

Анализ влияния напряженно-деформированного состояния облученных оболочек твэлов из циркониевых сплавов на ориентацию гидридов

© Г.В. Кулаков¹, А.В. Ватулин², Ю.В. Коновалов³, А.А. Косауров¹,
М.М. Перегуд¹, Е.А. Коротченко¹, В.Ю. Шишин⁴, А.А. Шельдяков⁴

¹ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А. Бочвара», Москва, 123098, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, 115409, Россия

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

⁴ОАО «ГНЦ – научно-исследовательский институт атомных реакторов»
(ГНЦ НИИАР), Димитровград, Ульяновская обл., 433510, Россия

Проведен анализ влияния распределения напряжений на характер распределения гидридов в циркониевых оболочках твэлов дисперсионного типа. Показано, что в оболочках твэлов под воздействием растягивающих напряжений может происходить переориентация гидридов циркония, обуславливающая появление радиально ориентированных гидридов и охрупчиванию оболочки при расхолаживании твэла. Определены значения растягивающих напряжений, при которых ориентация гидридов меняется с тангенциальной на радиальную.

Ключевые слова: циркониевый сплав, гидриды, напряжение, распределение, дисперсионный твэл, оболочка.

Введение. Оболочки из отечественных циркониевых сплавов Э110 и Э635 используются в твэлах энергетических реакторов типа ВВЭР и РБМК, а также в твэлах дисперсионного типа атомных ледоколов. Опыт успешной эксплуатации активных зон ледоколов, укомплектованных такими твэлами, показал их высокую работоспособность [1, 2].

Циркониевые сплавы склонны к поглощению водорода, что в условиях облучения приводит к повышению его концентрации в оболочках твэлов. Концентрация водорода из сплавов Э110 и Э635 в оболочках твэлов, облученных в условиях атомных ледоколов, не превышает 0,02 и 0,03 % (мас.) соответственно.

В области рабочих температур оболочек (280...340 °С) практически весь водород находится в твердом растворе, а в области низких температур (20...150 °С) он выделяется в виде гидридов циркония. Для исходного состояния циркониевых труб характерна тангенциальная ориентация гидридов, определяемая технологией изготовления. Однако в условиях облучения наряду с ростом содержания водорода в оболочках твэлов может происходить перераспределение

его ориентации под действием растягивающих напряжений. Это приводит к появлению радиально ориентированных гидридов и охрупчиванию оболочек при расхолаживании твэлов.

Данная проблема наиболее актуальна для твэлов дисперсионного типа, используемых в активных зонах атомных ледоколов и плавучих энергоблоков, где растягивающие напряжения в оболочках постоянно присутствуют в условиях эксплуатации.

Радиальная ориентация гидридов может приводить к снижению пластичности оболочки [3–5] и в конечном итоге отрицательно влиять на долговечность и надежность элементов конструкций реакторов [6–8].

В настоящей работе на основе результатов дореакторных и послереакторных исследований оболочек твэлов из циркониевых сплавов Э110, Э635 и Э635М [9], а также моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) облученных оболочек проведен анализ влияния напряжений в них на ориентацию гидридов.

Составы исследованных сплавов приведены в таблице.

Химический состав циркониевых сплавов

Сплав	Содержание элементов, % (мас.)			
	Nb	Sn	Fe	O
Э110	1,0	—	—	0,03
Э635	1,0	1,2	0,33	0,05
Э635М	0,8	0,8	0,33	0,07

Экспериментальное исследование влияния растягивающих напряжений на ориентацию гидридов в трубах в дореакторных условиях. Для изучения влияния напряжений, возникающих в оболочках твэлов в процессе эксплуатации, на ориентацию гидридов были изготовлены герметичные ампулы (образцы) из труб циркониевых сплавов Э110, Э635 и Э635М.

Образцы были наводорожены в соответствии со стандартом ASTM B-811 до концентрации водорода 0,02 % (мас.) методом газового насыщения. Растягивающие напряжения создавались внутренним давлением аргона.

Испытания газонаполненных наводороженных образцов проводили в паровой среде при температуре 340 и 400 °С в течение 30...40 сут.

