

УДК 669.017.14.046.516.2: 620.172.21

EDN DDQVBV

## Влияние содержания легирующих элементов на вязкость оболочечных труб из сплавов системы Zr-Nb-Sn-Fe

Е.А. Терехин<sup>1</sup>, Н.С. Сабуров<sup>1</sup>, В.А. Маркелов<sup>1</sup>, С.А. Никулин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва

<sup>2</sup>Университет науки и технологий «МИСИС», Москва  
NSSaburov@bochvar.ru

Проведена оценка вязкости по работе деформации в испытаниях на растяжение кольцевых образцов от тонкостенных оболочек из сплавов системы Zr-Nb-Sn-Fe, включая сплавы типа Э635, в сопоставлении со сплавами типа Э110 системы Zr-Nb. Оцениваемая характеристика рассмотрена во взаимосвязи с параметром легирования для сплавов двух систем в виде отношения  $Nb/(Sn+Fe+O)$ . В результате показана возможность повышения до уровня, близкого к сплавам Э110, вязкости четырёхкомпонентного сплава за счёт увеличения в его составе ниобия и снижения олова, по сравнению с Э635, при сохранении содержания железа.

**Ключевые слова:** сплавы типа Э635, сплавы типа Э110, система Zr-Nb-Sn-Fe, система Zr-Nb, вязкость, работа деформации, параметр легирования

---

## Effect of alloying elements content on the fracture toughness of cladding tubes made of Zr-Nb-Sn-Fe system alloys

E.A. Terekhin<sup>1</sup>, N.S. Saburov<sup>1</sup>, V.A. Markelov<sup>1</sup>, S.A. Nikulin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow

<sup>2</sup>University of Science and Technology «MISIS», Moscow  
NSSaburov@bochvar.ru

The fracture toughness was evaluated based on the deformation work in tensile tests of ring specimens made of thin-walled claddings of Zr-Nb-Sn-Fe alloys, including E635-type alloys, in comparison with E110-type alloys of the Zr-Nb system. The evaluated characteristic was considered in relation to the alloying parameter for the alloys of the two systems in the form of the  $Nb/(Sn+Fe+O)$  ratio. As a result, it was shown that the fracture toughness of a four-component alloy can be increased to a level similar to that of E110 alloys by increasing the amount of niobium and reducing the amount of tin compared to E635, while maintaining the same iron content

**Keywords:** E635-type alloys, E110-type alloys, Zr-Nb-Sn-Fe system, Zr-Nb system, fracture toughness, deformation work, alloying parameter

---

### Введение

В качестве материала оболочек твэлов в энергетических реакторах на тепловых нейтронах типа ВВЭР и PWR применяются сплавы циркония разных систем легирования. Для отечественных оболочек используется сплав Э110 [1] системы Zr-Nb и его модификации с улучшенным комплексом свойств за счёт применения губки в качестве шихтовой основы и увеличения содержания железа и кислорода

– это сплавы Э110опт [2,3] и Э110М [4,5]. Прошли опробование в опытно-промышленной эксплуатации сплавы Э635 [6] и Э635М [4] системы Zr-Nb-Sn-Fe для оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000. Сплавы типа Э635 обладают более высоким сопротивлением радиационному формоизменению в сравнении со сплавами Э110, но заметно уступают им в стойкости к равномерной коррозии, особенно под облучением [5-8]. Повысить сопротивление коррозии сплавам системы Zr-Nb-Sn-Fe

до уровня, близкого к коррозии под облучением сплавов системы Zr-Nb, возможно за счёт корректировки их состава по содержанию ниобия и олова в сумме с железом, как было показано в работе [9]. Другой характеристикой, по которой сплавы типа Э635 уступают сплавам системы Zr-Nb, является вязкость разрушения [10], что проявляется в их более низкой стойкости к охрупчиванию в условиях наводороживания с выделением гидридов, например, при замедленном гидридном растрескивании [11,12]. Повысить вязкость разрушения сплаву Э635 можно диспергированием выделений частиц второй фазы в его микроструктуре [13,14]. Другая возможность повышения вязкости для сплавов системы Zr-Nb-Sn-Fe, очевидно, связана с оптимизацией их легирующего состава. С этой целью выполнены испытания по определению работы деформации до разрушения при растяжении кольцевых образцов от тонкостенных оболочек из сплавов системы Zr-Nb-Sn-Fe с различными содержаниями легирующих элементов и в сопоставлении с образцами из сплавов типа Э110. Работа деформации, выражаемая площадью истинной диаграммы деформирования, характеризует вязкость материала, которая в настоящем исследовании рассмотрена в зависимости от легирования сплавов для определения наиболее оптимального по вязкости состава сплава системы Zr-Nb-Sn-Fe.

