

Работа выполнена на оборудовании Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saurel R., Abgrall R. A multiphase Godunov method for compressible multifluid and multiphase flows. — J. Comp. Phys., 1999, v. 150, p. 425—467.
2. Harten A., Lax P., Leer B. On upstream differencing and Godunov type schemes for hyperbolic conservation laws. — SIAM Rev., 1983, v. 25, № 1, p. 35—61.
3. Zein A., Hantke M., Warnecke G. Modeling phase transition for compressible two-phase flows applied to metastable liquids. — J. Comp. Phys., 2010, v. 229, p. 2964—2998.
4. Chiapolino A., Boivin P., Saurel R. A simple and fast phase transition relaxation solver for compressible multi-component two-phase flows. — Comput. Fluids, 2017, v. 150, p. 31—45.
5. Ransom V. Numerical benchmark test no. 2.1. Faucet flows. — Multiphase Sci. Technol., 1987, v. 3, № 1—4, p. 465—467.
6. Ambroso A., Chalons C., Raviart P.-A. A Godunov-type method for the seven-equation model of compressible two-phase flow. — Comput. Fluids, 2012, v. 54, p. 67—91.
7. Le Métayer O., Saurel R. The Noble—Abel—Stiffened—Gas equation of state. — Phys. Fluids, 2016, v. 28(4), № 046102, p. 1—23.
8. Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Леонов А.А. Методика решения задач двухфазной тепло- и гидродинамики с натриевым теплоносителем. — Атомная энергия, 2018, т. 125, вып. 4, с. 200—206.

Поступила в Редакцию 29.11.20

УДК 621.039.524:691.714.018.8

ТОПЛИВО С ХРОМОВЫМ ПОКРЫТИЕМ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА, УСТОЙЧИВОЕ К АВАРИИ

Картюк Л.А., Кузнецов В.И., Маслов А.А., Новиков В.В., Орлов В.К.,
Рыкунов Д.В., Тутов А.О. (АО «ВНИИИМ», г. Москва)
e-mail: dvrykunov@bochvar.ru

Начало активных разработок топлива, устойчивого к аварии, связано с чрезвычайным происшествием на АЭС «Фукусима» (Япония). Авария показала особую опасность пароциркуционной реакции, возникающей при повышении температуры оболочки твэла в результате потери теплоносителя и всплеске реактивности. Понятие «устойчивое к авариям топливо» относится к всему твэлу, т.е. в рассмотрение включается как топливо, так и оболочка. По терминологии МАГАТЭ такое топливо должно быть безопасно при работе как в нормальных условиях эксплуатации, так и при потере теплоносителя.

В большинстве стран с развитой ядерной энергетикой активизировались исследования по снижению возможности возникновения пароциркуционной реакции. Работы проводятся в Германии, Индии, Китае, России, США, Франции, Чехии, Швейцарии, Южной Кореи, Японии и др. [1].

Концепция создания топлива, устойчивого к аварии. Основным следствием аварий на реакторах считают возникновение пароциркуционной реакции. Высокотемпературное окисление и гидрирование циркония приводят к снижению его пластичности и трещиностойкости, что может вызвать разгерметизацию твэлов [2]. Поэтому основной целью создания топлива является исключение пароциркуционной реакции. Для этого можно применять как физический, так и термодинамический барьер.

Концепция создания топлива заключается в значительном снижении объема образующегося водорода или запасенного тепла посредством большей теплопроводности топлива (рис. 1).

Безопасность твэла в аварийных условиях может быть повышена путем создания



Р и с. 1. Нанесение хромоалюминиевых покрытий на циркониевую оболочку твэла: а — мозаичная мишень из алюминия, укомплектованная штифтами из хрома; б — микроструктура однослойного покрытия

физического барьера, т.е. исключения контакта пара с цирконием. Это возможно путем нанесения защитного покрытия на оболочку. Более радикальный способ — замена сплава, содержащего цирконий, на другой, инертный по отношению к воде в рассматриваемом диапазоне температуры.