При температуре 400 °С весь находящийся в образцах водород (0,02 % (мас.)) переходит из гидридной фазы в твердый раствор. При последующем охлаждении после выдержки в течении 30...40 сут., необходимой для залечивания следов от ранее выпавших гидридов, водород из твердого раствора выделяется в виде вновь образующихся

гидридов, располагающихся в матрице металла в соответствии с направлением и величиной действующих растягивающих напряжений.

При температуре 340 °С часть гидридов (менее 0,01 % (мас.)) не растворяется в цирконии и сохраняет исходную тангенциальную ориентацию, что затрудняет подсчет коэффициента ориентации гидридов F_n и оценку общей картины переориентации гидридов. Поэтому исследования проводили не только при максимальной рабочей температуре оболочек твэлов 340 °С, но и при температуре 400 °С.

На рис. 1 представлены характерные микроструктуры труб, подвергнутых действию растягивающих напряжений σ .

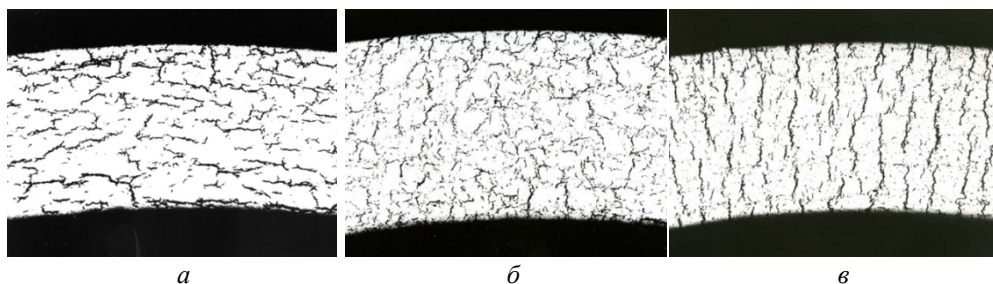


Рис. 1. Микроструктуры оболочек, подвергнутых действию растягивающих напряжений:

- a* — сплав Э110, $\sigma = 50$ МПа, $T = 340$ °С, $F_n = 0,29$;
- б* — сплав Э635М, $\sigma = 70$ МПа, $T = 400$ °С, $F_n = 0,62$;
- в* — сплав Э635, $\sigma = 130$ МПа, $T = 400$ °С, $F_n = 1,00$

Результаты исследований приведены на рис. 2.

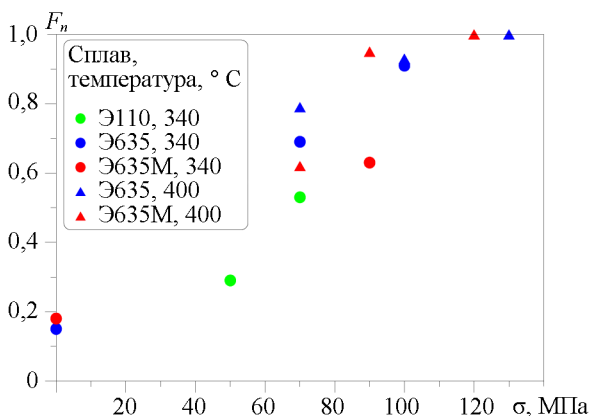


Рис. 2. Зависимость коэффициента ориентации гидридов от растягивающих напряжений в оболочке

Ориентация гидридов при отсутствии растягивающих напряжений сохраняет свою тангенциальную направленность, характерную для исходного состояния ($F_n \approx 0,15$).

Действие растягивающих напряжений $\sigma = 50$ МПа приводит к появлению незначительного количества радиальных гидридов в образцах из сплава Э110, но суммарная ориентация гидридов находится в пределах допустимого для оболочечных труб после изготовления: $F_n = 0,29$.

Увеличение растягивающих напряжений до 70 МПа существенно повышает долю радиально направленных гидридов. В образцах из сплава Э110 F_n возрастает до 0,53, в образцах из сплавов Э635М и Э635 — до 0,62 и 0,69 соответственно.

Увеличение напряжений до 90 МПа и выше приводит к уже полностью радиальной ориентации гидридов в образцах из сплавов Э635 и Э635М и F_n составляет 0,9...1,0.