### Материал и методика эксперимента

Исследования проведены на образцах оболочечных труб номенклатуры PWR с наружным диаметром 9,5 мм и толщиной стенки 0,57 мм, изготовленных из экспериментальных (масса 50 кг) и промышленных (масса 1500 кг) слитков сплавов двух систем легирования. Трубы из восьми опытных сплавов O1÷O5; O8÷O10 системы Zr-Nb-Sn-Fe (табл. 1) изготовлены из экспериментальных слитков и различаются содержаниями ниобия (0,60-2,50) % и олова (0,23-1,10) % в пределах диапазона концентраций этих элементов, используемых в отечественной и мировой практике разработки сплавов циркония для оболочек твэлов и других конструктивных элементов тепловыделяющих сборок. Содержания железа и кислорода в указанных сплавах примерно одинаковые. При этом сплав O8 по составу соответствует сплаву Э635. Трубы из сплава Э635М с пониженными до 0,8 % содержаниями олова и ниобия, в отличие от Э635, а также трубы из сплавов Э110опт и Э110М изготовлены из промышленных слитков. Химический состав по легирующим элементам каждого исследуемого сплава представлен в таблице. 1. Все сплавы изготовлены на шихтовой основе из губчатого циркония и имеют близкий примесный состав, соответствующий техническим требованиям.

Таблица 1

Легирующий состав исследуемых сплавов (% масс)					
№ сплава	Nb	Sn	Fe	O	Nb/(Sn+Fe+O)
O1	0,60	0,38	0,34	0,11	0,72
O2	1,02	0,40	0,33	0,09	1,24
O3	1,63	0,40	0,32	0,09	2,01
O4	2,33	0,40	0,33	0,09	2,84
O5	1,03	0,60	0,34	0,09	1,00
O8	1,00	1,10	0,33	0,09	0,66
O9	1,00	0,23	0,33	0,10	1,52
O10	2,50	0,24	0,34	0,11	3,62
Э635М	0,80	0,80	0,32	0,08	0,67
Э110опт	1,05	0	0,05	0,09	7,50
Э110М	1,00	0	0,094	0,125	4,57

Оболочечные трубы из всех сплавов изготовлены по единой деформационно-термической схеме в условиях промышленного производства АО ЧМЗ и находились в состоянии после финишного проката. Затем в лабораторных условиях АО «ВНИИНМ» отрезки труб были подвергнуты вакуумной термообработке при 400 °С - 24 часа для снятия напряжений с

целью проведения сравнительных экспериментов на упрочнённом материале, как и в работе [12].

Для выполнения механических испытаний от исследуемых труб на электроискровом станке EXETEC изготавливали кольцевые образцы высотой 2,7 мм. Испытания на растяжение колец в поперечном (диаметральном) направле-

нии проводили на универсальной серво-электронной испытательной системе INSTRON 8861 со скоростью 1 мм/мин при температурах 20 °С и 350 °С, по 4 образца на точку. По результатам испытаний определяли: временное сопротивление разрушению ( $\sigma_B$ ), условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), общее ( $\delta$ ) и равномерное ( $\delta_p$ ) относительные удлинения. После испытаний на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM-3000 измеряли площадь излома, равную конечной площади поперечного сечения образца в месте разрыва  $S_k$ . Затем вычисляли относительное поперечное сужение  $\psi = (S_0 - S_k)/S_0$ , где  $S_0$  - исходная площадь поперечного сечения рабочей зоны образца.

