

СПЛАВ Zr1Nb ДЛЯ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

В. М. Ажажа¹, И. Н. Бутенко¹, Б. В. Борц¹, В. С. Вахрушева², П. Н. Вьюгов¹,
Н. П. Вьюгов¹, К. А. Линдт³, И. М. Неклюдов¹, И. А. Петельгузов¹, В. И. Савченко¹

¹ Інститут фізики твердого тела, матеріалознавства і технологій ННЦ ХФТИ, Харків, Україна

² Государственное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я.Е. Осады», Днепропетровск, Украина

³ Государственное научно-производственное предприятие «Цирконий», Днепродзержинск, Украина

Методом вакуумно-дуговой плавки получен сплав Zr1Nb на основе тройной шихты. Определен химический состав сплава и исследованы его микроструктура, структура, механические и коррозионные свойства. Показано, что сплав Zr1Nb имеет однородную структуру по высоте и сечению слитка, равномерное распределение примесей и легирующих элементов по объему слитка, что подтверждается измерениями твердости, микротвердости. Механические и коррозионные свойства сплава Zr1Nb такие же, как и сплава Э-110.

Введение

Металлургия циркония получила интенсивное развитие после того, как цирконий стал основным компонентом конструкционных сплавов для атомной техники. Цирконий обладает рядом преимуществ - малое сечение захвата тепловых нейтронов, высокая температура плавления ($T = 1852\text{ }^{\circ}\text{C}$), хорошие механические свойства и высокая коррозионная стойкость [1]. Свойства циркония в сочетании с хорошей совместимостью с ядерным горючим, сравнительно высокими технологическими свойствами (деформируемостью и свариваемостью) делают его весьма перспективным материалом для ядерных реакторов на тепловых нейтронах, работающих при невысоком обогащении горючего и допускающих значительную степень выгорания. Сплавы циркония являются основой конструкционных материалов активной зоны ядерных реакторов. По совокупности своих ядерных и технологических свойств цирконий является одним из лучших материалов для оболочек твэлов [2 - 4].

Технологии получения циркония и его сплавов являются очень сложными и требуют специального подхода, начиная от стадии очистки хлоридов или фторидов циркония до выплавки слитков циркония или его сплавов. Поскольку цирконий является весьма активным металлом, то его плавка без загрязнения кислородом, азотом и материалом тигля представляет собой сложную задачу [5]. В Украине разработана кальциетермическая технология получения циркония: восстановление кальцием тетрафторида циркония с последующей электронно-лучевой плавкой. Цирконий, полученный по этой технологии, имеет повышенное содержание кислорода. В процессе получения изделий из циркония или его сплавов получается большое количество отходов, которые сильно удорожают стоимость

изделий. Поэтому необходимо в процессе получения изделий использовать все отходы. Однако эти отходы имеют разный химический состав. Часть отходов используется непосредственно в процессе получения сплава, другая часть должна пройти процесс рафинирования, чтобы содержание примесей в ней удовлетворяла требованиям ТУ. Таким методом рафинирования является иодидный процесс. Поэтому выплавляемый сплав состоит из нескольких компонент (как правило, из трех или четырех, в случае сложнолегированных сплавов число компонент увеличивается). Во всех странах при выплавке сплавов циркония используется вакуумно-дуговая плавка, которая дает возможность получать слитки циркониевого сплава больших размеров (диаметр слитка до 800 мм и более, длина слитка до 3000 мм), с равномерным распределением примесей и легирующих элементов по диаметру и длине слитка.

В настоящее время топливо для украинских АЭС поставляется Россией. Украина имеет большие запасы циркония и урана. Имеется циркониевое производство, трубопрокатное производство и плоский прокат. Возникает естественное стремление для удешевления ТВС для АЭС наладить в Украине собственное производство комплектующих (твэльные трубы, прутки, ленты и др.).

Целью данной работы являются исследования свойств сплава Zr1Nb, выплавленного методом двойного дугового переплава на основе тройной шихты, и сравнение свойств этого сплава со свойствами российского сплава типа Э-110.

Материалы и методы исследования

Выплавка слитков сплава Zr1Nb на основе тройной шихты с содержанием кислорода менее 0,1 мас. % проводилась на вакуумно-дуговой установке в кристаллизаторе диаметром 160 мм (первый переплав) и диаметром 200 мм (второй

переплава). Исходными материалами служили: сплав КТЦ-110 с содержанием кислорода 0,11...0,14 мас. % в виде штанг диаметром 85 мм и длиной 110 - 120 мм, иодидный цирконий в виде прутков диаметром 17 - 19 мм со средним содержанием кислорода 0,035 мас. % и трубки, изготовленные из сплава КТЦ-110, с содержанием кислорода 0,14 мас. %. Легирующий элемент (ниобий) вводился в виде ленты, где содержание кислорода было значительно <0,1 мас. % [6].