Другой подход — создание термодинамического барьера, т.е. исключение возможности начала реакции за счет того, что температура 862 °С, при которой начинается парциальная реакция, не будет достигнута даже при аварийной ситуации. Этого можно достичь посредством повышения теплопроводности топливной композиции. При использовании таблеток с диоксидом урана на поверхности оболочки температура в нормальных условиях эксплуатации составляет ~350 °С, в то время как внутри топливной таблетки она может достигать 1500 °С в силу малой теплопроводности диоксида. При аварии, обусловленной потерей теплоносителя, запасенное тепло слабо рассеивается, и температура оболочки твэла за счет остаточного энерговыделения повышается. При этом запас до начала плавления циркония 1855 °С мал. При использовании более плотного топлива с более высокой теплопроводностью температура внутри топливного сердечника будет значительно меньше и в некоторых случаях может составлять около 600 °С. Поэтому при потере теплоносителя запас до плавления топливной композиции, например, сплава ОМ9АО с температурой плавления ~1230 °С будет более чем вдвое выше. Кроме того, преимуществом более плотного топлива является повышенная ураноемкость. За счет этого гипотетически может быть увеличена длительность кампании твэлов, улучшены показатели активной зоны. Повышенная ураноемкость плотного топлива компенсирует также потерю реактивности вследствие использования оболочек с покрытием или оболочек из других материалов с большим сечением поглощения тепловых нейтронов.

Нанесение на поверхность твэла из циркониевого сплава защитного покрытия на основе хрома. В настоящее время материалы покрытий и технологии их нанесения на оболочки твэлов разрабатывают все ведущие производители ядерного топлива. Это не только однослойные металлические и металлокерами-

ческие, но и многослойные керамические и функционально-градиентные покрытия [3—7]. Наиболее перспективным для многих производителей на первом этапе представляется вариант нанесения на поверхность твэла из циркониевого сплава защитного покрытия на основе хрома. Этот вариант представляется самым простым для внедрения в производство, так как нет необходимости изменять конструкцию ТВС, изменения в технологической документации минимальные. Хромовое покрытие также повышает коррозионную стойкость оболочки в перегретом паре и обладает повышенной износостойкостью.

Одним из отрицательных факторов является большее в 15 раз по сравнению с цирконием сечение захвата тепловых нейтронов изотопами хрома 0,185 б. Кроме того, в покрытии могут накапливаться короткоживущий ^{51}Cr и ванадий, изменяя химический состав покрытия. Влияние этих факторов можно снизить за счет уменьшения толщины покрытия. В настоящее время оптимальная толщина покрытия составляет 8—10 мкм. Известно, что при 1332 °С хром с цирконием образуют эвтектику. Это более чем на 100 °С превышает температуру проектной аварии. Таким образом, хромовое покрытие позволит повысить проектный предел до высокотемпературного окисления циркония.

Выбор метода нанесения покрытия. При выборе метода нанесения защитных покрытий на оболочки твэла необходимо учитывать, что современное массовое производство ориентировано на прецизионные изделия с малым допуском и высоким классом чистоты поверхности. Эти требования продиктованы необходимостью собираемости ТВС и тем, что размерные характеристики серийных твэлов установлены многочисленными исследованиями, включая реакторные. Таким образом, выбор метода нанесения покрытия и его толщина не должны значительно усложнять технологию изготовления твэла и сказываться на его размерных характеристиках.

В АО «ВНИИНМ» предложен метод нанесения хромового покрытия по технологии высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления, широко используемого в производстве ответственных изделий атомной техники [8]. Этот метод по универсальности наносимых материалов, их структуре, плотности, адгезии, механическим и физическим свойствам значительно превосходит галь-

ванические процессы. Он наилучшим образом подходит для нанесения покрытий сразу на несколько деталей цилиндрической формы. Формирующиеся при нанесении покрытий адгезионные связи обеспечивают высокую пластичность покрытий, стойкость к ударным нагрузкам, малый размер пор. Отличительной особенностью такой технологии является использование специальных водоохлаждаемых мишеней, что позволяет увеличить плотность мощности распыления и тем самым в несколько раз повысить его скорость. Данная технология позволяет совмещать в одном цикле с напылением покрытия предварительную обработку поверхности тлеющим разрядом или ионной бомбардировкой. Это способствует повышению адгезии покрытия к подложке и позволяет удешевить процесс.

