



НИЦ «Курчатовский институт»

В диссертационный совет

Д 520.009.07

123182, г. Москва, пл. Академика

Курчатова, д. 1.

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **Сафонова Дениса Валерьевича**

на тему: «Структурно-фазовое состояние оболочечных материалов в условиях эксплуатации, сухого хранения, а также проектной аварии», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Развитие ядерной энергетики в России и за рубежом требует повышения безопасности работы ядерных реакторов. При этом в связи с растущими генерирующими мощностями, остро встает вопрос о хранении отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Современные тенденции, получившие широкое развитие в странах запада, предполагают переход от мокрого к сухому хранению ОЯТ как экономически более выгодному и экологически более чистому способу хранения. В связи с этим необходимо создание прогнозных моделей для обоснования безопасного сухого хранения ОЯТ. Построение подобной модели невозможно без получения экспериментально-обоснованных данных по изменению микроструктуры и свойств используемого сплава циркония Э110, в том числе и в имитационных условиях сухого хранения. Таким образом, проведение исследований структурно-фазового состояния сплава Э110 для установления степени деградации его структуры в условиях имитации сухого хранения является не только актуальным, но и практически значимой задачей для современной атомной энергетики России.

Другим актуальным направлением, получившим широкое развитие в мире, является создание толерантного твэла для предотвращения протекания паро-циркониевой реакции в аварийных условиях в реакторах типа ВВЭР – так называемая программа по созданию толерантного к авариям топлива. Одним из важных направлений этой программы является создание нового материала оболочки твэла, способного заменить привычные сплавы циркония. В данной работе проведены исследования сплава 42ХНМ как одного из подобных материалов в имитационных условиях возможной аварии типа LOCA, что позволит в будущем обосновано делать вывод о его применимости в качестве материала оболочки толерантного твэла.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, литературных ссылок из 140 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы. Сформулированы цели работы и решаемые задачи, указаны новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** работы является обзорной по анализу литературных данных. Её первая часть посвящена конструкции тепловыделяющих элементов реакторов типа ВВЭР, используемым материалам и их свойствам. Отдельно стоит отметить часть, посвященную ползучести, в том числе оболочек из сплава циркония. На основании проведенного обзора, автор делает вывод о необходимости проведения исследований сплава Э110 для имитации ползучести оболочки в условиях сухого хранения ОЯТ. Вторая часть посвящена обзору направлений по созданию материала оболочки толерантного твэла. Важным здесь является подробное изложение накопленного опыта исследуемого в работе сплава 42ХНМ в эксплуатационных условиях реакторов ВВЭР. На основании выявленных закономерностей автор делает вывод о необходимости дополнительных исследований данного сплава в условиях, имитирующих температурно-временной режим аварии типа LOCA.

**Вторая глава** посвящена описанию исследованных материалов, даны их составы, описаны состояния, в которых проведены исследования. Дан развернутый обзор используемых методов исследований, в том числе методов подготовки образцов, методов получения и обработки данных. Наибольшее внимание уделено методу просвечивающей электронной микроскопии, как основному, который использовал автор при проведении исследований. Также приводятся описания методов механических испытаний образцов, результаты которых также использованы в работе.

**В третьей главе** представлены результаты исследования сплава циркония Э110. Исследования проведены поэтапно: на первом этапе автор проводит исследования необлученного сплава Э110, затем последующие исследования материала оболочек твэлов, облученного в реакторе ВВЭР-1000 при штатной эксплуатации, а завершают главу результаты исследования сплава Э110 после облучения и последующих имитационных испытаний в заданных режимах сухого хранения.

При этом автор приводит данные регрессионного анализа по влиянию микроструктурных параметров на сопротивление ползучести сплава Э110, на основании которого делает вывод, что наиболее значимое влияние на сопротивление сплава термической ползучести вносят глобулярные выделения  $\beta$ -Nb, которые формируются в сплаве уже в исходном состоянии при изготовлении. Этот результат получен впервые и является важным с научной и практической точки зрения.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований сплава 42ХНМ. Как и ранее, исследования проведены в несколько этапов: необлученный сплав 42ХНМ, после облучения в ВВЭР-1000 в качестве оболочек пэлов, после нагревов в температурно-временных условиях максимальной проектной аварии типа LOCA. Таким образом, появляется возможность проследить все изменения, происходящие с материалом от изготовления на заводе до имитации тяжелой проектной аварии в ВВЭР-1000. Поскольку при проектной аварии типа LOCA оболочка твэла находится в опасном температурном интервале (с точки зрения резкого снижения пластичности сплава 42ХНМ) менее минуты, то особое внимание было уделено проведению сравнительных исследований влияния различного времени нагрева (длительные и короткие нагревы) на объем фазовых превращений и поведению пористости в сплаве при этих нагревах. Показано, что в необлученном сплаве 42ХНМ при длительных нагревах фазовые

превращения происходят в меньшем объеме, чем в облученном. При этом сравнение длительных и коротких нагревов показало, что в случае коротких нагревов объем фазовых превращений и объемная доля пористости по границам зерен меньше, чем при длительных нагревах.