Расчеты по составу сборного электрода для выплавки сплава Zr1Nb с содержанием кислорода менее 0,1 мас. % показали, что состав сборного электрода должен быть следующим:

сплав КТЦ-110 с содержанием кислорода 0,13 - 0,14 мас. % \approx 53 %;

иодидный цирконий с содержанием кислорода 0,035 мас. % \approx 40 %;

отходы трубного производства с содержанием кислорода не более 0,14 мас. % \approx 7 %.

Выплавка слитков сплава Zr1Nb проводилась на вакуумно-дуговой установке ИФТТМТ в вакууме $(1,4 - 1,6) \cdot 10^{-3}$ Па.

В данной работе использовался сплав Zr1Nb на основе тройной шихты с содержанием кисло-

рода <0,09 мас. %. Сплав Zr1Nb необходимо выплавить на основе тройной шихты (сплав КТЦ-110 + иодидный цирконий + отходы трубного производства + ниобий), потому что это дает возможность использовать не только отходы, возникающие в процессе получения изделий из циркония, но и уменьшить концентрацию кислорода в сплаве за счет малого содержания кислорода в иодидном цирконии.

Просмотр и съемку шлифов из циркониевых сплавов проводили на металлографических микроскопах в нескольких диапазонах увеличения. Микротвердость образцов измерялась прибором ПМТ-3 при нагрузке 0,1 кг. Средний разброс при определении длины диагоналей составлял 1 - 2 %, погрешность при измерении микротвердости не превышала 5 %.

Результаты

Слиток сплава Zr1Nb после второго переплава диаметром 200 мм разрезался по высоте на темплеты толщиной 10 и 25 мм. На темплетах толщиной 10 мм были проведены исследования микроструктуры, микротвердости и твердости.

Таблица 1. Химический состав темплетов сплава Zr1Nb (второй переплава)

Элемент	Темплет 1 (верх)	Темплет 2	Темплет 3	Темплет 4	ТУ 001.257-85	ТУ 95.166-98 на Э-110
O ₂	0,07	0,09	0,09	0,08	0,06-0,1	0,1
Hf	0,008	0,009	0,007	0,008	0,01	0,05
F	0,003	<0,003	<0,003	0,003	0,003	0,003
N	0,005	0,0042	0,0058	0,005	0,006	0,006
C	0,0052	0,0055	0,0069	0,0062	0,02	0,02
Si	0,0044	0,0047	0,0039	0,0056	0,02	0,02
Al	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,008	0,008
Ni	0,0035	0,0022	0,0023	0,0021	0,02	0,02
Fe	0,008	0,009	0,0083	0,007	0,05	0,05
Ti	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,007	0,005
Cr	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,02	0,02
Mn	<0,0001	<0,0001	0,0002	0,0004	0,002	0,002
Cu	0,0004	0,0005	0,0019	0,0005	0,005	0,005
Ca	<0,001	0,0011	0,0018	0,0024	0,03	0,03
Mo	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,005	0,005
B	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,00005	0,00005
Be	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,003	0,0003
Cd	<0,00003	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,00003	0,00003
Pb	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,005	0,005
K	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,004	0,004
Li	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	0,0002
Cl	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,003	0,003
Nb	1,00	0,96	0,96	1,00	0,9-1,1	0,9-1,1

Результаты химического анализа сплава Zr1Nb приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, содержание примесей и легирующего элемента (ниобия) удовлетворяет требованиям

ТУ 95.166-98 на сплав Э-110. Циркониевым сплавам свойственно большое многообразие фазовых и структурных изменений, обусловленное полиморфным $\beta \leftrightarrow \alpha$ превращением и воз-

возможностью образования ряда нестабильных фаз. Поэтому анализ микроструктуры циркониевых сплавов является сложной и ответственной задачей.

Макроструктура слитков сплава циркония с 1 % ниобия (КТЦ-110) после первой вакуумно-дуговой плавки (рис. 1) отмечается однородностью структуры по длине и сечению слитка с незначительной разнотернистостью и наличием зоны столбчатых кристаллов у наружной поверхности. Наиболее благоприятная структура формируется в середине слитка, отдельные зерна β -фазы достигают 25...30 мкм в поперечнике.