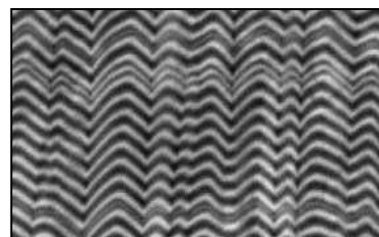
Параллельно проводятся исследования технологии обработки поверхности перед нанесением покрытия ионно-пучковым методом и ионной полировкой [9].

При выборе материала для сравнения, помимо металлического хрома, были исследованы другие покрытия на образцах, предназначенных для коррозионных испытаний, такие, как хромоалюминиевое и железохромоалюминиевое.

Для получения хромоалюминиевого однослойного покрытия использовали мозаичную мишень, получая покрытие, состоящее из соединения хрома и алюминия (см. рис. 1). Для получения хромоалюминиевого многослойного покрытия, состоящего из чередующихся слоев хрома и алюминия, использовали поочередно алюминиевую и хромовую мишени. Общая толщина покрытия составляла около 10 мкм, толщина отдельных слоев 50 нм.

Для формирования многослойного железохромоалюминиевого покрытия распыляли поочередно мишень из стали 12Х18Н10Т и мозаичную хромоалюминиевую мишень (см. рис. 1). Варьированием времени распыления мишеней получали покрытия с разным содержанием элементов. Структура покрытия, содержащего 75% хрома, показана на рис. 2. Толщина нанослоев 40—60 нм.

Для обоснования работы твэла при разной температуре были проведены три серии коррозионных экспериментов. В первых двух испытаниях были близки к нормальным условиям эксплуатации твэла ВВЭР-1000 (табл. 1). Результа-



Р и с. 2. Микроструктура многослойного наноструктурированного железохромоалюминиевого покрытия

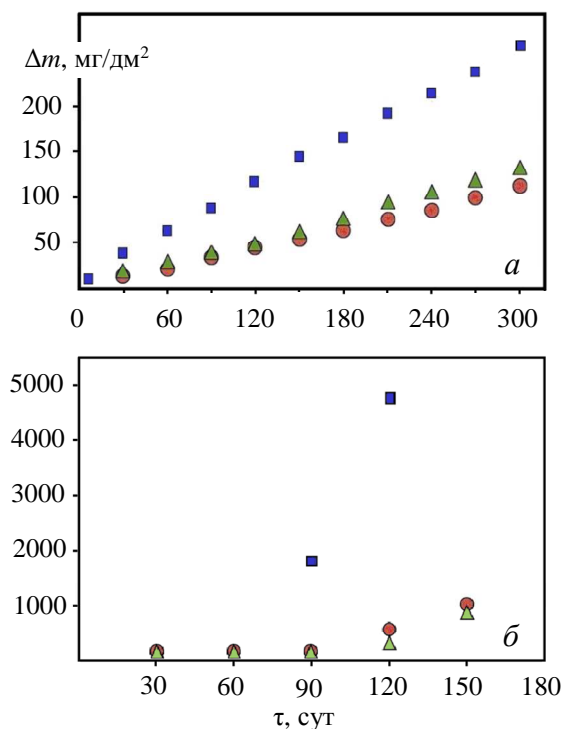
ты первой серии экспериментов после коррозионных автоклавных испытаний в паре при температуре 400 °С и давлении 10,3 МПа показаны на рис. 3, а, второй серии в воде с добавлением лития при 360 °С и давлении 18,6 МПа — на рис. 3, б. Как видно, коррозионная стойкость образцов с покрытием в режимах нормальных условий эксплуатации в 3—5 раз выше по сравнению с образцами без него. Это видно из сравнения внешнего вида образцов после испытаний в воде с добавлением лития (рис. 4).

