

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ВВЭР-1000, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ КАЛЬЦИЕТЕРМИЧЕСКОГО ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Zr1Nb ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

В.С. Красноруцкий, И.А. Петельгузов, В.К. Яковлев, Н.Н. Белаиш, Л.С. Ожигов, А.Г. Родак, Ф.А. Пасенов, В.И. Савченко, Е.А. Слабоспицкая, Н.И. Ищенко
Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, г. Харьков, Украина

Исследованы кинетика коррозии кальциетермического циркониевого сплава, содержащего 1 мас.% ниобия (Zr1Nb) в составе оболочек и заглушек моделей твэлов реактора ВВЭР-1000. Испытания были проведены в воде при температуре и давлении, сходными с аналогичными параметрами активной зоны реактора. Исследования после испытаний в течение времени до 12000 ч показали, что элементы конструкции моделей из сплава Zr1Nb имеют достаточно высокие показатели коррозионной стойкости и механических свойств, близкие к таковым для штатного сплава Э110, применяющегося в твэлах современных реакторов ВВЭР.

Данная работа является продолжением исследований, выполненных ранее [1,2], по изучению характеристик труб для тепловыделяющих элементов, изготовленных из кальциетермического циркониевого сплава Zr1Nb. Целью ее являлось изучение влияния повышенных количеств кислорода в сплаве Zr1Nb экспериментального состава на его свойства до и после длительных коррозионных испытаний. Изучалась устойчивость моделей твэлов к термостатированию и некоторые механические свойства.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве исследуемых материалов были использованы твэльные трубы из кальциетермического циркониевого сплава Zr1Nb экспериментального состава четырех плавов № 797, 803, 904 и 906. Для сравнения изучали штатные трубы российского производства из сплава Э110, применяющегося для производства серийных твэлов ВВЭР-1000. Трубы Э110 были изготовлены по ТУ 95.405-89. Исходные заготовки сплава Zr1Nb были выплавлены на Приднепровском химическом заводе (ПХЗ, г.Днепропетровск), а твэльные трубы изготовлены в Днепропетровском государственном трубном институте (ГТИ, г.Днепропетровск) и Южно-трубном заводе (ЮТЗ, г.Никополь). Основным отличием сплавов Zr1Nb экспериментальных плавов в сравнении со штатным сплавом Э110 являлось повышенное содержание примеси кислорода в Zr1Nb [3,4]. Кроме того, эти материалы, хотя и незначительно, различались и по концентрации ряда других примесей (табл.1). В качестве образцов для механических испытаний использовали кольца из этих труб шириной 2,7 мм. Механические испытания образцов проводили на установке конструкции НИКИМПа типа 1246Р-2/2300 при комнатной температуре и темпе-

ратуре 350°C в вакууме по методике испытаний кольцевых образцов циркониевых сплавов, разработанной совместно НТК ЯТЦ и ИФТТМТ ННЦ ХФТИ, которая была близкой к методике испытаний штатных (промышленных) твэльных труб. В качестве образцов использовали кольца из этих труб шириной 2,7 мм.

Конструкция моделей твэлов по основным конструктивным элементам модели твэлов сходна с конструкцией твэла промышленного варианта [4], но отличается меньшей длиной и отсутствием топливных таблеток внутри оболочки. Вместо последних использованы балластные стержни из нержавеющей стали X18H10T. Модели твэлов готовили следующим образом: перед сваркой их оболочки и заглушки комплектовали с учетом сборки по плотной посадке.

После обезжиривания поверхности образцов производили сборку и сварку оболочки с нижней заглушкой на электронно-лучевой установке ЭЛА-15. Затем вставляли внутрь оболочки нержавеющей стержень и поджимную пружину из сплава Э110.

Снаряженную заготовку модели твэла загружали в камеру установки СА-281 для приварки второй заглушки электродуговой сваркой в атмосфере очищенного аргона или гелия. На изготовленных моделях твэлов проверяли состояние поверхности, качество сварных соединений, после чего их обезжиривали, протравливали в растворе состава 5%HF+45%HNO₃+50%H₂O и автоклавировали в парах воды при 400°C, давлении 20,0 МПа в течение 72 ч.