Рис. 1. Структура исходного электрода из сплава КТЦ-110 диаметром 85 мм.

В слитках после второго ВДП найдена существенная разница в формировании макроструктуры, вдоль слитка можно заметить мелкое равноосное зерно размером до 6,0 мм, по высоте наблюдаются вытянутые макрозерна до 12,1 мм. Как видно из приведенной макроструктуры верхней и нижней частей слитка существует разница в размерах зерна: низ - 4,47 мм, верх - 3,37 мм (рис. 2).

Для исследований микроструктуры и измерений величины микротвердости из темплетов вырезались образцы кубической формы размером 10 × 10 × 10 ... 15 мм.

Структурные исследования сплава циркония показали, что его микроструктура состоит из пластин α -фазы, между которыми расположены прослойки ниобиевой β -фазы, а также прослоек α -фазы, расположенных по границам β -зерен. Исходные зерна β -фазы очень крупные и имеют весьма большой разброс по размерам от единиц до десятков мм (рис. 3).

Измерения на темплетях, вырезанных из слитка сплава, показывают величину микротвердости и твердости по объему слитка. Поскольку вели-

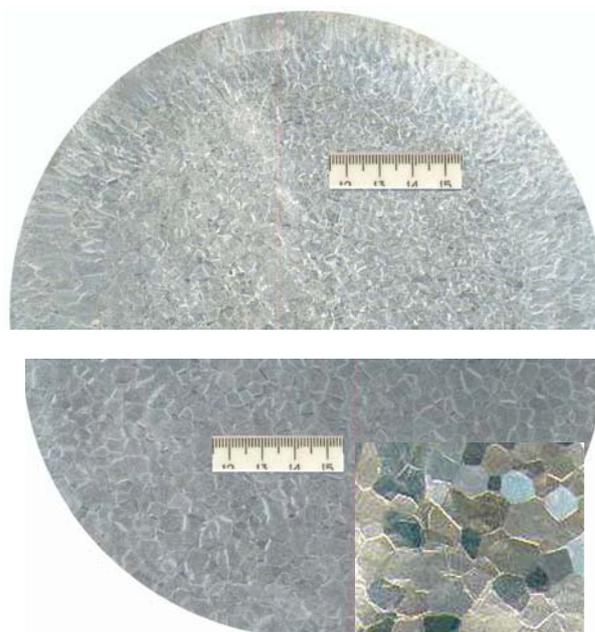


Рис. 2. Макроструктура поверхности верхней и нижней частей слитка после второго дугового переплава, диаметр 200 мм.



Рис. 3. Микроструктура сплава Zr1Nb после второй ВДП.

чина микротвердости и твердости зависят в первую очередь от содержания кислорода и азота в циркониевом сплаве, то величина микротвердости приблизительно характеризует содержание кислорода и азота по объему слитка (на разной высоте и по диаметру). Измерения твердости по Бринелю проводились шариком диаметром 10 мм при нагрузке 3000 кг на всех вырезанных темплетях по всей поверхности с шагом 20 мм. Имея твердость на темплетях сплава можно делать выводы о равномерности химического состава по сечению и высоте слитка (по объему слитка). Данные по величине твердости представлены в табл. 2 - 4.

Загрязненность слитков неметаллическими включениями определялась на сплаве Zr1Nb после двойного вакуумно-дугового переплава.

Таблица 2. Средний размер зерна и твердость по Бринелю слитков сплавов Zr1Nb после первого и второго дуговых переплавов

Материал	№ слитка (номер темплетта)	Диаметр слитка, мм	Метод получения	Средний размер зерна, мм	Твердость по Бринелю, МПа
Zr1Nb	1	160	первый ВДП	6,2	1530
	2				1570
	4				1540
	5				1480
	6				1410
	7				1440
Zr1Nb	1 (низ) по диаметру в центральной части на R = 50 мм	200	второй ВДП	4,8	1450
	4,5				
	1 (верх) в центральной части на R = 65 мм			3,0	1620
	от R65 до 100			Вытянутые зерна длиной до 10 мм, шириной от 3 до 6 мм	
	2 (низ)			6,6	1660
	2 (верх) центр 1/2R = 50 мм			3,5 2,5	1610
от R50 до 100	Вытянутые зерна длиной до 10 мм				
3 (низ) 3 (верх)	6,7 4,6	1590 1690			
Требования ТУ 95.166-98 на сплав Э-110					1800

Примечания. 1. Размер микрочастиц вычислен по методу секущей, в соответствии с ГОСТ 5639-82; 2. Макротвердость по методу Бринеля определялась на приборе 2109 ТБ при нагрузке 750 кг, шариком диаметром 5 мм, в соответствии с ГОСТ 9012-59.

