

## *Раздел второй*

# ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

УДК 669.296:621.78.019.84

### КОРРОЗИОННЫЕ ЭКСПРЕССНЫЕ И ДЛИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТВЭЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ СПЛАВА Zr1Nb (0,1%O)

*В.С. Красноруцкий<sup>1</sup>, И.А. Петельгузов<sup>1</sup>, В.М. Грицина<sup>1</sup>, Н.И. Ищенко<sup>1</sup>,  
Е.А. Слабоспицкая<sup>1</sup> [В.М. Ажжажа], В.С. Вахрушева<sup>3</sup>, С.Д. Лавриненко<sup>2</sup>, П.Н. Вьюгов<sup>2</sup>,  
Н.Н. Пилипенко<sup>2</sup>, Н.П. Вьюгов<sup>2</sup>, Н.Н. Белаиш<sup>1</sup>, И.В. Федченко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл»,*

<sup>2</sup>*Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,  
Харьков, Украина*

*E-mail: petelg@kipt.kharkov.ua, факс +38(057)335-37-74, тел +38(057)335-67-67;*

<sup>3</sup>*Днепропетровский институт трубной промышленности им. Я.Е. Осады,  
Днепропетровск, Украина*

Из сплава, изготовленного в ИФТТМТ ННЦ ХФТИ на основе тройной шихты (КТЦ-110 + йодидный цирконий + обрезки трубного производства), в Днепропетровском институте трубной промышленности им. Я.Е. Осады были получены твэльные трубы, проведена термическая и механическая обработки в соответствии с техническими условиями и представлены на исследования в НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ. Результаты исследований коррозионных, структурных и механических свойств труб в сравнении со свойствами труб из штатного сплава Э110 для твэлов ВВЭР-1000 представлены в данной статье. Показано, что исследуемые свойства труб из сплава на основе кальциетермического циркония и свойства труб из штатного сплава Э110 практически идентичны.

#### ВВЕДЕНИЕ

Исследуемый в настоящее время для применения в Украине сплав на основе кальциетермического циркония содержит повышенное количество кислорода (до 0,16 мас.%). Этот сплав (Zr1Nb) был разработан на предприятии ГНПП «Цирконий» (Днепро-дзержинск). С целью уменьшения содержания кислорода было предпринято разбавление йодидным цирконием сплава Zr1Nb до содержания 0,1 % O. Эта комплексная работа была выполнена в ИФТТМТ – структурном подразделении ННЦ ХФТИ. Твэльные трубы из этого сплава изготовлены в Днепропетровском трубном институте. Ранее был исследован полуфабрикат из такого сплава в виде прокатанных и термообработанных полос [1].

Для определения качества сплава, пригодности его для дальнейших исследований и использования как материала оболочек твэлов применяются следующие основные методы: оценка коррозионной стойкости материала в исходном состоянии в изделии; определение механических свойств; структурные исследования для определения размеров зерна, возможной ориентации гидридов в изделии после специального наводороживания; рентгеновские структурные данные.

В настоящей работе исследуются трубы для оболочек твэлов, полученные из сплава с содержанием примеси кислорода не более 0,10 мас.%.

#### 1. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследований был выбран сплав Zr+1%Nb, изготовленный по опытным технологиям, описанным ранее в работе [1]. Химический состав полученного материала по легирующим элементам и основным примесям был следующий: 0,9%Nb; 0,08...0,10%O; 0,004...0,006%N; 0,01...0,02%C; 0,003...0,005%F. Твэльные трубы, как уже упоминалось выше, были изготовлены в Днепропетровском институте трубной промышленности им. Я.Е. Осады по специально разработанным технологиям.

#### 1.2. МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ

Испытания труб из сплава Zr1Nb+0,1%O, как нового материала, сначала были проведены по режиму экспрессных испытаний при более высоких температуре (400 °C) и давлении, чем в реакторе ВВЭР-1000, а затем при рабочей температуре твэлов (350 °C) [2,3].