Ввиду относительно небольших размеров модели твэлов можно было периодически взвешивать в процессе длительных испытаний и получить усредненную количественную оценку скорости корро-

зионного процесса в целом. Количество образцов на

каждую точку значений привесов, приводимых на графиках, приходится от 5 до 14.

Таблица 1

Химический состав исследуемых материалов

Состав сплава, партия, плавка	Состав по лег. доб.Nb, (мас.%)	Примеси (x 10 ⁻³ мас.%)													
		O	N	C	Ca	Si	Al	Cu	Ti	Fe	Ni	Cr	Mo	H	F
Zr1Nb (плавка 797)	1,06	100...120	5,0	5,0	4,8	3,0	1,5	1,3	1,6	19	4,0	2,0	1,0	1,4	3,0
Zr1Nb (плавка 904)	0,96	120...130	6,0	11,0	1,8	20,0	1,0	0,7	1,5	40	7,0	1,5	2,0	1,5	3,0
Zr1Nb (плавка 906)	1,06	130...150	6,0	10,0	4,0	18,0	1,4	2,1	1,5	25	4,0	1,3	2,0	1,5	3,0
Zr1Nb (плавка 803)	0,97	140	3,5	2,0	4,8	6,0	1,3	0,6	8,0	26	6,0	3,0	1,0	1,5	3,0
Э110 (ТУ 95.405-81Е)	0,9-1,1	60...100	6,0	20,0	20,0	20,0	8,	5,0.	5,0	20,0	20,0	20,0	5,0	1,5	3,0

Данные привесов определялись как среднеарифметические значения привесов отдельных образцов моделей твэлов. Разброс величин привесов относительно среднего значения находился в пределах 10...20%.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛЕЙ ТВЭЛОВ

После изготовления и экспрессных коррозионных испытаний (водяной пар, 400°C, 20,0 МПа, 72 ч) моделей твэлов одну группу (14 образцов) испытывали при температуре 350°C, при давлении 16,5 МПа в бидистиллированной воде, вторую часть (10 образцов) выдерживали в паре при 400°C, третью группу моделей подвергали термоциклированию по описанному ниже режиму и последующему испытанию на коррозионную стойкость при 350°C и давлении 16,5 МПа. Четвёртую группу моделей твэлов испытывали в воде, сходной по химическому составу с теплоносителем реактора ВВЭР (водный раствор на основе дистиллированной воды, содержащей добавки 7 г/л борной кислоты H₃BO₃, 0,025 г/л КОН, до 0,014 г/л NH₃, рН раствора составлял 7,1).

Продолжительность коррозионных испытаний при температуре 350°C составила 12000 ч. За время испытаний на оболочках моделей твэлов не наблюдалось образования коррозионных дефектов. На сварных соединениях моделей из сплава Zr1Nb, полученных электронно-лучевым и электродуговым методами сварки, после экспрессных испытаний в области сварных соединений (в зоне термического влияния) образовались пояски слабого изменения цвета оксидных плёнок, но на сварных соединениях у сплава Э110 пояски побеления или не наблюдались, или проявлялись очень слабо. За время испытаний ширина поясков у сварных соединений сплава

Zr1Nb увеличилась. Вид поверхности оболочек моделей твэлов из сплавов Zr1Nb был аналогичен виду таких же образцов из сплава Э110 (рис.1).



Рис.1. Вид моделей твэлов после испытаний в автоклаве при 350°C, давлении 16,5 МПа, изготовленных из кальциетермического сплава Zr1Nb (верхний образец) и штатного сплава Э110 (нижний образец). Длительность испытаний 12000 ч

Кинетика увеличения привеса моделей, включающая рост плёнок на поверхности труб-оболочек, на поверхности заглушек, а так же на поверхности сварных соединений, показана на рис.2.

