

ТЕРМИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГАФНАТА ДИСПРОЗИЯ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ 1300°C

© 2025 г. В. Д. Рисованный^а, А. А. Мокрушин^а, А. А. Урусов^а,
С. В. Чувииков^а, Д. П. Шорников^б, М. С. Стальцов^{б, *}

^аАО НИИ НПО “ЛУЧ”, Подольск, 142103 Россия

^бНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: msstaltsov@mephi.ru

Поступила в редакцию 20.12.2024 г.

После доработки 20.12.2024 г.

Принята к публикации 30.12.2024 г.

В статье представлены результаты испытаний на термический удар необлученных макетов поглощающих элементов (ПЭЛ) реактора ВВЭР-1000 из сплава 42ХНМ с таблетками гафната диспрозия, а также циклические термические испытания и испытания на коррозионную стойкость в пароводяной среде при температуре до 1300°C отдельных таблеток из гафната диспрозия. Испытания и исследования проведены с учетом проектного срока службы ПЭЛ ПС СУЗ ВВЭР-1000 нового поколения в течение 20 лет, среднего значения циклов “останов–пуск” реактора от 15 до 40 и условий проектных аварий для толерантного топлива.

Ключевые слова: гафнат диспрозия, поглощающие элементы, циклические термические испытания, термический удар, коррозионная стойкость

DOI: 10.56304/S2079562925060235

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в поглощающих элементах систем управления защитой (СУЗ) реакторов ВВЭР-1000 применяется комбинированный сердечник в виде таблеток или порошка титаната диспрозия (Dy_2TiO_5) и карбида бора (B_4C) с естественным содержанием изотопов ^{10}B (19.8%) и бор-11 (80.2%) [1]. Основным критерием длительности эксплуатации поглощающих стержней (ПС) остается выгорание изотопов ^{10}B , которое не должно превышать 50% [2]. При постоянном нахождении карбида бора в активной зоне ВВЭР-1000 это выгорание достигается за 2–3 года. В комбинированном сердечнике титанат диспрозия размещают в нижней части ПЭЛа, где воздействие излучения максимально. В верхней части располагается карбид бора (B_4C). Такая компоновка позволила увеличить время работы ПЭЛ ПС СУЗ до проектных 10 лет, из них 2 года в режиме автоматического регулирования (АР) и последующие 8 лет в режиме аварийной защиты (АЗ). Полная замена карбида бора на титанат диспрозия невозможна из-за его низкой физической эффективности, которая составляет 75% от карбида бора.

Следует также отметить, что на сегодня нет ограничивающих критериев и требований по поведению ПЭЛ ПС СУЗ в случае аварийных ситуаций,

связанных с возможным их перегревом в активной зоне. В случае возникновения аварийной ситуации с потерей теплоносителя возможен разогрев ПС до 1300°C. Данное значение температуры обусловлено температурой плавления сплава 42ХНМ. Именно исследования при такой температуре представляли основной научный интерес. При этом во время внештатной ситуации скорости нагрева и охлаждения реакторной установки (РУ) чрезвычайно высокие, что вызывает дополнительные термические нагрузки на оболочку и материалы поглотителя. Для ПЭЛ ПС СУЗ ВВЭР-1000 в настоящий момент такие аварийные сценарии не разработаны, но их можно рассматривать, как предельные. Проведенные в АО “ГНЦ НИИАР” исследования показали, что при повышении температуры оболочки из хромо-никелевого сплава 42ХНМ до температуры 670°C при облучении происходит деформация и частичное разрушение поглощающих элементов с карбидом бора [3]. Причиной такого поведения оболочки является радиационное набухание карбида бора, а также его взаимодействие с материалом оболочки и образование легкоплавкой эвтектики. В связи с этим, для повышения надежности, безопасности и ресурса ПЭЛ ПС СУЗ актуальной является задача по замене карбида бора на более радиационно-стойкий поглощающий материал с высоким сечением захва-

Таблица 1. Температурно-временные параметры коррозионных испытаний таблеток гафната диспрозия

Температура, °C	Время, с
1000	10000
1100	10000
1200	500/1000/1500/3600
1300	250/500/1000/1500

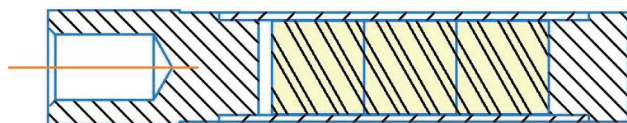
та нейтронов, лучшей совместимостью с конструкционным материалами, коррозионной стойкостью в пароводяной среде при температурах до 1200°C. Материалом, способным заменить комбинированный поглощающий сердечник из карбида бора и титаната диспрозия, может стать гафнат диспрозия ($n\text{Dy}_2\text{O}_3m\text{HfO}_2$) [4–6].

Так как в литературе не представлены данные о поведении гафната диспрозия в условиях термошока, а также отсутствуют данные о коррозионном взаимодействии гафната диспрозия со сплавом 42ХНМ в условиях пароводяной смеси, то проведение таких испытаний является актуальным направлением исследований.

