

СТРУКТУРА,
ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 621.039.53

ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ ГИДРИДОВ В НЕОБЛУЧЕННЫХ
ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБАХ ИЗ СПЛАВА Э110 В УСЛОВИЯХ,
ИМИТИРУЮЩИХ ДЛИТЕЛЬНОЕ СУХОЕ ХРАНЕНИЕ
ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

© 2021 г. Р. А. Курский^{a, *}, Д. В. Сафонов^a, А. В. Рожков^a, О. О. Забусов^{a, b},
А. С. Фролов^a, Е. А. Кулешова^a, Е. В. Алексеева^a, А. С. Брагин^a, Е. А. Васильева^a,
А. Б. Гайдученко^a, Д. А. Мальцев^a, М. А. Скундин^a

^aНИЦ Курчатовский институт, пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182 Россия

^bНИЯУ МИФИ, Каширское ш., 31, Москва, 115409 Россия

*e-mail: ruslan.kurskiy@rambler.ru

Поступила в редакцию 11.08.2020 г.

После доработки 13.04.2021 г.

Принята к публикации 22.04.2021 г.

Переориентация гидридов в процессе сухого хранения отработавшего ядерного топлива является одним из возможных механизмов деградации свойств оболочек твэлов реакторов ВВЭР, изготовленных из сплава Э110 (Zr–1% Nb) на основе губчатого циркония. Для определения степени переориентации гидридов в оболочках твэлов в условиях, имитирующих условия сухого хранения, были проведены серии испытаний необлученных образцов с содержанием водорода 100 и 200 wppm при различном уровне окружных напряжений до 100 МПа длительностью 40 сут. Ориентацию гидридов определяли с помощью металлографических исследований. Для оценки механических характеристик были проведены испытания кольцевых образцов на статическое одноосное растяжение. Анализ гидридов проводили с помощью просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Было показано, что при условиях испытаний наблюдается частичная переориентация гидридов, которая, в свою очередь, способствует снижению пластичности.

Ключевые слова: Э110, цирконий, гидриды, тепловыделяющие элементы, сухое хранение

DOI: 10.31857/S0015323021090072

ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных критериев обеспечения ядерной безопасности при длительном хранении отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реакторов ВВЭР-1000 является гарантия целостности топливной оболочки и сохранности топлива в хранилище. В процессе эксплуатации в результате взаимодействия теплоносителя с оболочками твэлов, изготовленными из сплава Э110 на основе электролитического или губчатого циркония, внутрь оболочки проникает атомарный водород [1]. При снижении температуры ОЯТ вследствие уменьшения остаточного тепловыделения при длительном хранении возможно образование хрупких гидридных фаз, приводящих к деградации механических свойств материала оболочек [2]. При эксплуатации, когда внутреннее давление в твэле компенсируется внешним давлением теплоносителя, гидриды обычно имеют окружную ориентацию, что обусловлено текстурой материала, созданной в

процессе термомеханической обработки при изготовлении оболочек твэлов. Однако при транспортировке и в процессе сухого хранения может произойти перерастворение водорода с последующим выделением гидридов в радиальном направлении под действием внутреннего давления при охлаждении. Радиально ориентированные гидриды могут служить путем распространения трещины и вызывать охрупчивание материала оболочки [3].

В ранее проделанных работах [4–8] было исследовано влияние различных факторов (состав сплава, содержание водорода, окружные напряжения, а также штатных и нештатных условий хранения, таких как максимальная температура и время выдержки при ней, скорость охлаждения) на переориентацию гидридов в материалах оболочек твэлов. Показано, что наибольшее значение имеют максимальная температура и уровень окружных напряжений. В связи с этим существу-

Таблица 1. Значения механических характеристик исследуемых материалов при комнатной температуре

Материал	Внешний диаметр трубки, мм	Внутренний диаметр трубки, мм	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_m , МПа	δ_m , %*	δ , %**
Э110	9.10	7.93	372	452	4.9	28.8

* – равномерное удлинение; ** – общее удлинение.

ет ряд ограничений при обращении с ОЯТ. Так, максимальная допустимая температура оболочки твэла при стандартных условиях сухого хранения ОЯТ легководных реакторов, в частности для ВВЭР-440, составляет 350°C, а при переходных и аварийных режимах допустимо ее повышение до 450°C в течение 8 ч [9]. Эксплуатация реакторов ВВЭР-1000 предполагает более высокую степень выгорания топлива и более высокое давление газообразных продуктов деления под конец топливной кампании. Таким образом, необходимо пересмотреть использование уже существующих параметров сухого хранения ОЯТ для реакторов ВВЭР-1000.