Таблица 3. Оценка загрязненности слитков и данные по микротвердости

№ слитка	Сечение	Место по сечению слитка и балл загрязненности			Средняя микротвердость Н _ц , МПа		
		R = 50 мм	R = 70 мм	R = 90 мм	R = 50 мм	R = 70 мм	R = 90 мм
1	Низ	по шкале оксидов (ОТ)-46	ОТ-36	глобулы типа силикатов (СН)-16 ОТ-36 НТ-26	2130	2130	2340
		по шкале нитридов (НТ)-56	НТ-16				
2	Низ	ОТ-16; НТ-26 ОС-16 (несколько коротких строчек)	ОТ-16 НТ-16	ОТ-26 НТ-26	1750	1750	1770
		ОТ-16 НТ-16	ОТ-26 НТ-16	ОТ-26 НТ-16			

Примечание. Оценка загрязненности по неметаллическим включениям проводилась по ГОСТ 1778-70 светлой фазы без четких границ на нетравленных шлифах точечной и неправильной формы.

Таблица 4. Микротвердость слитка (1) после двойного дугового переплава (D = 200 мм)

№ темплета	1_1	1_3	2_1	2_3	3_1	3_3	4_1	4_3
Hц, МПа	1930	1930	1930	1930	1910	2060	1900	1930

Таблица 5. Прочностные характеристики сплава Zr1Nb

№ образца	T°C	$\sigma_{в}$, МПа/мм ²	$\sigma_{0,2}$, МПа/мм ²	δ , %	Примечания
1	20	532,6	388,6	23,00	Вдоль прокатки
2	200	350,0	240,0	39,20	
3	400	240,5	155,0	32,55	
4	500	180,0	143,0	55,00	
1	20	497,7	440,3	21,40	Поперек прокатки
2	200	371,0	339,0	32,10	
3	400	198,0	165,0	24,25	
4	500	158,0	126,0	42,80	

Микрошлифы изготовлялись из разных мест (на расстоянии от центра по радиусу 50, 70 и 90 мм) по верхнему и нижнему сечениям слитков № 1, 2, 3.

Оценка загрязненности проводилась сравнением с эталонными шкалами по ГОСТ 1778-70 и определялся балл загрязненности точечными включениями (по виду) типу оксидов (ОТ), нитридов (НТ) или глобулярных типа силикатов недеформированных. Данные приведены в табл. 3.

Микроструктура литого сплава КТЦ-110 характерна для всех циркониевых образцов, она представляет собой крупные макрозерна с иглами мартенситного типа.

Анализ данных по макротвердости НВ на слитках сплава Zr1Nb заводских плавов (ГНПП „Цирконий“, диаметр 140 мм), ВДП первого и второго переплавов (ННЦ ХФТИ) показал, что разница между минимальным и максимальным значениями твердости по Бринелю составляет ± 20 МПа. Эти результаты свидетельствуют об однородности слитков как по диаметру, так и по высоте.

Измерение механических характеристик сплава Zr1Nb на основе тройной шихты проводилось на вакуумной высокотемпературной установке типа 1245P-2/2300 производства НКМП с большим набором скоростей деформации. Использовались образцы плоской формы в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 и имели размер рабочей части сечением $3,5 \times 1,5$ мм и длину 30 мм.

Исследования проводились в вакууме в интервале температур 20 - 600 °C при скорости растяжения 2 мм/мин. Результаты исследования механических свойств сплава Zr1Nb приведены в табл. 5. Как видно из таблицы, значения механи-

ческих характеристик при 20 °C незначительно отличаются от характеристик сплава Э-110. Это можно объяснить разным содержанием кислорода в сплавах Zr1Nb и Э-110.

Для коррозионных исследований были отобраны образцы из слитков, которые были изготовлены по технологии ИФТТМТ ННЦ ХФТИ. Химический состав исследуемого материала по легирующему элементу и основным примесям был следующий: ниобия - 0,9 %, кислорода - 0,08 ... 0,10 %, азота - 0,004 ... 0,006 %, углерода - 0,01 ... 0,02 %, фтора - 0,003 ... 0,005 %.