Для определения работы деформации до разрушения образца первичные диаграммы растяжения перестраивали из координат "нагрузка  $P$  – удлинение  $L$ " в координаты "истинное напряжение  $\sigma_{ист}$  – истинная деформация  $\epsilon_{ист}$ ", пример которых показан на рис. 1.

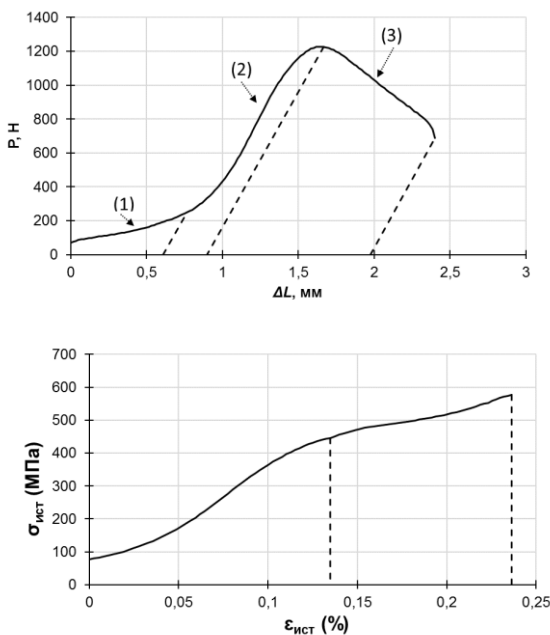


Рис. 1. Пример записи системой INSTRON 8861 первичной диаграммы растяжения образца из сплава Э110опт (а) и диаграмма его деформирования в истинных координатах (б)

Для определения истинной деформации необходимо знать значение площади поперечного сечения образца в каждый момент времени испытания. На первичных диаграммах

растяжения наблюдаются три стадии (рис. 1а): 1 – возрастание нагрузки при распрямлении между опорами двух рабочих зон кольцевого образца; 2 - равномерная деформация всего объема рабочих зон образца; 3 – сосредоточенная деформация с локализацией в отдельных объемах рабочих зон, что приводит к образованию местных сужений поперечного сечения (шеек) и, в конечном итоге, разрушению образца либо по двум шейкам одновременно, либо по одной из них.

Исходя из положения о постоянстве объема материала при деформировании, площади поперечных сечений рабочих зон образца в каждый момент испытания ( $S_i$ ) на стадии равномерной деформации определялись по формуле (1). На третьей стадии за начальные площади сечений рабочих зон образца принималась расчетная площадь сечения рабочей зоны на момент перехода от второй стадии эксперимента к третьей в точке максимальной нагрузки на первичной диаграмме растяжения (рис. 1а). При этом сделано допущение, что на третьей стадии площадь сечения образца изменяется по линейному закону. Истинная деформация ( $\epsilon_{истi}$ ) вычислялась по формуле (2). Истинные напряжения ( $\sigma_{истi}$ ) определялись отношением приложенной нагрузки ( $P$ ) к текущей площади сечений двух рабочих зон образца по формуле (3).

$$S_i = S_0 \cdot \frac{L_0}{L_i} \quad (1)$$

$$\epsilon_{истi} = \ln\left(\frac{L_i}{L_0}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_{истi} = \frac{P_i}{S_i} \quad (3)$$

По полученным данным строилась диаграмма деформирования в истинных координатах (рис. 1б), рассчитанная площадь под которой определяет работу деформации до разрушения, характеризующую вязкость материала образца  $W$  в МДж/м<sup>3</sup>.

### Результаты испытаний. Зависимость вязкости от легирования сплавов

Средние значения определяемых характеристик механических свойств, с учетом разброса получаемых данных, для всех сплавов сведены в таблице 2.