МАТЕРИАЛЫ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МЕТОДИКИ

Для изготовления таблеток гафната диспрозия использовали порошки оксида гафния (99.9 мас. % HfO_2) и оксида диспрозия (99.9 мас. % Dy_2O_3). Порошки смешивались в эквимольном соотношении, загружались в стакан из карбида вольфрама и обрабатывались в среде трихлорэтилена в планетарной мельнице RetschPM100. Затем смесь порошков извлекалась, декантировалась и сушилась на воздухе. Помолотую смесь оксидов смешивали с раствором поливинилового спирта (ПВС) в воде. Затем полученный порошок протирали сквозь сито. Заготовки таблеток прессовали в ручном прессе ПРГ-1. Затем заготовки отжигали на воздухе для удаления ПВС, после чего спекали в вакууме. Финальный отжиг получившихся таблеток гафната диспрозия проводили на воздухе.

Коррозионные испытания таблеток гафната диспрозия проводили на специальном стенде “ГАЗПАР” [7]. Установка представляет собой горизонтальную трубчатую печь, в которой находится изолированная от внешней атмосферы зона с об-

**Рис. 1.** Макет ПЭЛ с $n\text{Dy}_2\text{O}_3m\text{HfO}_2$.

разцом с функцией подачи в нее перегретого пара и инертного газа. Температуру контролировали с помощью вольфрам-рениевой термопары (BP5/20), расположенной в 5–10 мм от образца.

Перед проведением испытаний рабочую зону стенда продували слабым протоком аргона в количестве не менее 10 объемов. Затем насыщенный пар из парогенератора с расходом 0.05–0.1 г/с пропущенный через пароперегреватель, где происходил нагрев пара до температуры 400–450°C, после чего перегретый пар подавали в высокотемпературную ступень печи.

Температура испытаний составляла 1000–1300°C. Время проведения испытаний варьировалось от 250 до 10000 с (см. табл. 1). Образцы гафната диспрозия после испытаний обозначались как ГфД-Температура-Время.

Оболочка и заглушки макетов ПЭЛ ВВЭР-1000 (рис. 1) изготавливались из сплава 42ХНМ, диаметр оболочки составлял 8.2 мм, толщина стенки 0.55 мм. В верхней заглушке изготовлена резьба для закрепления макета в печи во время испытаний. В каждом макете размещали три таблетки гафната диспрозия высотой и диаметром 7 мм. Заглушки и оболочка герметизировались с помощью аргонодуговой сварки.

Испытание макетов ПЭЛ ВВЭР проводили на стенде, представляющим собой вертикальную трубчатую печь с несколькими зонами, в которых выдерживалась заданная температура нагрева. Макет ПЭЛ с контрольной термопарой на оболочке закреплялся на специальной штанге, которая позволяла перемещать макет между температурными зонами печи. Все испытания проводились в воздушной среде.

Термоциклические испытания макетов проводили при двух значениях температуры: нижнее $T_n = 50^\circ\text{C}$, и верхнее значение $T_v = 550^\circ\text{C}$, соответственно. За один цикл принято изменение температуры от T_n до T_v и до T_n . Скорость изменения температурами между установленными значениями составляла 2.5°C/мин. Время выдержка при каждой температуре составляло 20 мин. Макеты и таблетки гафната диспрозия обозначались как М-Ц-Количество циклов; ГфД-Ц-количество циклов.

Испытания на термический удар проводились по двум режимам:

1) Макет ПЭЛ медленно нагревали до стартовой температуры испытаний $T_{\text{старт}} = 550^\circ\text{C}$, после чего температуру резко повышали до $T_{\text{пик}} = 900–1200^\circ\text{C}$ посредством перемещения макета в высокотемпературную зону. После выдержки в течение 5 мин макет вновь перемещали в зону с температурой $T_{\text{старт}}$, выдерживая скорость уменьшения температуры 5°C/мин. Макеты при испытании обозначались как М-ТУ-температура.

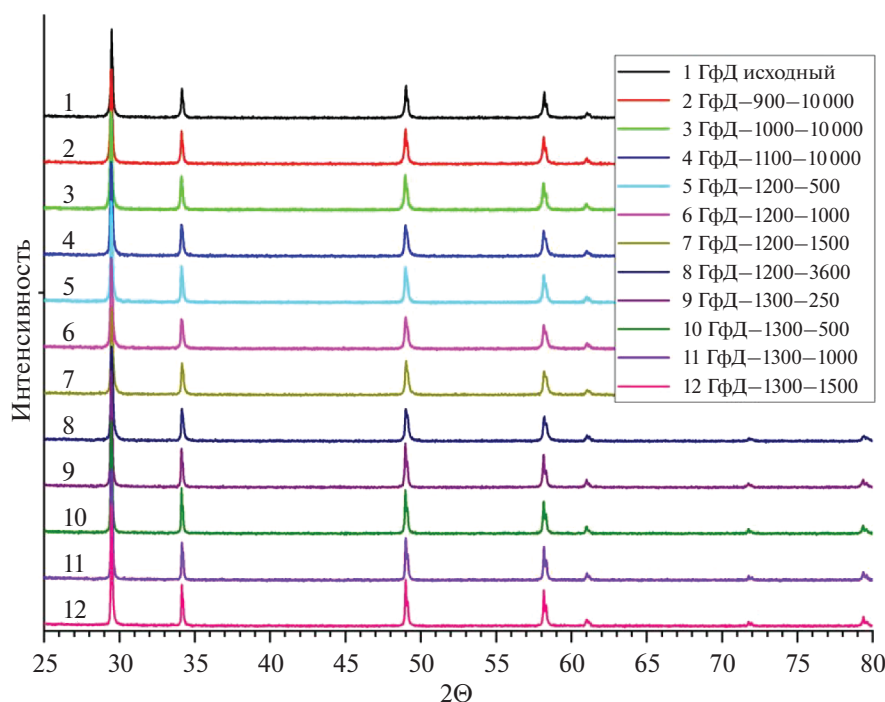


Рис. 2. Дифрактограммы поверхности таблеток гафната диспрозия после коррозионных испытаний.