Исследовались образцы труб-оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000 из экспериментально-промышленного сплава Zr+1%Nb+0,10%O и для сравнения – образцы труб из штатного сплава Э110 (Zr+1%Nb+0,08%O). Испытания образцов проводили при следующих экспериментальных условиях:

- температура 400 °C, водяной пар, давление 20,0 МПа (режим экспрессных испытаний);
- температура 350 °C, давление 16,5 МПа, коррозионная среда – состав теплоносителя 1-го контура ВВЭР-1000 со значением водородного показателя

pH = 7,2. Химический состав коррозионной среды в исходном состоянии по основным примесям приведен в табл. 1.

Для получения пара и исходной воды для растворов применялась деионизированная вода с чистотой, характеризуемой удельным сопротивлением более  $1,0 \cdot 10^6$  Ом/см<sup>2</sup>. Кинетика окисления определялась методом периодического взвешивания образцов.

Используемые методики для испытаний и исследований труб из сплава Zr+1%Nb+0,1%O аналогичны по режимам и требованиям методикам испытаний циркониевых сплавов в России и методикам ASTM [4,5]. Ниже представлены результаты испытаний и исследований.

Таблица 1

Состав и значения pH водной среды для автоклавных испытаний

Добавки	Среда, химический состав			
	pH	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , г/дм <sup>3</sup>	KOH, г/дм <sup>3</sup>	NH <sub>4</sub> OH, мг/дм <sup>3</sup>
Количество	7,2	3,1	0,025	5,6

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Структура.** Для изучения зеренной структуры материала твэльных труб в исходном состоянии были изготовлены металлографические шлифы и протравлены на зерно в реактиве состава 45% HNO<sub>3</sub>+5%HF +50% H<sub>2</sub>O. Структура сплавов Zr1Nb (0,1%O) и Э110 представлена на рис.1.

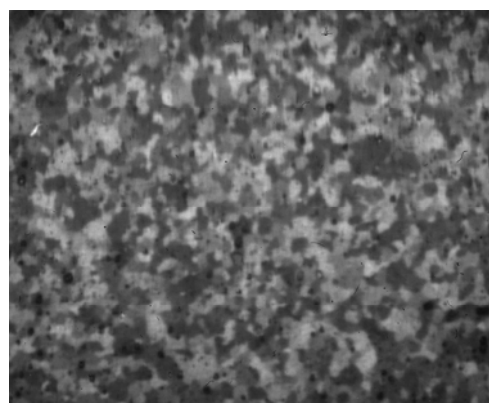
Как видно, структура зёрен у обоих сплавов имеет полиэдрический характер без резко выраженных очертаний границ зёрен. Размеры зёрен у спла-

ва Zr1Nb находятся в пределах 3...10 мкм, в то время как у сплава Э110 зёрна крупнее относительно размеров зёрен сплава Zr1Nb и их размеры – от 4 до 12 мкм. Средний размер зерна, определенный методом секущих, составил 5,4 мкм у сплава Zr1Nb(0,1%O) и 7,1 мкм у сплава Э110.

**Микротвёрдость.** Микротвёрдость исследуемых сплавов, измеренная на приборе ПМТ-3, имеет следующие значения: для сплава Zr1Nb (0,1%O) – 141,1 кг/мм<sup>2</sup> (1383 МПа), а для штатного сплава Э110 – H<sub>μ</sub> = 124,0 кг/мм<sup>2</sup> (1215 МПа) (отклонение от среднего значения – в пределах 10 %).



а



б

Рис. 1. Структура сплавов Zr1Nb (0,1%O) (а) и Э110 (б) в исходном состоянии, х 400

**Ориентация гидридов.** Ориентацию гидридов определяли по специальной методике после насыщения водородом и выдержки в газе при температуре 400...420 °С в течение 3...3,5 ч. Требования относительно ориентации гидридов в трубных изделиях введены для обеспечения высокой прочности и пластичности в реакторных условиях. Наиболее сильное падение пластичности наблюдается, когда гидриды ориентированы в радиальном или близком к радиальному направлению. Ориентация гидридов оценивается с помощью коэффициента F<sub>н</sub>, который отражает долю гидридов, ориентированных радиально, к общему количеству гидридов [6].

