

УДК: 620.193:621.039.5

**М.Н. Саблин, А.В. Никулина, В.Ф. Коньков,
В.А. Маркелов, В.В. Новиков, Т.Н. Хохунова**

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРУБ НАПРАВЛЯЮЩИХ КАНАЛОВ С ГИДРОТОРМОЗОМ ИЗ СПЛАВА Э635 ДЛЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ

Направляющий канал, являясь элементом силового каркаса тепловыделяющей сборки, в процессе всего срока эксплуатации должен обладать высоким сопротивлением формоизменению и коррозионной стойкостью. Представлены результаты исследований структуры, текстуры, сопротивления ползучести и коррозии усовершенствованных труб НК (НК с гидротормозом), а также анализа эксплуатации труб НК из сплава Э635. Выданы рекомендации по использованию труб НК с ГТ в ТВСА-Т реактора ВВЭР-1000.

Ключевые слова: циркониевый сплав Э635, тепловыделяющая сборка, реактор ВВЭР-1000, направляющий канал с гидротормозом, коррозия, ползучесть, микроструктура, состав и размер интерметаллидов, степень рекристаллизации, автоклавные испытания.

В разработанной ОАО «ОКБМ Африкантов» конструкции кассеты ТВСА-Т для реактора ВВЭР-1000 предусмотрено использование направляющих каналов (НК) с гидротормозом (ГТ) из сплава Э635. Зона гидротормоза представляет собой участок с уменьшенным диаметром в нижней части трубы с целью снижения скорости падения сборки системы управления защитой (СУЗ) в нижней части активной зоны.

Направляющий канал, являясь элементом силового каркаса тепловыделяющей сборки, в процессе всего срока эксплуатации должен обладать достаточным сопротивлением формоизменению, что определяется характеристиками радиационного роста и радиационной ползучести, а также высокими прочностными, пластическими и коррозионными свойствами материала, из которого они изготовлены.

Контрольные испытания труб НК с ГТ после предварительного наводораживания показали радиальную ориентацию гидридов в зоне гидротормоза трубы.

Целью настоящей работы являлось определение причин образования и влияния радиальной ориентации гидридов в зоне гидротормоза труб на их эксплуатационные характеристики и оценка на этой основе возможности использования таких труб в ТВСА – Т реактора ВВЭР – 1000.

Представлены результаты исследований структуры, текстуры, сопротивления ползучести и коррозии труб НК с ГТ, а также анализа эксплуатации труб НК из сплава Э635. На основании проведенных исследований показана возможность использования труб НК с ГТ в ТВСА-Т реактора ВВЭР-1000.

1. Материал и методы исследований

В качестве материала исследований использованы трубы направляющих каналов с гидротормозом из сплава Э635, термообработанных на готовом размере при $T = 580^\circ\text{C}$ в течение 3 часов в вакуумной печи типа СНВ.

Исследования структуры труб в продольном и поперечном сечениях (по отношению к оси прокатки) проводили с помощью оптического микроскопа «Leica» при увеличении 300 крат.

Более детальное исследование микроструктуры труб с анализом структурно-фазового состояния проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEM 2000-FX в сканирующем (СЭМ) и просвечивающем (ТЭМ) режимах. Электронно-микроскопические фольги готовили методом одностороннего электрохимического утонения в установке струйно-пульсирующего типа «Микрон» при напряжении 32–38 В и температуре электролита 30 °С.

Наводороживание образцов проводили на установке сухого наводороживания типа «Сивертс» до содержания водорода 0,02 мас.% при температуре менее 400 °С. Ориентацию гидридов оценивали по фотографиям, полученным с металлографических шлифов в оптическом микроскопе.

Механические свойства определяли в продольном и поперечном направлениях при комнатной и повышенной (350 °С) температуре на испытательной машине типа Instron.

Для анализа изменений текстуры вырезали специальные образцы, анализируемая поверхность которых была перпендикулярна радиальному направлению и находилась на различной глубине по сечению стенки. Анализ текстуры труб проводили по неполным прямым полюсным фигурам (ППФ) {0001} и {110}. Для расчёта интегральных текстурных параметров Кёрнса восстанавливали полные ППФ методом экстраполяции данных на неисследованную область стереографической проекции.

