

*Раздел второй*  
**МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ  
И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

УДК 669.269.5

**ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА АНИЗОТРОПИЮ  
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЭЛЬНЫХ ТРУБ  
ИЗ СПЛАВА Zr-1%Nb**

*П.И. Стоев, В.Н. Воеводин, И.И. Папиров, М.А. Тихоновский,  
Д.В. Виноградов, Н.П. Вьюгов*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*  
*E-mail: stoev@kipt.kharkov.ua*

Определены механические характеристики твэльных труб из сплава Zr-1%Nb украинского производства при растяжении в радиальном (кольцевые образцы) и продольном (квазиплоские образцы) направлениях в состоянии поставки и после наводороживания. Показано, что исходные трубы обладают значительной анизотропией механических свойств: наблюдается существенное различие для условного предела текучести, который в тангенциальном направлении (относительно оси трубы) на 20% выше, чем в продольном. Также наводороживание твэльных труб усиливает анизотропию механических свойств: условный предел текучести в тангенциальном направлении на 20...40% выше, чем в продольном. Предел прочности образцов в тангенциальном направлении превышает предел прочности в продольном направлении на 25...50%. При этом наводороживание практически не влияет на пластичность кольцевых образцов, но приводит к охрупчиванию квазиплоских образцов. Причиной анизотропии механических свойств исходной твэльной трубы является текстура, которая формируется в материале в результате особенностей механико-термической обработки. Особенности изменения прочностных и пластических свойств наводороженного материала связаны с образованием ориентированных выделений гидрида циркония, которые по-разному влияют на деформацию трубок в продольном и поперечном направлениях.

**ВВЕДЕНИЕ**

Циркониевые сплавы являются важнейшим конструкционным материалом для изделий активной зоны и твэлов атомных энергетических реакторов (оболочек твэлов, дистанционирующих решеток и т. д.) [1, 2]. К твэлам атомных реакторов предъявляются высокие требования, связанные с необходимостью соблюдения ядерной безопасности. Наиболее ответственным конструктивным элементом твэлов являются трубные оболочки. Они обеспечивают необходимую механическую прочность конструкции, ее размерную стабильность, защищают ядерное топливо и продукты деления от действия теплоносителя. В процессе эксплуатации оболочки работают в сложных условиях при одновременном действии на них облучения, высокой температуры, коррозионной среды и механических напряжений различного направления и величины [3, 4]. Поэтому материал оболочек твэлов должен обладать комплексом высоких свойств в диапазоне рабочих температур, а именно: иметь высокую коррозионную стойкость, устойчивость к радиационному росту и высокие механические свойства [3, 4]. К критическим процессам, которые ограничивают ресурс работы реакторных материалов, относится также их наводороживание [5–13]. В процессе работы в реакторе источниками накопления водорода в изделиях являются: водород, выделяющийся при коррозионном взаимодействии с теплоносителем, и

водород, присутствующий внутри оболочки твэла и выделяющийся из топлива при эксплуатации. Количество накапливающегося в циркониевых изделиях водорода зависит, прежде всего, от температуры эксплуатации и интенсивности коррозионного процесса. Обычно к концу кампании в оболочках из циркониевых сплавов содержание водорода может достигать 0,04...0,05 мас.%, что приводит к охрупчиванию и так называемому замедленному растрескиванию оболочек, снижающему ресурс циркониевых изделий.

При определении механических свойств твэльных трубок выбирают схему испытаний, которая воссоздает условия, наиболее близкие к эксплуатационным. Наиболее информативным видом испытаний по определению механических свойств являются испытания труб до разрушения при деформации в продольном, радиальном и тангенциальном направлениях относительно оси трубы. Эти испытания дают возможность получить абсолютные значения предела прочности и текучести, а также оценить пластические характеристики в разных направлениях деформации и определить степень анизотропии механических свойств. Как известно, поликристаллический цирконий и сплавы на его основе обладают анизотропией физико-механических свойств [14]. Данных по изучению и определению анизотропии механических свойств, полученных при растяжении твэльных труб, в литературе недостаточно. Поэтому

научный и практический интерес представляет изучение анизотропии механических свойств твэльных труб из сплава Zr-1%Nb в состоянии поставки и под воздействием различных факторов. В данной работе в качестве такого фактора выбрано накопление водорода в твэльных трубках.

### МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Образцы для испытаний вырезали механическим способом из твэльных труб украинского производства [15]. Деформирование образцов проводили в продольном (осевом) направлении на квазиплоских или полугантелевидных образцах (рис. 1) и тангенциальном направлении на кольцевых образцах (рис. 2).