Для коррозионных экспрессных и долговременных испытаний были изготовлены плоские образцы длиной 35 мм и шириной 8 мм. Подготовка поверхности производилась по методикам МР-4508 и МР-4509 коррозионных экспрессных и длительных испытаний.

Для сравнения использовались пластины толщиной 0,5 мм, которые были изготовлены прокаткой из прутков сплава Э-110 диаметром 10 мм, полученных на ЧМЗ (Удмуртия, Россия) по штатной технологии.

С целью удаления поверхностных загрязнений, получения однородной поверхности, а также в связи с тем, что поверхность оболочек для промышленных твэлов подвергается на финишном этапе аналогичному полирующему травлению, в наших экспериментах все образцы протравливались в травителе следующего состава:

фтористо-водородная кислота (плавиковая) 48 %-го состава ГОСТ 2567-73 - 5 % об.;

азотная кислота с удельным весом 1,35 г/см³, ГОСТ 11125-84 - 45 % об.;

остальное - бидистиллированная вода, $\sigma = (1 - 2) \cdot 10^{-6}$ сим/см, pH = 6 ... 7.

При травлении по режимам указанных методик удалялся слой толщиной $\sim 15 \dots 20$ мкм, поверхность получалась полированной, блестящей.

Установки для коррозионных длительных и экспрессных испытаний представляют собой автоклавы высокого давления, внутренний диаметр автоклавов составлял 48 мм, длина рабочей части – 250 мм емкостью 750 см^3 . Автоклавы оборудованы системой измерения и регулировки температур, давления, мембранными предохранителями от превышений давления среды в объеме автоклавов, приспособлением для напуска и сброса воды и пара.

Автоклавы были рассчитаны на рабочие параметры: температура 350 и 400 °С, внутреннее давление среды на 16,5 и до 20,0 МПа соответственно.

В автоклавных испытаниях применялась вода с добавками веществ, используемых в теплоносителе реактора ВВЭР-1000 (350 °С) и водяной пар (400 °С).

С целью достижения максимально объективных и сравнимых характеристик материалов применяемые методики разрабатывались в НТК ЯТЦ ННЦ ХФТИ под углом зрения приближенности к методикам испытаний и исследований труб из циркониевых сплавов по ТУ 95.405-89 ЛУ России и ASTM В353-71 США.

В данной работе исследовалась кинетика коррозии пластин, изготовленных из вышеуказанных составов сплавов Zr1Nb и Э110.

Коррозионные испытания были проведены при следующих параметрах: температура 350 °С, давление воды 16,8 МПа; температура 400 °С, давление пара 20,0 МПа.

Вначале были проведены испытания при температуре 400 °С как экспрессные в течение 72 ч, а затем испытания были продолжены до 400 ч. Данные о привесах образцов после таких испытаний представлены на рис. 4.

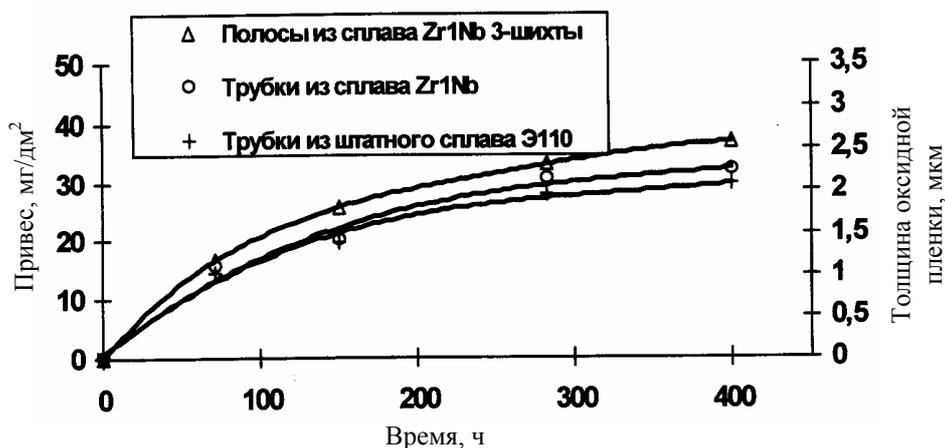


Рис. 4. Кинетика коррозии циркониевых сплавов в водяном паре при температуре 400 °С и давлении 20 МПа.