Сопротивление термической ползучести труб оценивали по результатам испытаний при одноосном нагружении в осевом направлении при температуре 380 °С и напряжении 100 МПа. Погрешность поддержания осевой нагрузки составляла $\pm 1\%$, колебания температуры на образцах ± 3 °С. В процессе испытаний осуществлялась регистрация параметров испытаний: время, температура и осевая деформация.

Коррозионные испытания наводороженных и ненаводороженных образцов выполнялись в автоклавах по методикам, разработанным в соответствии с международным стандартом [1], в условиях, моделирующих водно-химический режим реакторов ВВЭР при температуре 330 °С.

2. Результаты исследований

2.1. Ориентация гидридов

Ориентация гидридов в основной части и в зоне гидротормоза наводороженных образцов представлена на рис. 1.

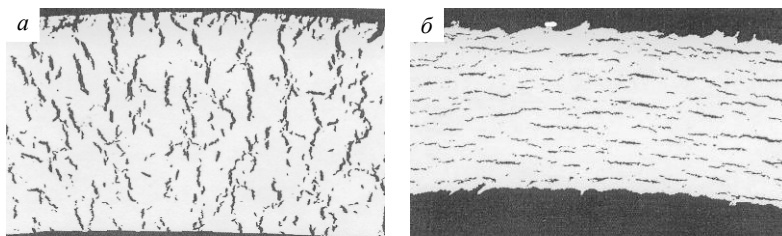


Рис. 1. Ориентация гидридов в трубах НК с гидротормозом: *а* – ориентация гидридов в зоне гидротормоза; *б* – ориентация гидридов в основной части трубы

Как видно, в основной части трубы коэффициент ориентации гидридов (F_n) находится в пределах (0,00 – 0,15), а в зоне гидротормоза трубы в пределах (0,89 – 0,97).

Такое различие может свидетельствовать о наличии текстурных и структурных отличий, что может оказывать влияние на эксплуатационные характеристики направляющих каналов.

2.2. Механические свойства труб

В табл. 1 представлены механические свойства различных участков труб НК с ГТ из сплава Э635.

Таблица 1

Механические свойства труб НК с гидротормозом из сплава Э635 (средние значения)

Место отбора	Продольное направление						Поперечное направление					
	20 °			350 °			20 °			350 °		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
Основная зона	510	370	38	280	190	41	510	440	25	260	230	30
Зона гидротормоза	520	370	28	280	190	29	540	450	23	280	230	29
Требования конструкторской документации, не менее												
	420	300	24	220	150	20	400	340	15	200	180	12

По прочностным и пластическим свойствам трубы удовлетворяют требованиям конструкторской документации. Однако отмечается различие в пластических свойствах основной зоны и зоны гидротормоза, более выраженное при комнатной температуре, которое составляет в среднем около 10 абс. %.

2.3. Структура труб

Зеренная структура основной части и зоны гидротормоза труб из сплава Э635 представлена на рис. 2. Видно, что структурное состояние основной части и зоны гидротормоза исследованных труб можно оценить как близкое к полностью рекристаллизованному (рис. 2). Измерения микротвердости основной части трубы

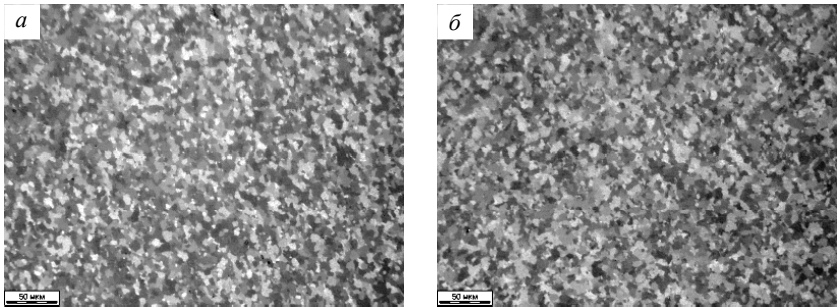


Рис. 2. Зеренная структура труб НК с гидротормозом из сплава Э635: а – зеренная структура основной части трубы; б – зеренная структура зоны гидротормоза

и зоны гидротормоза также подтвердили близость структурного состояния материала в этих участках труб (табл. 2).