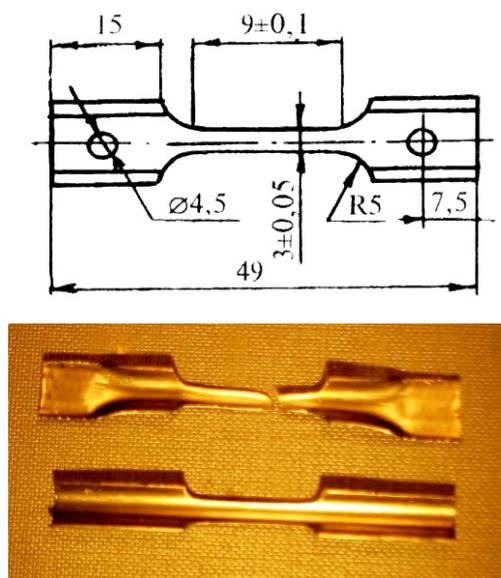


Рис. 1. Схема и внешний вид образцов для продольного растяжения

Механические свойства тонкостенных труб в тангенциальном направлении обычно определяют по результатам испытаний кольцевых образцов на разрыв при растяжении на полукруглых опорах. В данной работе параметры испытываемых образцов выбирали с учетом неравномерности торможения деформации на опорах. Были использованы цилиндрические образцы размерами 9,13×0,65×2,8 мм; их внешний вид и схема испытаний приведены на рис. 2. При этом удлинение образца определялось по величине изменения диаметра кольца в направлении растяжения.

Насыщение образцов циркониевого сплава водородом проводили на автоматизированной установке, изготовленной на базе гелиевого течеискателя. Образец помещали в камеру, давление в которой откачивали до 0,013 Па, после чего в нее напускали водород под давлением ~ 0,05 МПа, образец непрерывно нагревали со скоростью 8 град/мин до 475 °С, при этой температуре его выдерживали 3 ч и измеряли давление в камере. Количество поглощенного газа определяли по разнице давления в камере до и после насыщения весовым методом, а также из зависимости

интенсивности выхода водорода от температуры при равномерном нагреве образцов.

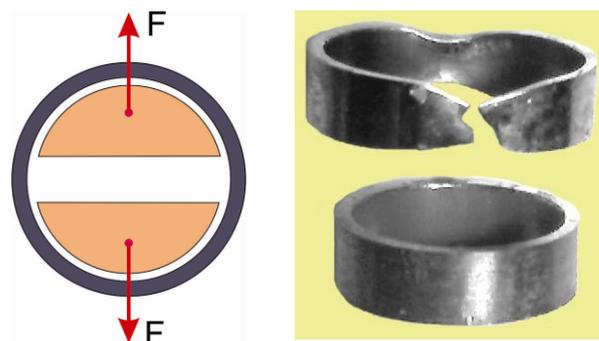


Рис. 2. Схема испытаний и внешний вид кольцевых образцов для тангенциального растяжения

Растяжение образцов проводили на универсальной испытательной машине 1958 У10-1 со скоростью деформации 0,17 мм/мин ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ) при комнатной температуре. По полученным кривым растяжения определяли условный предел текучести, предел прочности и удлинение. Синхронно с механическими характеристиками и с помощью акустического комплекса М400 [16] регистрировали параметры акустической эмиссии (АЭ) (активность, общую сумму импульсов, среднюю амплитуду), анализ которых позволял определять особенности деформации материала образца на разных стадиях, а амплитудное распределение акустических сигналов (АЭ) позволяло оценить энергетику процессов деформации. В качестве датчика-регистратора АЭ использовали пьезокерамический преобразователь из керамики ЦТС-19 с резонансной частотой 180 кГц. Датчик крепили к исследуемому образцу через специальный волновод, который касался одной из крепежных опор кольцевого образца в приспособлении для испытания или головки продольного образца. Сбор, обработку и анализ результатов, включавших информацию об АЭ и параметрах деформирования, проводили с помощью ЭВМ и специально разработанных программ обработки данных.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3, 4 и в табл. 1, 2 приведены кривые деформации и механические характеристики образцов сплава Zr-1%Nb в исходном и наводороженном состояниях при растяжении в тангенциальном и продольном направлениях. Из приведенных рисунков и таблиц видно, что механические свойства образцов твэльной трубки в разных направлениях отличаются как до, так и после наводороживания. Существенное различие наблюдается для величин предела текучести: у кольцевых образцов сплава Zr-1%Nb при деформировании в тангенциальном направлении (относительно оси трубки) условный предел текучести на 21% больше, чем в продольном (осевом) направлении.