Таблица 2  
Механические свойства при растяжении кольцевых образцов оболочек из сплавов циркония систем Zr-Nb-Sn-Fe и Zr-Nb

Сплав	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\delta_p$ , %	$\psi$ , %	$W$ , МДж/м <sup>3</sup> т истин
20 С°						
О1	677±8	612±11	13,2±3,6	2,3±0,2	40±3	116±7
О2	688±10	631±6	11,5±0,5	2,4±0,3	47±4	121±1
О3	700±6	654±13	11,0±0,6	2,4±0,1	41±1	123±2
О4	725±6	664±8	10,9±0,9	2,5±0,1	45±3	128±2
О5	669±32	618±31	11,3±1,2	2,2±0,1	48±3	121±6
О8	699±4	647±11	9,8±1,3	2,1±0,3	44±2	115±3
О9	680±8	615±14	13,7±2,5	2,4±0,2	43±2	117±6
О10	719±3	645±8	13,0±1,0	2,5±0,2	41±3	127±2
Э635М	668±5	655±26	10,2±1,3	2,0±0,1	42±3	107±4
Э110опт	636±8	585±10	11,1±0,8	2,1±0,1	50±2	135±3
Э110М	693±3	646±15	12,2±0,9	2,6±0,2	41±2	127±3
350 С°						
О1	419±11	368±29	14,0±2,4	2,4±0,4	52±3	73±5
О2	424±9	389±27	15,1±2,2	2,1±0,6	50±1	75±4
О3	439±7	416±7	15,1±1,8	1,9±0,2	51±1	75±3
О4	448±7	415±7	16,3±2,7	2,0±0,3	57±4	85±5
О5	445±7	423±5	15,1±0,9	1,6±0,2	49±5	78±3
О8	464±13	437±21	14,1±1,8	1,6±0,5	53±1	74±3
О9	436±10	407±18	17,9±3,4	1,7±0,6	51±3	79±1
О10	446±8	381±31	15,3±3,1	2,4±0,5	45±3	87±3
Э635М	414±9	372±17	15,5±1,2	2,3±0,3	51±2	74±2
Э110опт	389±6	351±10	23,0±4,6	2,0±0,2	64±5	90±6
Э110М	426±24	394±31	17,6±1,7	1,7±0,3	57±5	83±4

Чтобы объединить на одном графике для сплавов двух разных систем их связь работы деформации и разрушения (вязкости) с легированием, в настоящем исследовании предложено анализировать  $W$  в зависимости от величины параметра  $Nb / (Sn+Fe+O)$ , т.е. отношения содержания ниобия в сплаве к сумме содержаний олова, железа и кислорода. Значения этого параметра для исследуемых сплавов приведены в таблице 1. Ниобий в чис-

лителе, так как в диапазоне используемых концентраций положительно влияет на вязкость разрушения, а олово, железо и кислород в знаменателе, так как влияют на вязкость разрушения отрицательно. Это следует из сопоставления для труб давления одинаковой прочности из сплавов Э125 и Э635 характеристик вязкости разрушения  $dJ/da$ , которые приведены в [15] и соответственно равны 342,1±7,1 МПа и 266,7±3,9 МПа при температуре испытания

250 °С. Суммарное содержание легирующих элементов в сплавах Э125 и Э635 примерно одинаковое. Сплав Э125 легирован ниобием в количестве 2,5 %, а в сплаве Э635 столько же в сумме ниобия, олова и железа. Принимая во внимание приведенные выше для сплавов значения параметра  $dJ/da$ , можно заключить, что дополнительные 1,5% ниобия в сплаве Э125 увеличивают эту характеристику, а 1,5% в сумме олова и железа в сплаве Э635 её снижают. Кислород так же, как олово и железо, влияет на вязкость разрушения негативно. Это показывают данные работы [16], в которой повышенное легирование сплава Э110М кислородом и железом, по сравнению со сплавом Э110, приводит к упрочнению и понижению характеристик вязкости разрушения оболочечных труб при комнатной температуре в испытаниях на трещиностойкость:  $K_{IS}$  снижается в 1,7 раза, а  $J_{IS}$  снижается в 2,9 раза.

Полученные зависимости величины работы деформации при растяжении кольцевых образцов до разрушения от параметра легирования  $Nb / (Sn+Fe+O)$  для температур испытаний при 20 °С и 350 °С представлены на рис. 2.