Как видно на графике, привесы моделей твэлов, изготовленных из сплава Zr1Nb, располагаются выше привесов моделей твэлов из сплава Э110 приблизительно на 20...30%. На этом же графике приведены привесы при коррозии твэльных труб из обоих типов сплавов (Zr1Nb и Э110), значения которых взяты из работы [5]. Видно, что привесы моделей твэлов незначительно выше значений привесов трубок. Образцы укороченного варианта конструкции моделей твэлов прошли длительные (10000 ч) коррозионные испытания в паре при 400°C, давлении 20 МПа. Как и при температуре испытаний 350°C определялись привесы моделей и фиксировалось состояние поверхности.

Результаты определения привесов приведены на графиках (рис.3), из которых следует, что за время испытаний общий привес моделей из сплава Zr1Nb составил около 520 мг/дм², а привес моделей из сплава Э110 – 470 мг/дм², т.е. ниже на ~10%.

В отличие от вида моделей, испытанных при 350°C, где цвет плёнок был иссиня-чёрный, здесь наблюдалось некоторое потускнение и отмечался серовато-тёмный оттенок. Разрушений плёнок на поверхности оболочек и сварных соединений не отмечено. Для сравнения нанесены на графике и кри-

вые коррозии отдельных труб из тех же сплавов. Видно, что привесы труб при коррозионных испытаниях располагаются ниже, чем привесы образцов моделей твэлов. Последнее можно объяснить, как и при испытаниях при 350°C, повышенной окисляемостью материалов в области сварных соединений.

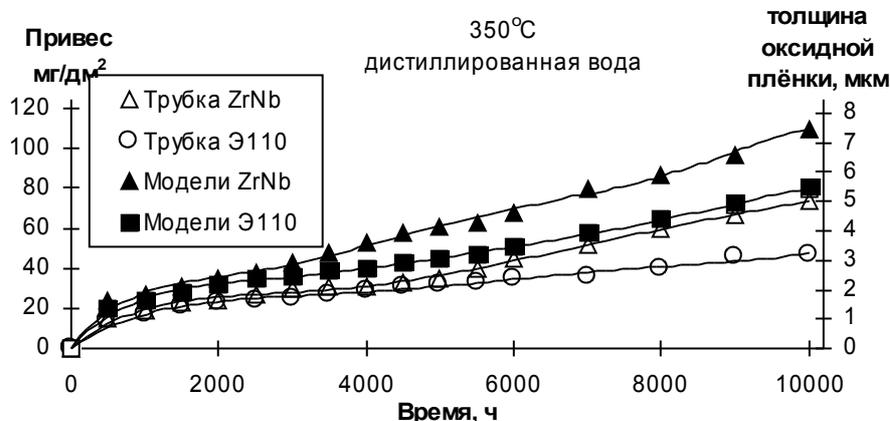


Рис.2. Величины привесов моделей твэлов и трубок из сплавов Zr1Nb и Э110 при коррозии в дистиллированной воде при температуре 350°C, давлении 16,5 МПа за время 10000 ч; ▲ – коррозия моделей твэлов из сплава Zr1Nb (усреднённые данные); ■ – коррозия моделей твэлов из сплава Э110; Δ – коррозия трубок Zr1Nb; о – коррозия трубок из сплава Э110

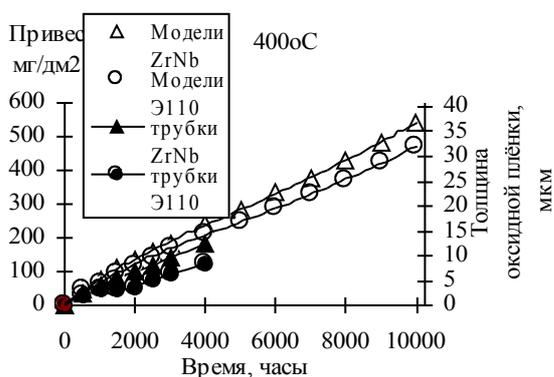


Рис.3. Величины привесов моделей твэлов и трубок из сплавов Zr1Nb и Э110 при коррозии в паре при температуре 400°C, давлении 20,0 МПа; Δ – коррозия моделей твэлов из сплава Zr1Nb (усреднённые данные); о – коррозия моделей твэлов из сплава Э110; ▲ – коррозия трубок из Zr1Nb; ● – коррозия трубок из сплава Э110

Различие в величинах общих привесов для моделей из сплава Zr1Nb и из сплава Э110 незначительно (тёмная плёнка на наконечнике-заглушке на образце из Э110). Фотография внешнего вида моделей после испытаний показана на рис.4. Сварка труб-оболочек с заглушками произведена аргонодуговой сваркой.