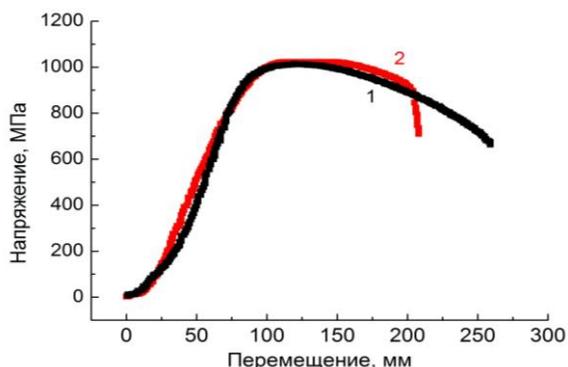


Рис. 3. Зависимость приложенного напряжения от перемещения захвата (деформации) при тангенциальном направлении деформирования кольцевых образцов: 1 – исходное состояние; 2 – после наводороживания

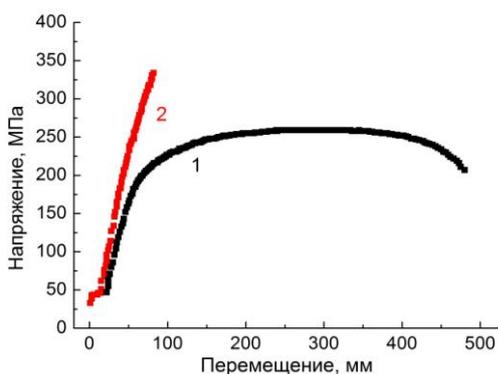


Рис. 4. Зависимость приложенного напряжения от перемещения захвата (деформации) при продольной деформации образцов: 1 – исходное состояние; 2 – после наводороживания

Из приведенных данных (см. рис. 3, 4 и табл. 1, 2) видно, что наводороживание кольцевых образцов до 0,090 мас.% (900 ppm) приводит к:

- увеличению предела прочности на 3...4%;
- увеличению условного предела текучести на 3...3,5% без существенного изменения пластичности.

Влияние наводороживания очень сильно проявляется для образцов, испытанных в продольном направлении. Для этих образцов наводороживание до 0,090 мас.% приводит к уменьшению предела прочности на 18...37%, условного предела текучести на 5...35% и удлинения в 10–20 раз, т. е. образцы практически разрушаются хрупким образом.

Таблица 1

Механические характеристики кольцевых образцов сплава Zr-1%Nb в исходном и наводороженном состояниях при растяжении в тангенциальном направлении

Образец	Водород, мас.%	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	Удлинение, мм
Исходный	0	466,7	384,5	1,95
После наводороживания	0,090	481,3	396,6	1,97

Таблица 2

Механические характеристики образцов сплава Zr-1%Nb в исходном и наводороженном состояниях при растяжении в продольном направлении

Образец	Водород, мас.%	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	Удлинение, %
Исходный	0	462,6	302,5	20,2
После наводороживания	0,090	290,0...380,0	190,0...290,0	1,0...2,0

На рис. 5–8 приведены зависимости акустических параметров (активности и общей суммы импульсов АЭ) образцов сплава Zr-1%Nb в исходном состоянии и после наводороживания от перемещения при деформировании в тангенциальном и продольном направлениях. Абсолютные значения активности АЭ при деформировании образцов сплава Zr-1%Nb в исходном состоянии очень низкие (см. рис. 5, 6). АЭ начинает регистрироваться при деформации, которая соответствует напряжениям приблизительно 0,25...0,30 от условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  и достигает максимума (порядка 20 имп./с) в области напряжений 0,7...0,75  $\sigma_{0,2}$ . При дальнейшей деформации образцов активность АЭ снижается и остается низкой (1...2 имп./с) до разрушения образца.

После наводороживания кривые зависимостей активности АЭ существенно изменяются. Абсолютные значения активности АЭ после наводороживания существенно возрастают: для кольцевых образцов в 7,5, а для продольных – в 15 раз (см. рис. 5, 6). Отличия наблюдаются и в виде кривых зависимости активности АЭ при деформировании в различных направлениях. Так, зависимости активности АЭ наводороженных кольцевых образцов описываются кривой с максимумом, тогда как кривая активности для наводороженных продольных образцов – это кривая без максимума и спадающей части. Особенностью поведения зависимости активности АЭ продольных образцов является нарастание активности АЭ вплоть до разрушения материала, которое происходит при малых величинах пластической деформации.

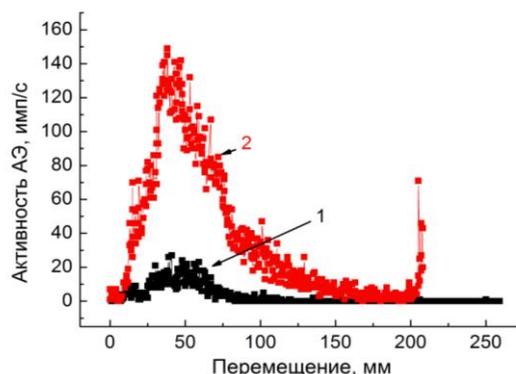


Рис. 5. Зависимость активности АЭ кольцевых образцов в исходном состоянии (кривая 1) и после наводороживания (кривая 2) от перемещения при деформировании в тангенциальном направлении

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных в работе результатов позволил установить ряд особенностей в поведении механических характеристик и акустических спектров при деформировании в разном направлении твэльных трубок сплава Zr-1%Nb в исходном состоянии и после наводороживания.