Для обоснования безопасности длительного сухого хранения ОЯТ ВВЭР-1000 необходимо иметь модель, прогнозирующую поведение материала оболочек на всех этапах хранения, включая транспортировку и вакуумную сушку. При этом, в основе модели должны лежать экспериментальные данные, полученные в ходе термомеханических испытаний, имитирующих условия сухого хранения. На данный момент исследований по переориентации гидридов в материале Э110 проведено недостаточно для того, чтобы обосновать модель и определить критические параметры хранения. К тому же, в некоторых работах [10, 11] наблюдается расхождение результатов, полученных при схожих условиях испытаний. Целью исследований в данной работе является получение экспериментальных данных по формированию структуры гидридов, по их переориентации в необлученных образцах в условиях, имитирующих условия сухого хранения, определение структурно-фазового состава гидридов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования материалов оболочек твэлов в исходном состоянии использовали образцы длиной 100 мм, вырезанные из бесшовных холоднокатаных труб, изготовленных из сплава Э110 на основе губчатого циркония. Химический состав сплава Э110 по данным завода-изготовителя (ТУ 001.437–2014) в мас. %: Zr–98.8; Nb–0.99; Fe–

0.05; O–0.086; N < 0.002; H–0.0004; Hf–0.004, Cu < 0.001, C–0.005. Размеры и механические характеристики исследуемого материала в исходном состоянии, определенные при испытаниях кольцевых образцов на статическое растяжение, представлены в табл. 1.

Наводороживание оболочек из сплава Э110 производили методом катодной зарядки. Для создания гидридных фаз, характерных для сплавов на основе циркония (в первую очередь, δ -гидридов [12]), из которых изготовлены оболочки твэлов водо-водяных реакторов, после окончания процесса катодной зарядки проводили диффузионный отжиг в течение 7 ч при температуре 450°C с последующим охлаждением с печью со скоростью 1°C/мин. Отжиг проводили в герметичной ампуле в атмосфере аргона. В результате были получены образцы с содержанием водорода 100 и 200 wrpm. Содержание водорода контролировали на газоанализаторе JUWE-STROHLEIN Hmat 225 (Германия).

Детальный анализ фазового состава гидридов проводили при помощи просвечивающего электронного микроскопа Titan 80-300 (FEI, США) и высокоразрешающего растрового электронного микроскопа (РЭМ) Merlin (Zeiss, Германия). Для получения изображения гидридов в высоком разрешении использовали метод просвечивающей растровой электронной микроскопии (ПРЭМ).

Для определения типа гидридных фаз использовали два независимых метода: метод микродифракции (SAED – Selected Area Electron Diffraction) в совокупности с анализом Фурье-преобразований HRTEM-изображений [13], а также спектроскопия энергетических потерь электронов (EELS – Electron Energy Loss Spectroscopy). Последний метод позволяет производить идентификацию гидридов по фрагменту спектра энергетических потерь электронов в области плазмонного пика [14, 15]. Расшифровку дифракционных картин проводили с использованием рентгеновской базы данных порошковой дифракции PDF-4 [15] и программного пакета DiffraCalc [16].

Для дополнительной верификации использовали метод дифракции обратно рассеянных элект-

Таблица 2. Режимы термических испытаний

Серия испытаний	Содержание водорода, wrpm	Температура, °С	Время выдержки, ч	Окружные напряжения, МПа
1	200	340 + термопик (380)	960	0; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100
2	200	340	960	0; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100
3	100	340	960	0; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100

тронов EBSD (Electron Back Scattered Diffraction) с помощью приставки для EBSD-анализа (Oxford Instruments) на растровом электронном микроскопе.

Для того чтобы в исследованных образцах вызвать переориентацию гидридов за счет внутренних окружных напряжений при повышенных температурах, внутреннюю полость образцов заполняли аргоном под высоким давлением. Температура испытаний и внутренние напряжения были близки к условиям послереакторного хранения [9]. Окружные напряжения в образцах с содержанием водорода 100 и 200 wrpm варьировали от 0 до 100 МПа при температуре выдержки 340°С, с дополнительным подъемом температуры до 380°С в течение 1 ч, со скоростями нагрева и охлаждения 6°С/ч. В табл. 2 приведены параметры термических испытаний различных серий образцов. Образец для описанных ранее микроскопических исследований методами ПЭМ и РЭМ был выбран из серии испытаний 1 с окружным напряжением 100 МПа.

Для количественной оценки переориентации гидридов из каждого образца, прошедшего термические испытания, вырезали три кольцевых образца: из центра трубки и на расстояниях ± 2.5 см от центра.

В качестве параметра оценки использовали коэффициент K_L — отношение суммы длин переориентировавшихся ($>45^\circ$) гидридов к сумме длин всех гидридов [4].

Для выявления зависимости механических свойств от переориентации гидридов после термомеханических испытаний производили испытания кольцевых образцов на одноосное растяжение. Кольцевые образцы шириной 3 мм вырезали из наводороженных трубок после термоиспытаний и испытывали при комнатной температуре на статическое растяжение на универсальной испытательной машине ZWICK/ROELL Z030 со скоростью перемещения траверсы 1 мм/мин в соответствии с методикой, описанной в [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Растворимость водорода в цирконии и в сплавах на его основе при температурах, соответствующих условиям эксплуатации оболочек твэлов и начальным условиям сухого хранения твэлов (300–400°С), зависит от многих факторов. Для диапазона температур 300–400°С предел растворимости водорода в сплаве Zr–1% Nb находится в области 100–200 wrpm [18, 19]. Снижение температуры способствует уменьшению предела растворимости водорода в циркониевых сплавах, что ведет к выделению гидридных фаз.