Согласно требованиям ТУ на трубные изделия, ориентация потенциально выделяемых в условиях работы твэлов гидридов должна быть максимально приближённой к тангенциальному направлению в оболочке твэлов. В нашем случае наводороживание и подсчёт доли гидридов, выделившихся в радиаль-

ном секторе < ±45°, показали, что эта доля (коэффициент ориентации) не превышает 0,3 и это допустимо по техническим условиям на твэльные трубы.

### 2.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Оценка прочностных и пластических свойств Zr-сплавов для труб проводилась на кольцевых образцах труб Ø 9,1 мм и шириной колец 2,7 мм. Использовали лабораторную методику измерений механических свойств труб для твэлов МР. 4512 ПМ.

Испытания проводились на разрывной машине МР-0,5 при комнатной и рабочей температуре оболочки твэлов в реакторе 350 °С, при скорости растяжения образцов 1,8 мм/мин. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

В таблице приведены также для сравнения данные параллельных механических испытаний для труб из сплавов Zr1Nb партий №797 и 906 с повышенным содержанием кислорода.

Эти результаты показывают, что прочностные характеристики ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) при комнатной температуре у сплава Zr1Nb (0,1%O) в исходном состоянии почти не отличаются от свойств труб из сплава Э110. Также близки и пластические свойства исследуемого и сравниваемого сплавов. Прочность сплавов плавки №797 и 906 выше, чем у сплава

Zr1Nb (0,1%O), а их пластические свойства ниже. Различие связывается с повышенным содержанием кислорода в сплавах плавки №797 и 906 (0,13 и 0,16 % O соответственно). Уменьшение содержания в сплаве кислорода до 0,1 % (Zr1Nb (0,1%O)) привело к близости всех его характеристик к свойствам сплава Э110.

Таблица 2

Результаты механических испытаний труб для твэлов из сплавов Zr1Nb (0,1%O), Zr1Nb (0,13-0,16%O) и Э110 в исходном состоянии

Сплав	Испыт. при 20 °С			Испыт. при 350 °С		
	$\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %
Э110	37,0	32,1	30,1	19,2	16,2	40,0
Zr1Nb (0,1%O)	39,1	31,7	33,0	19,3	16,5	39,0
Zr1Nb, плавка №797 (0,13 % O)	54,0	45,0	26,0	19,2	16,2	38,0
Zr1Nb, плавка №906 (0,16 % O)	62,0	50,0	25,0	21,2	17,4	37,0

При 350 °С прочностные характеристики труб из сплава Zr1Nb (0,1%O) превышают характеристики Э110. А вот относительное удлинение ( $\delta$ ) у исследуемых сплавов для твэльных труб оказалось близким к относительному удлинению для Э110 и высоким по значению (около 40 %).

### 2.3. ЭКСПРЕССНЫЕ И ДЛИТЕЛЬНЫЕ КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

#### 2.3.1. Испытания при температуре 400 °С

Экспрессные испытания сводятся к выдержке сначала при 400 °С в течение 72 ч в среде водяного пара с взвешиванием в начале и в конце испытаний. Если привес за счёт роста плёнки не превышает 22 мг/дм<sup>2</sup> и оксидная плёнка имеет характерный глянцевый вид без каких-либо дефектов, то сплав

или трубка из сплава считаются пригодными для дальнейших технологических операций, исследований или изготовления твэлов. Для большей доказательности высокой коррозионной стойкости сплава выдержку в паре при 400 °С продолжили на более длительный период (рис. 2 и 3). Данные наших экспрессных испытаний показали, что за контрольный период (72 ч) испытанные образцы (6 штук) имели средний привес ( $17,2 \pm 0,2$ ) мг/дм<sup>2</sup> при сохранении плотных, сплошных коррозионных плёнок. Эти данные свидетельствуют об удовлетворении требований к сплаву по коррозионной стойкости. Далее испытания были продолжены вплоть до 5500 ч (см. рис. 2 и 3).