1. Установлена сильная анизотропия механических свойств трубных образцов сплава Zr-1%Nb, деформированных в тангенциальном и продольном направлениях, причем после наводороживания она резко усиливается.

2. Показано, что наводороживание твэльных трубок сплава приводит к существенным изменениям прочностных и пластических свойств исследованного материала.

Как известно, монокристаллы  $\alpha$ -циркония обладают анизотропией физико-механических свойств [14]. В поликристаллическом цирконии и сплавах на его основе, которые сильно текстурируются в процессе обработки давлением, это также приводит к вышеописанной анизотропии. Текстура труб и анизотропия механических свойств циркониевых сплавов в значительной степени определяются технологической схемой их изготовления [17–19]. Технология изготовления труб состоит изковки, горячего выдавливания и холодной прокатки с промежуточными отжигами. Посредством сочетания холодной прокатки, условий отжига и подбора содержания кислорода можно регулировать в широких пределах механические свойства изделий. В работах [17–19] изучена текстура труб, которые изготавливали по различным технологическим схемам, а также определено ее влияние на анизотропию механических свойств. Обычно в этих работах приводят значения механических характеристик в осевом и радиальном направлениях.

Достаточно распространенным видом испытаний является испытание циркониевых труб до разрушения внутренним давлением, наиболее близкое к реальным условиям работы твэлов и позволяющее определить удлинение и прочностные свойства в радиальном направлении, а затем пересчитать их для тангенциального направления. Эти данные характеризуют устойчивость оболочек против сплющивания, качество оболочек и точность выполнения технологической схемы изготовления труб.

Остановимся более подробно на экспериментальных данных, которые получены в данной работе. Из табл. 1 и 2 видно, что для кольцевых образцов сплава Zr-1%Nb в состоянии поставки абсолютные значения условного предела текучести в тангенциальном направлении (384,5 МПа) на 21% выше, чем в продольном направлении (302,5 МПа). Абсолютные величины предела прочности у этих образцов имеют близкие значения.

Для анализа гистограмм амплитудного распределения сигналов АЭ отметим [20, 21], что пластическая деформация монокристаллов  $\alpha$ -цирко-

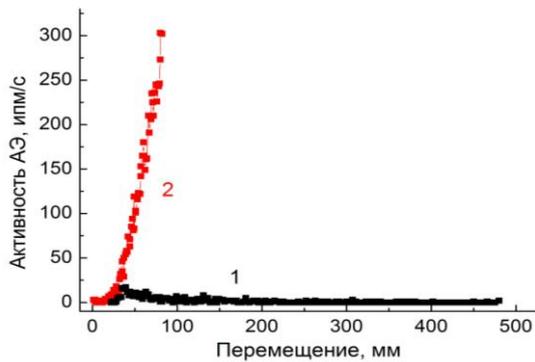


Рис. 6. Зависимость активности АЭ образцов в исходном состоянии (кривая 1) и после наводороживания (кривая 2) от перемещения при деформировании в продольном направлении

Отмеченные выше особенности хорошо иллюстрируют рис. 7, 8, на которых приведены зависимости общей суммы регистрируемых импульсов АЭ в процессе деформирования кольцевых и продольных образцов в исходном и наводороженном состояниях. Видно радикальное различие характеристик АЭ исследованных образцов при их деформировании как в зависимости от направления деформирования, так и от содержания водорода.

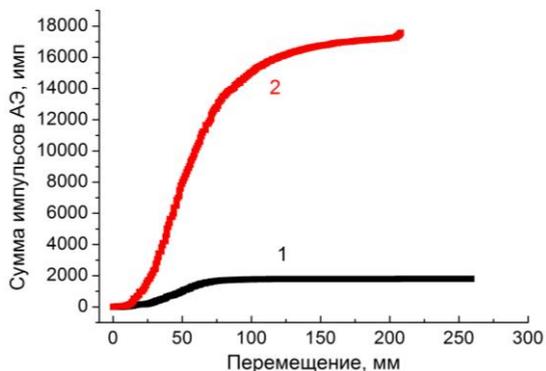


Рис. 7. Зависимость общей суммы импульсов АЭ кольцевых образцов в исходном состоянии (кривая 1) и после наводороживания (кривые 2) от перемещения при деформировании в тангенциальном направлении

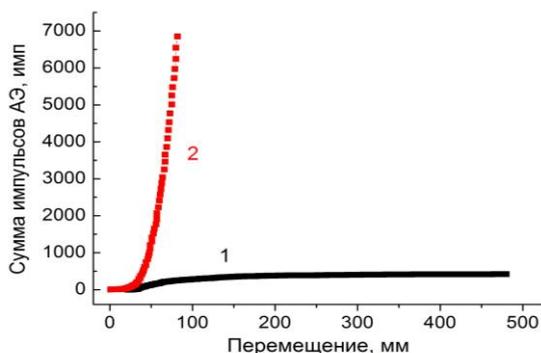


Рис. 8. Зависимость общей суммы импульсов АЭ образцов в исходном состоянии (кривая 1) и после наводороживания (кривая 2) от перемещения при деформировании в продольном направлении