II) Макет ПЭЛ медленно нагревали до стартовой температуры испытаний $T_{\text{старт}} = 550^\circ\text{C}$, после чего температуру резко повышали до $T_{\text{пик}} 900\text{--}1200^\circ\text{C}$ посредством перемещения макета в высокотемпературную зону. После выдержки в течение 5 мин макет помещали в воду с температурой 20°C . Такие макеты обозначались как М-ТУ-В-температура.

Фотографии внешнего вида образцов получали с помощью стереоскопического микроскопа Olympus SZX7 и программного обеспечения uEyeDemo.

Фотографирование продольного сечения фрагментов образцов, а также количественный и качественный анализ микроструктур осуществляли с помощью видеоизмерительного комплекса для анализа микроструктур и макроструктур материалов VESTRAImagingSystem.

Электронно-микроскопические исследования проводили на растровом электронном микроскопе (РЭМ) TESCAN VEGA 3 XMU (Чехия) с использованием энергодисперсионной (EDX) системы OXFORD ADVANCED AZTECEnergy на базе энергодисперсионного детектора X-Max80 с кремний-дрейфовым (SDD) детектирующим элементом с активной площадью кристалла 80 мм^2 для количественного определения элементного состава образцов в области взаимодействия пучка электронов с поверхностью образца методом рентгено-спектального микроанализа (РСМА).

Рентгеновский фазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре D8 Dis-

cover фирмы Bruker (Германия) с использованием $\text{Cu K}\alpha$ — излучения. Съемка образцов проводили с фокусировкой по Бреггу—Брентано в режиме $\Theta\text{--}\Theta$. Интервал углов 2Θ составлял $(15\text{--}145)^\circ$, дискретность 0.02° , экспозиция 0.1 с. Исследование проводили с плоскости продольного среза. При проведении качественного фазового анализа использовали базу данных PDF-2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные образцы гафната диспрозия представляли собой бледно-желтые таблетки без видимых дефектов и плотностью $8.0 \pm 0.05\text{ г/см}^3$. Плотность таблеток рассчитывали по результатам измерения диаметра, высоты и массы. Согласно данным РФА (см. рис. 2 и табл. 2) таблетки полностью состояли из твердого раствора типа флюорита (CaF_2) с рассчитанным параметром решетки $a = 5.267 \pm 0.002\text{ \AA}$ ($Fm\bar{3}m$), что хорошо согласуется с ранее полученными данными [8]. Фаз оксидов гафния, диспрозия или иных примесных фаз обнаружено не было. Элементный анализ методом РФСА таблеток выявил низкое содержание вольфрама, который может попадать в порошок в процессе помола.

После проведения коррозионных испытаний было отмечено, что абсолютно все таблетки гафната диспрозия сохранили свой внешний вид и целостность, никаких видимых дефектов на поверхности обнаружено не было. Более того, после

Таблица 2. Плотность таблеток гафната диспрозия и параметры кристаллической решетки, элементный состав таблеток после проведения коррозионных испытаний

Образец	ρ , г/см ³	a ($Fm\bar{3}m$), Å	Содержание элемента, мас. %		
			Dy	Hf	W
ГфД-исходный	8.05 ± 0.02	5.267(3)	35.45(29)	64.17(36)	0.38(18)
ГфД-900-10000	8.04 ± 0.02	5.266(4)	35.31(46)	63.99(32)	0.70(13)
ГфД-1000-10000	8.04 ± 0.02	5.268(2)	35.09(32)	64.44(25)	0.47(15)
ГфД-1100-10000	8.06 ± 0.03	5.266(2)	35.29(23)	64.32(38)	0.39(19)
ГфД-1200-500	8.05 ± 0.02	5.267(3)	34.97(19)	64.73(26)	0.30(21)
ГфД-1200-1000	8.06 ± 0.02	5.265(4)	35.14(42)	64.46(41)	0.40(16)
ГфД-1200-1500	8.03 ± 0.02	5.266(4)	35.02(38)	64.62(33)	0.36(9)
ГфД-1200-3600	8.05 ± 0.03	5.269(3)	35.48(35)	63.97(46)	0.55(23)
ГфД-1300-250	8.03 ± 0.03	5.270(3)	35.11(21)	64.51(19)	0.38(15)
ГфД-1300-500	8.04 ± 0.03	5.267(2)	34.92(29)	64.71(21)	0.37(18)
ГфД-1300-1000	8.06 ± 0.02	5.264(3)	35.46(33)	64.12(27)	0.42(13)
ГфД-1300-1500	8.05 ± 0.02	5.268(2)	35.04(21)	64.37(31)	0.59(18)
ГфД-Ц-20	8.04 ± 0.03	5.263(2)	35.61(40)	63.82(28)	0.57(14)
ГфД-Ц-40	8.05 ± 0.02	5.267(3)	34.85(24)	64.37(45)	0.78(19)
ГфД-Ц-60	8.07 ± 0.03	5.266(3)	34.67(35)	64.76(25)	0.57(16)
ГфД-Ц-80	8.05 ± 0.03	5.265(3)	35.07(27)	64.31(30)	0.65(17)

проведенных дополнительных испытаний, в которых таблетка гафната диспрозия выдерживалась в пару при 1300°C и сразу погружалась в воду при комнатной температуре, также сохранялась целостность, что указывает на значительную механическую стойкость керамики при значительных температурных перепадах.