Для изучения устойчивости сварных соединений и материалов моделей твэлов с комплектующими из сплава Zr1Nb разного состава по кислороду к температурным воздействиям в технологических процессах и в рабочих условиях были проведены термоциклические испытания в диапазоне температур от

комнатной до 360°C (P=0,1...19,0 МПа) и с высокими скоростями температурных изменений (до 550°C/мин). Было выполнено 100 термоциклов.



Рис. 4. Вид сваренных образцов оболочек и заглушек (по типу моделей твэлов) после испытаний в автоклаве при 400°C, давлении 20,0 МПа, изготовленных из сплава Zr1Nb (два образца, 1,2) и Э110 (3). Длительность испытаний 10000 ч

Результаты исследований поверхности оболочек моделей и сварных соединений после термоциклирования показали, что все образцы твэлов с оболочкой и заглушками, изготовленными из различных сплавов циркония, выдержали испытания без рас-

трескивания и коррозионного разрушения. Последующие испытания в стационарном режиме при 350°C и давлении 16,5 МПа в воде состава ВВЭР в течение 10000 ч не выявили каких-либо повреждений моделей твэлов.

Общий привес моделей из сплава Zr1Nb и моделей из сплава Э110 после испытаний при 350°C в воде состава ВВЭР приведен на рис.5.

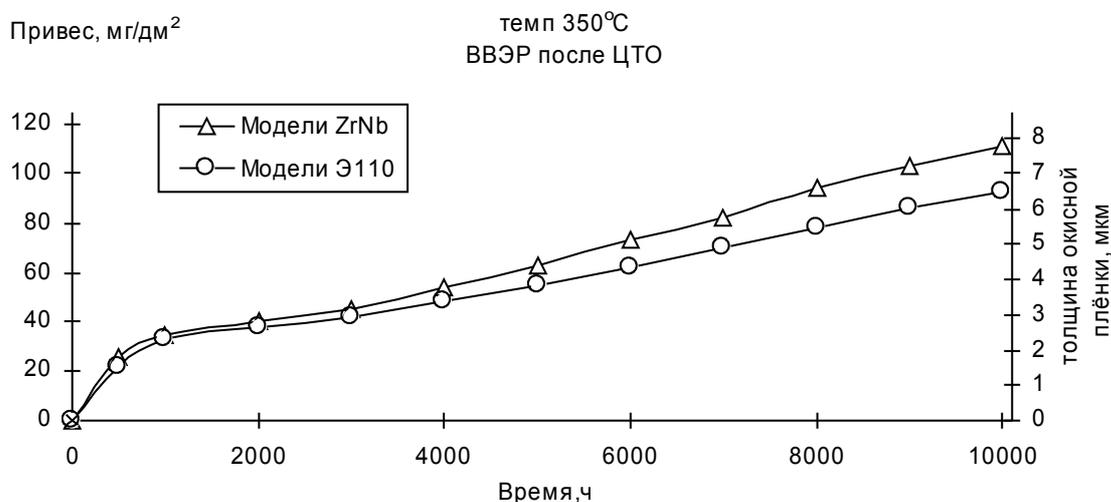


Рис.5. Величины привесов моделей твэлов и трубок из сплавов Zr1Nb и Э110 при коррозии в воде при температуре 350°C, давлении 16,5 МПа после термоциклических испытаний; Δ – коррозия моделей твэлов из сплава Zr1Nb (усреднённые данные); \circ – коррозия моделей твэлов из сплава Э110

Как следует из графиков, различие в общих привесах моделей твэлов, прошедших и не прошедших термоциклирование, при последующих коррозионных испытаниях при рабочей температуре твэлов и в водной среде, сходной по химическому составу с теплоносителем реактора ВВЭР, незначительно (~10...15%).

