

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ПЕРЕОРИЕНТАЦИЮ ГИДРИДОВ В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛОВ ИЗ Zr-1%Nb

*Т.П. Черняева, В.М. Грицина, В.С. Красноруцкий, А.П. Редкина,  
И.А. Петельгузов, Е.А. Слабоспицкая*

*Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл»  
ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина  
E-mail: gritsina@kipt.kharkov.ua*

Представлены результаты экспериментальных исследований переориентации гидридов и водородного охрупчивания, которые могут иметь место в оболочках твэлов в условиях, имитирующих штатные и некоторые аварийные режимы обращения с ОЯТ. Проведены испытания с нагревом макетов твэлов с оболочками из сплава Zr-1%Nb с разным содержанием водорода под внутренним давлением (холодное давление под оболочкой 3, 4 и 5 МПа) до температуры 450 °С, выдержкой при этой температуре 8 ч и последующим охлаждением. Установлено, что при содержании водорода 400 ppm интенсивная переориентация гидридов в оболочках макетов твэлов при термических испытаниях начинается при тангенциальном напряжении  $\approx 55...60$  МПа при 450 °С. С уменьшением содержания водорода интенсивность влияния испытаний на переориентацию гидридов значительно снижается. Термоциклирование на стадии выдержки ОЯТ в СХОЯТ приводит к значительному усилению переориентации гидридов. В оболочках с концентрацией водорода 400 ppm, при испытаниях с трехкратным термоциклированием 180 °С $\leftrightarrow$ 450 °С происходит практически полная переориентация гидридов. Проведены механические испытания образцов, вырезанных из гидрированных отрезков труб и оболочек макетов с разным содержанием водорода, до и после испытаний на переориентацию гидридов. Исходя из полученных результатов и результатов проведенного информационного поиска, сделан прогноз относительно степени опасности деградации свойств оболочек ОЯТ.

### ВВЕДЕНИЕ

Обращение с ОЯТ и его длительное хранение являются неотъемлемой составляющей ядерного топливного цикла. Безопасность операций обращения с ОЯТ в значительной степени определяется состоянием оболочек твэлов. С введением в эксплуатацию (24 августа 2001 г.) сухого хранилища отработавшего ядерного топлива (СХОЯТ) на Запорожской АЭС значительно возросла актуальность проведения в Украине исследования явлений, ответственных за деградацию оболочек твэлов при обращении с ОЯТ и его длительном хранении.

В качестве оболочек твэлов и некоторых элементов конструкции тепловыделяющих сборок водоохлаждаемых ядерных реакторов, таких как корпусные реакторы с водой под давлением (PWR, ВВЭР), кипящие (BWR, RBMK) и тяжеловодные реакторы (HPWRs), уже много лет успешно используются циркониевые сплавы [1]. По завершении эксплуатации оболочки твэлов находятся под внутренним давлением [2, 3], которое при наличии других факторов, например содержания водорода, может приводить к деградации состояния оболочек [4].

К явлениям деградации, обусловленным присутствием водорода в цирконии, относятся:

- водородное охрупчивание (HE), представляющее собой значительное уменьшение пластичности при гидрировании [5, 6];
- замедленное гидридное растрескивание (DHC), суть которого заключается в постепенном

подрастании трещины при дискретном растрескивании по гидридам, образующимся в ее вершине [7–9];

- перераспределение водорода и гидридный блистеринг (образование крупных гидридов в местах локального накопления водорода [10]).

Согласно общепринятому мнению для оболочек твэлов при обращении с ОЯТ наибольшую опасность представляет переориентация гидридов и обусловленное этим повышение эффективности водородного охрупчивания [11].

При принятой на практике технологии изготовления оболочечных труб в них задается предрасположенность к образованию гидридов окружной (тангенциальной) ориентации. Эффективность водородного охрупчивания оболочек твэлов может значительно увеличиться, если гидридные пластины переориентируются от их обычной окружной ориентации к радиальной ориентации в оболочке [12–14]. Переориентация гидридов может происходить в результате нагрева при вакуумной сушке, в течение которой температура оболочек может повыситься вплоть до 450 °С (предельная температура при обращении с ОЯТ, принятая на ЗАЭС), при которой гидриды частично или полностью растворяются. При последующем охлаждении происходит выделение гидридов, при этом, если тангенциальное напряжение превышает критическое, образующиеся при охлаждении гидриды имеют радиальную ориентацию [15].

На конец эксплуатации (bytheend-of-life) внутреннее давление под оболочкой в зависимости

от исходного давления (2,0...3,45 МПа) в твэлах PWR при комнатной температуре составляет 4...6 МПа [2, 16]. Зависимость давления под оболочкой от выгорания ( $V_u$ ) может быть представлена в виде [2]

$$P_{end} = 2,8781 + 0,0022V_u, \quad (1)$$

где  $P_{end}$  – внутреннее давление в твэле на конец эксплуатации;  $V_u$  – выгорание, (МВт-сут)/кг U; 2,8781 МПа – среднее исходное давление под оболочкой (параметр подгонки).

Согласно требованиям U.S. Nuclear Regulatory Commission следующие критерии должны выполняться, чтобы гарантировать сохранение целостности оболочек твэлов при транспортно-технологических операциях перегрузки отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) и их длительное хранение [16, 17]:

– тангенциальное напряжение в оболочке твэлов при температуре 400 °С не должно превышать 90 МПа;

– содержание водорода в оболочках твэлов не должно превышать 400...500 ppm.

Количество водорода, накопленного в сплаве Zr-1%Nb за шесть лет эксплуатации (70 (МВт-сут)/кг U), составляет ~ 50...60 ppm и не превышает 80 ppm; гидриды длиной до 80 мкм

имеют преимущественно радиальную ориентацию [18]. Из-за столь низкого содержания водорода ранее не задавались ограничения на содержание водорода в оболочках твэлов из Zr-1%Nb, загружаемых на длительное хранение; в настоящее время введен предел, равный 400 ppm, в соответствии с требованиями США и западных критериев проектирования [17, 19].

В данной работе проведены испытания, имитирующие температурный режим и напряженное состояние оболочек твэлов из Zr-1%Nb с содержанием водорода вплоть до 400 ppm и разными «сценариями» технологических операций перегрузки ОЯТ и его хранения по выявлению влияния изменения состояния оболочек на переориентацию гидридов.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ

### ОБРАЗЦЫ

Испытания и исследования, проведенные в данной работе, выполнены на необлученных оболочечных трубах сплава Zr-1%Nb в состоянии поставки (финишный отжиг – 580 °С, 3 ч); их основные характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики оболочечных труб, используемых в работе

Материал	Химический состав	Состояние	Размер зерен, мкм	Текстура	Размеры, мм
Сплав Э110	Zr-1 мас.%Nb	Рекристаллизованное	4...8	$f_R = 0,586$ $f_T = 0,364$ $f_L = 0,050$	Внешний диаметр – 9,13, толщина стенки – 0,68

### ИСПЫТАНИЯ НА ПЕРЕОРИЕНТАЦИЮ ГИДРИДОВ

Испытания на переориентацию гидридов проведены на макетах твэлов под внутренним давлением с оболочками из сплава Zr-1%Nb (рис. 1). Общая длина макета 112 мм, длина газонаполненной полости 66 мм. Давление газа (гелия) под оболочкой при температуре 20 °С – 3, 4 и 5 МПа.



Рис. 1. Макет твэлов под давлением для испытаний на переориентацию гидридов

Согласно спецификации содержание водорода в негидрированных оболочечных трубах из Zr-1%Nb (Э110) не превышает 15 ppm (ppm – part per million); его обычное содержание 4...7 ppm [20–22]. Насыщение оболочек макетов водородом проведено методом «сухого» гидрирования при температурах 380 и 420 °С. Источником газообразного водорода служил порошок гидроксида титана. Концентрация водорода определена методом взвешивания и по металлографическим изображениям структуры (поперечное сечение). Концентрация водорода в

оболочках гидрированных макетов – от 60 до 400 ppm.

Выбор температурного режима испытаний основан на критериях безопасности обращения с ОЯТ [23, 24].

Система критериев безопасности СХОЯТ на Запорожской АЭС, принятая на данное время, отвечает следующему [25–28]:

– максимальная температура оболочек твэлов отработавших тепловыделяющих сборок для нормального режима длительного сухого хранения в среде гелия составляет 350 °С;

– для экстремальных погодных условий и при транспортно-технологических операциях перегрузки ОТВС допускается повышение температуры до 450 °С в течение не более 8 ч за весь период перегрузки и хранения.