В соответствии с дифрактограммами РФА (см. рис. 2), можно сделать вывод о неизменности фазового состава гафната диспрозия после испытаний во всех экспериментальных условиях, на что также указывают рассчитанные параметры решетки (см. табл. 2).

В соответствии с результатами РФСА элементный состав таблеток также не изменился. Таким образом, можно сделать вывод, что гафнат диспрозия обладает хорошей химической стойкостью в водяном паре вплоть до температуры 1300°C. Также можно утверждать о полном сохранении морфологии поверхности таблеток гафната диспрозия, выдержанных при температуре 1100, 1200 и 1300°C максимальное время, о чем свидетельствовали изображения СЭМ образцов, приведенные на рис. 3.

Анализ результатов, проведенных испытаний по термоциклированию в течение 20, 40, 60 и 80 циклов, показал, что макеты ПЭЛ ВВЭР полностью сохранили свою целостность и геометрические размеры. Материал оболочки потускнел и приобрел матовый оттенок за счет окисления и образования тонкого оксидного слоя на поверхности. Таблетки гафната диспрозия извлекали без ис-

пользования специальных средств: геометрические размеры сохранены, целостность не нарушена. Визуальный осмотр не выявил образования дефектов или изменения цвета.

Согласно результатам РФА поверхности таблеток гафната диспрозия параметры решетки структура гафната диспрозия не изменилась, так же как и элементный состав таблеток (рис. 4, табл. 2).

При проведении испытаний на температурный перепад максимальная температура была обусловлена точкой плавления сплава 42ХНМ, равной 1345°C. Программа имитировала температурный режим тяжелой аварии энергоблока с потерей теплоносителя с максимальной скорости разогрева. При этом температура в 1200°C достигается в течение 6–8 с. Для выявления процессов, протекающих в момент разогрева. Испытания макетов проведены при значениях температуры в 900, 1000, 1100 и 1200°C.

По результатам испытаний все макеты М-ТУ-900/1200 сохранили свою герметичность и геометрические размеры. При извлечении таблеток поглотителей из оболочки было отмечено частичное их разрушение в области сварного контакта (см. рис. 5), что вероятно связано с уменьшением внутреннего диаметра оболочки, которое происходило в процессе сварного соединения оболочки с заглушкой макета. Данное явление приводило к тому, что в процессе термических испытаний за счет различных коэффициентов линейного термического расширения ($nDy_2O_3mHfO_2 > 42ХНМ$ в

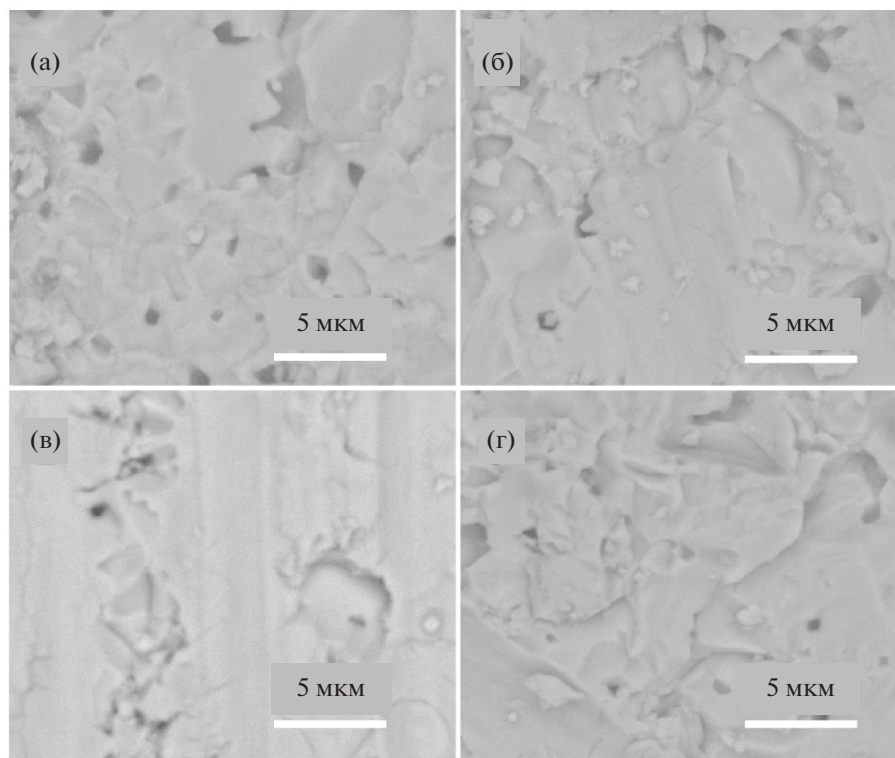


Рис. 3. СЭМ изображения поверхности образцов: ГфД-исходный (а), ГфД-1100-10000 (б), ГфД-1200-3600 (в), ГфД-1300-1000 (г).