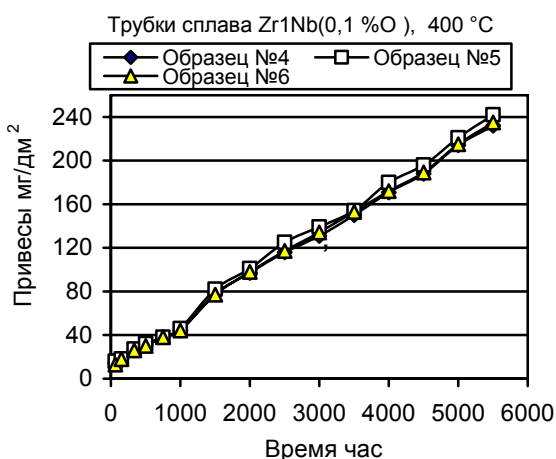


Рис. 2. Длительные испытания в водяном паре образцов труб из сплава Zr1Nb (0,1%O) при температуре 400 °С

Кривые являются затухающими, что говорит о защитном характере образующихся оксидных плёнок. Показатель  $n$  в уравнении

$$\Delta m/S = kt^n, \quad (1)$$

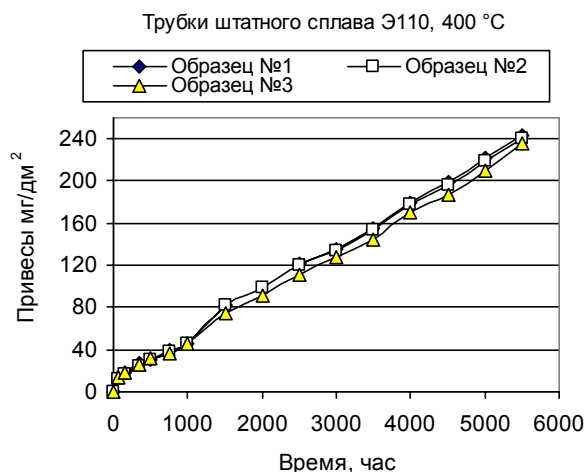


Рис. 3. Испытания в водяном паре образцов труб из штатного сплава Э110 при температуре 400 °С

которым обычно описывается кинетика коррозии циркониевых сплавов в первый период окисления при 400 °С, находится в пределах 0,4...0,5, что является типичным. Среднее значение показателя  $n$  в (1)

для сплава Zr1Nb (0,1%O) – 0,42, в то время как для сплава Э110 эта величина равна 0,46. После примерно 1000 ч окисления наблюдается некий коррозионный «перелом» от затухающего окисления к линейному с небольшим изменением коэффициента наклона кривой к оси времени, что свойственно и сплаву Э110. Для сплавов типа циркалой наклон кривой после «перелома» более значительный.

Как видим, коррозия сплава Э110 при 400 °С в виде твэльных труб подчиняется такой же временной закономерности, как и окисление сплава Zr1Nb (0,1%O). На обоих сплавах не отмечено каких-либо дефектов в оксидных плёнках или их отслаивания. Все образцы покрыты глянцевой сплошной плёнкой темно-серого цвета (рис. 4). Существенного различия по виду между образцами из кальциетермического сплава Zr1Nb (0,1%O) и из штатного электролитического сплава Э110 не отмечается. В обоих случаях оксидные плёнки отличаются высокой прочностью и плотностью.