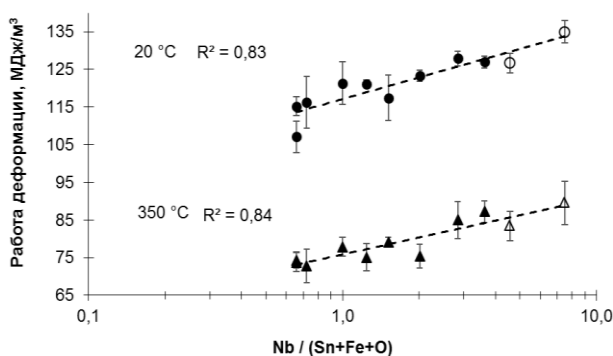


Рис. 2. Зависимость работы деформации (вязкости) от параметра  $Nb / (Sn+Fe+O)$  в испытаниях на растяжение кольцевых образцов оболочек из сплавов циркония системы  $Zr-Nb-Sn-Fe$  (●, ▲) и  $Zr-Nb$  (○, △)

Из приведенных графиков следует, что с увеличением параметра  $Nb / (Sn+Fe+O)$  величина работы деформации возрастает с коэффициентом детерминации  $R^2$ , равным 0,83 и 0,84 соответственно, для зависимостей при температурах испытаний 20 °С и 350 °С. При этом наиболее близкие к сплавам системы  $Zr-Nb$  значения работы деформации из сплавов системы  $Zr-Nb-Sn-Fe$  показывают сплавы О4 и О10, содержащие больше ниобия (2,33-2,50) % и меньше олова (0,24-0,40) % в сравнении со сплавами типа Э635 (таблица1).

Другие характеристики механических свойств при растяжении колец, приведенные в таблице 2, не проявляют зависимости от параметра легирования  $Nb / (Sn+Fe+O)$ .

### Корреляция результатов по вязкости с данными по коррозии

Определение работы деформации до разрушения по диаграмме растяжения в координатах "истинное напряжение – истинная деформация" для оценки вязкости материала наиболее правильно и надёжно осуществлять в испытаниях гладких стандартных образцов. В настоящей работе испытывали образцы тонкостенных оболочечных труб одного типоразмера для всех исследуемых сплавов, что важно в проведении для них сравнительных исследований. Кроме того, растяжение кольцевых образцов обеспечивает малые по объёму затраты материала, что особенно важно при выполнении аналогичных испытаний на облучённых образцах для сопоставления с необлучёнными. В целом, результаты на рис. 2 показывают реальную возможность оценки вязкости исследуемых сплавов по работе деформации при растяжении кольцевых образцов, даже с учётом сделанных допущений при построении истинных диаграмм деформирования.

Как следует из полученных данных, близкие значения вязкости к сплавам типа Э110 системы  $Zr-Nb$  показывают те из исследованных сплавов системы  $Zr-Nb-Sn-Fe$ , которые при одинаковом содержании железа со сплавами типа Э635 имеют одновременно наиболее увеличенное содержание ниобия и существенно пониженное содержание олова. При этом стоит отметить, что ощутимое преимущество в вязкости указанных сплавов над сплавами типа Э635 при комнатной температуре (рис. 2) будет обеспечивать им и преимущество в сопротивлении образованию трещин при холодном деформировании, что необходимо в технологиях проката для производства изделий. А превосходство в вязкости при повышенной температуре даёт основание ожидать более высокую стойкость сплавов, по крайней мере, к замедленному гидричному растрескиванию, что следует из публикаций [11,12,15] и планируется экспериментально оценить в развитие настоящего исследования.

Полученный результат по вязкости для сплавов системы  $Zr-Nb-Sn-Fe$  коррелирует с результатами коррозионных испытаний предварительно облучённых образцов аналогичных вариантов сплавов в сравнении с образцами

без облучения [9]. На рис. 3 показана взаимосвязь между параметром легирования  $Nb/(Sn+Fe)$  и коэффициентом усиления коррозии в результате облучения (отношение привесов облучённого и необлучённого образцов) для сплавов систем Zr-Nb-Sn-Fe и Zr-Nb, привесы которых без облучения были сопоставимы. Кислород в данном случае отсутствует в знаменателе параметра легирования, так как он при используемых содержаниях в сплавах не влияет на их коррозию, в отличие от его влияния на вязкость разрушения.