Изменения температуры оболочек твэлов ОТВС с остаточным энерговыделением 1 кВт при долгосрочном сухом хранении в контейнерах СХОЯТ ЗАЭС показаны на рис. 2. Максимальная температура оболочки твэла в начале хранения составляет 349 °С (рис. 3) и со временем уменьшается. Через 5 лет хранения эта температура будет равна 275 °С, а через 45...50 лет она снизится до 180 °С.

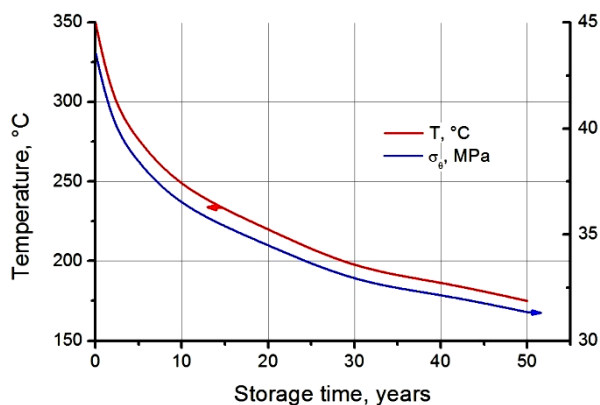


Рис. 2. Изменения температуры и тангенциального напряжения в оболочках твэлов при хранении в СХОЯТ ЗАЭС ( $P_{293} = 3,3$  МПа) [29–32]

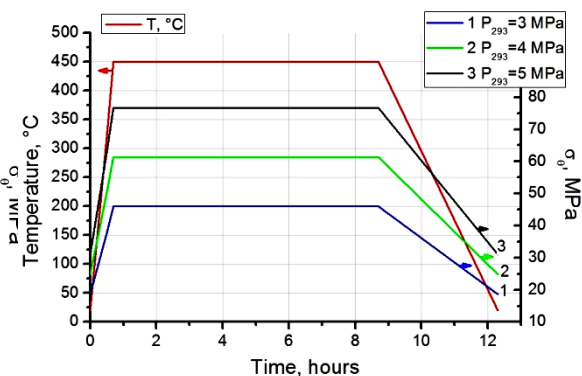


Рис. 3. Температурный режим и тангенциальные напряжения в оболочках макетов твэлов с исходным внутренним давлением 3...5 МПа при испытаниях, имитирующих операции перегрузки с нагревом до температуры 450 °С

Температурный режим при испытаниях, имитирующих операции перегрузки и нормальные условия хранения (режим 1), представлен на рис. 3.

Напряженное состояние как оболочек твэлов ОТВС при длительном сухом хранении, так и оболочек макетов твэлов при испытаниях описывается следующим уравнением (в предположении тонкостенных труб):

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_{293} \cdot D_{mid}}{2t} \cdot \frac{T}{293}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\theta}$  – тангенциальное, продольное и радиальное напряжения в оболочке соответственно;  $P_{293}$  – давление под оболочкой при комнатной температуре;  $D_{mid}$  и  $t$  – средний диаметр и толщина стенки оболочки соответственно;  $T$  – температура оболочки, К.

Отметим, что при данной постановке испытаний напряженное состояние оболочек макетов изменяется с температурой по закону Шарля, как это наблюдается и на оболочках твэлов при транспортно-технологических операциях и долгосрочном хранении.

Изменение тангенциальных напряжений в оболочках макетов твэлов под давлением 3, 4 и 5 МПа при испытаниях по режиму, имитирующему перегрузку топлива и нормальные условия хранения, показано на рис. 3.

Испытания, имитирующие температурный режим операций перегрузки и предельные проектные аварии, включали:

- Испытания макетов твэлов под внутренним давлением 3, 4 и 5 МПа по режиму: нагрев до температуры 450 °С, выдержка при 450 °С в течение 3 ч, охлаждение до 300 °С; выдержка при 300 °С в течение 1 ч и последующее трехкратное термоциклирование от 300 (температура после ~2 лет хранения) до 450 °С. Выдержка в каждом из циклов при температурах 300 и 450 °С равна 1 ч (режим 2) (рис. 4).

- Испытания макетов твэлов под внутренним давлением 5 МПа по режиму: нагрев до температуры 450 °С, выдержка при 450 °С в течение

3 ч, охлаждение до 300 °С; выдержка при 300 °С в течение 1 ч и последующее пятикратное термоциклирование от 300 до 450 °С. Выдержка в каждом из циклов при температурах 300 и 450 °С равна 1 ч (режим 3).

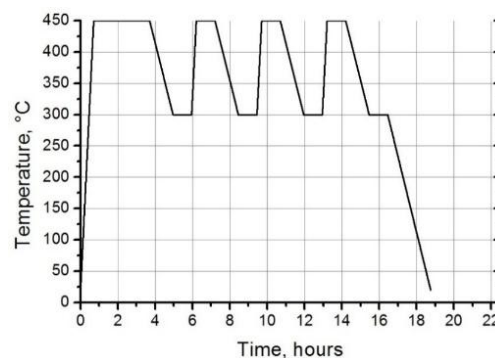


Рис. 4. Температурный режим испытаний на переориентацию гидридов по режиму, имитирующему операции перегрузки и предельные проектные аварии с трехкратным термоциклированием 300↔450 °С

- Испытания макетов твэлов под внутренним давлением 5 МПа по режиму: нагрев до температуры 450 °С, выдержка при 450 °С в течение 3 ч, охлаждение до 300 °С и последующее семикратное термоциклирование от 300 до 450 °С. Выдержка в каждом из циклов равна 1 ч при температуре 300 °С и 45 мин при 450 °С (режим 4).

- Испытания макетов твэлов под внутренним давлением 4 и 5 МПа по режиму: нагрев до температуры 450 °С, выдержка при 450 °С в течение 3 ч, охлаждение до 180 °С и последующее трехкратное термоциклирование от 180 (температура после ~45...50 лет хранения) до 450 °С. Выдержка в каждом из циклов при температурах 180 и 450 °С равна 1 ч (режим 5).

- Испытания макетов твэлов под внутренним давлением 4 и 5 МПа по режиму: нагрев до температуры 450 °С, выдержка при 450 °С в течение 3 ч, охлаждение до 180 °С и последующее

пятикратное термоциклирование от 180 до 450 °С. Выдержка в каждом из циклов при температурах 180 и 450 °С равна 1 ч (режим б).

- Испытания макетов твэлов под внутренним давлением 5 МПа по режиму: нагрев до температуры 450 °С, выдержка при 450 °С в течение 3 ч, охлаждение до 180 °С и последующее семикратное термоциклирование от 180 до 450 °С. Выдержка в каждом из циклов равна 1 ч при температуре 180 °С и 45 мин при температуре 450 °С (режим 7).

### МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Металлографические исследования были проведены на оптическом микроскопе «Axio Observer. Alm». По металлографическим изображениям структуры определены содержание водорода и коэффициент ориентации гидридов.

Концентрация водорода определялась по площади, занимаемой гидридами на поперечном сечении образца [22, 23]:

$$[H]_t = [H]_\delta \cdot F_\delta \frac{P_\delta}{\rho_\alpha(1-F_\delta) + \rho_\delta \cdot F_\delta}, \quad (3)$$

где  $[H]_t$  – концентрация водорода в образце (при комнатной температуре содержание водорода в твердом растворе  $\alpha$ -Zr не превышает 1 ppm);  $[H]_\delta$  – содержание водорода в  $\delta$ -гидриде (17570 ppm);  $F_\delta$  – доля площади, занимаемая гидридами (эквивалентно объемной доле гидридов);  $\rho_\alpha$  – плотность  $\alpha$ -Zr-матрицы при комнатной температуре (6550 кг/м<sup>3</sup>);  $\rho_\delta$  – плотность  $\delta$ -гидридов при комнатной температуре (5650 кг/м<sup>3</sup>).

Коэффициент ориентации гидридов определялся по формуле [15]

$$F_n = \frac{\sum_i L_{ri}}{\sum_i (L_{ri} + L_{ci})}, \quad (4)$$

где  $F_n$  – коэффициент ориентации гидридов;  $L_{ri}$  – длина  $i$ -го радиального гидрида, ориентированного под углом 0...45° к радиальному направлению, и  $L_{ci}$  – длина  $i$ -го тангенциального гидрида, ориентированного под углом 45...90° к радиальному направлению.

### ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Кратковременные механические испытания на растяжение кольцевых образцов (внешний диаметр 9,13 мм, толщина стенки 0,68 мм, ширина 2,7 мм) были проведены на полукруглых опорах диаметром 6,0 мм при температурах 20 и 350 °С. Скорость движения активного захвата составляла около 1,8 мм/мин. Рабочую длину рассчитывали по формуле

$$L = \frac{1}{2} \pi (D_{mid} - 0,85d_o), \quad (5)$$

где  $D_{mid}$  – средний диаметр образца, мм;  $d_o$  – диаметр опор, мм. Скорость деформации составляла  $5,7 \cdot 10^{-3}$  1/с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ ГИДРИДОВ

В процессе испытаний оболочек гидриды, образующиеся в соответствии с параметрами технологии их изготовления, в зависимости от концентрации водорода растворяются полностью или частично, а при последующем охлаждении выделяются гидриды, ориентация которых в значительной мере определяется действующими напряжениями. Между температурой полного растворения гидридов (TSSD) при нагревании и температурой их выделения при охлаждении (TSSP) существует гистерезис (выделение гидридов требует некоторого переохлаждения). Концентрации водорода при температурах полной диссоциации гидридов ( $[H]_{TSSD}$ ) при нагревании и начала выделения гидридов при охлаждении ( $[H]_{TSSP}$ ) в сплаве Zr-1%Nb (M5) определяются уравнениями [24]:

$$[H]_{TSSD}(ppm) = 84965 \cdot \exp\left(-\frac{34187}{RT}\right), \quad (6)$$

$$[H]_{TSSP}(ppm) = 30638 \cdot \exp\left(-\frac{26180}{RT}\right), \quad (7)$$

где  $R$  – газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К));  $T$  – абсолютная температура, К.

Зависимости температур диссоциации гидридов в сплаве Zr-1%Nb при нагревании и их выделения при охлаждении от концентрации водорода представлены на рис. 5.

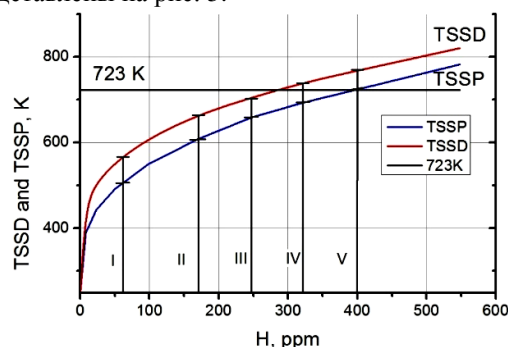


Рис. 5. Зависимости температуры диссоциации гидридов (TSSD) при нагреве и температуры начала их выделения при последующем охлаждении (TSSP) в сплаве Zr-1%Nb от концентрации водорода  $[H]$

Испытания на переориентацию гидридов в оболочках макетов твэлов под давлением 3, 4 и 5 МПа (при комнатной температуре) по режиму, имитирующему перегрузку топлива и нормальные условия хранения в СХОЯТ, проведены на макетах с содержанием водорода в оболочках Zr-1%Nb 170, 250, 320 и 400 ppm. На рис. 5 отмечены температуры растворения и выделения гидридов при этих концентрациях (I–V), а также максимальная температура при испытаниях (450 °С (723 К)). Распределение гидридов в оболочках макетов до и после испытаний показано на рис. 6; данные об ориентации гидридов (значения коэффициента ориентации гидридов в оболочках макетов) приведены в табл. 2.



Из полученных результатов (см. рис. 6, табл. 2) следует, что испытания макетов под внутренним давлением 3, 4 и 5 МПа по режиму, имитирующему перегрузку топлива, не приводят к переориентации гидридов в оболочках с низким содержанием водорода (60 и 170 ppm (см. рис. 5)), у которых как температура диссоциации, так и температура выделения гидридов лежит значительно ниже 450 °С. Это может быть связано с низким уровнем напряжений в оболочках макетов с низкой концентрацией водорода при температуре начала выделения гидридов. При концентрациях водорода 250...400 ppm, с повышением внутреннего давления

и при комнатной температуре до 4 МПа наблюдается незначительное увеличение коэффициента ориентации гидридов и его резкое увеличение с повышением внутреннего давления при комнатной температуре от 4 до 5 МПа (см. рис. 6, табл. 2). Склонность оболочек Zr-1%Nb к образованию под внутренним давлением радиальных гидридов повышается с увеличением концентрации водорода от 250 до 400 ppm, что качественно совпадает с зависимостью тангенциального напряжения в оболочках макетов при температуре выделения гидридов (TSSP) (см. рис. 5).

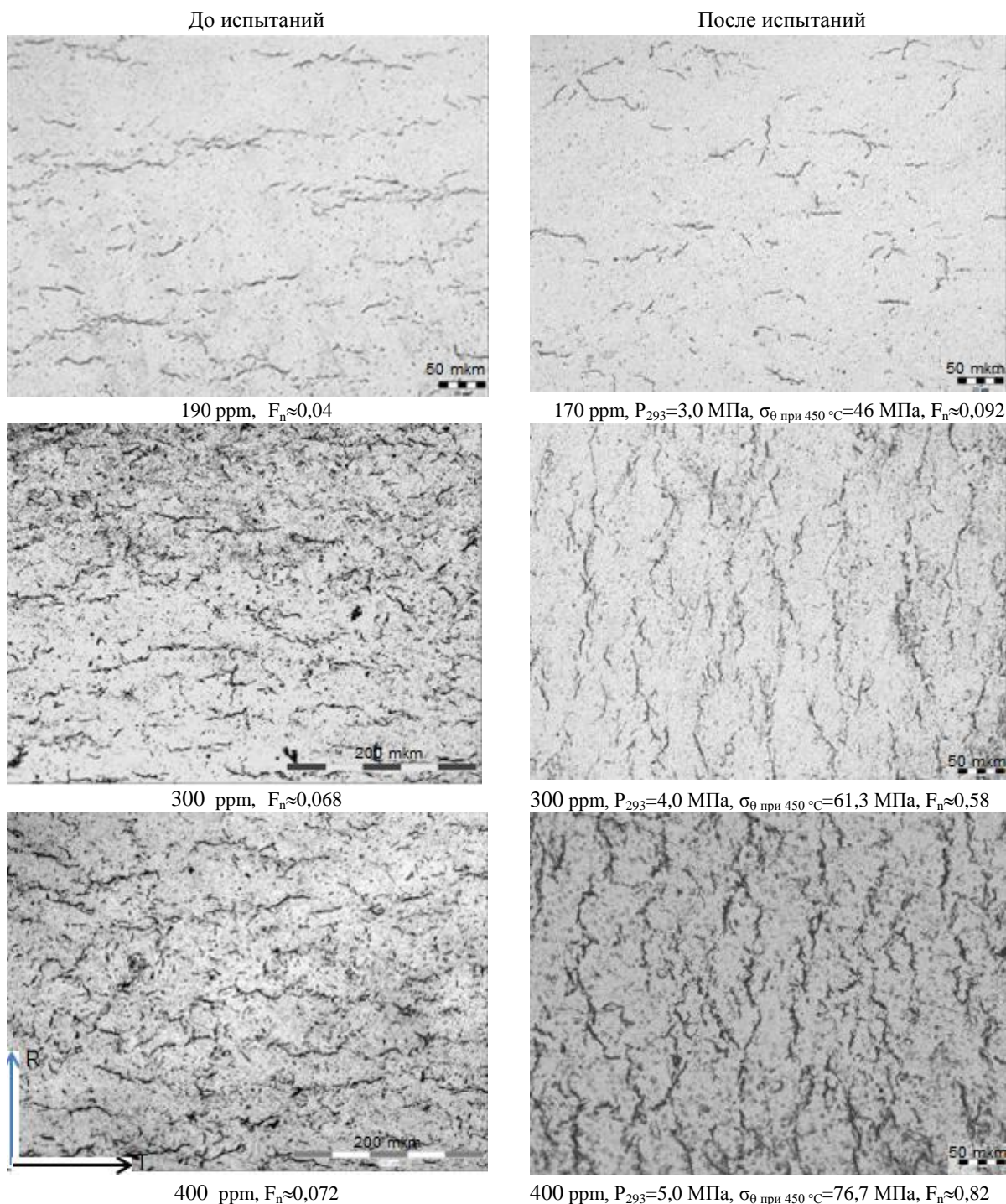


Рис. 6. Гидриды в оболочках макетов (Zr-1%Nb) до и после испытаний на переориентацию гидридов по режиму, имитирующему перегрузку топлива в СХОЯТ

Значения коэффициента переориентации гидридов в оболочках макетов твэлов, испытанных по режиму, имитирующему перегрузку топлива и нормальные условия хранения в СХОЯТ