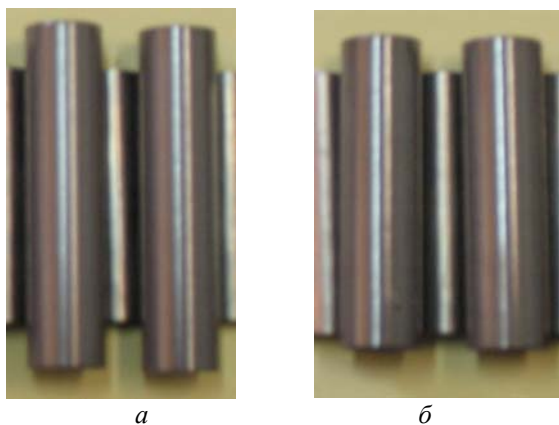


Рис. 4. Внешний вид образцов труб (по два образца) из сплавов Zr1Nb (0,1%O) (а) и Э110 (б) после 5500 ч испытаний при температуре 400 °С

### 2.3.2. Длительные испытания при температуре 350 °С

Далее опишем результаты испытаний образцов труб из сплава Zr1Nb (0,1%O) в условиях, приближённых к рабочим для оболочек твэлов. На рис. 5 показаны кривые окисления для трёх образцов исследуемого сплава. Среднее значение показателя  $n$  в

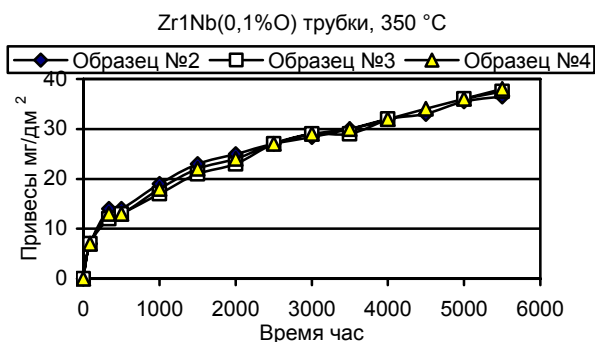


Рис. 5. Кинетика окисления в высокотемпературной воде трех образцов труб из сплава Zr1%Nb (0,1%O) при температуре 350 °С

уравнении (1) составляет для сплава Zr1Nb (0,1%O) – 0,397, а для сплава Э110 (рис. 6) – 0,371. При сравнении этих данных с данными окисления сплавов при 400 °С можно видеть тенденцию уменьшения коэффициентов  $n$  при снижении температуры, т. е. при повышении температуры до 400 °С уравнение окисления приближается к параболической форме, удаляясь от кубической. Такой закономерности подчиняются до определённого времени и штатный сплав Э110 [8], и сплав циркалой [9]. При продолжении испытаний при 350 °С также наступает «перелом». Но для его наблюдения испытания необходимо продолжить до 10000 ч, когда кубическая зависимость привеса от времени постепенно сменяется на линейную, с очень малым угловым коэффициентом, свидетельствующим о низком нарастании скорости коррозии, не угрожающей общей коррозионной стойкости оболочек твэлов.

Сравнительные характеристики поверхности после окисления труб из сплава Э110 при температуре 350 °С показаны на рис. 7. Как видно из снимков образцов, плёнки на обоих сплавах характеризуются сплошностью, глянцевым видом и незначительным отличием между собой.

## 2.4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ МАКЕТОВ ТВЭЛОВ

Для исследования свариваемости и последующей коррозионной стойкости сварных соединений, согласно методике НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ изготавливаются макеты твэлов, которые отличаются по конструкции от настоящих твэлов длиной (укороченная длина до 70 мм) и отсутствием топливного столба из диоксида урана. Вместо последнего применяются стерженьки из неактивного металла, например стали, которые по размерам и допускам соответствуют размерам стержней у рабочих твэлов.

Приварка наконечников у макетов производилась методом аргонно-дуговой сварки. После изготовления макетов произведено осветляющее травление их поверхности и промывка в потоке воды. Испытания и исследования показали хорошее состояние макетов твэлов как после изготовления, так и после контрольных экспрессных испытаний при 400 °С в течение 100 ч.