Температура испытаний большой роли в переориентации гидридов не играет. При 340 °С часть первоначально выпавших после исходного наводороживания тангенциально расположенных гидридов не перешла в твердый раствор вследствие ограниченной растворимости, поэтому коэффициент F_n испытанных при 400 °С образцов оказался несколько выше, чем у образцов, испытанных при 340 °С.

Таким образом, изменение ориентации гидридов с тангенциальной на радиальную начинается при напряжениях 50...70 МПа и слабо зависит от температуры испытаний. При напряжении 70 МПа в ориентации гидридов структура образцов становится ближе к радиальной, а F_n изменяется от 0,5 до 0,8. При этом значения F_n выше у более прочного сплава. При напряжениях свыше 90 МПа ориентация гидридов в оболочках полностью радиальная.

По результатам дореакторных исследований можно принять, что пороговое напряжение, при котором происходит переориентация гидридов, $\sigma_{\text{lim}} = 70...90$ МПа. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами работ [10] ($\sigma_{\text{lim}} = 75...80$ МПа) и [11] ($\sigma_{\text{lim}} = 74$ МПа при $T = 400$ °С).

Экспериментальное исследование распределения гидридов в оболочках облученных твэлов, сопоставление с результатами расчетов НДС. В необлученных оболочках твэлов содержание водорода незначительно (рис. 3, а). В результате облучения содержание водорода в оболочках твэлов заметно возрастает. При отсутствии приложенных напряжений ориентация гидридов является тангенциальной (рис. 3, б).

В ходе послереакторных исследований облученных твэлов, проводимых в НИИАР (г. Димитровград), изучали распределение водорода в оболочках твэлов из циркониевых сплавов, облученных в реакторах атомных ледоколов. Проводили травление оболочек на гидриды.

Установили, что под действием растягивающих напряжений, вызванных радиационным распуханием топливного сердечника, в оболочках твэлов частично происходит смена ориентации гидридов с

исходной тангенциальной на радиальную. Причем на определенных участках оболочки преимущественное выпадение гидридов радиальной ориентации происходит с ее внешней стороны (при этом с внутренней стороны оболочки образуются в основном тангенциально ориентированные гидриды), тогда как на других участках оболочки распределение гидридов обратное: с внешней стороны ориентация гидридов преимущественно тангенциальная, а с внутренней — радиальная. Данное явление обусловлено сложным НДС оболочек, возникающим под действием ряда факторов:

- распухания топливной композиции в процессе облучения;
- давления теплоносителя;
- релаксации напряжений в оболочке из-за радиационной ползучести (следует отметить, что для циркониевых сплавов Э110 и Э635 скорость радиационной ползучести заметно выше, чем скорость термической ползучести при температуре эксплуатации).

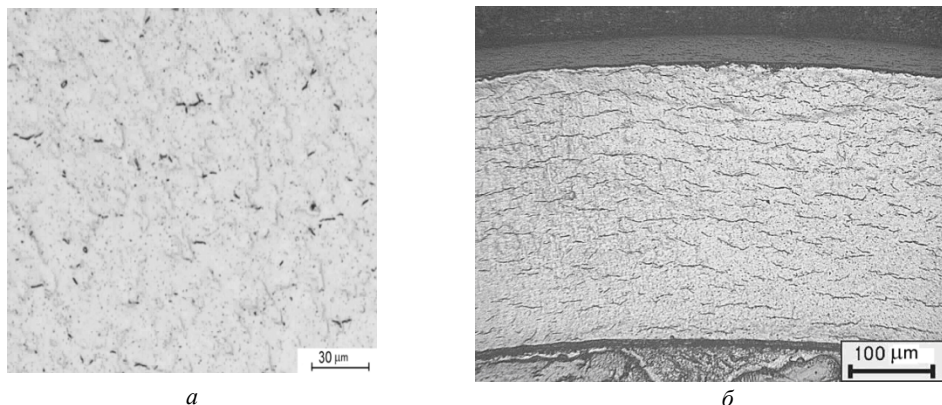


Рис. 3. Микроструктура оболочки твэла из сплава Э635 (травление на гидриды):

а — в исходном состоянии (необлученный твэл); *б* — облученный твэл при отсутствии напряжений (ориентация гидридов тангенциальная)

Сложное НДС связано с наличием в топливном сердечнике полостей определенной формы для компенсации распухания топливной композиции.