[H], ppm	$P_{293}$ , МПа	$\sigma_0$ , МПа при 450 °С	TSSD, °С	TSSP, °С	$\sigma_0$ , МПа при TSSP	$F_n$
60	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	3	46	293,72	231,40	32,09	0,05
	4	61,3	293,72	231,40	42,78	0,06
	5	76,7	293,72	231,40	53,48	0,06
170	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	3	46	388,70	332,53	38,52	0,07
	4	61,3	388,70	332,53	51,36	0,1
	5	76,7	388,70	332,53	64,20	0,12
250	до испыт.	–	–	–	–	0,05
	3	46	432,48	381,10	41,61	0,14
	4	61,3	432,48	381,10	55,48	0,15
	5	76,7	432,48	381,10	69,35	0,32
320	до испыт.	–	–	–	–	0,06
	3	46	463,68	416,49	43,86	0,16
	4	61,3	463,68	416,49	58,48	0,18
	5	76,7	463,68	416,49	73,10	0,48
400	до испыт.	–	–	–	–	0,07...0,08
	3	46	494,36	451,96	46,12	0,18
	4	61,3	494,36	451,96	61,49	0,23
	5	76,7	494,36	451,96	76,87	0,58

В качестве иллюстрации на рис. 7 представлена зависимость коэффициента ориентации гидридов от тангенциального напряжения при 450 °С для оболочек макета (Zr-1%Nb) с содержанием водорода 400 ppm (TSSP = 425 °С), испытанных по режиму, имитирующему перегрузку топлива в СХОЯТ, а также по режимам с трех-, пяти- и семикратным термоциклированием 300↔450 °С.

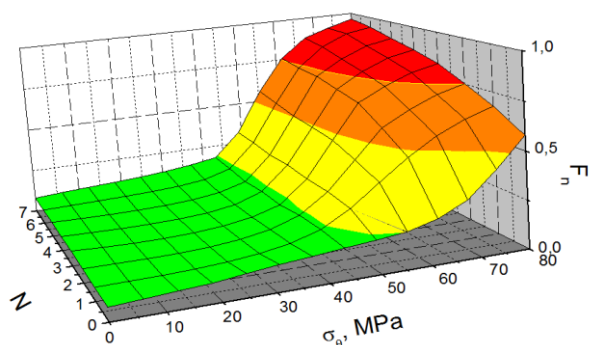


Рис. 7. Зависимость коэффициента ориентации гидридов от тангенциального напряжения при 450 °С в оболочке макета твэла (Zr-1%Nb) с содержанием водорода 400 ppm, испытанного по режиму 1, имитирующему перегрузку топлива; а также по режимам 2 – 4 с трех-, пяти- и семикратным термоциклированием 300↔450 °С

Согласно полученным данным, в оболочках макетов твэлов с концентрацией водорода 400 ppm при испытаниях по режиму: нагревание до 450 °С, выдержка при 450 °С в течение 8 ч и охлаждение со скоростью ~ 2 град/мин, пороговое напряжение переориентации гидридов ≈ 55...60 МПа (перелом на зависимости  $F_n \rightarrow \sigma_0$  (см. рис. 7)).

Распределение гидридов в оболочках макетов до и после испытаний по режимам: нагревание до 450 °С, выдержка 3 ч, охлаждение до 300 °С и последующее трех-, пяти- и семикратное термоциклирование 300↔450 °С, показано на рис. 8; данные об ориентации гидридов (значения коэффициента ориентации гидридов в оболочках макетов твэлов) приведены в табл. 3.

При трехкратном термоциклировании 300↔450 °С значительно повышается уровень переориентации гидридов, при этом значительная переориентация наблюдается и в оболочках макетов твэлов с концентрацией водорода 170 ppm, а в оболочках макетов твэлов с содержанием водорода 250...400 ppm значительная переориентация имеет место и при испытании макетов с внутренним давлением  $P_{293} = 4$  МПа.

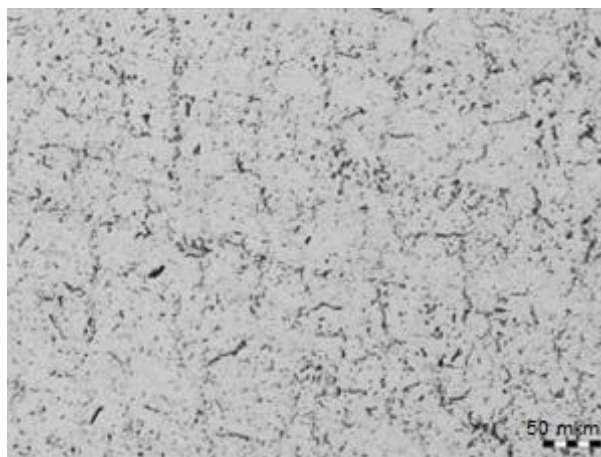
Следует отметить, что к значительному увеличению коэффициента ориентации гидридов приводит трехкратное термоциклирование



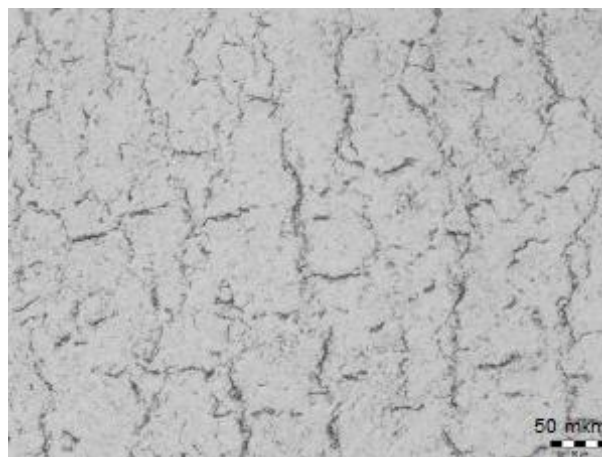
300↔450 °С, при дальнейшем увеличении числа циклов до пяти и семи ( $P_{293} = 5$  МПа) коэффициент ориентации гидридов увеличивается незначительно (см. табл. 2 и 3, рис. 7).

Распределение гидридов в оболочках макетов до и после испытаний по режимам: нагревание до

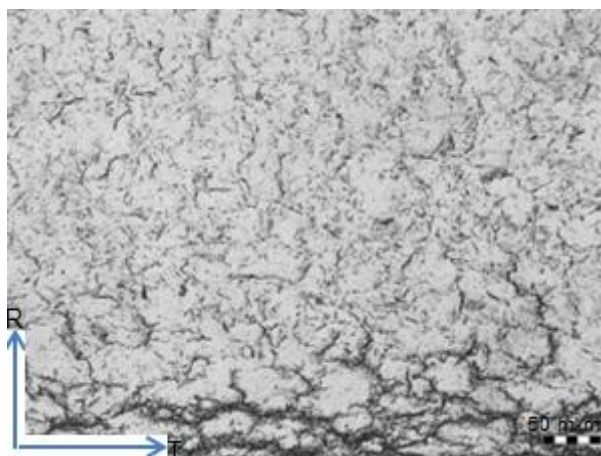
450 °С, выдержка 3 ч, охлаждение до 180 °С и последующее трех-, пяти- и семикратное термоциклирование 180↔450 °С, представлено на рис. 9; данные об ориентации гидридов (значения коэффициента ориентации гидридов в оболочках макетов твэлов) приведены в табл. 4.



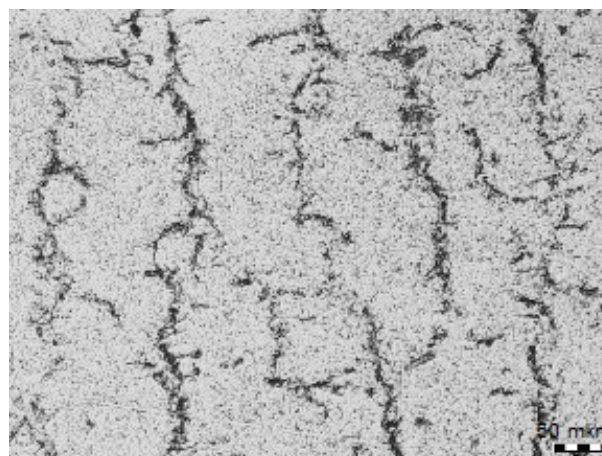
*a* – 150 ppm,  $P_{293}=5,0$  МПа,  $\sigma_{\theta}$  при 450 °С=76,7 МПа,  
 $N_{\text{циклов}} = 3, F_n \approx 0,58$



*б* – 200 ppm,  $P_{293}=5,0$  МПа,  $\sigma_{\theta}$  при 450 °С=76,7 МПа,  
 $N_{\text{циклов}} = 5, F_n \approx 0,76$



*в* – 300 ppm,  $P_{293}=5,0$  МПа,  $\sigma_{\theta}$  при 450 °С=76,7 МПа,  
 $N_{\text{циклов}} = 5, F_n \approx 0,88$



*г* – 400 ppm,  $P_{293}=5,0$  МПа,  $\sigma_{\theta}$  при 450 °С=76,7 МПа,  
 $N_{\text{циклов}} = 7, F_n \approx 0,98$

*Рис. 8. Гидриды в оболочках макетов (Zr-1%Nb) до и после испытаний на переориентацию гидридов по режиму: нагревание до 450 °С, выдержка 3 ч и охлаждение до 300 °С с последующим термоциклированием 300↔450 °С от трех до семи циклов*

Как и при трехкратном термоциклировании 300↔450 °С, при трехкратном термоциклировании 180↔450 °С значительно повышается уровень переориентации гидридов, при этом значительная переориентация происходит и в оболочках макетов твэлов с концентрацией водорода 170 ppm, а в оболочках макетов твэлов с содержанием водорода 250...400 ppm значительная переориентация имеет

место и при испытании макетов с внутренним давлением при комнатной температуре 4 МПа.