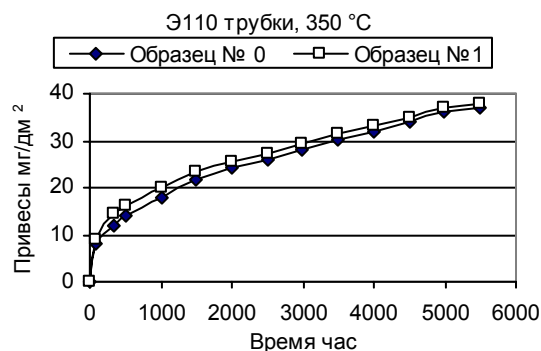


Рис. 6. Кинетика окисления в высокотемпературной воде двух образцов труб из сплава Э110 при температуре 350 °С

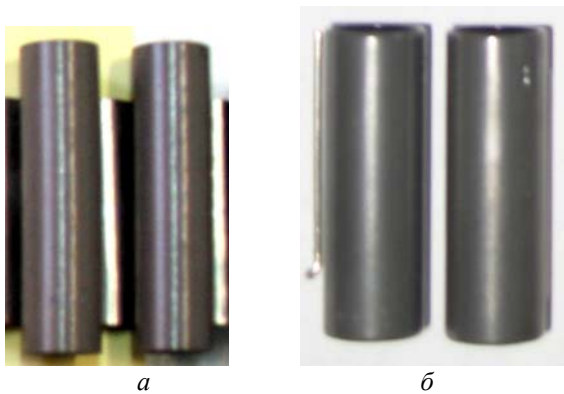


Рис. 7. Внешний вид образцов труб из сплавов Zr1Nb (0,1%O) (а) и Э110 (б) после 5500 ч испытаний при температуре 350 °С

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты экспрессных испытаний при температуре 400 °С показали, что за контрольный период (72 ч) испытанные образцы (6 штук) имели средний привес ( $17,2 \pm 0,2$ ) мг/дм<sup>2</sup> при сохранении плотных, сплошных коррозионных плёнок. Эти данные свидетельствуют о соответствии техническим требованиям по коррозионной стойкости к твэльным трубам.

Далее испытания были продолжены до достижения 5500 ч. Для сравнительных целей одновременно испытывались и образцы трубок из штатного сплава Э110. Из анализа результатов длительных испытаний при температуре 400 °С следует, что кинетика коррозии сплава Zr1Nb (0,1%O) описывается обычной кинетической кривой, свойственной по характеру коррозии циркониевым сплавам. Привесы и соответственно толщина оксидных плёнок находятся в пределах толщины коррозионно-стойких циркониевых сплавов. Характерно, что коррозионные привесы и вид оксидных плёнок на обоих сплавах – испытываемого и сравнительного – полностью идентичны.

Таким образом, результаты экспрессных испытаний, проведенные в соответствии с отраслевыми стандартами России [4] и стандартами США (ASTM) [5], а также длительные испытания в течение 5500 ч при температуре, заведомо более высокой, чем рабочие температуры поверхности твэлов, показали высокую коррозионную стойкость экспериментальных труб из сплава Zr1Nb (0,1%O) и близость значений привесов образцов экспериментальных труб с трубами из штатного сплава Э110.

Привесы образцов исследуемых труб из сплава Zr1Nb (0,1%O) после испытаний при температуре 350 °С и давлении 16,5 МПа в течение 5500 ч также показали сходство с значениями с привесами труб из штатного сплава Э110. Таким образом, видим, что и в случае испытаний при рабочей температуре оболочек твэлов кинетика окисления обоих сплавов сходна по значению привесов и по характеру закономерностей (типа кубических). Сходен и внешний вид окисленных поверхностей (см. рис. 7), о чём уже говорилось выше.

Величины привесов в функции времени для образцов труб из сплава Zr1Nb (0,1 %O) при темпера-

туре испытаний 350 °С даже несколько меньше, чем у образцов из сплава Э110, в то время как при температуре испытаний 400 °С зависимость обратная. Но эти различия невелики и находятся в пределах технологических и экспериментальных разбросов измеряемых величин. В целом, коррозионная стойкость образцов труб из сплава Zr1Nb оценивается как высокая, близкая к стойкости образцов сплава Э110.