На рис. 4 представлены результаты расчетов НДС твэла из сплава Э635 с компенсирующей полостью, облученного в реакторе атомного ледокола (распределение тангенциальных напряжений в оболочке), и микроструктуры поперечных сечений фрагментов оболочек твэлов. Расчеты НДС твэла проводились в упруговязкопластичной постановке с использованием конечно-элементного программного комплекса MARC (MSC Software) и базы данных по свойствам материалов дисперсионных твэлов для реакторов различного назначения.

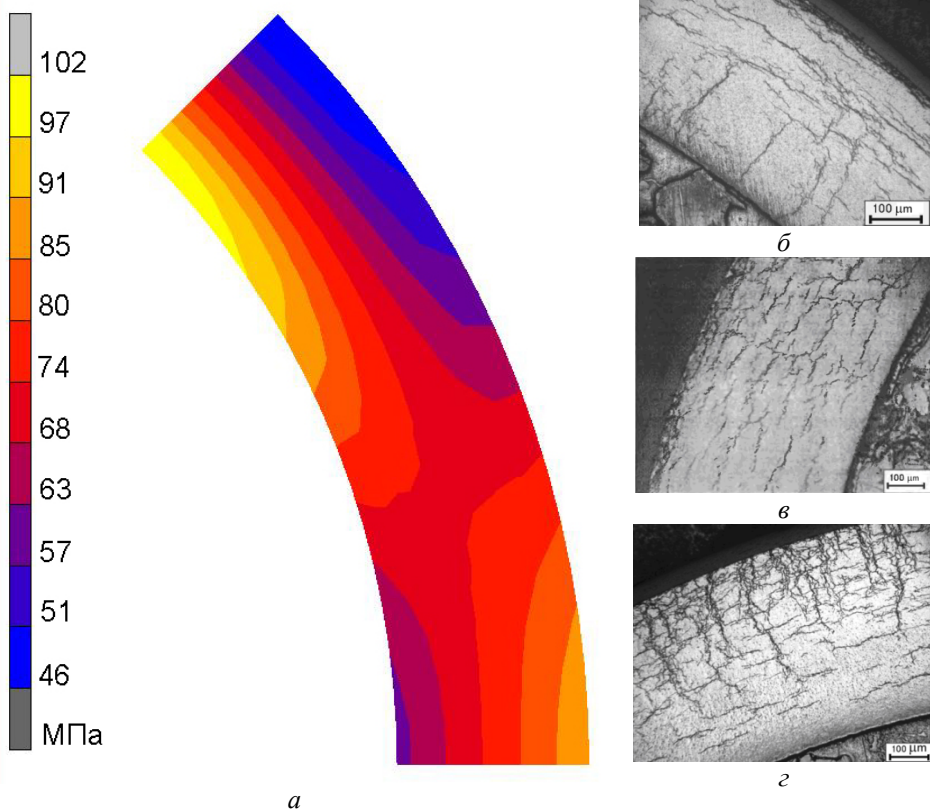


Рис. 4. Распределение тангенциальных напряжений в оболочке из сплава Э635 (а) и микроструктура фрагмента оболочки (травление на гидриды (б – г)): б — напротив впадины компенсирующей полости в сердечнике; в — промежуточное положение; г — напротив выступа компенсирующей полости в сердечнике

Распределение напряжений на рис. 4, а приведено по состоянию на конец кампании для «разогретого» состояния активной зоны реактора, так как характер распределения гидридов в оболочке соответствует именно распределению тангенциальных напряжений для данного состояния в конце эксплуатации активной зоны, поскольку в расхоленном состоянии тангенциальные напряжения имеют большие отрицательные значения (сжатие) по всему сечению оболочки (рис. 5). Максимальные тангенциальные напряжения в оболочке при 20 °С составляют 150 МПа. Зависимость максимального тангенциального напряжения в оболочке твэла от ее температуры при расхолаживании активной зоны приведена на рис. 6.

Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами после реакторных исследований твэлов по характеру распределения гидридов в оболочках. Из сопоставления микроструктур на рис. 4 следует, что изменение исходной тангенциальной ориентации гидридов на

радиальную в оболочках твэлов происходит при напряжениях свыше 70 МПа, т. е. практически при таких же напряжениях, как и в дореакторных условиях.

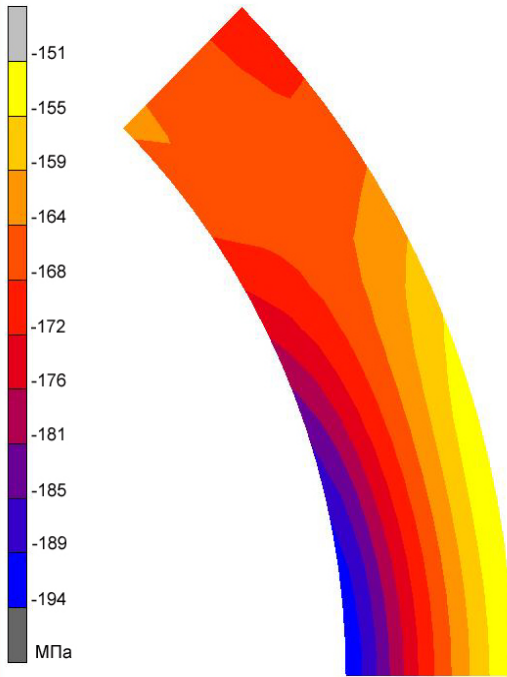


Рис. 5. Распределение тангенциальных напряжений в оболочке из сплава Э635 твэла с компенсирующей полостью, облученного в реакторе атомного ледокола (при 20 °С после расхолаживания активной зоны)

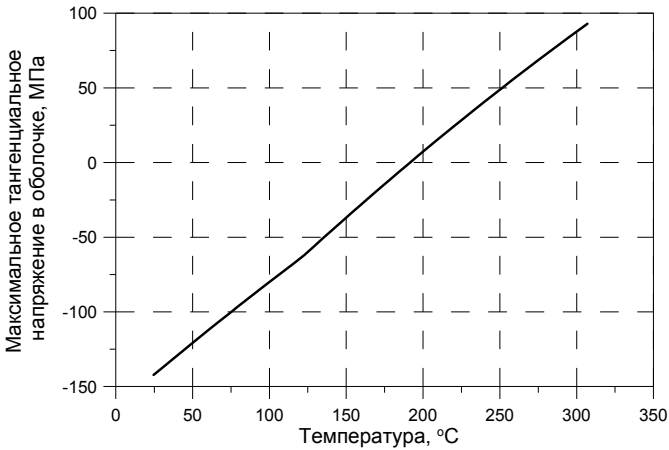


Рис. 6. Зависимость максимального значения тангенциального напряжения в оболочке от ее температуры при расхолаживании

На рис. 7 представлена микроструктура поперечного сечения фрагмента оболочки из сплава Э110 и результаты расчетов НДС твэлов с компенсирующей полостью, облученных в реакторах атомных ледоколов. Качественно характеры распределения тангенциальных напряжений на рис. 4, *а* и 7, *а* схожи, однако уровень напряжений на рис. 7, *а* значительно ниже. На рис. 7, *а* видно, что уровень тангенциальных напряжений по всему периметру оболочки по состоянию на конец эксплуатации не превышает 50 МПа, что обуславливает тангенциальную ориентацию гидридов в оболочке. Это подтверждается результатами послереакторных исследований, приведенными на рис. 7, *б*.

