опасность коррозионного растрескивания стальных оболочек твэлов может быть существенно уменьшена такими мерами, как выбор более стойких к растрескиванию сталей, технологическое снижение уровня растягивающих напряжений на оболочке; повышение чистоты теплоносителя по опасным примесям, например по хлор-иону и кислороду. Следует отметить, что при правильном выборе марки стали и технологии изготовления из нее оболочек, а также радиационном выборе конструкции твэла и режима эксплуатации, аустенитные нержавеющие стали являются надежным материалом для оболочек твэлов водоохлаждаемых реакторов.

Хорошие ядерные и физические характеристики: малое сечение захвата нейтронов, высокая способность замедлять и отражать нейтроны, низкая плотность, высокая прочность и теплопроводность, сравнительно высокая температура плавления, маленький коэффициент термического расширения – позволяют считать бериллий наиболее ценным материалом, в частности хорошим контактным материалом для дисперсионных твэлов. Бериллий имеет плотность 1,85 г/см³, температуру плавления 1275 °С, содержание в земной коре составляет 6 · 10⁻⁴ %. Однако наряду с положительными свойствами бериллий обладает значительными недостатками. Металл, редкий и дорогой, хрупкий и очень токсичный, имеет высокую химическую активность. Снизить хрупкость бериллия легированием трудно из-за небольших размеров его атомов. Это сводит к минимуму число элементов, способных образовать с ним твердые растворы. В настоящее время ведутся большие работы по созданию бериллиевых сплавов и разработке надежной технологии получения конструктивных изделий для твэлов и сборок из них.

Чистый от примесей титан из-за невысоких прочностных свойств не представляет особого интереса в качестве конструкционного материала. Титан имеет плотность 4,5 г/см³, температура плавления 1665 °С, содержание в земной коре составляет 0,57 %. Титан хорошо сплавляется со многими металлами. Высокая удельная прочность, жаропрочность, хорошая коррозионная стойкость, низкая упругость паров, хорошая свариваемость, практическое отсутствие хладноломкости – все это открывает большие перспективы использования конструктивных титановых сплавов во многих областях техники. Высокую прочность титановых сплавов можно обеспечить легированием, но сплавы, полученные таким путем, имеют низкую пластичность и вряд ли могут удовлетворить

требования, предъявляемые к материалу. Поэтому большой интерес представляют дисперсионно-твердеющие титановые сплавы, которые в отожженном или закаленном состоянии имеют неплохую пластичность, а после упрочняющей термообработки (закалки и старения) приобретают высокую прочность и жаростойкость. Таким способом можно обеспечить требуемую прочность и хорошую пластичность конструкционных титановых сплавов.

Тугоплавкие металлы «большой четверки» – ниобий, тантал, молибден и вольфрам – обладают хорошей стойкостью во многих жидкометаллических теплоносителях при температурах выше 1000 °С [2]. При использовании тугоплавких металлов, особенно ниобия и тантала, в реакторах с жидкометаллическими теплоносителями необходима хорошая очистка теплоносителя от кислорода, влаги, углерода и строгий отбор материалов первого контура. Стойкость ниобия, тантала, молибдена и вольфрама в кислородсодержащих средах (воздух, пары воды, углекислый газ) очень низкая. На этих металлах возникает неплотная отслаивающаяся пленка, а молибден к тому же образует летучие окислы. При испытаниях на воздухе уже при 500–600 °С эти металлы дают привес до десятков миллиграммов на 1 см² в час, что недопустимо при использовании их в реакторе. Для нахождения метода преодоления окисляемости этих металлов, исследования проводились с применением инертных газов в качестве теплоносителя, легирование металлов и создание защитных покрытий на них.

Основным препятствием при внедрении вольфрама и молибдена в ядерную технику наряду с окисляемостью и плохой свариваемостью является их хладноломкость, т.е. переход при определенных температурах из пластического состояния в хрупкое. В настоящее время предлагаются разные способы устранения хладноломкости, которые подразделяются на химические и физические. К химическим методам следует отнести очистку от примесей внедрения, проводимую на разных этапах технологического процесса получения чистых металлов. К физическим способам относятся деформация по схеме всестороннего неравномерного сжатия, создание оптимальной текстуры деформации; применение вибрации, ультразвука, очистки от растворенных газов пластической деформацией в вакууме, создание оптимальной структуры путем легирования.

Особое место среди тугоплавких металлов занимает ниобий. Ниобий имеет плотность 8,57 г/см³, температуру плавления 2500 °С, содержание в земной коре составляет $2 \cdot 10^{-3}$ %. Обладая высокой температурой плавления, хорошей обрабатываемости, сохранением прочности при высоких температурах, пластичностью и хорошими физическими свойствами ниобий ценен как конструкционный материал. Для оценки возможности применения нового материала при высоких температурах первоначально рассматривают его прочность и пластичность, обрабатываемость, сопротивление окислению, а также стоимость и запасы. Ниобий удовлетворяет всем условиям, помимо сопротивления окислению. Низкое сопротивление нелегированного ниобия окислению мешает его применению в средах, содержащих кислород. В результате исследований установлено, что сопротивление высокотемпературному окислению может быть существенным образом повышено легированием. Азот в небольших количествах является, по-видимому, наиболее эффективным упрочнителем ниобия. Кислород оказывает такое же влияние, но при более высоком содержании. Наименьшее влияние на твердость при низких температурах оказывает углерод при содержании не выше 0,05%.