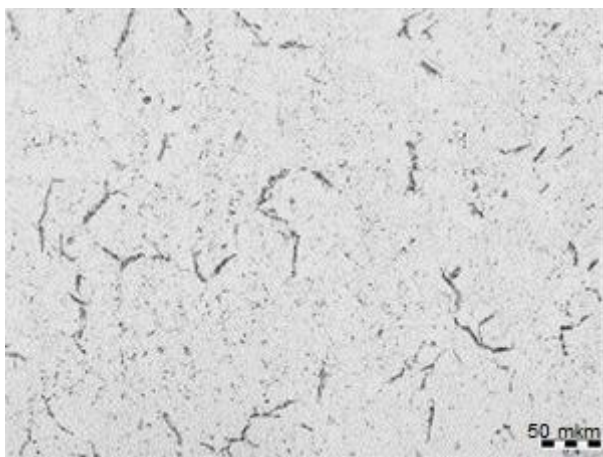
К значительному увеличению коэффициента ориентации гидридов приводит трехкратное термоциклирование 180↔450 °С, влияние дальнейшего увеличения числа циклов до пяти и семи ( $P_{293} = 5$  МПа) незначительное и неоднозначное (см. табл. 4).

Таблица 3

Значения коэффициента переориентации гидридов в оболочках макетов твэлов, испытанных по режиму: нагревание до 450 °С, выдержка 3 ч, охлаждение до 300 °С и последующее трех-, пяти- и семикратное термоциклирование 300↔450 °С

[H], ppm	$P_{293}$ , МПа	$\sigma_{\theta}$ , МПа при 450 °С	TSSD, °С	TSSP, °С	$\sigma_{\theta}$ , МПа при TSSP	$F_n$
трехкратное термоциклирование						
80	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	3	46	317,12	255,80	33,64	0,06
	4	61,3	317,12	255,80	44,854	0,07
	5	76,7	317,12	255,80	56,07	0,06
150	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	3	46	375,64	318,28	37,62	0,092
	4	61,3	375,64	318,28	50,15	0,32
	5	76,7	375,64	318,28	62,69	0,38
220	до испыт.	–	–	–	–	0,05
	3	46	417,34	364,16	40,53	0,14
	4	61,3	417,34	364,16	54,05	0,38
	5	76,7	417,34	364,16	67,56	0,48
330	до испыт.	–	–	–	–	0,06
	3	46	467,77	421,18	44,16	0,16
	4	61,3	467,77	421,18	58,88	0,53
	5	76,7	467,77	421,18	73,60	0,73
400	до испыт.	–	–	–	–	0,07...0,08
	3	46	494,36	451,96	46,12	–
	4	61,3	494,36	451,96	61,49	0,68
	5	76,7	494,36	451,96	76,87	0,82
пятикратное термоциклирование						
60	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	5	76,7	293,72	231,4	53,48	0,07
170	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	5	76,7	388,70	332,53	64,20	0,4
250	до испыт.	–	–	–	–	0,05
	5	76,7	432,48	381,10	69,35	0,52
320	до испыт.	–	–	–	–	0,06
	5	76,7	463,68	416,49	73,10	0,79
400	до испыт.	–	–	–	–	0,08
	5	76,7	494,36	451,96	76,87	0,89
семикратное термоциклирование						
60	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	5	76,7	293,72	231,40	53,48	0,13
170	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	5	76,7	388,70	332,53	64,20	0,58
250	до испыт.	–	–	–	–	0,05
	5	76,7	432,48	381,10	69,35	0,76
320	до испыт.	–	–	–	–	0,06
	5	76,7	463,68	416,49	73,10	0,88
400	до испыт.	–	–	–	–	0,08
	5	76,7	494,36	451,96	76,87	0,98

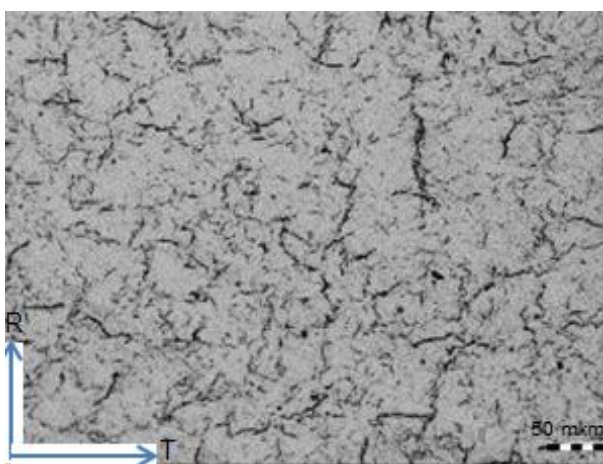




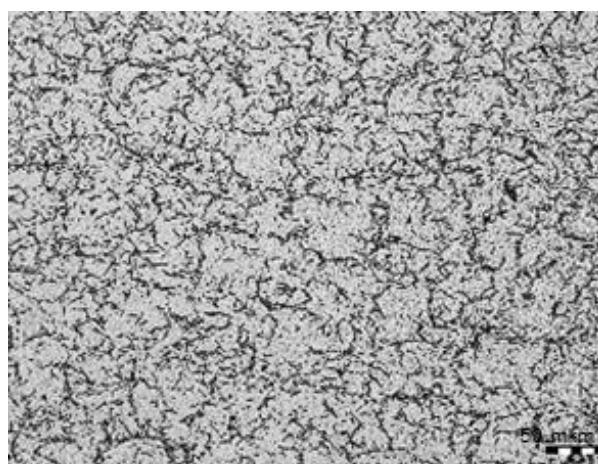
*a* – 60 ppm,  $P_{293}=4,0$  МПа,  $\sigma_{\theta}$  при  $450^{\circ}\text{C}=61,3$  МПа,  
 $N_{\text{циклов}}=3, F_{\text{H}}\approx 0,08$



*б* – 140 ppm,  $P_{293}=5,0$  МПа,  $\sigma_{\theta}$  при  $450^{\circ}\text{C}=76,7$  МПа,  
 $N_{\text{циклов}}=3, F_{\text{H}}\approx 0,1$



*в* – 300 ppm,  $P_{293}=4,0$  МПа,  $\sigma_{\theta}$  при  $450^{\circ}\text{C}=61,3$  МПа,  
 $N_{\text{циклов}}=5, F_{\text{H}}\approx 0,58$



*г* – 400 ppm,  $P_{293}=5,0$  МПа,  $\sigma_{\theta}$  при  $450^{\circ}\text{C}=76,7$  МПа,  
 $N_{\text{циклов}}=3, F_{\text{H}}\approx 0,92$

*Рис. 9. Гидриды в оболочках макетов (Zr-1%Nb) до и после испытаний на переориентацию гидридов по режиму: нагревание до  $450^{\circ}\text{C}$ , выдержка 3 ч и охлаждение до  $180^{\circ}\text{C}$  с последующим термоциклированием  $180\leftrightarrow 450^{\circ}\text{C}$  от трех до семи циклов*

### МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Механические испытания проведены при 20 и  $350^{\circ}\text{C}$  на кольцевых образцах шириной 2,7 мм, вырезанных из негидрированных оболочек твэлов, гидрированных отрезков оболочек труб длиной 75 мм и оболочек макетов с различным содержанием водорода, прошедших испытания по всем режимам, описанным в разделе «Испытания на переориентацию гидридов».

На рис. 10 представлены зависимости предела прочности, предела текучести и относительного удлинения образцов, вырезанных из оболочечных труб и гидрированных отрезков труб от концентрации водорода, при температурах 20 и  $350^{\circ}\text{C}$ .