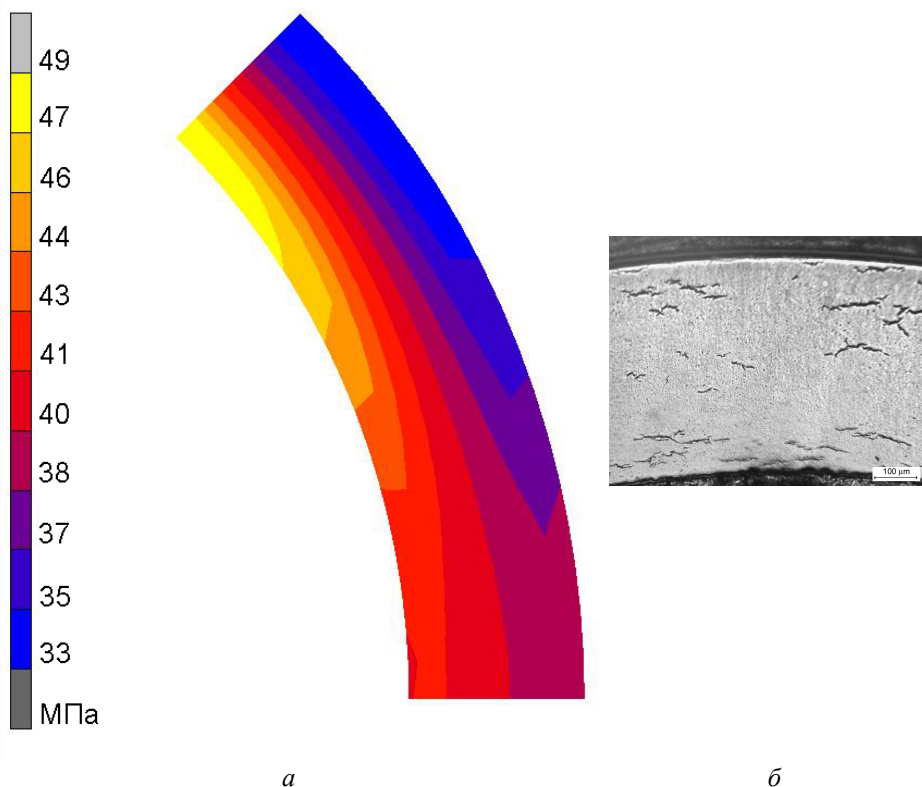


Рис. 7. Распределение тангенциальных напряжений в оболочке из сплава Э110 (*а*) и микроструктура фрагмента оболочки напротив впадины компенсирующей полости (травление на гидриды) (*б*)

Меньший уровень тангенциальных напряжений в оболочках из сплава Э110 по сравнению с оболочками из сплава Э635, несмотря на сопоставимые условия облучения, обусловлен большей скоростью радиационной ползучести сплава Э110 по сравнению со сплавом Э635 в рабочих условиях.

Таким образом, уровни значений тангенциальных напряжений в оболочке из циркониевых сплавов, при которых происходит переход

от тангенциальной ориентации гидридов к радиальной, экспериментально установленные в дореакторных условиях и полученные расчетным моделированием в условиях облучения, близки.

Выводы.

1. На основании результатов экспериментального исследования влияния растягивающих напряжений на ориентацию гидридов в циркониевых трубах из сплавов Э110, Э635 и Э635М в дореакторных условиях установлено, что при напряжениях около 70 МПа в структуре образцов проявляется уже частично радиальная ориентация гидридов. При напряжениях свыше 90 МПа ориентация гидридов полностью радиальная. Таким образом, изменение ориентации гидридов на радиальную происходит в диапазоне напряжений 70...90 МПа.

2. Результаты расчетного моделирования напряженно-деформированного состояния оболочек из циркониевых сплавов Э110 и Э635 твэлов, отработавших в активных зонах атомных ледоколов, показали, что характер распределения гидридов соответствует распределению тангенциальных растягивающих напряжений в оболочках твэлов при работе реактора на мощности. При выпадении гидридов при расхолаживании твэлов тангенциальные напряжения в оболочках становятся сжимающими (имеют отрицательные значения).