Тип гидридов, образующихся в изделиях из сплавов на основе Zr, и их морфология определяется многими факторами, включая чистоту Zr, режимы термической обработки, внешнюю нагрузку, скорость деформации и концентрацию водорода. Согласно данным [20–22], в сплавах циркония может наблюдаться 4 типа гидридов.

Методами SAED в исследованных образцах выявлено наличие гидридов двух типов:

- γ -гидриды (ZrH), имеющие ГЦТ-решетку с параметрами $a \sim 4.586 \text{ \AA}$ и $c \sim 4.948 \text{ \AA}$ [23];
- δ -гидриды (ZrH_{1.6}), имеющие ГЦК-решетку с параметром $a \sim 4.777 \text{ \AA}$ [24].

Типичные изображения гидридов и соответствующие им картины микродифракции приведены на рис. 1, 2.

С целью дополнительной верификации полученных данных проводили определение типа гидридов методами EELS, путем определения положения пика плазмонных потерь для идентифицируемых фаз. По данным [20, 25] δ -гидридам должно соответствовать положение пика на 19.2 эВ, а γ -гидридам — 18.3 эВ. Типичные спектры энергетических потерь электронов для δ - и γ -гидридов, а также для Zr-матрицы сплава Э110 (пик плазмонных потерь соответствует энергии 16.8 эВ) приведены на рис. 3.

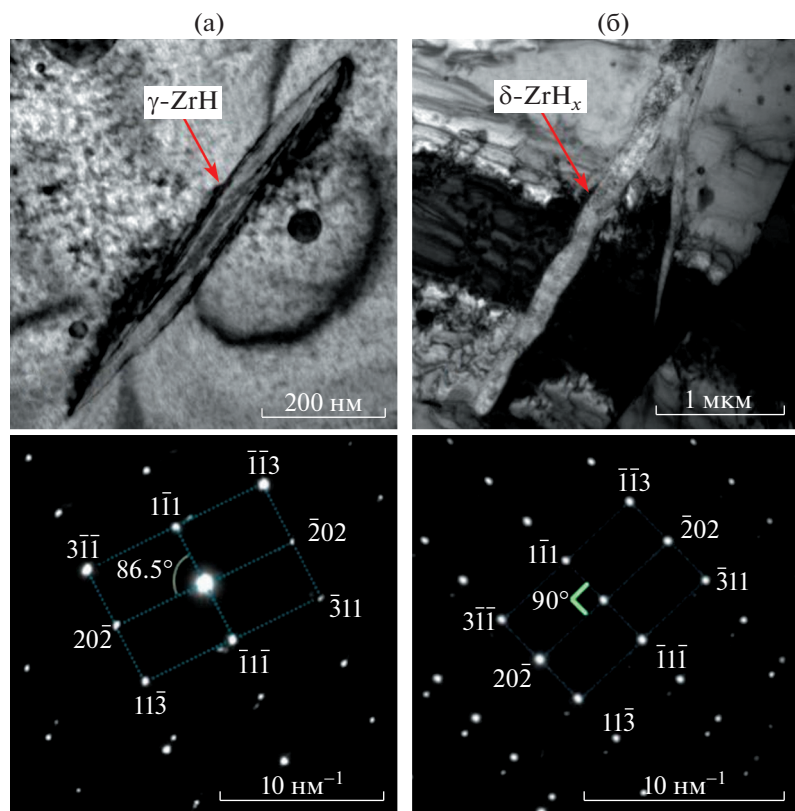


Рис. 1. ПЭМ-изображения гидридов в сплаве Э110 и соответствующие им картины микродифракции с осью зоны $\langle 121 \rangle$: а – γ -гидрид; б – δ -гидрид.