Результаты экспрессных испытаний показали следующее:

все образцы трубок из сплавов Zr1Nb за время экспрессных испытаний (72 ч) в условиях пара при 400 °С, давлении $P = 20,0$ МПа имели близкие между собой привесы, которые ниже браковочных привесов для сплавов Э-110 (22 мг/дм^2 согласно требованиям ТУ-805-81Е) и для сплавов типа циркалой ($\leq 22 \text{ мг/дм}^2$ по требованиям испытаний ASTM США № G-2-74));

привесы пластин штатного сплава Э-110 при условиях 400 °С, 20,0 МПа составляют величину $19,4 \text{ мг/дм}^2$, что также ниже браковочного значения привеса.

Таким образом, привесы всех типов образцов Zr1Nb и сравнительного сплава Э-110 при испытаниях в условиях 400 °С, $P = 10,0$ МПа не превышают значений, допустимых по ТУ-805-81Е

на штатный сплав Э-110.

Длительные испытания (400 ч) образцов обоих сплавов, проведенные при температуре 400 °С в паре, подтвердили данные экспрессных испытаний.

Результаты испытаний не выявили коррозионных разрушений, образований нодулярных очагов коррозии или признаков побеления пленок, хотя привесы значительно возросли. Величины скоростей коррозии исследуемых сплавов за время испытаний очень близки по значению для всех исследуемых сплавов.

Параллельно проводились также коррозионные испытания при 350 °С в воде состава теплоносителя реактора ВВЭР-1000 (борная кислота H_3BO_3 - 7 ... 8 г/л; KOH - 0,025 г/л; NH_3 - 14 мг/л. Остальное – бидистиллированная вода, рН раствора составлял 7,0 ... 7,2). Испытания в воде

обоих указанных сплавов проведены в течение 400 ч. Результаты испытаний представлены на рис. 5.

В целом привесы для трубок из сплава Zr1Nb близки к привесам контрольного сплава Э-110 или совпадают по значениям в пределах разброса, или имеют несколько меньшие значения. Вид оксидных пленок практически совпадает у сплавов Zr1Nb и Э-110.

Результаты коррозионных автоклавных испытаний при температуре 350 и 400 °С образцов пластин из литого сплава Zr1Nb и из пластин, полученных из прутков штатного сплава Э-110 (раскатаны на вальцах), показывают высокую коррозионную стойкость при экспрессных и продолжительных испытаниях. И хотя данные

испытания рассматриваются как предварительные и требуют дальнейших исследований, можно сделать указанные выводы.

Величины привесов в функции времени для образцов лент-полос для температур 350 и 400 °С представлены на рис. 4 и 5. Из рисунков следует, что при температуре испытаний 350 °С величина привеса у образцов из полос сплава Zr1Nb несколько меньше, чем у образцов сплава Э-110, в то время как при температуре испытаний 400 °С зависимость обратная. Причины такого поведения пока не выяснены. В целом коррозионная стойкость образцов пластин из сплава Zr1Nb при 350 °С оценивается как высокая, близкая к стойкости образцов сплава Э-110 при этой температуре.

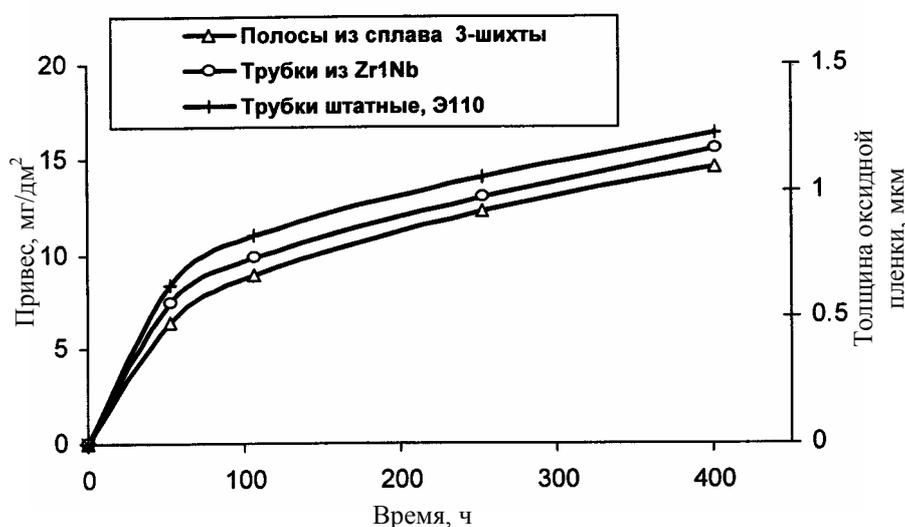


Рис. 5. Кинетика коррозии циркониевых сплавов в высокотемпературной воде состава теплоносителя в реакторе ВВЭР-1000 при температуре 350 °С и давлении 16,5 МПа.