1.8 раз) возникал градиент напряжений. Это и могло стать причиной разрушения таблеток. На данный механизм косвенно указывает и тот факт, что две разрушенные таблетки находились в макетах М-ТУ-900 и М-ТУ-1100, что позволяет сделать выводы об отсутствии прямой связи между температурой испытания и разрушением таблеток.

Отдельно необходимо обратить внимание на зазор между таблеткой и оболочкой, при изготовлении макета для испытаний за основу были взяты штатные размеры ПЭЛ с зазором в 0.1 мм (на две стороны), как видно из рис. 5а–5г после проведения испытаний зазор отсутствует, что указывает на высокотемпературную деформацию оболочки, так как согласно проведенным измерениям диаметр таблетки после испытаний не изменился после испытаний.

Согласно результатам СЭМ исследования (см. рис. 6), разрушение образцов гафната диспрозия хрупкое, по механизму скола, излом транскристаллитный, материал не имеет вторичных межзеренных трещин, что в совокупности косвенно указывает на высокую чистоту границ зерен. Отмечено наличие ручьистого излома и “террасной” фасетки (рис. 6б).

Разрушение образцов происходило путем распространения одной поперечной трещины (рис. 6а), получившей наибольшее торможение в централь-

ной области разрушенных образцов, имеющей большую по сравнению с периферией плотность. Детали микрорельефа, имеющие вид ступенек, образованы кристаллографическими плоскостями зерен (рис. 6б). Поры имеют овальную, округлую и линзовидную формы, в материале локализованы как внутри зерен, так и по их границам. Размер отдельных пор достигает 5 мкм.

При анализе образцов гафната диспрозия испытанных при различных температурах было отмечено, что в процессе роста температурного воздействия на макеты наблюдали миграцию пор в керамическом материале из “холодной” центральной области на “горячую” периферийную путем переконденсации материала (по механизму испарения—конденсации).

По результатам РФСА (см. табл. 3) можно сделать вывод, что элементный состав образцов гафната диспрозия не изменился во всех областях таблеток, что свидетельствует об отсутствии проникновения элементов из оболочки.

В результате испытаний по второй программе все макеты М-ТУ-В сохранили свою герметичность и геометрические размеры. При извлечении таблеток поглотителей из оболочки было отмечено частичное разрушение одной таблетки в области сварного контакта макета М-ТУ-В-900. Как и в случае с макетами серии М-ТУ, это может

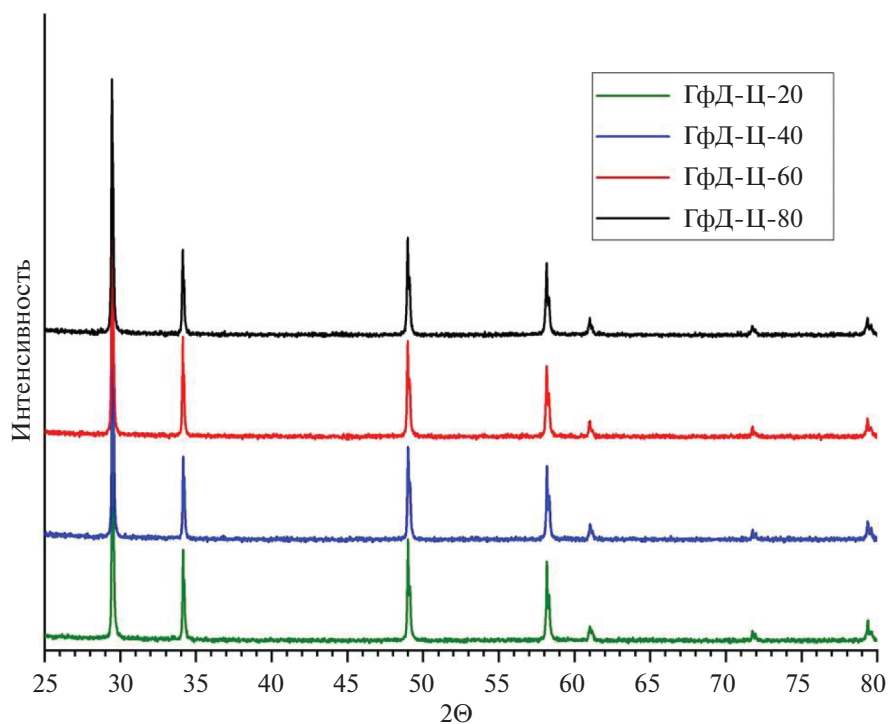


Рис. 4. Дифрактограммы с поверхности гафната диспрозия ГфД-Ц после термоциклических испытаний.