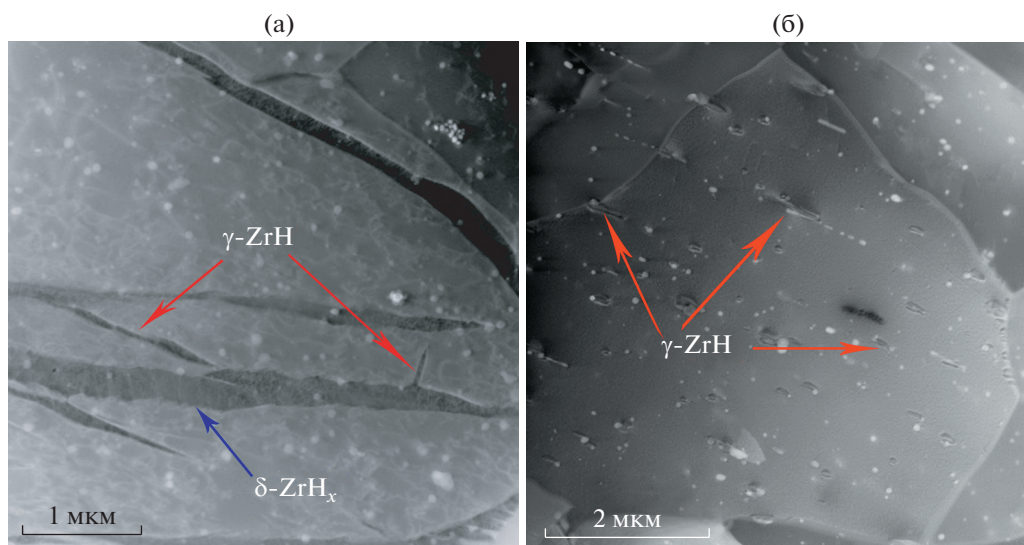


Рис. 2. ПРЭМ-изображения областей, содержащих δ -гидриды с расположенными по периферии γ -гидридами (а) и дисперсные частицы γ -гидридов (б).

Исследования образцов оболочек твэлов из сплава Э110 после наводороживания до 100 и 200 wppm методами РЭМ, в том числе методом

EBSD (см. рис. 4, 5) показали, что в структуре присутствуют стеки гидридов, представленные, главным образом, δ -гидридами. δ -гидриды име-

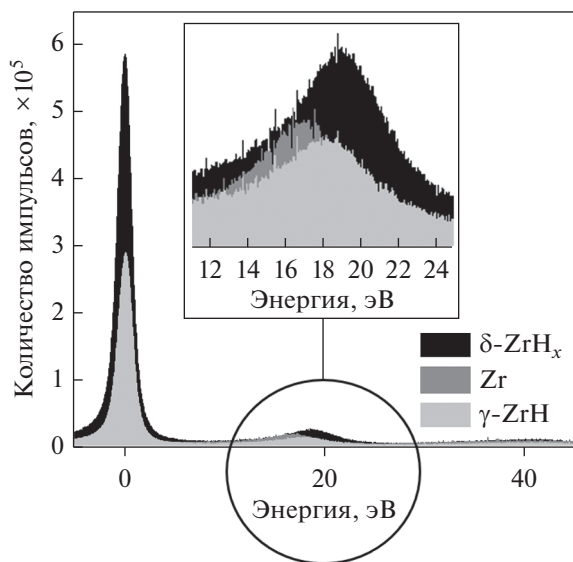


Рис. 3. Изображение EELS-спектров в области энергий пика плазмонных потерь.

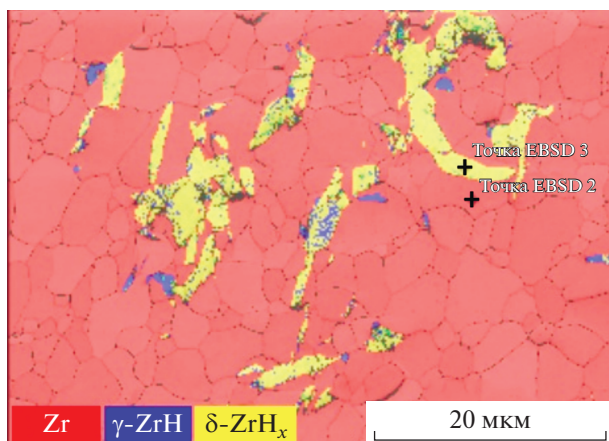


Рис. 4. Многослойная EBSD-карта фаз с участка, содержащего гидриды, в образцах сплава Э110 после наводороживания до 200 wrpm.

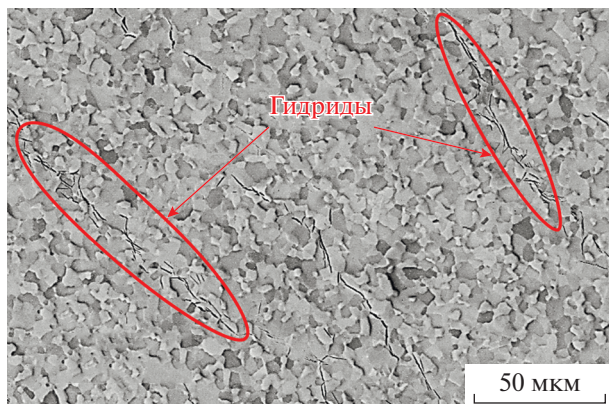


Рис. 5. РЭМ-изображение участка кольцевого образца, содержащего гидридные фазы.