Таблица 2

Микротвердость различных участков труб НК с гидротормозом из сплава Э635

Зона гидротормоза			Основная зона		
Наружная поверхность	Середина	Внутренняя поверхность	Наружная поверхность	Середина	Внутренняя поверхность
136	137	136	138	137	134

Более детальное исследование микроструктуры проводили методом электронной микроскопии в ТЭМ- и СЭМ-режимах. СЭМ-исследования подтвердили данные металлографии и показали высокую однородность в распределении частиц второй фазы в циркониевой матрице (рис. 3, а, в). ТЭМ-исследования показали, что во всех образцах наблюдаются частицы одного типа, а именно фазы Лавеса – $Zr(Nb,Fe)_2$ с кристаллической решеткой ГПУ (рис. 3, б, г). Средний размер выделений фазы Лавеса составляет около 100 нм, концентрация $\sim(1-4) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Структура практически полностью рекристаллизована. Степень рекристаллизации в обоих участках труб всех исследованных вариантов составляет более 90 %.

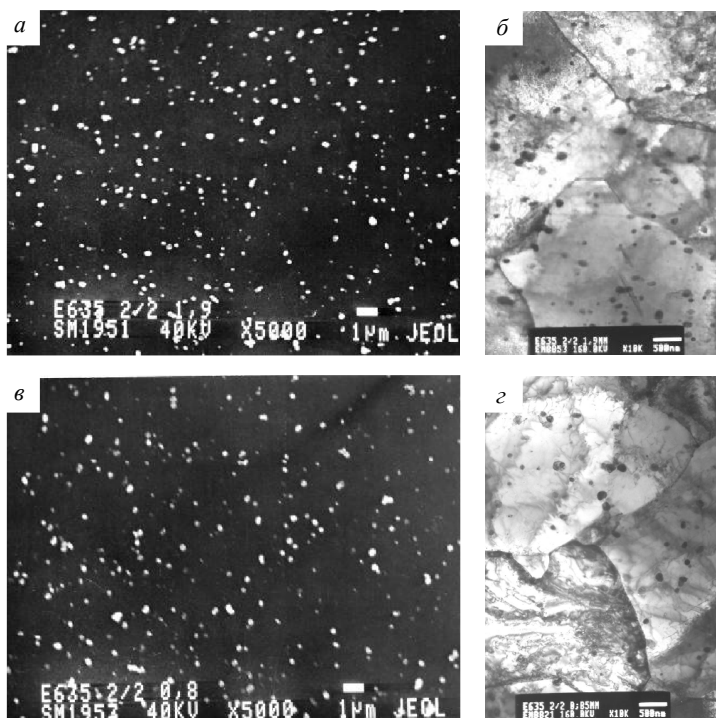


Рис. 3. СЭМ (а, в) и ТЭМ (б, г) – фотографии различных участков труб НК с гидротормозом из сплава Э635: а, б – зона гидротормоза; в, г – основная часть трубы

2.4. Текстура

Результаты определения текстуры труб из сплава Э635 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Текстурные параметры различных участков труб НК с ГТ из сплава Э635

Место отбора	Текстурные параметры		
	f_R	f_T	f_L
Основная зона трубы	0,52	0,43	0,05
Зона гидротормоза	0,27	0,66	0,07

Как видно из представленных результатов, переход от основной части трубы к зоне гидротормоза приводит к резкому изменению текстуры от радиальной ($f_R=0,52-0,57$) к тангенциальной ($f_T=0,63-0,65$) (табл. 3). Такое различие обусловлено сложной геометрией труб направляющих каналов с гидротормозом и, как следствие, различными параметрами деформационной обработки различных ее частей в процессе изготовления.

2.5. Коррозионная стойкость

В предыдущих разделах показано, что в зоне гидротормоза труб наблюдается радиальная ориентация гидридной фазы, обусловленная формированием текстуры с преобладающей тангенциальной компонентой.