Данные химического состава кальциетермического сплава Zr1Nb (0,1 %O) свидетельствуют о достаточно высокой чистоте этого сплава по примесям и сходстве по чистоте со сплавом Э110. Такое представление подтверждается результатами металлографического анализа, который не выявил включений и неоднородностей. Имеющиеся выделения, которые относятся, скорее всего, к выделениям интерметаллической фазы  $\beta_{Nb}$ , по размерам не превышают 3 мкм, а качественная картина распределения выделений у обоих сплавов: Zr1Nb (0,1 %O) тройной шихты и Э110, достаточно сходная.

Таким образом, различие между химическими составами изучаемых типов сплавов (исходного – до разбавления, штатного Э110 и экспериментального, изготовленного по тройной шихте) сводится по существу к разнице в количестве примеси кислорода. В литературе существует представление о том, что кислород не является существенно вредной примесью в цирконии, снижающей его коррозионную стойкость.

В работе [8] отмечено некоторое возрастание привесов при длительных коррозионных испытаниях в воде сплавов Zr1Nb при увеличении содержания кислорода от 0,12 до 0,16 мас.%. Но это увеличение привесов также невелико.

Настоящая работа имела основную цель исследовать коррозионную стойкость, основные структурные и механические характеристики труб из сплава Zr1Nb, полученных из экспериментальных слитков, изготовленных на украинских предприятиях. Одновременные испытания нашего сплава в составе труб и штатного сплава Э110 позволяют нам получать чёткие сравнительные данные по коррозионной стойкости кальциетермического сплава Zr1Nb тройной шихты с данными штатного сплава Э110, применяемого в настоящее время в работающих реакторах.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о завершении многолетнего цикла исследований и разработок кальциетермического сплава в плане возможности применения технологий его получения и изделий из этого сплава в виде труб для твэлов. Мы считаем, что выполнено всестороннее обоснование на уровне дореакторных исследований технологичности, воспроизводимости и высоких качеств работоспособности сплава как материала для оболочек твэлов.

Эти и опубликованные другие данные [10,11] исследований кальциетермического цирконий-ниобиевого сплава дают основание рекомендовать этот сплав и трубные изделия из него в комплексе со всей технологической цепочкой для получения изделий для твэлов и комплектующих ТВС АЭС Украины.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены коррозионные и структурные исследования, а также определены механические свойства труб для твэлов реактора ВВЭР-1000, изготовленных из экспериментального сплава Zr+1%Nb на основе кальциетермического циркония с добавлением йодидного с целью снижения общего содержания кислорода в сплаве до 0,1 мас. %.