ния осуществляется двумя способами: при растяжении (сжатии) кристалла вдоль оси  $a$  – скольжением по плоскостям  $(10\bar{1}0)$  в направлении  $[11\bar{2}0]$  и при растяжении (сжатии) вдоль оси  $c$  – двойникованием по плоскостям  $(10\bar{1}2)$ ,  $(11\bar{2}1)$ . Из рис. 9 следует, что в спектре амплитудного распределения сигналов АЭ образцов, деформированных в тангенциальном направлении, присутствуют сигналы высокой амплитуды (7 и 8 каналы), которые позволяют утверждать, что кроме процесса скольжения (за него отвечает низкоамплитудная составляющая амплитудного распределения сигналов АЭ) в процессе деформации участвует двойникование (высокоамплитудная составляющая). В амплитудном спектре сигналов АЭ при продольном деформировании образцов (рис. 10) высокоамплитудная составляющая практически отсутствует, т. е. деформация материала осуществляется менее энергетическим процессом, вероятнее всего, дислокационным скольжением. Для прохождения деформации путем двойникования требуется приложить к материалу значительно более высокое скалывающее напряжение [22, 23]. Различия в механизме деформации, а значит, и в уровне критических скалывающих напряжений являются, на наш взгляд, причиной более высокого значения условного предела текучести в тангенциальном направлении по сравнению с продольным в исходных (ненаводороженных) образцах.

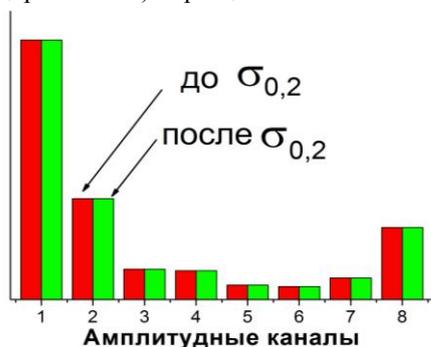


Рис. 9. Гистограмма амплитудного распределения сигналов АЭ при деформировании образцов сплава Zr-1%Nb в исходном состоянии в тангенциальном направлении

Параметры напряжения на стадии образования шейки и последующего разрушения кольцевых и продольных образцов становятся, по-видимому, близкими, поэтому близки значения предела прочности в обоих направлениях (см. табл. 1 и 2).

Анизотропия относительного удлинения при испытании продольных и кольцевых образцов в исходном состоянии определяется в первую очередь отсутствием подобия в этих видах испытания. Так, неравенство отношений длины к поперечному сечению образцов приводит к нарушению геометрического подобия форм и размеров образцов, а неравенство относительных скоростей деформации и напряженного состояния – к нарушению механического подобия в испытаниях.

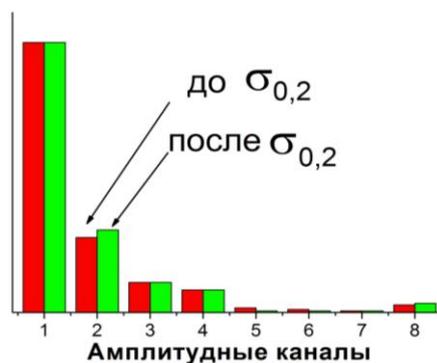


Рис. 10. Гистограмма амплитудного распределения сигналов АЭ при деформировании образцов сплава Zr-1%Nb в исходном состоянии в продольном направлении

Рассмотрим теперь роль водорода, содержание которого в наших образцах после наводороживания было значительным (примерно в два раза выше, чем предельное значение в конце кампании эксплуатации твэлов). В твэльных трубках при комнатной температуре почти весь поглощенный водород присутствует в виде выделений гидрида циркония. Выделение гидридной фазы в пересыщенных растворах происходит предпочтительно вдоль границ зерен, а их ориентация определяется текстурой металла, а также внутренними напряжениями [1].

На рис. 11 приведена микроструктура наводороженного образца сплава Zr-1%Nb (ось трубки перпендикулярна плоскости рисунка). Видно, что гидридные выделения ориентированы в тангенциальном направлении. Анализ микроструктур наводороженных образцов сплава показал, что размер гидридов в продольном направлении существенно меньше, чем размер гидридных выделений в тангенциальном направлении, т. е. гидриды имеют вид вытянутых тонких нитей (лент).



Рис. 11. Микроструктура наводороженного образца сплава Zr-1%Nb

При проведении испытаний в тангенциальном направлении это направление растяжения совпадает с ориентацией гидридных выделений, т. е. деформируемый образец можно рассматривать как матрицу исходного сплава, «армированную» гидридными выделениями. Поэтому для деформирования такого «армированного» изделия необходимо приложить большую нагрузку, чем при

растяжении наводороженного образца, что, естественно, приводит к росту величин предела прочности и текучести.