Выводы

1. Сплав Zr1Nb, выплавленный на основе тройной шихты по химическому составу удовлетворяет требованиям ТУ 95.166-98 на сплав типа Э-110 и является идентичным сплаву Э-110. Микроструктура сплава Zr1Nb на основе тройной шихты соответствует микроструктуре сплава Э-110. Твердость сплава Zr1Nb близка к величине твердости сплава Э-110.

2. Проведено сравнение микроструктуры и микротвердости сплава Zr1Nb и сплава Э-110. Показано, что микроструктура сплава Zr1Nb такая же, как и у сплава Э-110. Величина микротвердости сплава Zr1Nb H_{μ} составляет 2060 - 2130 МПа/мм², а для сплава Э-110 H_{μ} - 2040 - 2100 МПа/мм².

3. Проведено сравнение твердости сплава Zr1Nb и сплава Э-110. Показано, что твердость сплава Zr1Nb $HВ$ составляет 1600 - 1700 МПа/мм², а твердость сплава Э-110 $HВ$ составляет 1500 - 1700 МПа/мм².

4. Проведено сравнение механических свойств сплава Zr1Nb и сплава Э-110 в интервале температур 20 - 500 °С. Показано, что они такие же, как и у сплава Э-110. При температуре 20 °С величина предела прочности при растяжении для сплава Zr1Nb σ_b составляет 540 - 550 МПа/мм², а для сплава Э-110 σ_b - 480 - 490 МПа/мм², величина предела текучести $\sigma_{0,2}$ для сплава Zr1Nb составляет 380 - 390 МПа/мм², а для сплава Э-110 $\sigma_{0,2}$ - 360 - 380 МПа/мм², пластичность сплавов одинакова и составляет ~ 18 - 25 %.

5. Проведено сравнение коррозионных свойств сплава Zr1Nb и сплава Э-110 в воде при температуре 350 °С при давлении воды 16,8 МПа и при температуре 400 °С при давлении пара 20,0 МПа. Показано, что в воде при температуре 350 и 400 °С сплав Zr1Nb ведет себя так же как и сплав Э-110.