Молибден помимо высокой жаропрочности обладает хорошей совместимостью со всеми используемыми в настоящее время жидкометаллическими теплоносителями при температурах 1000 °С и выше. Молибден имеет плотность 10,2 г/см³, температуру плавления 2620 °С, содержание в земной коре $1 \cdot 10^{-4}$ %. Серьезным препятствием для применения молибдена является его склонность к хрупкому разрушению при комнатной температуре. Прочность молибдена может быть значительно повышена легированием небольшим количеством углерода с последующим выделением мелких карбидных включений в процессе старения.

Отличным конструкционным материалом в ядерной технике является вольфрам. Вольфрам имеет плотность 19,25 г/см³, температуру плавления 3422 °С, содержание в земной коре составляет $1 \cdot 10^{-4}$ %. Материал обладает исключительной прочностью при высоких температурах. Трудность при разработке изделий из вольфрама связана с его недостаточной пластичностью при низких температурах, хотя есть надежда получить пластичный. Пластичность вольфрама была резко повышена глубокой очисткой его от углерода (до 0,001%) путем термоциклической обработки в среде, содержащей сотые доли процента кислорода. Многие сплавы вольфрама были изучены на стойкость к окислению. Большинство испытаний проводили на воздухе до 1093 °С, однако до сих пор не было сообщений о значительном улучшении стойкости к окислению бинарных сплавов. Было также изучено влияние на стойкость к окислению двойных добавок из элементов Nb, Co, Cr, Mo, Ta, Ti. Найдено, что перспективными добавками являются ниобий и тантал.

Искусственный графит основательно вошел в ядерную технику как конструкционный материал для оболочек и матриц ТВЭЛов и противоосколочных покрытий сферических частиц топлива в высокотемпературных газовых реакторах [3]. Плотность графита 2,25 г/см³, температура плавления 3845 °С, содержание в земной коре $2,3 \cdot 10^{-2}$ %. Из графита выполнены отдельные детали тепловыделяющих сборок реакторов. Графит в виде монокристалла обладает большой анизотропией свойств, которая обусловлена его гексагональной слоистой структурой. Характеристики реакторного графита следующие: общая пористость, доля открытых пор, их распределение и размеры. Характер пористости во многом зависит от исходных материалов и способа изготовления. С помощью технологических приемов можно изменить многие свойства графита для получения изделий с требуемыми характеристиками; удастся изготовить графит, почти нечувствительный к радиационному росту при низких температурах.

В настоящее время ведутся широкие исследования материалов на основе указанных элементов с целью изучения их физико-химических, коррозионных и радиационных свойств в различных средах, в широком интервале

температур, в напряженном состоянии, что вселяет надежду в то, что будут получены ещё более безопасные, надёжные и экономически целесообразные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В.* Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие. Т., Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
2. *Ягодин Г. А., Синегрибова О. А., Чекмарев А. М.* Технология редких металлов в атомной технике. Учебное пособие для вузов. М., Атомиздат, 1974. – 344 с.
3. *Григорьева В. А., Зорина В. М.* Тепловые атомные электрические станции: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

ВНЕДРЕНИЕ ПРИНЦИПОВ И АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ “ЗЕЛЁНОЙ” ЭКОНОМИКИ В БЕЛАРУСИ

IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPLES AND ANALYSIS OF THE MAIN DIRECTIONS FOR THE IMPLEMENTATION OF THE “GREEN” ECONOMY CONCEPT IN BELARUS

К. М. Мукина^{1,2}, Н. С. Смашный^{1,2}

K. M. Mukina^{1,2}, N. S. Smashny^{1,2}

¹Белорусский государственный университет, БГУ

*²Учреждение образования «Международный государственный экологический институт имени А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, г. Минск, Республика Беларусь
kem@iseu.by, smashnyy02@mail.ru*

¹Belarusian State University, BSU

²International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

В статье рассматривается развитие Республики Беларусь по пути «зеленой» экономики - модели экономического развития, основанной на устойчивом развитии и знании экономики окружающей среды, требующего большого количества реформ в различных сферах жизни государства, основной из которых является экономика. Проведен анализ созданной концепция “зелёной” экономики, внедрения и развития её принципов на территории Республики Беларусь и выполнения плана действий по развитию “зелёной” экономики до 2020 года, и следующего плана до 2025 года, а также документации, которая затрагивает вышеперечисленные документы.

The article discusses the development of the Republic of Belarus along the path of a «green» economy – a model of economic development based on sustainable development and knowledge of environmental economics, which requires a large number of reforms in various spheres of the life of the state, the main of which is the economy. An analysis was made of the created concept of the “green” economy, the implementation and development of its principles in the territory of the Republic of Belarus and the implementation of the action plan for the development of the “green” economy until 2020, and the next plan until 2025, as well as documentation that affects the above documents.

Ключевые слова: устойчивое развитие, “зелёная” экономика, программный подход, энергосбережение, эмиссия парниковых газов, отдельный сбор отходов, экономия воды, развитие экологической инфраструктуры.

Keywords: sustainable development, «green» economy, programmatic approach, energy saving, greenhouse gas emissions, separate waste collection, water saving, development of ecological infrastructure.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2022-2-295-298>

Принципы “зелёной” экономики за последние годы стали основополагающими в развитии экономики многих стран. Тенденция перехода от ведения традиционной экономики к современной и устойчивой заметна во многих странах. Это не только даёт новые пути развития во многих отраслях ведения хозяйства, но и уменьшает влияние человека на окружающую среду.

Концепция “зелёной” экономики – это модель, которая ведет к улучшению здоровья и социальной справедливости населения, а также к значительному снижению опасных воздействий на окружающую среду и к снижению