Для оценки влияния тангенциальной текстуры и радиальной ориентации гидридной фазы на коррозионную стойкость труб НК с ГТ проведены испытания образцов в исходном состоянии и после предварительного наводороживания до 0,02 мас.%. Содержание водорода 0,02 мас.%, выбрано исходя из условий получения в металле радиально ориентированных гидридов, обусловленных текстурой труб, так как известно, что превышение содержания водорода в металле труб свыше (0,02–0,03) мас.%. приводит к переориентации гидридной фазы из-за деформации циркониевой матрицы, обусловленной большим объемным эффектом образования гидридной фазы [2].

Результаты коррозионных испытаний труб НК с ГТ из сплава Э635 в исходном состоянии и после предварительного наводороживания в условиях, приближенных к условиям эксплуатации НК в реакторах ВВЭР-1000 (без учета нейтронного облучения), показаны в табл. 4 и на рис. 4. Из данных табл. 4 и рис. 4 видно, что за 150 суток испытаний не наблюдается различий в коррозионном поведении основной части и зоны гидротормоза труб НК.

Таблица 4

Коррозионная стойкость труб НК с ГТ из сплава Э635
($T = 330\text{ }^{\circ}\text{C}$, вода, длительность 150 суток)

Место отбора	Исходное содержание водорода, мас.%	Толщина оксидной пленки, мкм
Основная зона трубы	-	1,8–1,9
Основная зона трубы	0,02	1,8–2,2
Зона гидротормоза	-	1,8–1,9
Зона гидротормоза	0,02	1,9–2,2

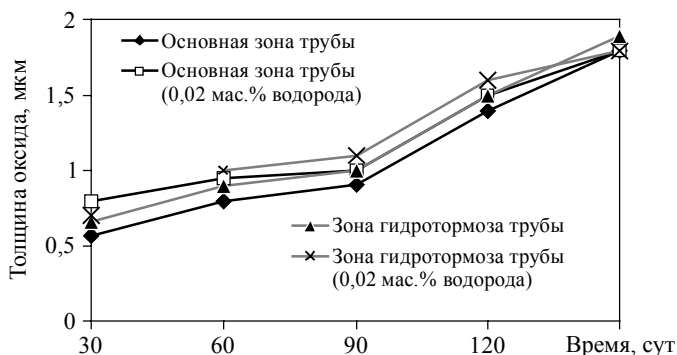


Рис. 4. Коррозионная стойкость труб НК с ГТ из сплава Э635 ($T = 330^\circ\text{C}$, деаэрированная вода)

2.4. Ползучесть труб

Для изучения влияния текстуры на размерную стабильность труб НК с ГТ проведены испытания труб на стойкость к ползучести при одноосном нагружении в осевом направлении при $T = 400^\circ\text{C}$ и напряжении 100 МПа. Результаты представлены в табл. 5 и на рис. 5. За 3500 ч испытаний выявлено незначительное уменьшение деформации ползучести зоны гидротормоза трубы в сравнении с ее основной тонкостенной частью (табл. 5).

Таблица 5

Деформация ползучести труб НК с ГТ из сплава Э635 при одноосном нагружении в осевом направлении ($T = 400^\circ\text{C}$, напряжение 100 МПа)

Место отбора образца	Длительность испытаний, ч	Деформация, %
Основная зона	3500	1,3 – 1,7
Зона гидротормоза	3500	1,2 – 1,3