Это предположение хорошо иллюстрируют зависимости активности и общей суммы импульсов АЭ при деформировании в тангенциальном направлении (см. рис. 5 и 7). Поскольку при растяжении образцов в исходном состоянии абсолютные значения активности АЭ низкие, то рост активности наводороженных образцов можно объяснить постепенным разрушением гидридных пластин, которые «армируют» матрицу.

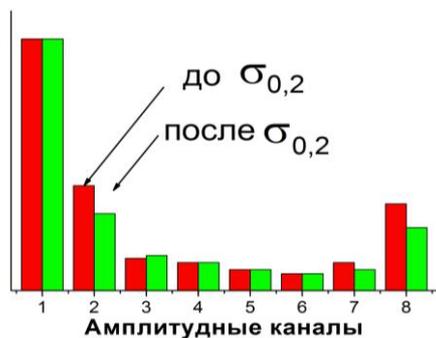


Рис. 12. Гистограмма амплитудного распределения сигналов АЭ при деформировании кольцевых образцов сплава Zr-1%Nb в исходном состоянии в тангенциальном направлении

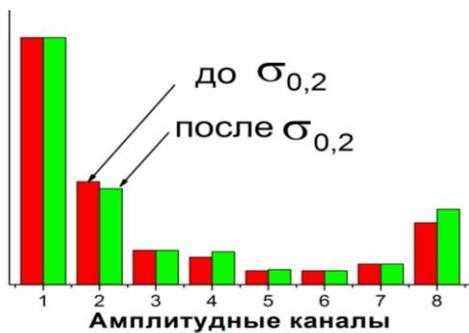


Рис. 13. Гистограмма амплитудного распределения сигналов АЭ при деформировании образцов сплава Zr-1%Nb в наводороженном состоянии в тангенциальном направлении

Можно предположить, что при деформировании образца в тангенциальном направлении разрушение гидридных выделений не приводит к образованию крупных трещин (концентраторов напряжения), поэтому значения удлинения исходных и наводороженных образцов практически одинаковы.

Это согласуется с гистограммами амплитудных распределений сигналов АЭ при деформировании в тангенциальном направлении образцов в состоянии поставки и после наводороживания (рис. 12, 13). Подобие гистограмм амплитудного распределения сигналов АЭ для исходных и наводороженных образцов свидетельствует о том, что наводороживание не привело к существенному охрупчиванию материала в тангенциальном направлении.

На рис. 14 и 15 приведены гистограммы амплитудных распределений сигналов АЭ при

деформировании в продольном направлении образцов в состоянии поставки и после наводороживания. Сравнение этих гистограмм позволяет сделать заключение о том, что наводороживание продольных образцов привело к существенному увеличению высокоамплитудной составляющей спектра сигналов АЭ.

Как показано ранее, процесс разрушения наводороженных циркониевых сплавов осуществляется в три стадии: образование и развитие трещин в гидридах; выход трещины из гидрида в матрицу и распространение трещины в матрице [25]. Наличие высокоамплитудных сигналов АЭ на начальной стадии деформирования наводороженного продольного образца (см. рис. 15) показывает, что гидридные выделения начинают разрушаться при напряжениях, существенно ниже значений условного предела текучести, и создают локальные несплошности матрицы в виде трещин. При увеличении прикладываемой нагрузки эти трещины быстро достигают критического размера и начинают двигаться в матрице, разрушая материал. Свидетельством этого являются наличие в спектре амплитудного распределения у продольных наводороженных образцов сигналов АЭ высокой амплитуды и рост их числа в процессе деформирования при напряжениях, выше условного предела текучести.

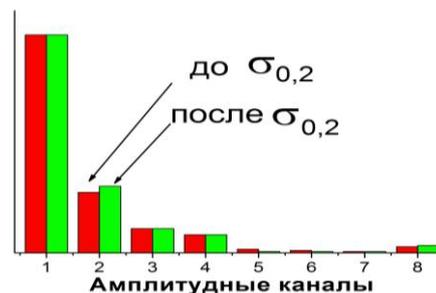


Рис. 14. Гистограмма амплитудного распределения сигналов АЭ при деформировании образцов сплава Zr-1%Nb в исходном состоянии в продольном направлении

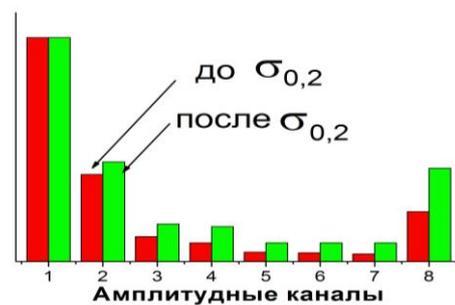


Рис. 15. Гистограмма амплитудного распределения сигналов АЭ при деформировании образцов сплава Zr-1%Nb в наводороженном состоянии в продольном направлении

Можно предположить, что при деформировании образцов в продольном направлении разрушение гидридов приводит к образованию трещин, размер которых близок к критическому. Следствием этого является разрушение наводороженных образцов при

растяжении в продольном направлении уже на начальной стадии пластической деформации (1...2%) при невысоких значениях прикладываемого напряжения.