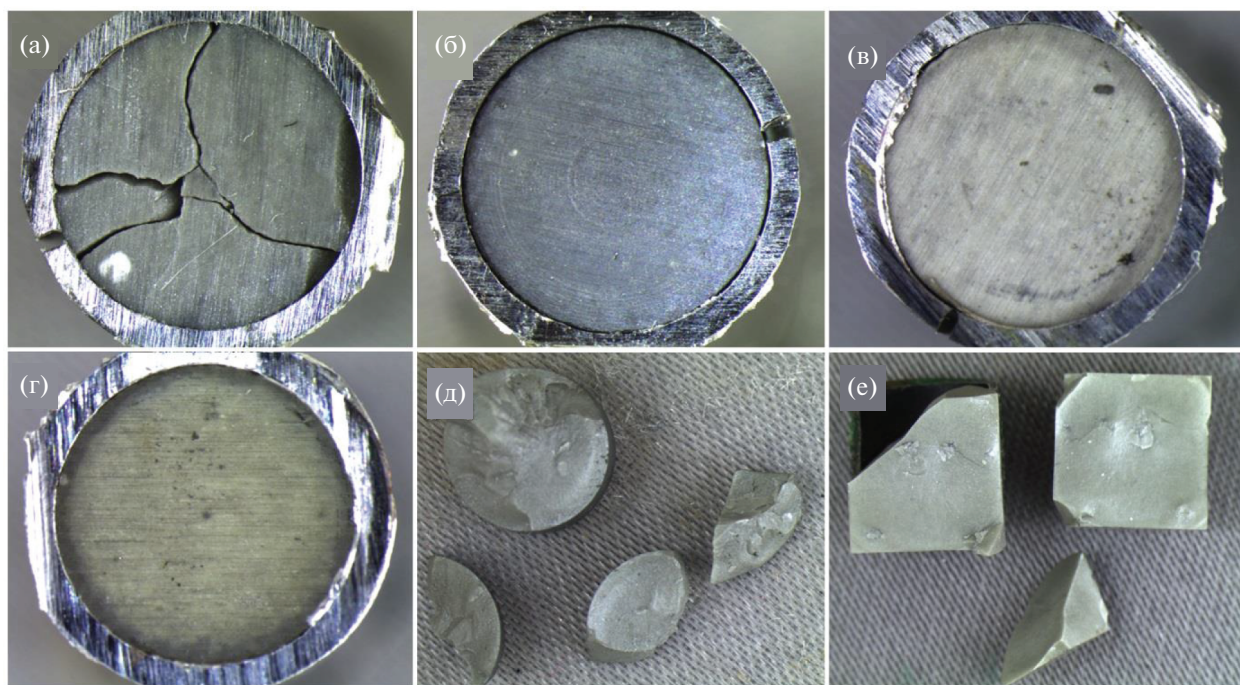


Рис. 5. Оптические фотографии срезов макетов ПЭЛ в области верхнего сварного соединения в М-ТУ-900 (а), М-ТУ-1000 (б), М-ТУ-1100 (в), М-ТУ-1200 (г); оптические фотографии разрушенных таблеток гафната диспрозия в макете М-ТУ-900 (д) и М-ТУ-1100 (е).

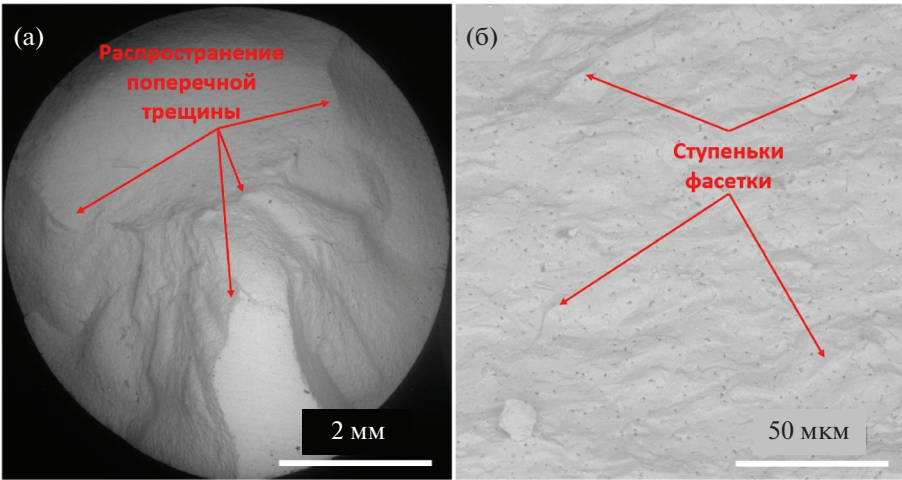


Рис. 6. СЭМ изображения внутренней поверхности разрушенных таблеток гафната диспрозия из макетов М-ТУ-900: общий вид (а), при увеличении (б).

быть связано с различными коэффициентами линейного термического расширения, поскольку разрушение произошло в макете с минимальной пиковой температурой (рис. 7). Как и описывалось выше, зазор между таблеткой и оболочкой (0.05 мм на сторону). Различный КТЛР для таблетки и оболочки в совокупности привели к разрушению таблеток. На высокую прочность таблеток указывает и то, что после коррозионных испытаний, проводимых без оболочки, все таблетки остались целы. Стоит обратить внимание, что, несмотря на существенное количество трещин (рис. 7б), таблетка гафната диспрозия из макета М-ТУ-В-1000 сохранила свою целостность (рис. 7е).

По результатам РФА поверхности и внутренней области таблеток поглотителя очевидно, что все образцы не изменили свой фазовый состав (см. табл. 4).

Согласно результатам СЭМ, картина разрушения таблетки гафната диспрозия из макета М-ТУ-В-900 схож с механизмом разрушения в макетах М-ТУ: путем распространения одной поперечной трещины, получившей наибольшее торможение в центральной области разрушенных образ-

цов, имеющей большую по сравнению с периферией плотность.