6. Исследования показали, что сплав Zr1Nb на основе тройной шихты, методом ВДП идентичен российскому сплаву Э-110.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г.* Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. - М.: Энергоатомиздат, 1994.
2. *Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головин И.С. и др.* Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Кн. 1. - М.: Энергоатомиздат, 1955.
3. *Дуглас Д.* Металловедение циркония: Пер. с англ. / Под ред. А.С. Займовского. - М.: Атомиздат, 1975.
4. *Миллер Г.Л.* Цирконий / Пер. с англ. - М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
5. *Ластман Б., Керзе Ф.* Металлургия циркония / Пер. с англ. - М.: Изд-во иностр. лит., 1959.
6. *Егоров А.В., Моржин А.Ф.* Электрические печи. - М.: Metallurgia, 1975.
7. *Башенко В.В., Донской А.В., Соломахин И.М.* Электроплавильные печи цветной металлургии. - М.: Metallurgia, 1971.
8. *Смелянский М.Я., Бояришинов В.А., Гуттерман К.Д.* Дуговые вакуумные печи и плавильные установки. - М.: Metallurgizdat, 1962.
9. *Линчевский Б.В.* Вакуумная металлургия стали и сплавов. - М.: Metallurgia, 1970.
10. *Никольский Л.Е.* Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры. - М.: Энергия, 1971.
11. *Свенчанский А.Д., Смелянский М.Я.* Электрические промышленные печи (ч. 2. Дуговые печи). - М.: Энергия, 1970.
12. *Зотова З.* Цветная металлургия. - 1973. - № 2.
13. *Albert P., Renucci L., Lehr P.* Bull. Soc. Chim. France. - 1962. № 11 - 12.
14. Вакуумная металлургия / Под ред. В.М. Самарина - М.: Metallurgizdat, 1962.
15. *Аржакова В.М., Федотов С.Ф., Ермакова Л.Ф.* Исследование структурного состояния циркониевых слитков сплавов Э110 и Э125 двойного вакуумно-дугового переплава с использованием радиоактивных индикаторов // ВАНТ. Тр. конф. "Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике", 14 - 19 июля 1999 г., Алушта, Крым. - Харьков, 1999.
16. *Строение и свойства сплавов для атомной энергетики.* - М.: Наука, 1973.
17. *Вакуумная технология для металлургии // Рекламный выпуск А. G. Leybold.* - 1995.
18. *Некрасова Г.А., Парфенов Б.Г., Смирнов Ю.В., Пиляев А.С.* Производство циркониевых сплавов и технические требования, предъявляемые к ним. - Атомная техника за рубежом. - 1978. - № 3.
19. *Металлургия циркония и гафния / Под ред. Л.Г. Нехамкина.* - М.: Metallurgia, 1979. - 208 с.
20. *Денисова Н.Д., Баскова А.П., Бирюкова В.М. и др.* Металлургия тугоплавких металлов. - М.: Metallurgia, 1975. - С. 70 - 80.
21. *Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д. и др.* Цирконий и его сплавы: технология производства, области применения. - Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998. - 98 с.
22. *Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д. и др.* Электронно-лучевая плавка титана циркония и гафния // ВАНТ. Сер. Вакуум, чистые металлы, сверхпроводники. - 2002. - № 6. - С. 95 - 99.
23. *Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Пилипенко Н.Н.* Взаимодействие в газопаровой фазе при электронно-лучевой плавке металлов // Там же. - 1999. - Вып. 1(9). - С. 40 - 43.
24. *Волохонский Л.А.* Вакуумные дуговые печи. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 232 с.
25. *Бояришинов В.А., Шалимов Ал.Г., Щербаков А.И. и др.* Рафинирующие переплавы стали и сплавов в вакууме. - М.: Metallurgia, 1979. - 304 с.
26. *Договір «Розробка та освоєння дослідно-промислової технології виробництва злитка та трубної заготовки із сплаву цирконію методом ВДП»: (Звіт, етап 2 «Визначення складу (в %) сплаву Zr1Nb із потрійної шихти»).*
27. *Коровин Ю.Ф., Чупринко В.Г., Ліндт К.А. и др.* Производство циркония и гафния на ПО "ПХЗ" для удовлетворения потребности атомной энергетики Украины // ВАНТ. Сер. ФРП и РМ. - 1994. - Вып. 2(62), 3 (63). - С. 114 - 124.
28. *Технология обработки поверхности циркониевых труб. Рекомендации трубного института. Факс ДТИ от 01.11.2002 г.*
29. *Лабораторная методика экспрессных коррозионных испытаний циркониевых сплавов. МР. 4508 ПМ.* - 1999. - 14 с.
30. *Лабораторная методика длительных коррозионных испытаний циркониевых сплавов. МР.4509 ПМ.* - 1999. - 12 с.
31. *Aqueous corrosion testing of samples of zirconium and zirconium alloys. ASTM № G 2-74 USA.* - 1996. - 17 p.
32. *Лабораторная методика механических испытаний циркониевых сплавов. МР. 4512 ПМ.* - 1999. - 5 с.

СПЛАВ Zr1Nb ДЛЯ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

В. М. Ажажа, И. Н. Бутенко, Б. В. Борц, В. С. Вахрушева, П. М. В'югов, М. П. В'югов, К. А. Ліндт, І. М. Неклюдов, І. А. Петельгузов, В. І. Савченко

Методом вакуумно-дугової плавки одержано сплав Zr1Nb на основі потрійної шихти. Визначено хімічний склад сплаву та досліджено його мікроструктуру, структуру, механічні та корозійні властивості. Показано, що сплав Zr1Nb має однорідну структуру по висоті та перерізу злитка, рівномірний розподіл домішок і легуючих елементів в об'ємі злитка, що підтверджено вимірами твердості, мікротвердості. Механічні та корозійні властивості сплаву Zr1Nb такі ж, як і сплаву E-110.

ALLOY Zr1Nb FOR ATOMIC ENERGY IN UKRAINE

**V. M. Azhazha, I. N. Butenko, B. V. Borts, V. S. Vakhrusheva, P. N. Vyugov, N. P. Vyugov,
K. A. Lindt, I. M. Nekludov, I. A. Petelgusov, V. I. Savchenko**

Zr1Nb alloy based on triple charge was received by vacuum arc melting method. Chemical composition of the alloy was determined. Microstructure, structure itself, mechanical and corrosion properties were studied. It was shown that Zr1Nb alloy has the homogeneous structure in the height and ingot cross-section, has the uniform distribution of the impurities and ingot volume doping elements, which are confirmed by the firmness measurements and microfirmness. Mechanical and corrosion properties of Zr1Nb are the same as in E-110 alloy.

Поступила в редакцію 23.06.06,
после доработки – 14.06.07.