### ВЫВОДЫ

Определены механические характеристики твэльных труб из сплава Zr-1%Nb украинского производства в состоянии поставки при растяжении в тангенциальном и продольном направлениях. Показано, что твэльные трубы обладают сильной анизотропией механических свойств: существенное различие наблюдается для величин условного предела текучести, который на 20% выше в тангенциальном направлении (относительно оси трубы) по сравнению с продольным. Предел прочности в тангенциальном направлении также несколько превышает предел прочности в продольном направлении. Причиной анизотропии механических свойств твэльной трубы является текстура, которая формируется в материале в результате особенностей механико-термической обработки и приводит к реализации разных механизмов деформации.

Установлено, что наводороживание образцов сплава Zr-1%Nb приводит к образованию протяженных гидридных выделений тангенциальной ориентации. Такая ориентация гидридных выделений является следствием образования текстуры, сформированной деформационными и термическими обработками при изготовлении твэльных труб. Наводороживание кольцевых образцов до 0,09 мас.% (900 ppm) приводит к увеличению предела прочности и условного предела текучести в тангенциальном направлении на 3...4% без заметного изменения пластичности. При этом механические характеристики в продольном направлении существенно снижаются: предел прочности на 18...37%, условный предел текучести на 5...35%, относительное удлинение в 10–20 раз. Обнаруженная анизотропия свойств наводороженных образцов обусловлена ориентацией и анизотропией формы гидридных выделений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. *Циркониевые сплавы в атомной энергетике*. М.: «Энергоиздат», 1981, 232 с.
2. Д.Л. Дуглас. *Металловедение циркония* / Под ред. А.С. Займовского. М.: «Энергоатомиздат», 1975, 360 с.
3. П.П. Маркелов, А.А. Никулина, М.М. Перегуд, Н.Г. Решетников. *Ползучесть оболочек твэлов из циркониевых сплавов*: Препринт. М.: «ВНИИНМ», 1978, 13 с.
4. С.А. Никулин, А.Б. Рожнов, А.В. Бабукин. Структура и сопротивление разрушению циркониевых сплавов для атомной энергетики // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005, №5, с. 8-17.
5. Б.А. Колачев. *Водородная хрупкость металлов*. М.: «Металлургия», 1985, 217 с.

6. Н.М. Власов, И.И. Федик. Водородное охрупчивание сплавов циркония // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003, №8, с. 48-51.

7. В.А. Гольцов. Водород в металлах // *ВАНТ. Серия «Атомно-водородная энергетика»*. 1977, в. 1, с. 65-101.

8. П.В. Гельд, Р.А. Рябов, Е.С. Кодес. *Водород и несовершенства структуры металла*. М.: «Металлургия», 1979, 221 с.

9. S.V. Ivanova. Effect of hydrogen on serviceability of zirconium items VVER and RBMK-type reactors fuel assemblies // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2002, v. 27, N 7-8, p. 819-824.

10. С.А. Никулин, А.Б. Рожнов. Коррозионное растрескивание циркониевых оболочечных труб // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005, №2, с. 31-39.

11. Б.Г. Парфенов, В.В. Герасимов, Г.И. Бенедиктова. *Коррозия циркония и его сплавов*. М.: «Атомиздат», 1967, 258 с.

12. В.В. Герасимов. *Коррозия реакторных материалов*. М.: «Атомиздат», 1980, 253 с.

13. С.И. Иванова, А.К. Шиков, О.В. Бочаров. Наводороживание циркониевых изделий в процессе изготовления и эксплуатации – фактор, ограничивающий ресурс их работы в реакторах ВВЭР и РБМК // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003, №8, с. 40-47.

14. А.А. Брюханов, В.С. Иваний, А.Е. Брюханов. Изучение анизотропии и текстуры холоднокатанного циркония // *Изв. АН СССР. Металлы*. 1976, в. 4, с. 146-150.

15. В.С. Вахрушева, Т.А. Дергач, Г.Д. Сухомлин, В.Я. Замощиков, М.И. Медведев. Разработка принципиальной технологической схемы промышленного производства труб-оболочек твэл из сплава Zr1Nb в Украине // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2002, №6, с. 84-87.

16. П.И. Стоев. Изучение акустической эмиссии при термоциклической обработке бериллия // *Металлы*. 1998, №3, с. 68-70.