При  $20^{\circ}\text{C}$  негидрированные оболочечные трубы имеют:  $\sigma_u = 40,75$  кГ/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{0,2} = 37,5$  кГ/мм<sup>2</sup> и  $\delta = 39,6\%$ . С повышением содержания водорода до 170...400 ppm:

– предел прочности увеличивается до 45,15...48,3 кГ/мм<sup>2</sup>;

– предел текучести увеличивается до 42,2...45,3 кГ/мм<sup>2</sup>;

– относительное удлинение уменьшается, но при этом не опускается ниже 27%.

При температуре  $350^{\circ}\text{C}$  негидрированные оболочечные трубы имеют:  $\sigma_u = 17,75$  кГ/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{0,2} = 16,00$  кГ/мм<sup>2</sup> и  $\delta = 38\%$ . С повышением содержания водорода до 170...400 ppm:

– предел прочности увеличивается до 19,1...21,3 кГ/мм<sup>2</sup>;

– предел текучести увеличивается до 16,8...19,5 кГ/мм<sup>2</sup>;

– относительное удлинение увеличивается до 40,8...44,2%.

Таблица 4

Значения коэффициента переориентации гидридов в оболочках твэлов, испытанных по режиму: нагревание до 450 °С, выдержка 3 ч, охлаждение до 180 °С и последующее трех-, пяти- и семикратное термоциклирование 180↔450 °С

[H], ppm	R <sub>293</sub> , МПа	σ <sub>θ</sub> при 450 °С, МПа	TSSD, °С	TSSP, °С	σ <sub>θ</sub> при TSSP, МПа	F <sub>n</sub>
трехкратное термоциклирование						
60	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	3	46	293,72	231,40	32,09	0,09
	4	61,3	293,72	231,40	42,78	0,08
	5	76,7	293,72	231,40	53,48	0,08
140	до испыт.	–	–	–	–	0,07
	3	46	368,65	310,71	37,13	0,09
	4	61,3	368,65	310,71	49,51	0,1
	5	76,7	368,65	310,71	61,89	0,1
270	до испыт.	–	–	–	–	0,05
	3	46	441,92	391,74	42,29	0,14
	4	61,3	441,92	391,74	56,38	0,09
	5	76,7	441,92	391,74	70,48	0,59
320	до испыт.	–	–	–	–	0,06
	3	46	463,68	416,49	43,86	0,15
	4	61,3	463,68	416,49	58,48	0,73
	5	76,7	463,68	416,49	73,10	0,68
400	до испыт.	–	–	–	–	0,07
	3	46	494,36	451,96	46,12	0,18
	4	61,3	494,36	451,96	61,49	0,78
	5	76,7	494,36	451,96	76,87	0,89
пятикратное термоциклирование						
60	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	5	76,7	293,72	231,40	53,48	0,12
170	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	5	76,7	388,70	332,53	64,20	0,38
250	до испыт.	–	–	–	–	0,05
	5	76,7	432,48	381,1	69,35	0,42
320	до испыт.	–	–	–	–	0,06
	5	76,7	463,68	416,49	73,10	0,58
400	до испыт.	–	–	–	–	0,08
	5	76,7	494,36	451,96	76,87	0,82
семикратное термоциклирование						
60	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	5	76,7	293,72	231,40	53,48	0,11
170	до испыт.	–	–	–	–	0,04
	5	76,7	388,70	332,53	64,20	0,38
250	до испыт.	–	–	–	–	0,05
	5	76,7	432,48	381,10	69,35	0,48
320	до испыт.	–	–	–	–	0,08
	5	76,7	463,68	416,49	73,10	0,59
400	до испыт.	–	–	–	–	0,08
	5	76,7	494,36	451,96	76,87	0,92

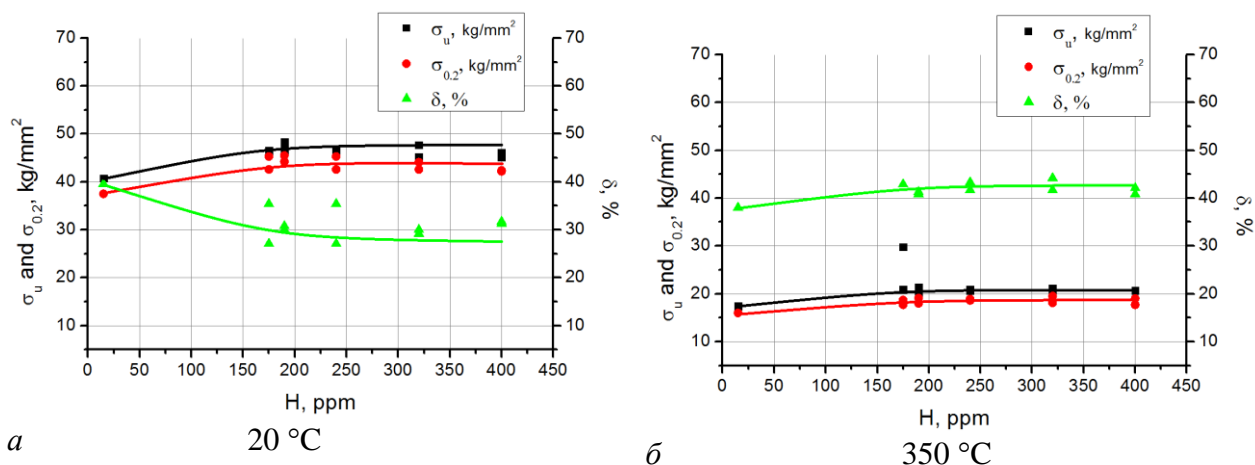


Рис. 10. Зависимости предела прочности, предела текучести и относительного удлинения оболочечных труб из сплава Zr-1%Nb (Э110) от концентрации водорода. Температуры испытаний: 20 и 350 °С

Испытания на переориентацию гидридов ни по одному из использованных в работе температурных режимов не привели к дополнительному водородному охрупчиванию. В качестве иллюстрации на рис. 11 приведены зависимости предела прочности, предела текучести и относительного удлинения образцов, вырезанных из макетов твэлов под давлением ( $P_{293} = 5$  МПа), после испытаний с семикратным термоциклированием 300↔450 °С, вызвавшим практически полную переориентацию гидридов ( $F_n=0,98$ ), от концентрации водорода. При комнатной

температуре прочность всех гидрированных оболочек макетов после испытаний с семикратным термоциклированием 300↔450 °С слегка выше, чем негидрированных образцов, а пластичность оболочек макетов, прошедших испытания на переориентацию гидридов, не снижается ниже 30%. При температуре 350 °С прочность оболочек макетов практически не зависит от содержания водорода, их пластичность несколько выше на гидрированных оболочках макетов.

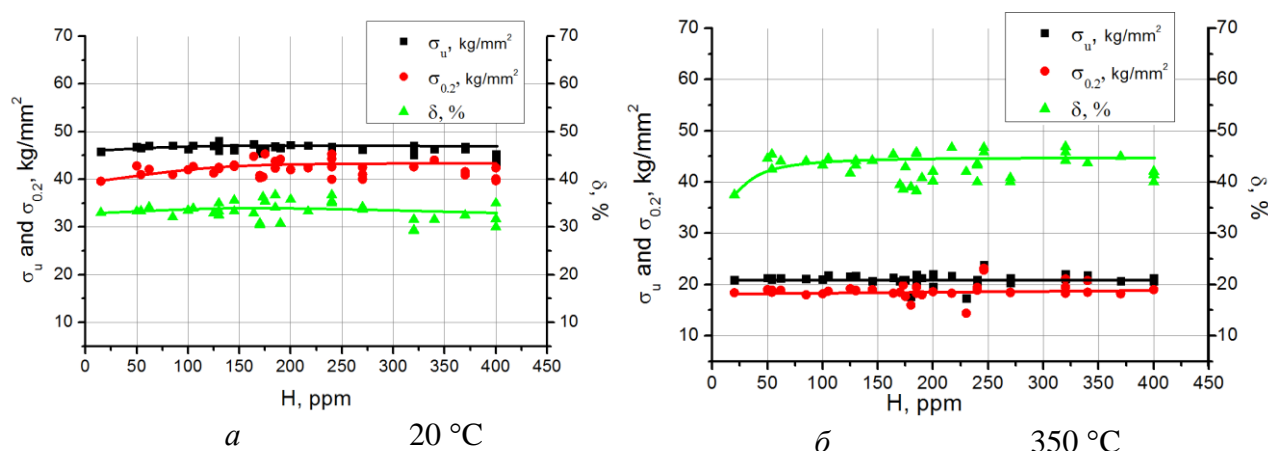


Рис. 11. Зависимости предела прочности, предела текучести и относительного удлинения оболочек макетов из сплава Zr-1%Nb (Э110), испытанных по режиму с семикратным термоциклированием 300↔450 °С, от концентрации водорода. Температуры испытаний: 20 и 350 °С

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В оболочках твэлов по завершении их эксплуатации сохраняется ряд наследственных деградационных факторов; к таким факторам относится водород, накопленный за время эксплуатации. При транспортно-технологических операциях и длительном сухом хранении в оболочках твэлов ОЯТ создаются условия, способствующие переориентации гидридов, что согласно общепринятым представлениям может привести к повышению эффективности водородного охрупчивания.