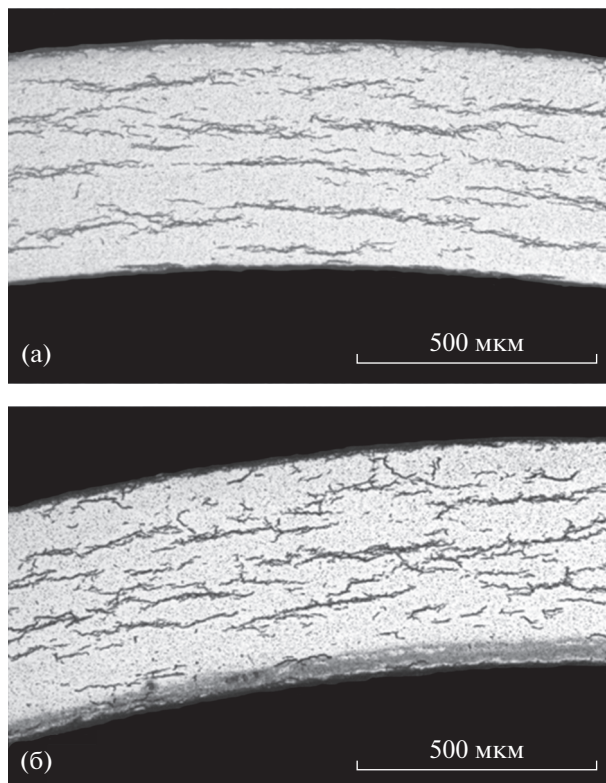


Рис. 6. Микроструктура гидридов в образцах с содержанием водорода 200 wrpm до (а) и после термических испытаний в течение 40 сут при внутреннем давлении 80 МПа (б).

ют форму пластин, ориентированных вдоль оси твэла и располагаются в теле зерна, но иногда могут пересекать межзеренную границу. γ -гидриды, имеющие существенно меньшие размеры и игольчатую форму, расположены, преимущественно, по периферии стеков δ -гидридов. Иногда также встречаются дисперсные частицы γ -гидридов вне связи с δ -гидридами.

В исходном состоянии стеки гидридов преимущественно ориентированы тангенциально (коэффициент K_L не превышает 0.1), что может быть связано с текстурой прокатки [26]. Как отмечалось ранее, перепад температур в ходе сухого хранения, вызванный как штатными [8], так и нештатными ситуациями [27], может оказать дополнительное влияние на ориентацию гидридов. В рамках данной работы производили термо механические испытания образцов с длительной выдержкой 40 сут (серия испытаний 2). На рис. 6 представлены фотографии образцов до (рис. 6а) и после термических испытаний (рис. 6б). Анализ показал, что после термических испытаний наблюдается частичная переориентация гидридов в радиальном направлении. На рис. 7 представлена

зависимость коэффициента переориентации от внутренних окружных напряжений для образцов с различным содержанием водорода (серия испытаний 2 и 3). Видно, что наблюдается монотонное увеличение коэффициента переориентации с ростом напряжений, при этом для образцов с содержанием водорода 100 wrpm такое поведение начинается с определенного уровня напряжений (70 МПа).

Чтобы оценить вклад кратковременного повышения температуры, была проведена серия испытаний 1 с дополнительным термопиком. На рис. 8 показан график зависимости коэффициента переориентации от окружных напряжений для образцов серий испытаний 1 и 2. Для обоих видов образцов наблюдался практически линейный рост коэффициента переориентации с увеличением окружных напряжений ($R^2 = 0.9$ и 0.83). Видно, что дополнительный кратковременный подъем температуры до 380°C не оказывает заметного влияния на переориентацию гидридов.

Несмотря на то, что термическая выдержка под напряжением в различных условиях привела к переориентации гидридов в радиальном направлении (что видно на рис. 6 и 7), значительная доля гидридов сохранила исходную тангенциальную ориентацию, а абсолютные значения коэффициента переориентации K_L не превышали 0.18. Одной из причин такого эффекта может быть неполное растворение первичных гидридов тангенциальной ориентации при максимальной температуре (до 380°C) [5] или недостаточный уровень напряжений (до 100 МПа) во время испытаний.

На рис. 9 представлены результаты измерений механических характеристик в зависимости от коэффициента переориентации K_L для всех испытанных на статическое растяжение кольцевых образцов. Видно, что равномерное удлинение снижается с 5.9 до 3.5% и наблюдается умеренная корреляция с коэффициентом переориентации (коэффициент корреляции равен 0.62 и 0.57 для образцов с содержанием водорода 100 и 200 wrpm соответственно). При этом значение равномерного удлинения непосредственно после наводороживания немного повышается по сравнению с исходным состоянием, а прочностные характеристики (предел прочности и условный предел текучести) несколько снижаются, что может быть вызвано диффузионным отжигом после наводороживания, приводящим к отжигу дефектов и внутренних напряжений, возникающих в процессе изготовления твэльных труб. Прочностные характеристики на рис. 9 приведены для всех типов образцов.