Коррозионные испытания поверхности твэлов экспериментального сплава были выполнены при максимальной рабочей температуре – 350 °С и при заведомо повышенной – 400 °С и сравнивались со штатным сплавом Э110. Исследования показали, что полученные трубные изделия из этого сплава по коррозионной стойкости, структурным характеристикам и механическим свойствам вполне удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к трубам для твэлов, и могут рассматриваться пригодными для дальнейших исследований в плане изготовления ТВС для испытания в реакторных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, И.А. Петельгузов, Н.И. Ищенко, Н.П. Вьюгов, И.Н. Бутенко. Изучение коррозионной стойкости образцов лент из кальциетермического сплава Zr1Nb с содержанием кислорода до 0,1 мас. % // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2007, №6, с. 88-95.
2. *Лабораторная методика экспрессных коррозионных испытаний циркониевых сплавов*. НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ, МР-4508 ПМ. Харьков, 1999.
3. *Лабораторная методика длительных коррозионных испытаний циркониевых сплавов*. НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ, МР-4509 ПМ. Харьков, 1999.
4. Технические условия на изготовление трубок из Э110, ТУ 95.405-81Е, 1990 (Россия). Проведение коррозионных испытаний циркониевых сплавов // *Типовая инструкция ОИ 001.297-94*. 1990.
5. Стандарт на коррозионные испытания циркониевых сплавов в воде, США // *Aqueous corrosion testing of samples of zirconium alloys*, ASTM № G2-74, USA / Пер. ЦНИИатоминформ. М., 1976.
6. А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. *Циркониевые сплавы в ядерной энергетике*. М.: «Энергоатомиздат», 1994, 232 с.
7. С.В. Иванова, А.В. Никулина. Циркониевые сплавы для компонентов ТВС реакторов типа ВВЭР-1000 и РБМК // *ФХОМ*. №6, 2001, с. 15-25.
8. И.А. Петельгузов. Исследование кинетики коррозии твэльных труб из кальциетермического циркониевого сплава Zr+1%Nb (Zr1Nb) в воде при температуре 350 °С и в паре при 400 и 500 °С // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2002, №6, с.88-95.
9. Ф. Гарзаролли, Р. Хольцер. Водная коррозия твэлов в LWR // *Атомная техника за рубежом*. 1993, №10, с. 20-28.
10. В.С. Вахрушева, Г.Д. Сухомлин, Т.А. Дергач. Комплексная оценка качества изготовленных в Украине первых опытных партий труб-оболочек твэл из сплава Zr1Nb // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2003, №2, с. 27–32.
11. В.С. Красноруцкий, И.А. Петельгузов, В.К. Яковлев, Н.Н. Белаш и др. Исследование моделей твэлов реактора ВВЭР-1000, изготовленных из кальциетермического циркониевого сплава Zr1Nb после длительных коррозионных испытаний // *ВАНТ. Серия «Физи-ка радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2003, №3, с. 101–107.

Статья поступила в редакцию 03.09.2011 г.

## КОРОЗИЙНІ ЕКСПРЕСНІ Й ТРИВАЛІ ВИПРОБУВАННЯ ТВЕЛЬНИХ ТРУБ ЗІ СПЛАВУ Zr1Nb (0,1%O)

*В.С. Красноруцкий, І.А. Петельгузов, В.М. Грицина, Н.І. Іщенко, О.О. Слабоспицька, В.М. Ажажа, В.С. Вахрушева, С.Д. Лавриненко, П.М. В'югов, М.М. Пилипенко, М.П. В'югов, М.М. Белаш, І.В. Федченко*

Із сплаву, виготовленому в ІФТТМТ ННЦ ХФТИ на основі потрійний шихти (КТЦ-110 + йодидний цирконій + відходи трубного виробництва), у Дніпропетровському інституті трубної промисловості ім. Я.Е. Осади були отримані труби, проведена термічна і механічна обробки відповідно до технічних умов та представлені на корозійні дослідження в НТК ЯПЦ ННЦ ХФТИ. Результати досліджень корозійних, структурних та механічних властивостей труб представлені у цій статті. Показано, що властивості труб із сплаву на основі кальциетермічного цирконію близькі до характеристик штатного російського сплаву Е110.

### EXPRESS AND LONG TIME TESTS OF FUEL PIPES FROM ALLOY Zr1Nb (0,1%O)

*V.S. Krasnorutskyy, I.A. Petelguzov, V.M. Grytsyna, N.I. Ishchenko, E.A. Slabospitskaya, V.M. Azhazha, V.S. Vakhrusheva, S.D. Lavrinenko, N.P. V'yugov, M.M. Pylypenko, P.N. V'yugov, M.M. Belash, I.V. Fedchenko*

Pipes for fuel rods, made from Zr+1%Nb alloy based on triple charge (calcium-thermal zirconium alloy with 1%Nb + iodine zirconium + waste of pipe production) with content of the oxygen not more than 0,1% prepared in NSC KIPT were explored. These pipes were produced in accordance with Standard specifications in Dnepropetrovsk Institute of pipe industry named after Yu.E. Osada. Then they were submitted for corrosion studies to STK NFC NSC KIPT. The results of the studies of corrosion, structural and mechanical characteristics of the pipes are presented. It is shown that characteristics of the pipes from alloy based on calcium-thermal zirconium are close to features of the pipes from staff Russian alloy E110.