На макетах твэлов под давлением (3...5 МПа, при комнатной температуре) с гидрированными оболочками Zr-1%Nb (вплоть до 400 ppm), исходно содержащими гидриды тангенциальной ориентации ( $F_n = 0,04...0,08$ ), были проведены испытания на переориентацию гидридов, имитирующие разные «сценарии» технологических операций перегрузки ОЯТ и его хранения:

- испытания, имитирующие операции перегрузки в СХОЯТ: нагревание до 450 °С, выдержка в течение 8 ч и последующее охлаждение со скоростью ~ 2 град/мин;

– испытания, имитирующие технологические операции перегрузки и предельные проектные аварии с трех-, пяти- и семикратным термоциклированием  $300 \leftrightarrow 450$  и  $180 \leftrightarrow 450$  °С.

Установлено, что при давлениях под оболочкой ( $P_{293} = 3, 4$  и  $5$  МПа) испытания по режиму: нагрев до  $450$  °С, выдержка в течение  $8$  ч и последующее охлаждение со скоростью  $\sim 2$  град/мин, не приводят к заметной переориентации гидридов в оболочках с низким содержанием водорода ( $60$  и  $170$  ppm). При концентрации водорода  $250 \dots 400$  ppm в оболочках макетов с повышением давления от  $0$  до  $4$  МПа наблюдается незначительное увеличение коэффициента ориентации гидридов и его резкое увеличение с повышением давления от  $4$  до  $5$  МПа (вплоть до  $F_n = 0,58$ ).

На оболочках макетов твэлов с концентрацией водорода  $400$  ppm при испытаниях по режиму: нагрев до  $450$  °С, выдержка при  $450$  °С в течение  $8$  ч и охлаждение со скоростью  $\sim 2$  град/мин, пороговое напряжение переориентации гидридов  $\approx 55 \dots 60$  МПа (перелом на зависимости  $F_n \rightarrow \sigma_0$ ).

При технологических операциях перегрузки ОТВС ВВЭР-1000 после трехлетней эксплуатации (давление под оболочкой  $\sim 3,3$  МПа), согласно полученным результатам, в оболочках твэлов не ожидается значительной переориентации гидридов, а следовательно, и повышения эффективности водородного охрупчивания.

При трехкратном термоциклировании  $300 \leftrightarrow 450$  и  $180 \leftrightarrow 450$  °С значительно повышается уровень переориентации гидридов, при этом значительная переориентация происходит и в оболочках макетов твэлов с концентрацией водорода  $170$  ppm, а в оболочках макетов твэлов с содержанием водорода  $250 \dots 400$  ppm значительная переориентация наблюдается и при испытании под давлением  $P_{293} = 4$  МПа.

Следует отметить, что к значительному увеличению коэффициента ориентации гидридов приводит трехкратное термоциклирование  $300 \leftrightarrow 450$  °С. Увеличение числа циклов  $300 \leftrightarrow 450$  °С от трех до пяти, а затем и до семи вызывает дополнительное увеличение степени переориентации гидридов (вплоть до  $0,98$  при семикратном термоциклировании на оболочках с содержанием водорода  $400$  ppm). Трехкратное термоциклирование  $180 \leftrightarrow 450$  °С приводит к увеличению степени переориентации гидридов вплоть до  $0,89$  (на оболочках с содержанием водорода  $400$  ppm); увеличение числа циклов  $180 \leftrightarrow 450$  °С от трех до семи не вызывает дополнительного увеличения степени переориентации гидридов.

При температуре  $20$  °С негидрированные оболочечные трубы имеют:  $\sigma_u = 40,75$  кГ/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{0,2} = 37,5$  кГ/мм<sup>2</sup> и  $\delta = 39,6\%$ . С повышением содержания водорода до  $170 \dots 400$  ppm: предел прочности увеличивается до  $45,15 \dots 48,3$  кГ/мм<sup>2</sup>; предел текучести увеличивается до  $42,2 \dots 45,3$  кГ/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение уменьшается, но при этом не опускается ниже  $27\%$ .

При температуре  $350$  °С негидрированные оболочечные трубы имеют:  $\sigma_u = 17,75$  кГ/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_{0,2} = 16,00$  кГ/мм<sup>2</sup> и  $\delta = 38\%$ . С повышением содержания водорода до  $170 \dots 400$  ppm: предел прочности увеличивается до  $19,1 \dots 21,3$  кГ/мм<sup>2</sup>; предел текучести увеличивается до  $16,8 \dots 19,5$  кГ/мм<sup>2</sup>; относительное удлинение увеличивается до  $40,8 \dots 44,2\%$ .

Испытания на переориентацию гидридов ни по одному из использованных в работе температурных режимов не привели к дополнительному водородному охрупчиванию.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. *Циркониевые сплавы в ядерной энергетике*. М.: «Энергоатомиздат», 1994.
2. В.М. Ажажа, Б.В. Борц, И.Н. Бутенко, А.Ф. Волков, В.С. Вахрушева, В.Н. Воеводин, П.Н. Вьюгов, Н.П. Вьюгов, В.М. Грицина, В.С. Красноруцкий, С.Д. Лавриненко, В.В. Левенец, К.А. Линдт, И.М. Неклюдов, Л.С. Ожигов, И.А. Петельгузов, Н.Н. Пилипенко, В.И. Попов, В.И. Савченко, Т.П. Черняева. Сплав цирконий – ниобий для АЭС Украины // *Энциклопедия инженера-химика*. 2012, №11, с. 46-59.
3. A. Machiels. End-of-Life Rod Internal Pressures in Spent Pressurized Water Reactor Fuel // *EPRI Product ID: 3002001949 EPRI*, California, Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2013.
4. C. Cappelaere, R. Limon, D. Gilbon, T. Bredel, O. Rabouille, P. Bouffieux, and J.P. Mardon. Impact of Irradiation Defects Annealing on Long-Term Thermal Creep of Irradiated Zircaloy-4 Cladding Tube // *Zirconium in the Nuclear Industry: Thirteenth International Symposium, ASTM STP 1423 / G.D. Moan and P. Rudling, Eds. ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2002, p. 720-739.
5. A. Couet, A.T. Motta, R.J. Comstock. Hydrogen pickup measurements in zirconium alloys: Relation to oxidation kinetics // *Journal of Nuclear Materials*. 2014, v. 451, N 1-3, p. 1-13.
6. C.E. Coleman and D. Hardie. The Hydrogen Embrittlement of  $\alpha$ -Zirconium – A Review // *Journals of the Less Common Metals*. 1966, v. 11, N 3, p. 168-185.
7. G. Bertolino, G. Meyer, J. Perez Ipin. Degradation of the mechanical properties of Zircaloy-4 due to hydrogen embrittlement // *Journal of Alloys and Compounds*. 2002, v. 330-332, p. 408-413.
8. K. Nuttall and A.J. Rogowski. Some Fractographic aspects of Hydrogen-Induced Delay Cracking in Zr-2.5%Nb alloys // *Journals of Nuclear Materials*. 1979, v. 80, N 2, p. 279-290.
9. IAEA-TECDOC-1649. *Delayed Hydride Cracking of Zirconium Alloy Fuel Cladding*. Vienna: IAEA, 2010, ISSN 1011-4289.
10. C. Coleman, V. Grigoriev, V. Inozemtsev, V. Markelov, M. Roth, V. Makarevicius, Y.S. Kim, K. Liagat Ali, J.K. Chakravarty, R. Mizrahi, and R. Lalgudi. Delayed Hydride Cracking in Zircaloy Fuel Cladding – An IAEA Coordinated Research Programme