3. Изменение исходной тангенциальной ориентации гидридов на радиальную в оболочках твэлов из сплава Э635 происходит при напряжениях свыше 70 МПа, т. е. практически при таких же напряжениях, как и в дореакторных условиях. В оболочках твэлов из сплава Э110 из-за большей скорости ползучести тангенциальные напряжения не превышают 50 МПа, что обуславливает тангенциальную ориентацию гидридов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Результаты эксплуатации и условия работы ледокольных активных зон. Тез. докл. 9-й Рос. конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, 14 сентября 2009 г., НИИАР. Димитровград, НИИАР, 2009, с. 68–70.
- [2] Ватулин А.В., Волкова И.Н., Новоселов А.Е. Коррозия сплава Э-635 в активной зоне атомного ледокола. *Атомная энергия*, 2011, т.111, вып. 4, с. 235–237.
- [3] Кулаков Г.В., Ватулин А.В., Ершов С.А., Коновалов Ю.В., Морозов А.В., Сорокин В.И., Федотов В.В., Новоселов А.Е., Овчинников В.А., Шишин В.Ю. Разработка твэлов плавучих энергоблоков и атомных станций малой мощности. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2012, вып. 1 (72), с. 14–25.
- [4] Lee K.W., Hong S.I. Zirconium hydrides and their effect on the circumferential mechanical properties of Zr–Sn–Fe–Nb tubes. *Journal of Alloy and Compounds*, 2002, vol. 346 (1–2), pp. 302–307.
- [5] Min S.L., Kim M.S., Kim K.T. Cooling rate- and hydrogen content-dependent hydride reorientation and mechanical property degradation of Zr–Nb alloy claddings. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, vol. 441 (1-3), pp. 306–314.

- [6] Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Европин С.В. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Ч. 1. Численное моделирование накопления повреждений. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 2013, № 11, с. 3–11.
- [7] Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Шиверский Е.А. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Ч. 2. Численное статистическое моделирование. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 2013, № 12, с. 12–19.
- [8] Димитриенко Ю.И., Юрин Ю.В., Европин С.В., Шиверский Е.А., Корецкий С.А., Прозоровский А.А. Метод расчета характеристик надежности корпусов теплоэнергетических двигательных установок на основе детального конечно-элементного моделирования. *Безопасность в техно-сфере*, 2014, № 3, с. 28–36.
- [9] Никулина А.В. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2004, № 11, с. 8–12.
- [10] Colas K.B., Motta A.T., Almer J.D., Daymond M.R., Kerr M., Banchik A.D., Vizcaino P., Santisteban J.R.. In situ study of hydride precipitation kinetics and re-orientation in Zircaloy using synchrotron radiation. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, pp. 6575–6583.
- [11] Singh R.N., Kishore R., Singh S.S., Sinha T.K., Kashyap B.P. Stress-reorientation of hydrides and hydride embrittlement of Zr–2.5 wt% Nb pressure tube alloy. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, vol. 325, pp. 26–33.

Статья поступила в редакцию 10.10.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/technic/1242.html>

Кулаков Геннадий Валентинович — канд. техн. наук, начальник отдела ОАО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Область деятельности и научных интересов — исследования в области атомной энергетики.

Ватулин Александр Викторович — д-р техн. наук, профессор НИЯУ МИФИ. Область деятельности и научных интересов — исследования в области атомной энергетики.

Коновалов Юрий Валентинович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов — статистическое моделирование процессов в области атомной энергетики.



Косауров Александр Анатольевич — заместитель начальника отдела ОАО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Область деятельности и научных интересов — исследования в области атомной энергетики.

Перегуд Михаил Михайлович — старший научный сотрудник ОАО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Область деятельности и научных интересов — исследования в области атомной энергетики.

Коротченко Евгения Александровна — инженер-технолог 2-й категории ОАО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара. Область деятельности и научных интересов — исследования в области атомной энергетики.

Шишин Валерий Юрьевич — канд. техн. наук, начальник отдела ОАО «ГНЦ НИИАР». Область деятельности и научных интересов — реакторное материаловедение.

Шельдяков Алексей Андреевич — старший научный сотрудник ОАО «ГНЦ НИИАР». Область деятельности и научных интересов — реакторное материаловедение.

Analysis of the stress-strain state effect of the zirconium alloy claddings on the distribution of hydrides

© G.V. Kulakov¹, A.V. Vatulin², Y.V. Konovalov³, A.A. Kosaurov¹, M.M. Peregud¹, E.A. Korotchenko¹, V.Y. Shishin⁴, A.A. Sheldyakov⁴

¹ Open Joint Stock Company “The High-Technology Research Institute of Inorganic Materials named after Academician A.A. Bochvar” (OJSC “VNIINM”), Moscow, 123060, Russia

² National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, 115409, Russia

³ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

⁴ Joint Stock Company “State Scientific Center — Research Institute of Atomic Reactors” (JSC “SSC RIAR”), 433510, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia

The purpose of the work is analysis of the influence of the stress distribution in zirconium claddings of dispersion type fuel rods on the orientation of hydrides. It is shown that the circumferential hydrides may be reoriented to the radial hydrides during the cooling process when the tensile stress is greater than a certain threshold stress. The determined threshold value is between 70 and 90 MPa.