2.2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ Zr1Nb ПОСЛЕ АВТОКЛАВИРОВАНИЯ

Металлографические исследования были проведены с целью сравнения состояния структуры сплавов Zr1Nb до и после длительного окисления.

Изучение структуры показало в исходных состояниях сплавов наличие мелких включений (выделений) разных размеров (от 0,1 до 2...5 мкм), состав которых пока точно не идентифицирован. Они могут представлять собой неметаллические включения, интерметаллические соединения или структурные фазовые выделения. С помощью электронной микроскопии был установлен один из видов выделений – это структурная составляющая сплавов, стабильная β_{Nb} -фаза.

Размер зёрен у сплавов Zr1Nb составлял в исходном состоянии 5...7 мкм, у сплава Э110 – 7...8 мкм. После испытаний при 350°C размер зёрен заметным образом не изменился. В структуре сплавов обнаруживаются редкие выделения гидридов, ориентация их хаотична.

По данным металлографических исследований, толщина образовавшихся за период испытаний окисных плёнок для труб-оболочек сплавов Zr1Nb четырёх указанных составов, различных по содержанию кислорода, находилась в пределах 5,5...6,6 мкм, а на сплаве Э110 составляла 5 мкм.

Толщина плёнок в области сварных соединений и зоны сварного влияния большая и достигает 15 мкм. Наблюдались в плёнках тангенциальные трещины различной протяжённости, особенно в плёнках в области сварных соединений.

Следует отметить, что не отмечено локальной коррозии или углублённого коррозионного проникновения оксида в структуру сплава Zr1Nb, как и в структуру Э110, в области указанных выше выделений и включений в структуре сплавов.

В целом после испытаний структура сплавов Zr1Nb была сходна со структурой сплава Э110 как по размерам зерна, так и по характеру выделений и близка к виду структуры сплавов в исходном состоянии.

2.3. КРАТКОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ Zr1Nb

Результаты определения механических характеристик в поперечном направлении образцов трубок Zr1Nb и Э110 приведены в табл. 2.

Анализ этих данных свидетельствует о следующем. В исходном состоянии образцов, испытанных при комнатной температуре на растяжение, величина

ны пределов прочности и текучести на кольцевых образцах из сплавов Zr1Nb составляли соответственно 54...62 и 45...47 кгс/мм², что превышает аналогичные значения, полученные на образцах сплава Э110, соответственно, 16...24 кгс/мм² ($\sigma_b = 38$ кгс/мм²) и 15...17 кгс/мм² ($\sigma_{0,2}=30$ кгс/мм²).

Величина относительного удлинения образцов из трубок сплавов Zr1Nb пл. 803 и 906, где содержание

кислорода составляло 0,13...0,14 мас.% (см. табл. 1), была ниже в исходном состоянии на 20%, по сравнению со сплавом Э110, и составляла (26±3)%, а у сплава Zr1Nb плавки 797 (0,11...0,12 мас. % кислорода) значения относительного удлинения (δ) были близки к значениям δ для труб из сплава Э110.

Таблица 2

Механические характеристики трубок из сплавов Zr1Nb и Э110 в исходном состоянии и после коррозионных испытаний

Сплав, термообработка	В исх. состоянии						После корр.испыт. при 400 °С, 3000 ч					
	Испыт. при 20 °С			Испыт. при 350 °С			Испыт. при 20 °С			Испыт. при 350 °С		
	σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %
Э110(в сост. пост.)	38±3	30±2	32±3	20±2	16±2	38±6	42±3	37±2	26±4	22±2	19±2	38±4
Zr1Nb пл.803 (в сост. пост.)	54±1	45±1	25±2	23±1	18±1	37±3	65±3	53±2	20±4	30±2	26±2	37±4

Таблица 3

Сплав, термообработка	В исх. состоянии						После корр. испыт. 3при 50 °С, 10000 ч					
	Испыт. при 20 °С			Испыт. при 350 °С			Испыт. при 20 °С			Испыт. при 350 °С		
	σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	σ_b , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %
Э110 (в сост. пост.)	38±3	30±2	32±3	20±2	16±2	38±6	38±2	32±2	32±4	18,5	16,5	41
Zr1Nb пл.906 (в сост. пост.)	62±2	47±1	25±2	26±1	19±1	42±2	63±2±2	53±2	23,5	26	19	40

Примечание. Значения характеристик округлены до целой цифры.