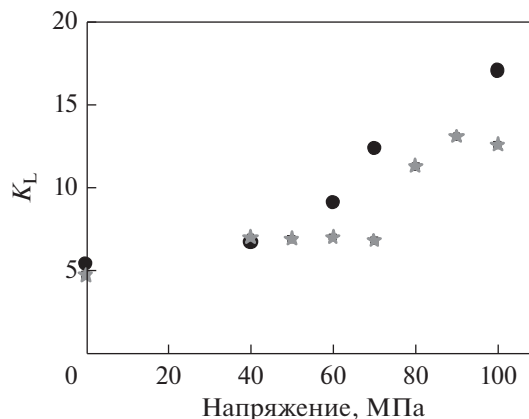


Рис. 7. Зависимость коэффициента переориентации от окружных напряжений для образцов: ★ – серия испытаний 3; ● – серия испытаний 2.

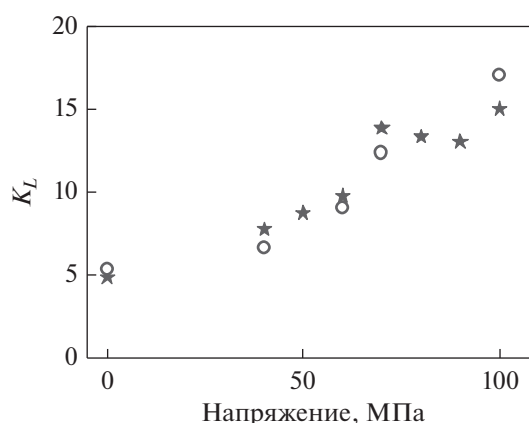


Рис. 8. Зависимость коэффициента переориентации от окружных напряжений для образцов серии испытаний: ★ – 1, ○ – 2.

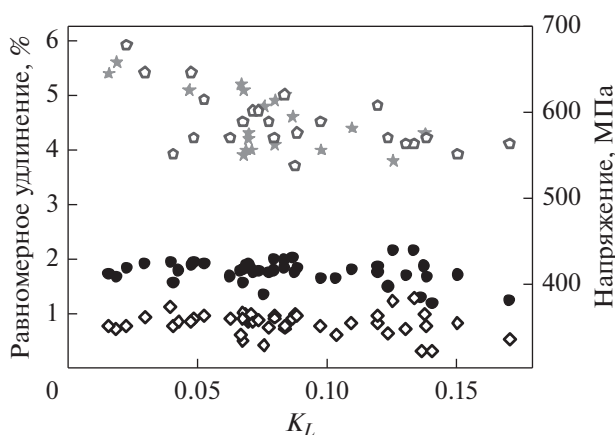


Рис. 9. Зависимость механических характеристик от коэффициента переориентации гидридов: равномерное удлинение для образцов с содержанием водорода ★ – 100 wrpm и ◇ – 200 wrpm, ● – предел прочности, ◇ – условный предел текучести.

Интенсивная диффузия водорода, проходящая в процессе термических испытаний, может привести к изменениям в матричной фазе α -Zr, в частности за счет микроискажений, возникающих, например, при образовании трехмерных нанокластеров в тетраэдрических порах в кристаллической решетке Zr, а также дислокационных петель вакансионного типа в базисных плоскостях [28].

Однако в литературе нет указаний на существенное влияние этих эффектов на характеристики прочности и пластичности сплавов данного типа, а основные изменения механических характеристик считаются обусловленными образованием гидридов и их неблагоприятной ориентацией [1, 2]. При достижении определенных напряжений гидриды являются местом зарождения микротрещин и служат путем их распространения. Движение трещин вдоль гидридов приводит к хрупкому разрушению, а при переходе трещины в циркониевую матрицу, механизм разрушения сменяется на вязкий. При наличии достаточного количества связанных радиальных гидридов механизм разрушения может полностью смениться на хрупкий и наблюдается резкая деградация механических свойств с опасностью разрушения трубки при внешних механических воздействиях или под действием напряжений, вызванных внутренним давлением на оболочку газов и топливных таблеток [6].

Считается, что предельным критерием сохранения пластических свойств является способность к полной деформации (упругая и пластическая) не менее 1% [29]. Стоит отметить, что в большинстве исследований проводят механические испытания на сжатие кольцевых образцов, в то время как в данной работе проводились испытания на растяжение. Испытания на сжатие в некоторых случаях позволяют измерить пластичность хрупких материалов, тогда как испытания на одноосное растяжение, являясь более жесткими, не всегда позволяют определить характеристики пластичности. Тем не менее способность оболочки твэла пластически деформироваться под действием внутренних растягивающих напряжений в большей степени имитируется при испытаниях на растяжение, чем сжатие. По этой причине в данной работе использовался этот метод.

Таким образом, термомеханические испытания, имитирующие условия сухого хранения, показали, что частичная переориентация гидридов при значениях коэффициента $K_L < 0.18$ практически линейно зависит от внутренних окружных напряжений, при этом вклад других факторов является незначительным.