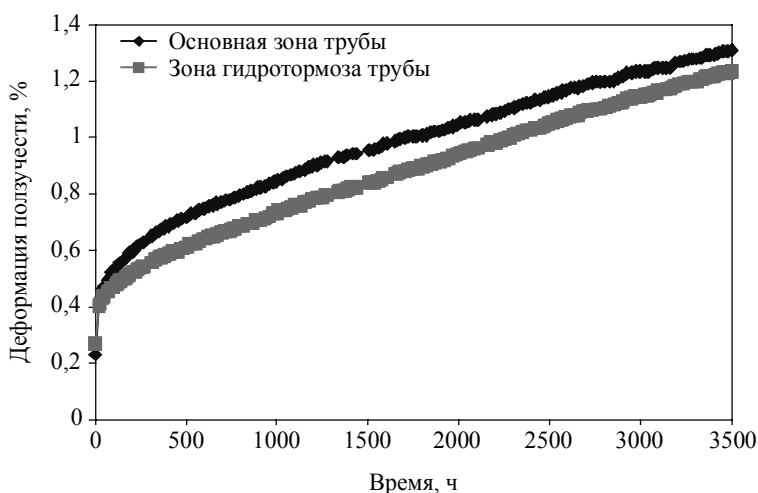


Рис. 5. Деформация ползучести при одноосном растяжении ($T = 400^\circ\text{C}$, 100 МПа) основной зоны и зоны гидротормоза труб НК из сплава Э635

3. Обсуждение результатов

Направляющий канал, являясь составной частью силового каркаса ТВС, должен обладать высокими прочностными свойствами, сопротивлением формоизменению и достаточной коррозионной стойкостью. Выполненные исследования показали, что по механическим свойствам направляющие каналы с гидротормозом с достаточным запасом удовлетворяют выставленным требованиям, несмотря на различие в свойствах основной части трубы и зоны гидротормоза. При этом прочностные свойства зоны гидротормоза находятся практически на уровне прочностных свойств основной части трубы.

Сопротивление формоизменению направляющих каналов в процессе эксплуатации, а также во время загрузки – выгрузки ТВС определяется помимо прочностных свойств характеристиками радиационно-термической ползучести и радиационного роста.

Радиационно-термическая ползучесть зависит не только от приложенных напряжений, температуры, флюенса нейтронов, структурного состояния и химического состава сплава, но и его сопротивления термической ползучести [2–4].

Проведенные в настоящей работе исследования показали, что структурное состояние основной части и зоны гидротормоза трубы идентично (рекристаллизованное), а исследования стойкости к термической ползучести не выявили значительных различий в поведении различных частей труб. Поэтому можно ожидать, что в процессе эксплуатации зона гидротормоза по своим характеристикам ползучести не будет отличаться от характеристик основной зоны трубы.

Деформация радиационного роста в значительной степени зависит не только от состава сплава, температуры и структурного состояния материала, но и от кристаллографической текстуры матрицы. В работах [5, 6] была определена эмпирическая зависимость, связывающая деформацию радиационного роста (ДРР) с характеристиками текстуры:

$$\text{ДРР} \sim (1 - 3f_i),$$

где f_i – текстурные параметры Кернса.

В соответствии с уравнением можно рассчитать, что деформация радиационного роста зоны гидротормоза труб в продольном направлении, определяемой фактором f_L , не превысит деформацию радиационного роста тонкостенной части трубы.

Основным вопросом, который должен был быть решен при обосновании безопасности эксплуатации направляющих каналов с гидротормозом, является их коррозионная стойкость.

Изучению влияния водорода на коррозионную стойкость изделий из циркониевых сплавов уделяется достаточно большое внимание [7–10]. При этом однозначного влияния содержания водорода на коррозионную стойкость циркониевых сплавов не выявлено, а данные по влиянию ориентации гидридной фазы на коррозию отсутствуют. Анализ литературных данных позволил только установить, что действие водорода на коррозию проявляется только при наличии градиента содержания водорода по толщине стенки циркониевых изделий [7–10].

Проведенные в настоящей работе исследования коррозионной стойкости основной части трубы и зоны гидротормоза в исходном состоянии и после предварительного наводороживания (до 0,02 мас.% водорода) не выявили отличий в коррозионном поведении различных частей труб НК с ГТ. Толщина оксидной пленки на всех исследованных образцах находилась в пределах (1,8–2,2) мкм. Та-

кие результаты указывают на отсутствие влияния содержания водорода (в исследованных пределах (до 0,02 мас.%) и ориентации гидридной фазы на коррозионную стойкость труб НК с ГТ. Необходимо отметить, что в данной работе был использован метод «сухого» наводороживания, позволяющий обеспечить равномерное распределение водорода по всему периметру образца. Имеющиеся результаты послереакторных исследований направляющих каналов из сплава Э635 показывают, что в трубах НК отсутствует градиент содержания водорода по сечению, что подтверждается равномерным распределением гидридов по толщине стенки направляющего канала [11]. Поэтому, полученные результаты могут быть использованы как обосновывающие безопасную эксплуатацию НК с ГТ.