При температуре испытаний 350°С сплавы Zr1Nb оставались прочнее, чем Э110, но разница в значениях пределов прочности образцов из сплавов Zr1Nb и Э110 была значительно меньшей, чем при 20°С и составляла 3...6 кг/мм², а разница пределов текучести – 2...4 кг/мм². Усреднённые величины относительного удлинения образцов сплавов Zr1Nb при температуре 350°С имели высокие значения (до 35...45%).

Тенденция повышения характеристик относительного удлинения у сплава Zr1Nb по сравнению со сплавом Э110 при повышенных температурах отмечалась в работе [6].

После автоклавных испытаний при 400°С в результате образования оксидных плёнок произошло дополнительное повышение прочностных характеристик исследуемых образцов в среднем на 15...23% и снижение пластичности примерно на 20...24% (испытания при температуре 20°С) по сравнению с исходными данными.

Прочностные характеристики при температуре механических испытаний 350°С после коррозионных испытаний повысились на 10...30% (σ_b) и 18...44% ($\sigma_{0,2}$) (табл.2,3), но значения относительных удлинений у сплава Zr1Nb (пл. 803) и Э110 оказались практически одинаковыми с исходными значениями и между собой.

Последнее говорит о том, что хотя при комнатной температуре сплавы типа Zr1Nb имеют худшие характеристики пластичности по сравнению со сплавом Э110, но при рабочей температуре твэлов их пластические свойства практически одинаковы. Аналогичная картина наблюдается также после испытаний в воде в течение 10000 ч при температуре 350°С.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование кинетики коррозии моделей твэлов, изготовленных из кальциетермического сплава Zr1Nb, при длительных испытаниях проводится впервые, поэтому ряд вопросов требует своего разрешения. Основной вопрос – влияние на скорость коррозии, коррозионную стойкость и механические свойства сплава примесных элементов и, в частности, кислорода.

Данные химического состава сплава Zr1Nb разных плавков, приведенные в табл.1, свидетельствуют о достаточно высокой чистоте сплава по вредным примесям (С, N, Al, Ti, Cu и др.) и о сходстве этого состава с составом сплава Э110.

Такое представление подтверждается результатами металлографического анализа, который хотя и выявил наличие выделений, но их размеры и количество не представляются слишком большими, а ка-

чественная картина распределения выделений у сплавов Zr1Nb и Э110 достаточно сходная. Таким образом, различие между химическими составами двух типов сплавов сводится по существу к разнице в количестве примеси кислорода. В литературе существует устойчивое представление о том, что кислород не является вредной примесью в цирконии, снижающей его коррозионную стойкость по крайней мере до концентраций 0,20...0,25 мас. % [7].

Однако приведенных в литературе данных недостаточно, чтобы однозначно определить влияние примеси кислорода на коррозионную стойкость кальциетермического сплава Zr1Nb при различных температурах и длительных временах испытаний.

Сравнительные исследования процесса коррозии твэльных трубок показали, что параметры в кинетических уравнениях, описывающих зависимость процесса коррозии образцов из сплава Zr1Nb от времени четырех исследуемых плавок, имеют близкие значения между собой и с параметрами кинетических кривых, полученных на образцах из штатного сплава Э110 [5].

Эти данные свидетельствуют о высокой коррозионной стойкости твэльных трубок Zr1Nb, поскольку сплав Э110 в настоящее время считается одним из наиболее коррозионно-стойких материалов для оболочек твэлов для реакторов, охлаждаемых водой под давлением [8].

Результаты автоклавных испытаний моделей твэлов в воде при температуре 350°C и давлении 16,8 МПа в течение времени до 10000...12000 ч подтвердили высокую коррозионную стойкость не только материала оболочек из сплава Zr1Nb в исходном состоянии, но и их сварных соединений, полученных электродуговой сваркой в атмосфере очищенного аргона, гелия или электронно-лучевой сваркой в вакууме.