По результатам механических испытаний кольцевых образцов была выявлена умеренная корреляция между равномерным удлинением и коэффициентом переориентации при постоянном уровне прочностных свойств. Наблюдаемое снижение равномерного удлинения при испытаниях на статическое растяжение может быть обусловлено увеличением степени переориентации гидридов, которая, однако, была явно ниже, чем во многих работах по изучению пороговых напряжений [4, 6, 10]. Поэтому в дальнейшем планируется провести дополнительные испытания при повышенных напряжениях, чтобы определить значения пороговых напряжений, вызывающих значимую переориентацию гидридов в оболочках из сплава Э110. Общий уровень величины равномерного удлинения сохранился выше предельного (>1%), что говорит об отсутствии резкого снижения пластичности при данных режимах испытаний. При этом выявленная частичная переориентация гидридов не привела к изменениям характеристик прочности сплава. Таким образом, рассмотренные в данной работе условия термических испытаний не привели к изменению ориентации гидридов, способным вызвать критическую деградацию эксплуатационных характеристик твэльных труб, изготовленных из сплава Э110, в необлученном состоянии.

Работа была проведена по заказу АО «ТВЭЛ» с использованием экспериментальной базы Исследовательского комплекса материаловедческих защитных камер НИЦ «Курчатовский институт». Результаты данной работы будут использованы в разработке модели для обоснования безопасности длительного сухого хранения ОЯТ реакторов ВВЭР-1000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам термомеханических испытаний необлученных оболочечных образцов из сплава Э110 на основе губчатого циркония с целью определения степени переориентации гидридов в условиях, имитирующих сухое хранение, последующих механических испытаний и микроструктурных исследований было установлено, что:

1. В исследуемых наводороженных образцах стеки гидридов, главным образом, представлены δ -гидридами. γ -гидриды имеют существенно меньшие размеры и расположены, преимущественно, по периферии δ -гидридов, а также в виде отдельных выделений в теле зерна.

2. Под действием внутренних окружных напряжений произошла частичная переориентация гидридов в радиальном направлении. Дополнительный термопик по окончании выдержки не

оказал заметного влияния на переориентацию гидридов.