17. R.N. Tuxworth. *A study of preferred orientation in extruded zircaloy-2 pressure tubes* / «Atomic Energy of Canada», Ltd Report CRMET-901, Chalk River Ont. Canad, 1960.

18. E.D Hindle, G.F. Slatter. Effect of circumferentially aligned hydride on the ductility of zircaloy-2 tubing under biaxial stress // *Journal of the Institute of Metals*. 1964, N 93, p. 565-570.

19. K.P. Steward, B.A. Cheadle. The effect of preferred orientation on the mechanical properties and deformation behavior of zircaloy-2 fuel sheathing // *Trans. Metallurg. Soc. AIME*. 1967, v. 239, p. 504-513.

20. П.И. Стоев, В.А. Белоус, В.Н. Воеводин и др. Механические свойства и акустические параметры твэльных труб из сплава Zr1%Nb с защитными покрытиями // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2015, №5, с. 87-97.

21. A. Akhtar, A. Teghsoonaian. Plastic deformation of zirconium single crystals // *Acta. Met.* 1971, v. 19, p. 655-663.

22. А.А. Предводителев, О.А. Троицкий. *Дислокации и точечные дефекты в гексагональных металлах*. М.: «Атомиздат», 1973, с. 200.

23. E.J. Rappoport, C.S. Hartley. Deformation Modes of Zirconium at 77 K, 300 K, 575 K, and 1075 K // *Trans. AIME.* 1969, v. 218, p. 869-874.

24. M.R. Warren, C.J. Beevers. The interrelation between deformation and crack nucleation and propagation in zirconium containing hydride precipitation // *J. Nucl. Mater.* 1968, v. 26, N 3, p. 273-284.

25. A. James Lee. Crack propagation behavior of zircoloy-2 // *Nucl. Applic.* 1969, v. 4, p. 307-312.

*Статья поступила в редакцию 24.03.2016 г.*

## **ВПЛИВ НАВОДОРОЖЕННЯ НА АНІЗОТРОПІЮ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТВЕЛЬНИХ ТРУБ ЗІ СПЛАВУ Zr-1%Nb**

*П.І. Стоєв, В.М. Воєводін, І.І. Папіров, М.А. Тихоновський, Д.В. Виноградов, М.П. Вьюгов*

Визначено механічні характеристики твельних труб зі сплаву Zr-1%Nb українського виробництва при розтягуванні в радіальному (кільцеві зразки) і поздовжньому (квазіплоскі зразки) напрямках у стані поставки і після наводороження. Показано, що вихідні трубки мають значну анізотропію механічних властивостей: спостерігається велика різниця для умовної межі текучості, яка в тангенціальному напрямку (щодо осі трубки) на 20% вища, ніж у поздовжньому. Також наводороження твельних труб підсилює анізотропію механічних властивостей: умовна межа плинності в тангенціальному напрямку на 20...40% вища, ніж в поздовжньому. Межа міцності зразків у тангенціальному напрямку перевищує межу міцності в поздовжньому напрямку на 25...50%. При цьому наводороження практично не впливає на пластичність кільцевих зразків, але призводить до окрихчення квазіплоских зразків. Причиною анізотропії механічних властивостей вихідної твельної трубки є текстура, яка формується в матеріалі в результаті особливостей механіко-термічної обробки. Особливості зміни міцності і пластичних властивостей наводороженого матеріалу пов'язані з утворенням орієнтованих виділень гідриду цирконію, які по-різному впливають на деформацію трубок у поздовжньому і поперечному напрямках.

## **EFFECT OF HYDROGENATION ON THE ANISOTROPY OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE FUEL ELEMENTS PIPES OF AN ALLOY Zr-1%Nb**

*P.I. Stoev, V.N. Voyevodin, I.I. Papirov, M.A. Tikhonovsky, D.V. Vinogradov, N.P. Vyugov*

Mechanical characteristics of the fuel tube the alloy Zr-1%Nb Ukrainian production tensile in radial (annular samples) and longitudinal direction ("quasi-plane" samples) in the delivery state and after hydrogenation were defined. It is shown that the fuel tubes in the initial state possess significant anisotropy of mechanical properties: significant difference is observed for the proof stress, which in a tangential direction (with respect to the tube axis) is 20% higher than in the longitudinal direction. Hydrogenation of the fuel tubes increases anisotropy of mechanical properties: yield strength in the tangential direction by 20...40% higher than in the longitudinal direction. Tensile strength of the samples which have been deformed in the tangential direction exceeds the tensile strength in the longitudinal direction by 25...50%. The process of hydrogenation virtually has no effect on the plasticity of the ring samples, but it leads to embrittlement of quasi-plane samples. The cause of the anisotropy of the mechanical properties of the fuel tubes in initial state is the texture which is formed in the material in resulting in mechanical and heat treatments. Features of change of the strength and plastic properties of the hydrogenated material is associated with the formation of oriented zirconium hydride precipitates, which have different effects on the deformation of the tubes in the longitudinal and transverse directions.