Механические испытания материала твэльных трубок из сплава Zr1Nb свидетельствуют, что при содержании кислорода на уровне 0,10...0,12 мас.% (плавка 797) этот сплав при комнатной температуре имеет характеристики пластичности, близкие к характеристикам трубок из сплава Э110, в то время как трубки плавки 803 и 906 имели при комнатной температуре меньшую пластичность ($\delta=25\pm 3\%$), чем у трубок Э110 ($\delta=32\pm 3\%$), что можно связать с более высоким содержанием кислорода в них.

При температуре испытаний 350°C (рабочая температура твэлов реактора ВВЭР-1000) сплавы Zr1Nb с разными концентрациями кислорода имеют высокую исходную прочность ($\sigma_b = 23...26 \text{ кг/мм}^2$) высокую пластичность ($\delta = 37...45\%$).

После длительных коррозионных испытаний сплавы Zr1Nb сохраняют повышенную прочность и пластичность, особенно при температуре испытаний 350°C, несмотря на наличие в них значительных концентраций кислорода и присутствие оксидных плёнок.

Таким образом, при рабочих температурах твэлов сплав типа Zr1Nb с повышенным содержанием кислорода имеет более высокую прочность и практически одинаковую пластичность со сплавом

Э110. С точки зрения оценки работоспособности сплава Zr1Nb, такое сочетание свойств является благоприятным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследования показали, что зависимость привесов моделей твэлов от продолжительности испытаний для образцов трубок из сплавов Zr1Nb с разным содержанием кислорода и из сплава Э110 в высокотемпературной воде при температуре 350°C и давлении 16,5 МПа описывается сходными коррозионными кривыми, хотя привесы у моделей из сплава Zr1Nb несколько выше, чем у образцов из Э110..

2. Длительные автоклавные испытания моделей твэлов, изготовленных из сплава Zr1Nb, в дистиллированной воде при 350°C и давлении 16,5 МПа выявили на базе испытаний до 12000 ч, что как основные элементы конструкций моделей (оболочки и заглушки) из сплава Zr1Nb исследуемых составов, так и их сварные соединения имеют коррозионную стойкость, сравнимую со стойкостью оболочек, заглушек и сварных соединений моделей твэлов из сплава Э110.

3. Испытания на термоциклическую стойкость моделей твэлов и их сварных соединений в интервале температур 20...360°C не выявили трещин и разрушений в результате резких температурных воздействий на образцы и при последующих коррозионных испытаниях.

4. Проведены механические испытания при температуре 20 и 350°C кольцевых образцов сплава Zr1Nb с повышенным содержанием кислорода в исходном состоянии и после длительных коррозионных испытаний. Отмечена высокая пластичность трубок из сплава Zr1Nb с повышенным содержанием кислорода при 350°C в исходном состоянии и после длительных коррозионных испытаний.

5. Проведенные испытания и исследования выявили достаточно высокие характеристики коррозионной стойкости и некоторых механических свойств сплава Zr1Nb экспериментальных плавок, близкие к характеристикам штатного сплава Э110, применяющегося в производстве твэлов реактора ВВЭР-1000. Эти результаты дают основание для продолжения исследований сплава Zr1Nb с повышенным содержанием кислорода с целью изучения возможности применения сплава такого состава как материала твэлов реактора ВВЭР-1000 или основы для его совершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.В.С. Вахрушева. Состояние разработки технологии и организации производства труб-оболочек твэлов из сплава циркония КТЦ-110 в Украине // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1999, вып. 1 (73), 2 (74), с.100.
- 2.И.А. Петельгузов, А.Г. Родак, Н.М. Роечко, В.С. Вахрушева, Т.А. Дергач. Сравнительное изучение кинетики коррозии твэльных труб из сплава КТЦ-

110 и Э110 в воде и паре //Труды конференции по проблеме циркония и гафния в атомной энергетике, 14-19 июня 1999 г. Алушта, 1999.