Т а б л и ц а 1. Режимы испытаний образцов сплава Э-110 о.ч. в первой серии экспериментов

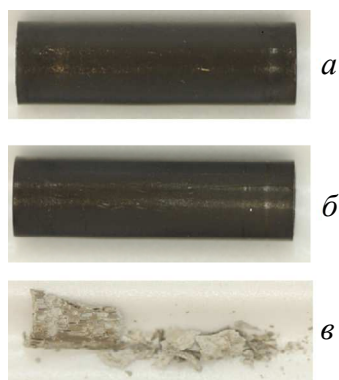
Режим	Номер образца	Образец
Пар, 400 °С, 10,3 МПа	7-0-1/1	Без покрытия
	7-7-1/1	С хромовым покрытием толщиной 7 мкм
	7-15-1/1	С хромовым покрытием толщиной 15 мкм
Вода + 70 мг·л ⁻¹ Li, 360 °С, 18,6 МПа	7-0-1/2	Без покрытия
	7-7-1/2	С хромовым покрытием толщиной 7 мкм
	7-15-1/2	С хромовым покрытием толщиной 15 мкм

Исследования также показали, что оптимальная толщина покрытия должна составлять 7—10 мкм. Образцы с жаростойким покрытием толщиной 5, 10 и 15 мкм, нанесенным методом высокоскоростного ионно-плазменного распыления, имеют сравнимую коррозионную стойкость, но время нанесения более толстого менее технологичного и более дорогого покрытия в 1,5 раза больше.

Автоклавные испытания в нормальных условиях эксплуатации не выявили заметного преимущества какого-либо материала покрытия. Незначительное преимущество имели образцы с однослойным хромовым и смешанным одно-



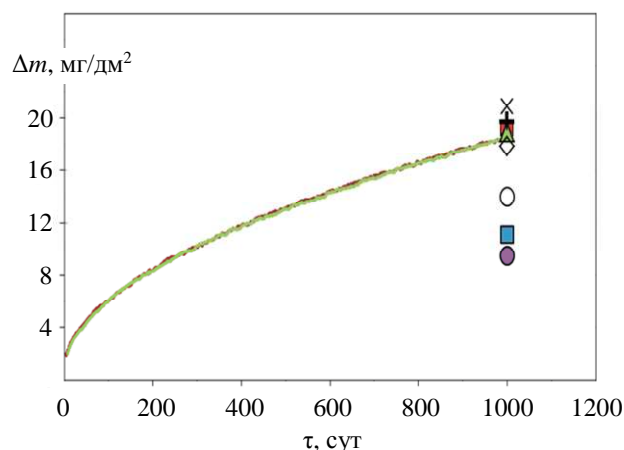
Р и с. 3. Результаты испытаний первой (а) и второй серии (б) образцов из сплава Э-110 о.ч. с толщиной хромового покрытия 7 (○), 15 мкм (△) и без покрытия (■)



Р и с. 4. Внешний вид образцов с хромовым покрытием толщиной 7 (а), 15 мкм (б), без покрытия (в) после 150 сут автоклавных испытаний в воде с добавлением 70 млг⁻¹ лития при 360 °С и давлении 18,6 МПа

слоиным покрытием, которое наносили одновременным распылением хромовой и сложной мозаичной железохромоалюминиевой мишени. Образцы с такими покрытиями имели одинаковый средний привес 14 мг/дм² в воде при 360 °С после 60 сут испытаний.