- // *Nuclear Engineering and Technology*. 2009, v. 41, N 2, p. 171-178.
11. P.A. Raynaud, D.A. Koss, and A.T. Motta. Crack growth in the through-thickness direction of hydrided thin-wall Zircaloy sheet // *Journal of Nuclear Materials*. 2012, v. 420, N 1-3, p. 69-82.
12. Review of Used Nuclear Fuel Storage and Transportation. Technical Gap Analyses. *FCRD-USED-2012-000215 Draft, PNNL-21596*, Prepared for the U.S. Department of Energy Used Fuel Disposition Campaign, Washington, D.C., July 31, 2012.
13. M.R. Louthan, Jr., and R.P. Marshall. Control of Hydride Orientation of Zircaloy // *Journal of Nuclear Materials*. 1963, v. 9, N 2, p. 170-184.
14. Hardie and A.W. Shanaham. Stress Reorientation of Hydrides in Zirconium-2.5%Nb // *Journal of Nuclear Materials*. 1975, v. 55, N 1, p. 1-13.
15. M.C. Billone, T.A. Burtseva, and R.E. Einziger. Ductile-to-Brittle Transition Temperature for High-Burnup Cladding Alloys Exposed to Simulated Drying-Storage Conditions // *Journal of Nuclear Materials*. 2013, v. 433, N 1-3, p. 431-448.
16. M.N. Cinbiz, D.A. Koss, A.T. Motta. The Effect of Stress Biaxiality on Hydride Reorientation Threshold Stress // *Proceedings of LWR Fuel Performance Meeting, TopFuel 2015*, 13–17 September, 2015, Zurich, Switzerland; Belgium, Brussels, Part II, 2015, p. 94-103.
17. ISG 15, Interim Staff Guidance – 15: Materials Evaluation.
18. NUREG 1536. Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility // Division of Spent Fuel Storage and Transportation, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, 2009.
19. А.Е. Новоселов, С.В. Павлов, В.С. Поленок, Д.В. Марков, В.А. Жителев, Г.П. Кобылянский, А.Н. Костюченко и И.Н. Волкова. Состояние оболочек твэлов ВВЭР после шести лет эксплуатации // *Физика и химия обработки материалов*. 2009, №2, с. 24-32.
20. IAEA-TECDOC-1381. *Analysis of differences in fuel safety criteria for WWER and western PWR nuclear power plants*. IAEA, Vienna, 2003.
21. P.V. Shebaldov, M.M. Peregud, A.V. Nikulina, Y.K. Bibilashvili, A.F. Lositski, N.V. Kuz'menko, V.I. Belov, and A.E. Novoselov. E110 alloy cladding tube properties and their interrelation with alloy structure-phase condition and impurity content // *Zirconium in the Nuclear Industry, Twelfth International Symposium, ASTM STP 1354 / G.P. Sabol and G.D. Moan / Eds. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2000*, p. 545-559.
22. А.Є. Лучна, А.І. Лавренчук, В.А. Седнев, В.М. Васильченко, О.М. Двоєглазов, В.І. Медведєв, и Ю.М. Печера. Сухе сховище відпрацьованого ядерного палива запорізької АЕС. Забезпечення безпеки // *International Conference Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy*, May 29–June 3, Kyiv, Ukraine, 2006. [http://www.kinr.kiev.ua/NPAE\_Kyiv2006/proc/Luchna.pdf].
23. R.S. Daum, Y.S. Chu, and A.T. Motta. Identification and quantification of hydride phases in Zircaloy-4 cladding using synchrotron X-ray diffraction // *Journal of Nuclear Materials*. 2009, v. 392, N 3, p. 453-464.
24. Y. Liu, Q. Peng, W. Zhao, and H. Jiang. Hydride precipitation by cathodic hydrogen charging method in zirconium alloys // *Materials Chemistry and Physics*. 2008, v. 110, N 1, p. 56-60.
25. R. Tang and X. Yang. Dissolution and precipitation behaviors of hydrides in N18, Zry-4 and M5 alloys // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009, v. 34, N 17, p. 7269-7274.
26. Т.П. Черняева, В.М. Грытсына, В.С. Краснорутский, А.П. Редкина, І.А. Петелгузов, Ye.A. Slabospitskaa. Effect of Fuel Rod Cladding Temperature and Stressed Conditions on Hydride Reorientation // *Program and Abstracts: 18th International Symposium on "Zirconium in the Nuclear Industry"*, May 15–19, 2016. The Westin Hilton Head Island Resort and Spa, Hilton Heat Island, SC, USA. 2016, p. 76-77.
27. Т.П. Черняева. Водородо-индуцированная аморфизация. Часть I – общие положения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1999, в. 1(73), 2(74), с. 52-67.
28. В.М. Грицина, И.А. Петельгузов, Н.И. Рагулина, А.И. Стукалов, Т.П. Черняева. Коллапс и образование гидридов в циркониевых элементах конструкций активных зон водоохлаждаемых реакторов // *Труды конференции по проблеме циркония и гафния в атомной энергетике*. Алушта, 14–19 июня 1999. Харьков, 1999, с. 75-77.
29. V. Grytsyna, A. Stukalov, T. Chernyayeva, V. Krasnorutskyy, D. Malykhin, V. Voyevodin, V. Bryk. Destruction of crystallographic texture in zirconium alloy tubes // *Fourteenth International Symposium: Zirconium in Nuclear Industry*. Stockholm, Sweden, June 13–17, 2005. ASTM Stock Number: STP1467. Bridgeport, NJ, 2006, p. 305-329.
30. Т.П. Черняева, А.В. Остапов. Водород в цирконии. Часть 1 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2013, №5(87), с. 16-32.
31. Т.П. Черняева, А.В. Остапов. Водород в цирконии. Часть 2 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2014, №2(90), с. 3-16.

Статья поступила в редакцию 29.11.2017 г.

## **ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ І НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НА ПЕРЕОРІЄНТАЦІЮ ГІДРИДІВ В ОБОЛОНКАХ ТВЕЛІВ З Zr-1%Nb**

*Т.П. Черняєва, В.М. Грицина, В.С. Красноруцький, Г.П. Редкіна,  
І.А. Петельгузов, О.О. Слабоспицька*

Представлено результати експериментальних досліджень переорієнтації гідридів і водневої крихкості, які можуть мати місце в оболонках твелів в умовах, що імітують штатні і деякі аварійні режими поводження з ВЯП. Проведено випробування з нагріванням макетів твелів з оболонками зі сплаву Zr-1%Nb з різним вмістом водню під внутрішнім тиском (холодний тиск під оболонкою 3, 4 і 5 МПа) до температури 450 °С, витримкою при цій температурі 8 год і наступним охолодженням. Встановлено, що при вмісті водню 400 ppm інтенсивна переорієнтація гідридів в оболонках макетів твелів при термічних випробуваннях починається при тангенціальній напрузі  $\approx 55\text{...}60$  МПа при 450 °С. Зі зменшенням вмісту водню інтенсивність впливу випробувань на переорієнтацію гідридів значно знижується. Термоцикування на стадії витримки ВЯП в ССВЯП призводить до значного посилення переорієнтації гідридів. В оболонках з концентрацією водню 400 ppm, при випробуваннях з трикратним термоцикуванням  $180\leftrightarrow 450$  °С відбувається практично повна переорієнтація гідридів. Проведено механічні випробування зразків з різним вмістом водню до і після випробувань на переорієнтацію гідридів. Виходячи з отриманих результатів і результатів проведеного інформаційного пошуку, зроблено прогноз щодо ступеня небезпеки деградації властивостей оболонок ВЯП.

## **EFFECTS OF Zr-1%Nb FUEL ROD CLADDING TEMPERATURE AND STRESSED CONDITIONS ON HYDRIDERE ORIENTATION**

*T.P. Chernyayeva, V.M. Grytsyna, V.S. Krasnorutsky, A.P. Redkina,  
I.A. Petelguzov, Ye.A. Slabospitskaya*

This paper presents results of experimental research into hydride reorientation and hydrogen embrittlement, which may occur in the FR cladding at conditions simulating normal and some accident modes of SNF handling. We performed experiments including heating the dummy FRs with Zr-1%Nb claddings with various hydrogen concentrations under internal pressure (cold pressure under cladding of 3, 4, and 5 MPa) to 450 °C and holding at this temperature for 8 hours with subsequent cooling. It was established that at hydrogen concentration of 400 ppm, intensive hydride reorientation in the dummy FR claddings during thermal tests begins at tangential stresses of  $\approx 55\text{...}60$  MPa at 450 °C. With a decrease in hydrogen concentration, intensity of the effect of the tests on hydride reorientation is significantly reduced. Thermal cycling at the stage of SNF holding in the SNF dry storage facility significantly intensifies hydride reorientation. In the claddings with a hydrogen concentration of 400 ppm, thermally cycled three times in the temperature range of  $180\leftrightarrow 450$  °C, almost complete hydride reorientation occurs. Mechanical tests of samples with various hydrogen concentrations before and after the hydride reorientation tests were performed. Based on the results obtained and the information search conducted, a prediction was made on the risk level due to SNF cladding degradation.