Таким образом, выполненные исследования показали, что по своим прочностным и коррозионным свойствам направляющие каналы с гидротормозом удовлетворяют выставленным требованиям и могут быть использованы в ТВСА-Т реактора ВВЭР-1000.

Выводы

1. Проведенные структурные и текстурные исследования труб НК с гидротормозом показали, что радиальная ориентация гидридов в зоне гидротормоза труб обусловлена формированием тангенциальной текстуры. Тангенциальная текстура практически не оказывает влияния на прочностные свойства и стойкость труб к термической ползучести, снижая при этом их пластические характеристики.

2. Автоклавные коррозионные испытания показали, что тангенциальная текстура и радиально ориентированные выделения гидридной фазы не влияют на коррозионную стойкость труб из сплава Э635.

3. На основании выполненных исследований обоснована возможность использования труб НК с гидротормозом из сплава Э635 в ТВСА-Т реактора ВВЭР-1000.

ЛИТЕРАТУРА

1. *International standard. Corrosion of metals and alloys «Aqueous corrosion testing of zirconium alloys for use in nuclear power reactors»*. ISO №10270.
2. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головин И.С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. Книга 1. М.: Энергоатомиздат, 1995.
4. Magnus Limback et al. A Model for analysis of the effect of final annealing on the In and out-of-reactor creep behavior of zircaloy cladding // Zirconium in the Nuclear Industry; Eleventh International Symposium, ASTM STP 1295. 1996.
5. Fidleris V. Primary creep of zircaioy-2 under irradiation // Zirconium in the Nuclear Industry: Proceedings of the Fourth International Conference, ASTM STP 681, American Society for Testing of Materials, Philadelphia, 1978.
6. Fidleris V., Tucker R.P., Adamson R.B. An overview of microstructural and experimental factors that affect the irradiation growth behavior of zirconium alloys // Zirconium in the Nuclear Industry: Seventh International Symposium, ASTM STP 939, American Society for Testing of Materials, Philadelphia, 1987.
7. Blat M. et al. Detrimental role of hydrogen on the corrosion rate of zirconium alloys // Zirconium in the Nuclear Industry: Eleventh International Symposium, ASTM STP 1295, American Society for Testing of Materials, 1996.
8. Blat M. et al. Contribution to a better understanding of the detrimental role of hydrogen on the corrosion rate of zircaloy-4 cladding materials // Zirconium in the Nuclear Industry: Twelfth

International Symposium, ASTM STP 1354, American Society for Testing of Materials, 2000.

9. *Garde A.M.* Enhancement of aqueous corrosion of zircaloy-4 due to hydride precipitation at the metal-oxide interface // *Zirconium in the Nuclear Industry: Ninth International Symposium*, ASTM STP 1132, American Society for Testing of Materials, 1991.
10. *Kim Y.S. et al.* Phenomenological study of In-reactor corrosion of zircaloy-4 in pressurized water reactors // *Zirconium in the Nuclear Industry: Tenth International Symposium*, ASTM STP 1245, American Society for Testing of Materials, Philadelphia, 1994.
11. *Markelov V., Novikov V., Nikulina A., Kon'kov V., Sablin M., et al.* Application of E635 alloy as structural components of WWER-1000 fuel assemblies // 6th International conference WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support, Bulgaria, 2005.

Статья поступила 17.06.2014 г.

Sablin M.N., Nikulina A.V., Markelov V.A., Kon'kov V.F., Novikov V.V., Khokhunova T.N. JUSTIFICATION FOR APPLYING OF GUIDE THIMBLES WITH HYDRAULIC BRAKE MADE FROM E635 ALLOY FOR FUEL ASSEMBLY FROM LIGHT WATER REACTORS

The guide tube (GT), being an element of the bearing frame of the fuel assembly, must be highly resistant to form change and corrosion during the whole operating life.

The aim of this work was to determine reasons for formation and influence of radial orientation of hydrides in the area of dashpot of GT on their performance characteristics and assessment on this basis the possibility of using such tubes in TVSA-T for the VVER-1000 reactor.