Третью серию экспериментов проводили на таких же образцах в условиях с потерей теплоносителя: нагрев до 1100 °С, выдержка 500 с, нагрев до 1200 °С, выдержка 1500 с, охлаждение до 800 °С со скоростью 20 °С/с, охлаждение водой до комнатной температуры. Суммарная ки-



Р и с. 5. Кинетика окисления образцов сплава Э-110 о.ч. с хромоалюминиевым многослойным (◇) и однослойным покрытием (○), хромоалюминиевым стальным покрытием (×), железохромоалюминиевым покрытием (+, ■), хромовым покрытием (●) и без покрытия (■, △) в паре при 1200 °С в течение 1000 с

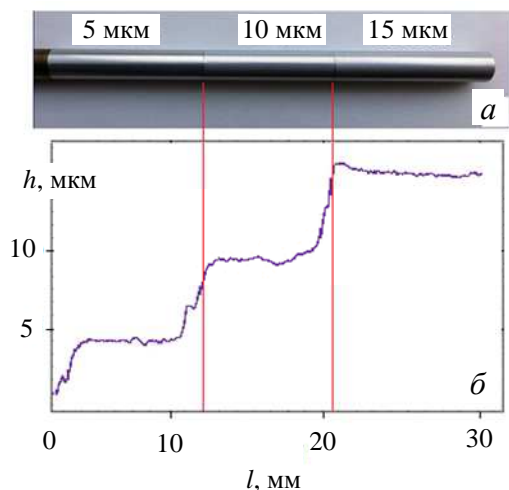
нетика окисления наружной и внутренней поверхности образцов показана на рис. 5.

В испытаниях наименьший удельный привес 9,5 мг/см² получен на образцах с хромовым и железохромоалюминиевым покрытием с содержанием хрома 75% (11,1 мг/см²). Железохромоалюминиевое покрытие растрескалось и осыпалось после испытаний. Таким образом, было показано, что в настоящее время лучшими характеристиками обладает чистое хромовое покрытие, которое и было выбрано как основное.

Наряду с разрушающими методами определения толщины покрытия обрабатывался и неразрушающий вихретоковый контроль. Для калибровки установки неразрушающего контроля изготовлен контрольный образец с фиксированной толщиной хромового покрытия 5, 10 и 15 мкм (рис. 6, а). Как видно на рис. 6, б, вихретоковый контроль позволяет определить толщину покрытия.

Методы и результаты исследования особенностей структуры и свойств хромовых покрытий. Проведены комплексные материаловедческие исследования следующих характеристик покрытия: структура, толщина, шероховатость, твердость, адгезия и пористость.

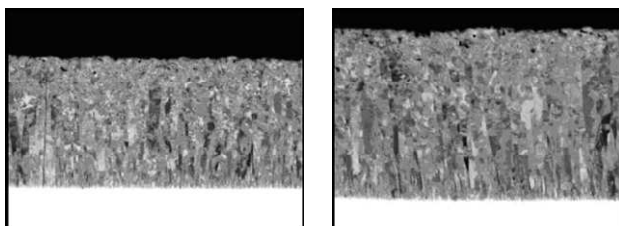
Структуру и морфологию поверхности покрытий исследовали на поперечных шлифах с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU (Чехия). На



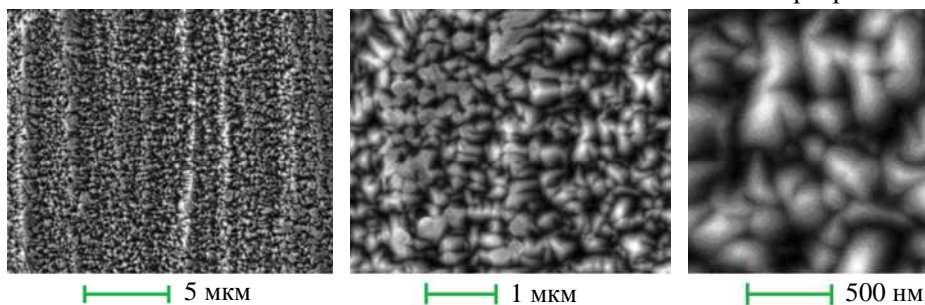
Р и с. 6. Внешний вид образцов трубы из сплава Э-110 с покрытием толщиной 5, 10 и 15 мкм (а) и результаты измерения толщины покрытия вихретоковым методом (б)

рис. 7, 8 видно, что хромовое покрытие имеет столбчато-зернистую структуру с размером зерна 0,05—0,5 мкм. Измеренная на DuraScan 20 (Австрия) методом Виккерса в пяти точках поверхности каждого образца микротвердость покрытия составила в среднем 270—380 HV 0,025. Шероховатость поверхности R_a оценивалась для покрытий на макетных оболочках с использованием профилометра Surftest SJ 210 (Япония) по пяти профилям. В среднем она составила 0,34—0,36 мкм.