Элементный состав образцов гафната диспрозия не изменился во всех областях таблеток (см. табл. 5), что свидетельствует об отсутствии проникновения элементов из оболочки.

Дополнительное исследование боковой поверхности таблеток гафната диспрозия методом рентгеновского энерго-дисперсионного анализа показало, что на поверхности таблеток обнаруживаются следы хрома (см. табл. 5), который располагался в виде тонкого равномерного слоя. Примечательно, что налет хрома обнаруживался только на поверхностях таблеток, которые имели непосредственный контакт с оболочкой, что свидетельствует о частичном массопереносе хрома из сплава 42ХНМ, вследствие близости температуры к $T_{\text{плав}} = 1358^{\circ}\text{C}$ оболочки.

По результатам материаловедческих исследований образцов после испытаний на термический удар можно констатировать, что изменения фазового состава материала не происходит. Значимого взаимодействия с оболочкой не происходит вплоть до 1200°C , поглощающий материал остается од-

Таблица 3. Плотность таблеток гафната диспрозия и параметры кристаллической решетки поверхности, элементный состав таблеток после проведения испытаний в составе макетов ПЭЛ

Образец	ρ , г/см ³	a ($Fm3m$), Å	Содержание элемента, масс. доля %		
			Dy	Hf	W
ГфД-исходный	8.05 ± 0.02	5.267(5)	35.45(25)	64.17(42)	0.38(17)
ГфД-М-ТУ-900	8.06 ± 0.02	5.265(3)	35.56(19)	64.06(31)	0.38(19)
ГфД-М-ТУ-1000	8.02 ± 0.03	5.265(8)	34.82(33)	64.88(29)	0.30(15)
ГфД-М-ТУ-1100	8.04 ± 0.02	5.267(4)	35.02(29)	64.72(38)	0.26(9)
ГфД-М-ТУ-1200	8.04 ± 0.03	5.263(6)	35.72(31)	63.82(35)	0.46(15)

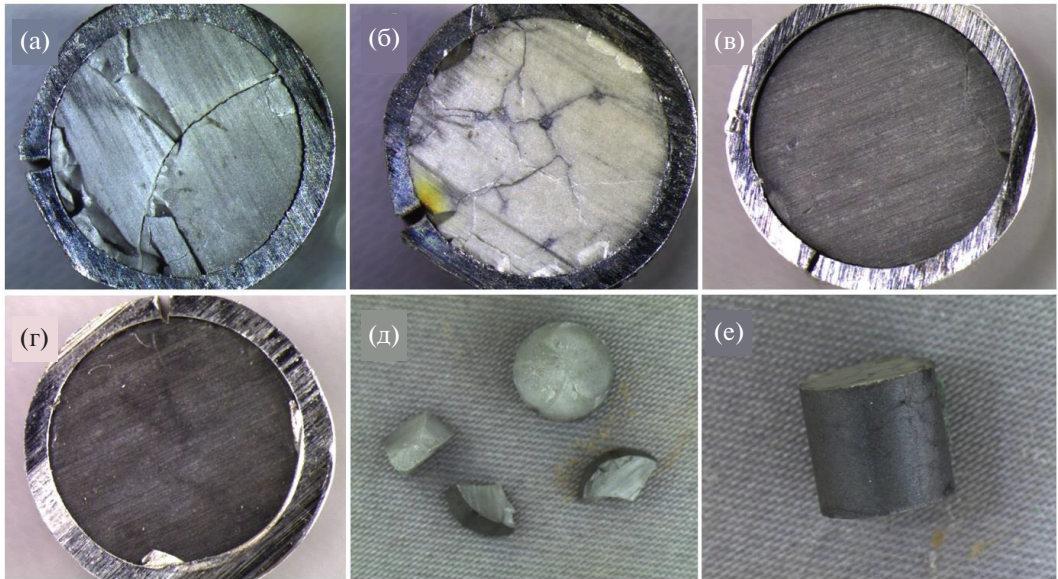


Рис. 7. Оптические изображения вскрытых макетов в области сварного контакта в М-ТУ-В-900 (а), М-ТУ-В-1000 (б), М-ТУ-В-1100 (в), М-ТУ-В-1200 (г); оптические фотографии таблеток гафната диспрозия в макете М-ТУ-В-900 (д) и М-ТУ-В-1000 (е).

нофазным. Резкие перепады температур приводят к растрескиванию поглощающего материала и в некоторых случаях к разрушению, если существует соприкосновение с оболочкой. Тем не менее, разрушенные части поглощающего материала представляют собой крупные объекты, которые не способны перемещаться вдоль оболочки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены температурные испытания макетов ПЭЛ ПС СУЗ ВВЭР-1000 с таблетками гафната диспрозия, имитирующие их штатную эксплуатацию в режиме до 80-ти циклов “останов–пуск” при температуре 50–550°С, что соответствует более 20 годам эксплуатации. Все макеты и вкладыши из гафната диспрозия сохранили целостность, форму и размеры.

Макеты поглощающих элементов с таблетками гафната диспрозия в оболочке из 42ХНМ по-

казали высокую механическую стойкость на термический удар. При нагреве до 1200°С и быстром охлаждении на некоторых таблетках наблюдалось появление трещин и частичное их разрушение на крупные фрагменты, которые механически не взаимодействовали с оболочкой и не деформировали ее. При отрезании концевых деталей таблетки и их фрагменты свободно извлекались из оболочки.