3.В.С. Вахрушева, Г.Д. Сухомлин, Т.А. Дергач. Комплексная оценка качества изготовленных в Украине первых опытных партий труб-оболочек твэлов из сплава Zr1Nb //Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных поврежденных и радиационное материаловедение». 1999, вып. 2 (77), с. 27–32.

4.Ф.Г. Решетников, Ю.К. Бибилашвили, И.С. Головин и др. Разработка производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов /Под редакцией Ф.Г. Решетникова. М.: «Энергоатомиздат», 1995, 325 с.

5.И.А. Петельгузов. Исследование кинетики коррозии твэльных труб из кальциетермического циркониевого сплава Zr+1%Nb (Zr1Nb) в воде при температуре 350°C и в паре при 400 и 500°C //Труды 15

Международной конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению в г.Алуште, Крым, 10-15 июня 2002 г., с.164.

6.В.В. Ковалёв, В.Н. Киселевский, В.А. Борисенко, В.В. Бухановский. Оценка работоспособности сплава КТЦ-110 для активных зон ядерных реакторов АЭС //Труды конференции «Оценка и обоснование продления ресурса работоспособности элементов конструкций ядерных реакторов» 6-9.06. 2000 г., г. Киев.

7.Т.П. Черняева, А.И. Стукалов, В.М. Грицина, Кислород в цирконии: Обзор. Харьков: ННЦ ХФТИ, 1999.

8.М.И. Солонин, Ю.К. Бибилашвили, А.В. Никулина, В.А. Цыканов, В.К. Шамардин, А.Е. Новосёлов. Цирконий-ниобиевые сплавы для оболочек твэлов и энергетических реакторов и установок типа ВВЭР и РБМК //Труды VI Российской конференции по реакторному материаловедению. г. Димитровград, 2000, с.112.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТВЕЛІВ РЕАКТОРА ВВЕР-1000, ВИГОТОВЛЕНИХ З КАЛЬЦІЄТЕРМІЧНОГО ЦИРКОНІЄВОГО СПЛАВУ Zr1Nb ПІСЛЯ ДОВГОТРИВАЛИХ КОРОЗІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ

***В.С. Красноруцький, І.А. Петельгузов, В.К. Яковлєв, М.М. Белаш, Л.С. Ожигов
А.Г. Родак, Ф.А. Пасьонов, В.І. Савченко, О.О. Слабоспицька, Н.І. Іщенко***

Досліджено кинетику корозії кальціетермічного цирконієвого сплаву, який вміщує 1 мас.% ніобію (Zr1Nb) у складі оболонок і заглушок моделей твелів реактора ВВЕР-1000. Випробування були проведені у воді при температурі та тиску, близькими по значенню до аналогічних параметрів активної зони реактора. Дослідження після іспитів на протязі 12000 г показали, що елементи конструкцій моделей твелів із сплаву Zr1Nb мали достатньо високі показники корозійної стійкості і механічних властивостей, подібними до характеристик штатного сплаву Е-110, який застосовується у твелах сучасних реакторів типу ВВЕР-1000.

THE STUDY OF FUEL MODEL RODS FOR REACTOR WWER-1000, MADE FROM EXPERIMENTAL CALCIUM-THERMAL Zr1Nb ALLOY AFTER LONG TIME AUTOCLAVE CORROSION TESTING

***V.S. Krasnorutsky, I.A. Petelguzov, V.K. Jakovlev, N.N. Belash, A.G. Rodak, L.S.Ojigov, V.I.Savchenko,
Y.A. Slabospitskaya, N.I. Ishenro***

Corrosion kinetics of calcium-thermal experimental zirconium alloy, containing 1% wt.Nb (Zr1Nb), in the composition of cladding and stubs of fuel rod models of reactor WWER-1000 is studied. Test were conducted in water at the temperature and pressure, close to similar parameters of active zone of reactor. The inspection after testing within a time before 12000 h have shown, that elements to designs the models from the alloy Zr1Nb have sufficiently high features corrosion stability and mechanical ability, close to such for the staff alloy E110, what is widely used in fuels of modern reactors by WWER type.