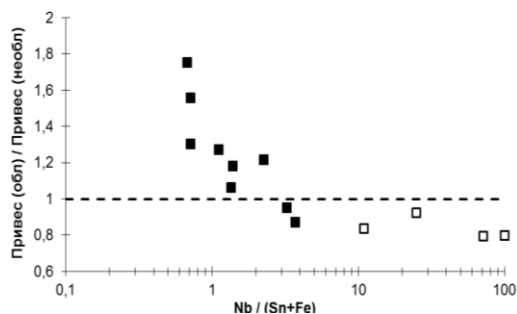


Рис. 3. Взаимосвязь между параметром легирования  $Nb/(Sn+Fe)$  и коэффициентом усиления коррозии под облучением для сплавов систем Zr-Nb ( $\square$ ) и Zr-Nb-Sn-Fe ( $\blacksquare$ ) [9]

На графике рис. 3 видно, что значения отношений коррозионных привесов для облучённых и необлучённых образцов более 1 имеют сплавы системы Zr-Nb-Sn-Fe (тёмные символы), для которых в результате облучения

наблюдается усиление коррозии. Ниже единицы расположены отношения привесов четырёх сплавов системы Zr-Nb (светлые символы), включая Э110опт и Э110М, и данные для сплавов системы Zr-Nb-Sn-Fe при легировании ниобием в количестве порядка 2,4% и оловом в сумме с железом примерно 0,6-0,7%, для которых усиление коррозии вследствие облучения не зафиксировано [9].

Таким образом, увеличение содержания ниобия и снижение содержания олова в сплавах системы Zr-Nb-Sn-Fe, в сравнении с Э635, обеспечивает повышение характеристик вязкости и сопротивления реакторной коррозии до значений, близких к сплавам системы Zr-Nb.

## Выводы

Показано, что повысить величину работы деформации до разрушения при растяжении, характеризующую вязкость материала, для сплава типа Э635 системы Zr-Nb-Sn-Fe до уровня, близкого к сплавам Э110 системы Zr-Nb, позволяет корректировка в нём содержания легирующих элементов путём увеличения содержания до (2,3-2,5) % и снижения олова до (0,24-0,40) % при неизменном содержании железа (0,32-0,34) %. Сплав такого состава, помимо сопоставимой вязкости со сплавами системы Zr-Nb, имеет и близкую к ним коррозионную стойкость в состоянии облучения применительно к нормальным условиям эксплуатации.

## Список литературы

1. Shebaldov P.V., Peregud M.M., Nikulina A.V., Bibilashvili Yu.K., Lositski A.F., Kuz'menko N.V., Belov V.I., Novoselov A.E., E110 Alloy Cladding Tube Properties and their Interrelation with Alloy Structure Phase Conditions and Impurity Content // *Zirconium in the Nuclear Industry: Twelfth International Symposium*, ASTM STP 1354. 2000. P. 545-559.
2. Peregud, M., Markelov, V., Novikov, V., Gusev, A., Kon'kov, V., Pimenov, Y., Agapitov, V. and Shtutsa, M. "Characteristics and Properties of Cladding Tubes for WWER-1000 Higher Uranium Content Fuel Rods" (paper presentation, WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, Helena, Bulgaria, September 26–October 4, 2009).
3. Lavchiev K., Konig M., Jadermas D., Karlsson J., Novikov V.V., Markelov V.A., Shevyakov, A.Y. et al., "Post Irradiation Examination of Cladding from TVS-K Fuel Rods Operated in Ringhals 3 for Three Cycles" (paper presentation, TopFuel 2021, Santander, Spain, October 24–28, 2021).
4. Vasilchenko I., S. Kushmanov S. and Vyalitsin V. "Objectives of Further Development of WWER Reactor Cores" (paper presentation, 12th International Conference WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, Nesebar, Bulgaria, September 16–23, 2017).
5. Markelov V., Novikov V., Saburov N., Gusev A., Kon'kov V., Peregud M., Dolgov A., Volkov B. and Andersson V. "Irradiation Test under Advanced PWR Conditions in the Halden Reactor and Post-Irradiation Examination of Fuel Rod Claddings from Different Zirconium Alloys" (paper presentation, TopFuel Reactor Fuel Performance 2018, Prague, Czech Republic, September 30–October 4, 2018).
6. Shishov V.N., Markelov V.A., Nikulina A.V., Novikov V.V., Peregud M.M., Shevyakov A.Yu., Volkova I.N., Kobylansky G.P., Novoselov A.E., and Obukhov A.V. *Corrosion, Dimensional Stability and Microstruc-*

ture of VVER-1000 E635 Alloy FA Components at Burnups up to 72 MWday/kgU. // 17th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP 1543, Robert J. Comstock and Pierre Barberis, Eds, Hyderabad, India, 2015, pp. 628–650.