The report presents results of research into the structure, texture, creep resistance, and corrosion of GT tubes with dashpot, and of the analysis of operation results of GT tubes made of the E635 alloy. On the basis of the investigations, GT tubes with dashpot were recommended for use in TVSA-T of the VVER-1000 reactor.

Keywords: zirconium alloy E635, fuel assembly, VVER – 1000, guide thimble with dashpot, corrosion, creep, microstructure, composition and size of intermetallic, degree of recrystallization, autoclave tests

Sablin Michail Nikolaevich (M.Sc., Joint Stock Company A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russian Federation)
E-mail: sablin@bochvar.ru

Nikulina Antonina Vasil'evna (Doctor of technical Sciences, Joint Stock Company A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russian Federation)
E-mail: nikulina@bochvar.ru

KON'KOV Viktor Fedorovich (Joint Stock Company A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russian Federation)
E-mail: kalina@bochvar.ru

Novikov Vladimir Vladimirovich (Candidate of technical Sciences, Joint Stock Company A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russian Federation)
E-mail: novikov@bochvar.ru

Markelov Vladimir Andreevich (Doctor of technical Sciences, Joint Stock Company A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russian Federation)
E-mail: markelov@bochvar.ru

Hohunova Tatiana Nikolaevna (Joint Stock Company A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russian Federation)
E-mail: o_mil@bochvar.ru

REFERENCES

1. International standard. Corrosion of metals and alloys "Aqueous corrosion testing of zirconium alloys for use in nuclear power reactors". ISO No.10270.
2. Zaymovskiy A.S., Nikulina A.V., Reshetnikov N.G. *Tsirkonievye splavy v yadernoy energetike*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1994. (in Russian)
3. Reshetnikov F.G., Bibilashvili Yu.K., Golovnin I.S., et al. *Razrabotka, proizvodstvo i ekspluatatsiya teplovydeleyayushchikh elementov energeticheskikh reaktorov. Kniga 1*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. (in Russian)
4. Magnus Limback et al. A Model for analysis of the effect of final annealing on the In and out-of-reactor creep behavior of zircaloy cladding. *Zirconium in the Nuclear Industry. Eleventh International Symposium*, ASTM STP 1295, 1996.
5. Fidleris V. Primary creep of zircaioy-2 under irradiation. *Zirconium in the Nuclear Industry. Proceedings of the Fourth International Conference*, ASTM STP 681, American Society for Testing of Materials, Philadelphia, 1978.
6. Fidleris V., Tucker R.P., Adamson R.B. An overview of microstructural and experimental factors that affect the irradiation growth behavior of zirconium alloys. *Zirconium in the Nuclear Industry. Seventh International Symposium*, ASTM STP 939, American Society for Testing of Materials, Philadelphia, 1987.
7. Blat M. et al. Detrimental role of hydrogen on the corrosion rate of zirconium alloys. *Zirconium in the Nuclear Industry. Eleventh International Symposium*, ASTM STP 1295, American Society for Testing of Materials, 1996.
8. Blat M. et al. Contribution to a better understanding of the detrimental role of hydrogen on the corrosion rate of zircaloy-4 cladding materials. *Zirconium in the Nuclear Industry. Twelfth International Symposium*, ASTM STP 1354, American Society for Testing of Materials, 2000.
9. Garde A.M. Enhancement of aqueous corrosion of zircaloy-4 due to hydride precipitation at the metal-oxide interface. *Zirconium in the Nuclear Industry. Ninth International Symposium*, ASTM STP 1132, American Society for Testing of Materials, 1991.
10. Kim Y.S. et al. Phenomenological study of In-reactor corrosion of zircaloy-4 in pressurized water reactors. *Zirconium in the Nuclear Industry. Tenth International Symposium*, ASTM STP 1245, American Society for Testing of Materials, Philadelphia, 1994.
11. Markelov V., Novikov V., Nikulina A., Kon'kov V., Sablin M., et al. Application of E635 alloy as structural components of WWER-1000 fuel assemblies. *6th International conference WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulgaria, 2005.