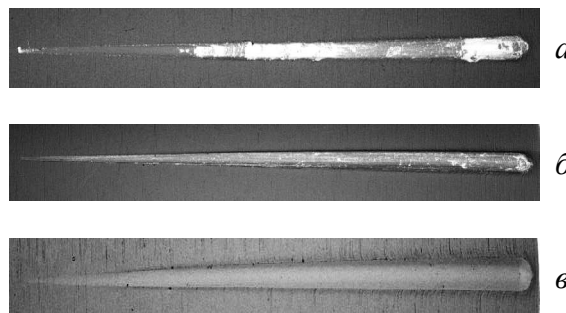
Адгезионные характеристики покрытий исследовали на макетных оболочках методом контролируемого царапания с использованием тестера Revetest Xpress Plus (Швейцария). Измерения проводили по образующей оболочки при



Р и с. 7. Структура хромового покрытия



Р и с. 8. Морфология поверхности хромового покрытия при разном увеличении



Р и с. 9. Характерный вид царапин, полученных в результате тестирования хромового покрытия при нагрузке 1—120 Н (а, б), 150 Н (в)

линейно возрастающей нагрузке. Нагрузка изменялась от 1 до 120—200 Н. В процессе испытаний определяли изменение глубины проникновения и коэффициента трения по длине царапины, которая составляла 10 мм.

При определении адгезионных характеристик покрытий было получено изображение царапины для оценки характера разрушения (рис. 9). По результатам испытаний фиксировали следующие критические нагрузки: L_{c1} — появление трещин, когезионное разрушение покрытия, L_{c2} — начало отслоения покрытия, адгезия покрытия к подложке, L_{c3} — полное разрушение покрытия.

Анализ табл. 2 показал, что при увеличении толщины покрытия от 4,5 до 10,4 мкм микротвердость, шероховатость поверхности и пористость снижаются. При этом возрастает число трещин и отслоений. Поэтому с учетом всех факторов применение хромовых покрытий толщиной 7—10 мкм представляется оптимальным.

Экспериментальные твэлы и ТВС. Завершающим этапом комплекса технологических, научно-исследовательских и конструкторских работ, выполненных в АО «ВНИИНМ», явились определение материалов и разработка конструкций экспериментальных твэлов, устойчивых к авариям. Для реакторного облучения были разработаны конструкции твэлов для облучения в условиях

водно-химического режима ВВЭР и PWR. В качестве материалов оболочки экспериментальных твэлов были выбраны сплав Э-110 с хромовым покрытием, нанесенным по тех-

Таблица 2. Характеристики хромовых покрытий

Номер образца	Толщина, мкм	Микротвердость, HV 0,025	Шероховатость, мкм	Среднее число пор на 1 см ²	Средняя критическая нагрузка, Н		
					L_{c1}	L_{c2}	L_{c3}
1	4,5 ± 0,3	380 ± 20	0,36 ± 0,02	1,4	11	43	103
2	8,5 ± 0,3	310 ± 20	0,36 ± 0,03	0,25—0,29	17	39	Не менее 78*
3	10,4 ± 0,4	270 ± 20	0,34 ± 0,03	0,08—0,1	25	55	Не менее 62**

*, **Испытание с полным разрушением покрытия, в остальных испытаниях при нагрузке до 120 и 150 Н соответственно полного разрушения покрытия не происходило.