7. Nikulina A.V., Markelov V.A., Peregud M.M., Bibilashvili Y.K., Kotrekhev V.A., Lositski A.F., Kuzmenko N.V., Shevchin Y.P., Shamardin V.K., Kobylansky G.P., Novoselov A.E. Zirconium Alloy E635 as a Material for Fuel Rod Cladding and Other Components of VVER and RBMK Cores // Zirconium in the Nuclear Industry: 11th Int. Symp. ASTM STP 1295. 1996. P.785-804.

8. Новиков В.В., Маркелов В.А., Целищев А.В., Коньков В.Ф., Синельников Л.П., Тимохин А.Н., Панченко В.Л., Смирнов В.П. Особенности структурно-фазовых изменений и коррозионного поведения под облучением оболочек твэлов из сплавов Э110 и Э635 в водоохлаждаемых реакторах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 2006. Вып. 1(66). С. 329-337.

9. Markelov, V., Novikov, V., Shevyakov, A., Gusev, F., Peregud, M., Konkov, V., Eremin, S., Pokrovsky, A. and Obukhov, A., Preliminary Irradiation Effect on Corrosion Resistance of Zirconium Alloys // Zirconium in the Nuclear Industry: 18th International Symposium, ASTM STP1597, R. J. Comstock and A. T. Motta, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, pp. 857–880, <http://dx.doi.org/10.1520/STP159720160067>.

10. Никулина А.В., Маркелов В.А., Гусев А.Ю., Желтковская Т.Н., Шамардин В.К., Кобылянский Г.П., Платонов П.А., Рязанцева А.В., Фролов И.А. Сплав Zr-1%Sn-1%Nb-0,5% Fe для труб технологических каналов реакторов типа РБМК // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 1990. Вып. 2(36). С. 58-66.

11. Маркелов В.А. Замедленное гидридное растрескивание сплавов циркония: условия проявления и основные закономерности // Деформация и разрушение материалов. 2010. №1. С. 31-37.

12. Сабуров Н.С., Маркелов В.А., Бекренёв С.А., Шевяков А.Ю., Гусев А.Ю., Котов П.В. Замедленное гидридное растрескивание оболочек твэлов из сплавов циркония различных систем легирования // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2022. Выпуск 2(113). С. 79-95.

13. Nikulin S.A., Goncharov V.I., Markelov V.A., Shishov V.N. Effects of Microstructure on Ductility and Fracture Resistance of Zr-1.3Sn-1Nb-0.4Fe Alloy // Zirconium in the Nuclear Industry: 11th Int. Symp. ASTM STP 1295. 1996. P.695-709.

14. Маркелов В.А., Никулин С.А., Гусев А.Ю., Шишов В.Н., Желтковская Т.Н., Гончаров В.И., Фатеев Б.М., Чеснокова Э.К. Влияние режимов термомеханической обработки на структуру и свойства сплава Zr-1,35Sn-1Nb-0,4Fe // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы. 1993. Вып. 1(48). С. 21-25.

15. Сабуров Н.С., Маркелов В.А., Бекренёв С.А., Шелепов И.А., Терёхин Е.А. Обоснование применимости для радиальной трещины в оболочке параметров замедленного гидридного растрескивания, полученных на образцах с осевой трещиной // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2024. Выпуск 3(124). С. 6-14.

16. Белов В.А. Сопротивление разрушению модифицированных циркониевых сплавов для оболочечных труб атомных реакторов // Автореферат диссертации кандидата технических наук, 2011, 23 с.

Поступила в редакцию / Received 01.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 03.12.2025

Принята к публикации / Accepted 05.12.2025