3. При испытаниях кольцевых образцов на статическое растяжение выявлено снижение равномерного удлинения с 5.9 до 3.5% с увеличением доли радиальных гидридов, что может быть связано, в первую очередь, с переориентацией гидридов. Для всех образцов прочностные характеристики несколько снизились по сравнению с характеристиками в исходном состоянии, что может быть связано с предшествующей термической обработкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шмаков А.А., Калинин Б.А., Смирнов Е.А. Водород в сплавах циркония. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 188 с.
2. Шмаков А.А., Калинин Б.А., Смирнов Е.А. О возможности гидридного растрескивания оболочек твэлов легководных реакторов // Инженерная физика. 1999. Т. 1. С. 60–62.
3. Motta A.T., Capolungo L., Chen L.Q., Cinbiz M.N., Daymond M.R., Koss D.A., Lacroix E., Pastore G., Simon P.C.A., Tonks M.R., Wirth B.D., Zikry M.A. Hydrogen in zirconium alloys: a review // J. Nucl. Mater. 2019. V. 518. P. 440–460.
4. Aomi M., Baba T., Miyashita T., Kamimura K., Yasuda T., Shinohara Y., Takeda T. Evaluation of hydride reorientation behavior and mechanical properties for high-burnup fuel-cladding tubes in interim dry storage // J. ASTM Int. 2008. V. 5. № 9. P. 651–673.
5. Lee J.M., Kim H.A., Kook D.H., Kim Y.S. A study on the effects of hydrogen content and peak temperature on threshold stress for hydride reorientation in Zircaloy-4 cladding // J. Nucl. Mater. 2018. V. 509. P. 285–294.
6. Auzoux Q., Bouffieux P., Machiels A., Yagnik S., Bourdilliau B., Mallet C., Mozzani N., Colas K. Hydride reorientation and its impact on ambient temperature mechanical properties of high burn-up irradiated and unirradiated recrystallized Zircaloy-2 nuclear fuel cladding with an inner liner // J. Nucl. Mater. 2017. V. 494. P. 114–126.
7. Cha H.J., Won J.J., Jang K.N., An J.H., Kim K.T. Tensile hoop stress-, hydrogen content- and cooling rate-dependent hydride reorientation behaviors of Zr alloy cladding tubes // J. Nucl. Mater. 2015. V. 464. P. 53–60.
8. Desquines J., Drouan D., Billone M., Puls M.P., March P., Fourgeaud S., Getrey C., Elbaz V., Philippe M. Influence of temperature and hydrogen content on stress-induced radial hydride precipitation in Zircaloy-4 cladding // J. Nucl. Mater. 2014. V. 453. № 1–3. P. 131–150.
9. WWER-440 fuel rod experiments under simulated dry storage conditions. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004. 74 p. IAEA-TECDOC-1385.
10. Черняева Т.П., Грицина В.М., Красноруцкий В.С., Режкина А.П., Петельгузов И.А., Слабоспицкая Е.А. Влияние температурного режима и напряженного состояния на переориентацию гидридов в оболочках твэлов из Zr–1% Nb // ВАНТ. 2018. Т. 113. № 1. С. 189–202.
11. Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Коновалов Ю.В., Косауров А.А., Перегуд М.М., Коротченко Е.А., Шишин В.Ю., Шельдяков А.А. Анализ влияния напряженно-деформированного состояния облученных оболочек твэлов из циркониевых сплавов на ориентацию гидридов // Атомная энергия. 2017. Т. 122. № 2. С. 73–77.
12. Min S.J., Won J.J., Kim K.T. Terminal cool-down temperature-dependent hydride reorientations in Zr–Nb alloy claddings under dry storage conditions // J. Nucl. Mater. 2014. V. 448. № 1–3. P. 172–183.
13. Williams D.B., Carter C.B. Transmission electron microscopy: a textbook for materials science. N.Y.: Springer, 2009. 760 p.
14. Kurata H., Isoda S., Kobayashi T. Chemical mapping by energy-filtering transmission electron microscopy // J. Electron Microsc. (Tokyo). 1996. V. 45. № 4. P. 317–320.
15. <http://www.icdd.com/translation/rus/pdf2.htm>
16. Frolov A.S., Krikun E.V., Prikhodko K.E., Kuleshova E.A. Development of the DIFFRACALC program for analyzing the phase composition of alloys // Crystallogr. Reports. 2017. V. 62. № 5. P. 809–815.
17. Yegorova L., Asmollov V., Abyshov G., Molofeev V., Avvakumov A., Kaplar E., Lioutov K., Shestopalov A., Bortash A., Maiorov L., Mikitiouk K., Polyanov V., Smirnov V., Goryachev A., Prokhorov V., Pakhnutz V., Vurim A. Database on the behavior of high burnup fuel rods with Zr–1% Nb cladding and UO₂ fuel (VVER type) under reactivity accident conditions. Description of test procedures and analytical methods. NUREG/IA-0156. V. 2. 1999.
18. Khatamian D., Ling V.C. Hydrogen solubility limits in α - and β -zirconium // J. Alloys Compd. 1997. V. 253–254. P. 162–166.
19. Khatamian D. Solubility and partitioning of hydrogen in metastable Zr-based alloys used in the nuclear industry // J. Alloys Compd. 1999. V. 293. P. 893–899.
20. Zhao Z., Blat-Yrieix M., Morniroli J.P., Legris A., Thuinet L., Kihn Y., Ambard A., Legras L. Characterization of zirconium hydrides and phase field approach to a mesoscopic-scale modeling of their precipitation // J. ASTM Int. 2008. V. 5. № 3. JAI101161. 21 p.
21. Daum R.S., Chu Y.S., Motta A.T. Identification and quantification of hydride phases in Zircaloy-4 cladding using synchrotron X-ray diffraction // J. Nucl. Mater. 2009. V. 392. P. 453–463.
22. Zhao Z., Morniroli J.P., Legris A., Ambard A., Kihn Y., Legras L., Blat-Yrieix M. Identification and characterization of a new zirconium hydride // J. Microsc. 2008. V. 232. № 3. P. 410–421.
23. Sidhu S.S., Satya Murthy N.S., Campos F.P., Zauberis D. Neutron and X-ray diffraction studies of nonstoichiometric metal hydrides. ANL-FGF-332. 1962.

24. *Bowman R.C. Jr., Craft B.D., Cantrell J.S., Venturini E.L.* Effects of thermal treatments on the lattice properties and electronic structure of ZrH_x // *Phys. Rev. B*. 1985. V. 31. P. 5604–5615.
25. *Woo O.T., Carpenter G.J.C.* EELS characterization of zirconium hydrides // *Microsc. Microanal. Microstruct.* 1992. V. 3. P. 35–44.
26. *Kearns J.J., Woods C.R.* Effect of texture, grain size, and cold work on the precipitation of oriented hydrides in Zircaloy tubing and plate // *J. Nucl. Mater.* 1966. V. 20. № 3. P. 241–261.
27. *Alyokhina S.* Thermal analysis of certain accident conditions of dry spent nuclear fuel storage // *Nucl. Eng. Technol.* 2018. V. 50. № 5. P. 717–723.
28. *Christensen M., Wolf W., Freeman C., Wimmer E., Adamson R.B., Hallstadius L., Cantonwine P.E., Mader E.V.* Diffusion of point defects, nucleation of dislocation loops, and effect of hydrogen in hcp-Zr: Ab initio and classical simulations // *J. Nucl. Mater.* 2015. V. 460. P. 82–96.
29. *Pazdera F., Belac J.* Safety criteria and their comparison between WWER and PWR // *5th Int. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*, Albena, 2003.