нологиям АО «ВНИИНМ» и НИЯУ МИФИ, сплав 42ХНМ, апробированный в качестве материала оболочки твэлов транспортных реакторов. В качестве топливных материалов выбраны диоксид урана как эталонный материал и уран-молибденовый сплав, разработанный АО «ВНИИНМ».

Таким образом, для реакторных испытаний были разработаны шесть типов экспериментальных твэлов, которые представляют собой следующие комбинации конструкционных материалов и топливных композиций:

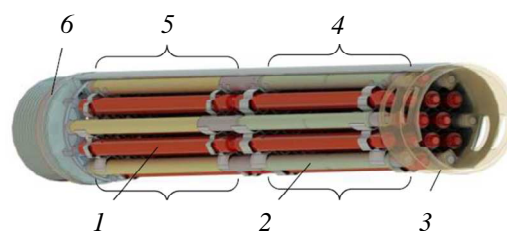
технология АО «ВНИИНМ» — оболочка из сплава Э-110 с хромсодержащим покрытием и топливом UO_2 , UMo , из сплава 42ХНМ и топливом UO_2 , UMo ;

технология НИЯУ МИФИ — оболочка из сплава Э-110 с хромсодержащим покрытием и топливом UO_2 , UMo .

В соответствии с программой испытаний планируется регулярная последовательная выгрузка твэлов каждого типа, облученных в условиях водно-химического режима ВВЭР и PWR.

Для испытаний АО «ОКБМ Африкантов» при участии АО «ГНЦ НИИАР» были спроектированы две двухсекционные экспериментальные сборки по 24 твэла в каждой ТВС-В и ТВС-К. Принципиальным отличием сборок является шаг решетки и диаметр твэлов, соответствующие параметрам ТВС ВВЭР-1000 и PWR (тип ТВС 17×17). Схема конструкции ТВС-В, предназначенной для облучения в канале реактора МИР.М1, показана на рис. 10.

Экспериментальные твэлы ТВС-В и ТВС-К были изготовлены в ПАО «НЗХК» в декабре 2018 г., реакторные испытания начаты в январе 2019 г. и без разгерметизации продолжаются в настоящее время.



Р и с. 10. Принципиальная схема экспериментальной сборки ЭТВС-В: 1 — экспериментальные твэлы; 2 — элементы каркаса; 3 — головка; 4, 5 — верхний и нижний блок твэлов соответственно; 6 — хвостовик

Заключение. Коррозионные исследования при нормальных условиях эксплуатации и аварии, связанной с потерей теплоносителя, позволили обосновать выбор однослойного жаростойкого хромового покрытия толщиной 7—10 мкм для оболочек из сплава Э-110. Разработанная АО «ВНИИНМ» технология нанесения тонкопленочных покрытий методом высокоскоростного ионно-плазменного магнетронного распыления обеспечивает необходимые размерные и физико-механические характеристики. Впервые циркониевые оболочки с жаростойким хромовым покрытием, нанесенным по технологии АО «ВНИИНМ», использовали для изготовления твэлов типоразмеров ВВЭР и PWR.

Авторы выражают благодарность Н.Н. Краснобаеву за исследования по выбору материала и разработке технологии нанесения хромового покрытия, а также за помощь, оказанную в подготовке статьи к опубликованию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **State-of-the-art** Report on Light Water Reactor Accident Tolerant Fuel. Nuclear Energy Agency Report, Nuclear Science/OECD 2018 NEA, № 7317.
2. **Скалозубов В.И., Васильченко В.Н., Ващенко В.Н., Яровой С.С.** Состояние вопросов моделирования взрывобезопасности при тяжелых авариях на АЭС с