Keywords: zirconium-based alloy, hydrides, stress, distribution, orientation, dispersion type fuel rod, cladding.

REFERENCES

- [1] Resultaty ekspluatatsii i usloviya raboty ledokolnykh aktivnykh zon [Results of operation and working conditions of icebreakers cores]. *Tezisy dokladov 9-y Rossiyskoy konferentsii po reaktornomu vferialovedeniyu* [Abstracts of IX Russian Conference on Reactor Materials Science]. Dimitrovgrad, 14 September, 2009, RIAR. Dimitrovgrad, RIAR, 2009, pp. 68–70.
- [2] Vatulin A.V., Volkova I.N., Novoselov A.E. *Atomnaya Energiya — Atomic Energy*, 2011, vol. 111, iss. 4, pp. 235–237.
- [3] Kulakov G.V., Vatulin A.V., Ershov S.A., Konovalov Yu.V., Morozov A.V., Sorokin V.I., Fedotov V.V., Novoselov A.E., Ovchinnikov V.A., Shishin V.Yu. *Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Seriya Materialovedenie i novye materialy — Issues of Atomic Science and Engineering, Series Material Science and New Materials*, 2012, vol. 1 (72), pp. 14–25.
- [4] Lee K.W., Hong S.I. Zirconium hydrides and their effect on the circumferential mechanical properties of Zr–Sn–Fe–Nb tubes. *Journal of Alloy and Compounds*, 2002, vol. 346 (1–2), pp. 302–307.
- [5] Min S.L., Kim M.S., Kim K.T. Cooling rate- and hydrogen content-dependent hydride reorientation and mechanical property degradation of Zr–Nb alloy claddings. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, vol. 441 (1–3), pp. 306–314.
- [6] Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Evropin S.V. *Izvestiya vyzov. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 11, pp. 3–11.
- [7] Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Shiverskiy E.A. *Izvestiya vyzov. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 12, pp. 12–19.

- [8] Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Evropin S.V., Shiverskiy E.A., Koreckiy S.A., Prozorovskiy A.A. *Bezopasnost' v tekhnosfere — Safety in Technosphere*, 2014, no. 3, pp. 28–36.
- [9] Nikulina A.V. *Metallovedenie I termicheskaya obrabotka materialov — Metal Science and Heat Treatment*, 2004, vol. 11, pp. 8–12.
- [10] Colas K.B., Motta A.T., Almer J.D., Daymond M.R., Kerr M., Banchik A.D., Vizcaino P., Santisteban J.R.. In situ study of hydride precipitation kinetics and re-orientation in Zircaloy using synchrotron radiation. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, pp. 6575–6583.
- [11] Singh R.N., Kishore R., Singh S.S., Sinha T.K., Kashyap B.P. Stress-reorientation of hydrides and hydride embrittlement of Zr–2.5 wt% Nb pressure tube alloy. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, vol. 325, pp. 26–33.

Kulakov G.V., Ph.D, head of Department in JSC “VNIINM”. Research interests: research in the field of nuclear energy.

Vatulin A.V., Dr.Sci., professor of NRNU “MEPhI”. Research interests: research in the field of nuclear energy.

Konovalov Yu.V., Ph.D, Assoc. Professor of the Computational Mathematics and Mathematical Physics Department of Bauman Moscow State Technical University. Research interests: Statistical modeling in the field of nuclear energy.

Kosaurov A.A., deputy head of Department in JSC “VNIINM”. Research interests: research in the field of nuclear energy.

Peregud M.M., senior researcher in JSC “VNIINM”. Research interests: research in the field of nuclear energy.

Korotchenko E.A., engineer in JSC “VNIINM”. Research interests: research in the field of nuclear energy.

Shishin V.Yu., Ph.D, head of Department of JSC “SSC RIAR”. Research interests: post-irradiated material testing.

Sheldyakov A.A., senior researcher of JSC “SSC RIAR”. Research interests: post-irradiated material testing.