Таблетки гафната диспрозия имеют высокую коррозионную стойкость в паро-водяной среде при температурах до 1300°С, что только на 45°С ниже температуры плавления оболочки из хромо-никелевого сплава 42ХНМ (1345°С). После выдержке при данной температуре в течение 25 мин таблетки полностью сохранили целостность, форму и размеры с отсутствием на поверхности следов коррозии.

Проведенный цикл термических и коррозионных испытаний таблеток гафната диспрозия и макетов поглощающих элементов с оболочками из сплава 42ХНМ при высоких температурах, в па-

Таблица 4. Плотность таблеток гафната диспрозия и параметры кристаллической решетки с поверхности, элементный состав таблеток после проведения испытаний в составе макетов М-ТУ-В

Образец	ρ , г/см ³	a ($Fm3m$), Å	Содержание элемента, масс. доля %		
			Dy	Hf	W
ГфД-исходный	8.05 ± 0.03	5.267(5)	35.45(22)	64.17(42)	0.38(11)
ГфД-М-ТУ-900	8.05 ± 0.02	5.264(7)	34.78(15)	64.83(19)	0.39(14)
ГфД-М-ТУ-1000	8.07 ± 0.03	5.262(5)	34.99(25)	64.37(32)	0.64(8)
ГфД-М-ТУ-1100	8.03 ± 0.02	5.264(6)	35.62(18)	63.82(38)	0.56(21)
ГфД-М-ТУ-1200	8.04 ± 0.02	5.263(4)	34.82(35)	64.77(24)	0.41(15)

Таблица 5. Элементное содержание на поверхности образцов гафната диспрозия после испытаний на термический удар, определенные методом энергодисперсионного анализа

Образец	Содержание элементов, масс. %			
	Hf	Dy	O	Cr
ГфД-М-ТУ-900	30.30(14)	54.60(32)	15.10(9)	—
ГфД-М-ТУ-1000	31.80(23)	54.90(21)	14.30(19)	—
ГфД-М-ТУ-1100	30.00(33)	54.40(44)	15.60(11)	—
ГфД-М-ТУ-1200	27.80(28)	52.00(23)	17.0(9)	3.2(5)
ГфД-М-ТУ-В-900	31.00(21)	54.40(29)	14.60(25)	—
ГфД-М-ТУ-В-1000	30.70(25)	54.70(30)	14.60(19)	—
ГфД-М-ТУ-В-1100	29.50(19)	56.20(22)	14.30(23)	—
ГфД-М-ТУ-В-1100	27.90(36)	52.20(39)	16.70(20)	3.2(6)

ро-водяной среде в основном соответствует параметрам возможных аварийных ситуаций для тепло-выделяющих элементов ТВС ВВЭР-1000 и является предельным, с малой вероятностью реализации для ПЭЛ ПС СУЗ в реакторе ВВЭР-1000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Рисованный В.Д., Захаров А.В., Клочков Е.П. и др.* Бор в ядерной технике. 2003. Димитровград: НИИАР.

2. *Рисованный В.Д., Захаров А.В., Клочков Е.П.* Поглощающие материалы и органы регулирования ядерных реакторов. 2012. Москва: МЭИ.

3. *Рисованный В.Д.* // ВАНТ: Физика ядерных реакторов. 2020. №2. С. 63.

4. *Рисованный В.Д., Захаров А.В., Пономаренко В.Б. и др.* Диспрозий в ядерной технике 162Dy66. 2011. Димитровград: НИИАР.

5. *Захаров А.В., Рисованный В.Д., Муралева Е.М. и др.* // Сб. тр. АО ГНЦ НИИАР. 2011. Т. 2. С. 8.

6. *Урусов А.А., Чувилов С.В., Полуниин К.К. и др.* // Цвет. мет. 2022. № 10. С. 41.

7. *Базюк С.С., Беспечалов Б.Н., Киселев Д.С. и др.* // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2018. № 4 (14). С. 74.

8. *Шевченко А.В., Лопато Л.М., Назаренко Л.В.* // Изв. АН СССР: Неорг. материалы. 1984. Т. 20 (11). С. 1862.

Thermal and Corrosion Tests of Hafnate Dysprosium up to Temperature 1300°C

V. D. Risovaniy¹, A. A. Mokrushin¹, A. A. Urusov¹,
S. V. Chuvikov¹, D. P. Shornikov², and M. S. Staltsov^{2,*}

¹LUCH JSC, Podolsk, 142103 Russia

²National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

*e-mail: msstaltsov@mephi.ru

Received December 20, 2024; revised December 20, 2024; accepted December 30, 2024

Abstract—The paper presents the results of thermal shock tests of non-irradiated mock-ups of WWER-1000 reactor absorber elements made of 42KhNM alloy with dysprosium hafnate pellets. Experiments of cyclic thermal tests and corrosion resistance tests in a steam-water environment at temperatures up to 1300°C of individual dysprosium hafnate pellets were conducted. The tests and studies were conducted taking into account the design service life of the absorber elements of WWER-1000 protection control systems during 20 years, the average value of reactor shutdown-startup cycles from 15 to 40, and design basis accident conditions for tolerant fuel.

Keywords: dysprosium hafnate, absorbing elements, thermal cycling tests, thermal shock, corrosion resistance