- ВВЭР. — Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля, 2012, вып. № 19, с. 50—60.
3. **Якушкин А.А., Высикайло Ф.И.** Проблемы разрушения поверхности оболочек тепловыделяющих элементов ядерных энергетических установок. — Вестник Московского государственного областного ун-та. Сер. Физика—математика, 2018, № 4, с. 92—111.
 4. **Brachet J.-C., Billard A., Schuster F. e.a.** Nuclear fuel cladding, manufacturing processes and use against oxidation. FR Patent 3025929 A1. № 1458933; fil. 17.09.2014. Publ. 21.10.2016. P. 43.
 5. **Donaghy R., Sherman A.** Surface coating Zr or Zr alloy nuclear fuel elements. UK Patent 2024262 A. № 7908120; fil.07.03.1979. Publ. 09.01.1980. P. 5.
 6. **Lahoda E., Junker W., Congedo T., Lareau J.** Method of applying a burnable poison onto the exterior of nuclear fuel rod cladding. US Patent 7815964 B2. № 2008/0237032 A1. fil.29.03.2007. Publ. 19.10.2010.
 7. **Mazzocchi J., Xu P., Ray S. e.a.** Deposition of a protective coating including metal-containing and chromium-containing layers on zirconium alloy for nuclear power applications. US Patent 9721676 B2. № 2015/0348652 A1. fil.27.05.2014. Publ. 03.12.2015. P. 11.
 8. **Кузьмичев А.И.** Магнетронные распылительные системы. Киев: Аверс, 2008.
 9. **Валиков Р.А., Волков Н.В., Калинин Б.А. и др.** Высокотемпературное окисление ионно-модифицированных образцов сплавов циркония. — В сб.: Физические проблемы материаловедения. Научно-технич. конф. АО «ТВЭЛ». Москва, 2016, с. 39—47.

Поступила в Редакцию 16.10.20

УДК 621.039.524:691.714.018.8

ПЕРСПЕКТИВНОЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ УРАН-МОЛИБДЕНОВОЕ ТОПЛИВО, УСТОЙЧИВОЕ К АВАРИЯМ

Картюк Л.А., Лысиков А.В., Маслов А.А., Михеев Е.Н., Новиков В.В., Орлов В.К., Титов А.О. (АО «ВНИИИМ» г. Москва)
e-mail: aotitov@bochvar.ru

Одним из направлений создания устойчивого к авариям топлива является увеличение его теплопроводности при высокой ураноемкости и стабильности при облучении. В качестве такого топлива с целью увеличить теплопроводность для уменьшения количества запасенного тепла рассматриваются несколько вариантов ураноемкого топлива: металлическое, нитридное, силицидное и дисилицидное. В результате замены диоксида урана на металлическое топливо увеличиваются его плотность, ураноемкость и теплопроводность, рабочая температура топлива может быть снижена на 400—500 °С.

Природный нелегированный уран в силу своих специфических свойств: более низкая по сравнению со сплавами урана прочность и пластичность, высокая анизотропия физико-механических характеристик, склонность к формоизменению при теплосменах и под воздействием облучения в большинстве случаев нельзя использовать для изготовления ответственных изделий атомной техники. Для изменения и формирования структуры и свойств урана применяется легирование в сочетании с термической или термомеханической обработкой.

В качестве легирующих используют, в основном, две группы элементов: имеющие малую

растворимость в уране и образующие с ним химические соединения железо, кремний, алюминий, хром и др. и образующие с ураном обширные области твердых растворов — молибден, ниобий, титан, цирконий и др. Для диаграмм состояния сплавов второй группы характерны широкие области твердых растворов, например, уран—молибден, переменная по температуре растворимость и возможность фиксации метастабильных фаз. Эти факторы определяют перспективность легирования указанными элементами в сочетании с термической и термомеханической обработкой для получения материала с требуемой структурой и комплексом свойств [1]. Двойные и более сложные сплавы этой группы представляют особый интерес как высокопрочные конструкционные материалы для изделий, работающих в условиях длительного воздействия значительных напряжений, и как перспективное высокоплотное топливо реакторов различного типа.

В работах [2—5] показаны высокая растворимость Mo, Nb и Zr в уране при повышенной температуре, а также возможность стабилизации γ -фазы с о.ц.к.-решеткой в сплавах с молибденом и ниобием при содержании легирующего элемента более 8—10% по массе не только при