В заключении автор проводит сравнение температурной зависимости фазовых превращений и изменения пористости на границе зерен с зависимостью пластичности сплава от температуры, на основании чего делает вывод, что снижение пластических свойств, наблюдаемое в интервале температур (600-800) °С связано с выделением зон прерывистого распада и фаз  $\alpha$ -Cr (КТР которых меньше, чем КТР матрицы в 1,7 раза), а также образованием пористости по границам зерен. Наиболее важным результатом данной части работы является установление корреляции между изменением структуры сплава 42ХНМ и его пластическими характеристиками, а также выявление причин резкого снижения остаточной пластичности сплава в условиях нагревов, имитирующих условия максимальной проектной аварии. Важным является установленный факт, что остаточная пластичность облученного сплава при коротких нагревах, имитирующих температурно-временные условия максимальной проектной аварии типа LOCA, не снижается ниже ~1,6 %. Данные исследования выполнены впервые для данного материала и позволяют обосновано подходить к вопросу о возможности использования данного сплава в качестве материала оболочки толерантного твэла.

Таким образом, в работе полностью решены поставленные задачи на высоком научном уровне, с привлечением большого объема экспериментальных результатов исследований на современном исследовательском оборудовании, что приводит к обоснованности и достоверности полученных выводов.

**Научная новизна диссертационной работы.** В результате проведенной работы получены новые научные результаты:

Впервые установлено, что наибольший вклад в сопротивление сплава Э110 ползучести в заданных условиях сухого хранения, вносят глобулярные выделения  $\beta$ -Nb. Показано, что в процессе испытаний на ползучесть оболочек твэлов из сплава Э110 в условиях, имитирующих сухое хранение, не происходит изменения фазового состава, а ползучесть определяется исходным состоянием сплава. Установлено, что причинами снижения пластических свойств сплава 42ХНМ при повышенных температурах являются образование зон прерывистого распада и выделений  $\alpha$ -Cr и образование пор по границам зерен.

#### **Практическая значимость диссертационной работы.**

Полученные параметры структурно-фазовых составляющих сплава циркония Э110, в том числе после имитационных испытаний на ползучесть в условиях сухого хранения используются по заказу АО «ТВЭЛ» при создании прогнозной модели ползучести, необходимой для аттестации технологии сухого хранения ОЯТ с оболочкой твэла из сплава Э110.

Установленные особенности структурно-фазового состояния сплава 42ХНМ в условиях максимальной проектной аварии типа LOCA и установленное наличие остаточной пластичности в дальнейшем также будут использованы при анализе возможности применения данного сплава в качестве материала оболочки толерантного твэла.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечена большим массивом проведенных исследований с использованием современного оборудования, анализом литературных данных, проведением теоретических расчетов, а также апробацией результатов работы.

**Оценка содержания работы.** Диссертационная работа написана технически грамотно и в целом оформлена в соответствии с общепринятыми стандартами (замечания по содержанию работы см. ниже). Автореферат и публикации отвечают содержанию диссертации.

**Вопросы и замечания по диссертационной работе**

По работе можно сделать некоторые замечания:

1. В части литературного обзора, посвященного технологии сухого хранения ОЯТ, было бы желательно более детально отразить суть данной технологии, а также привести некоторые примеры ее применения.
2. В главе 4 приводятся сравнительные данные по изменению микроструктуры в необлученном и облученном сплавах 42ХНМ после длительных нагревов. Однако в случае коротких нагревов в работе имеются данные изменения микроструктуры только облученного сплава 42ХНМ. Было бы интересно также провести сравнение с необлученным сплавом и определить количественные различия таких превращений между длительными и короткими нагревами.
3. Также в главе 4 в таблице 4.13 приводятся результаты фрактографического анализа изломов кольцевых образцов сплава 42ХНМ. При этом в последующих таблицах, где приводятся результаты исследования микроструктуры (таблицы 4.14-4.17) температуры исследований отличаются. Не понятно, с чем связаны такие различия.
4. В диссертационной работе использованы внесистемные единицы измерения (нм, сна), хотя желательно использовать все в системе «СИ».

Однако сделанные замечания не снижают ценности полученных в работе научных результатов.

Диссертационная работа Сафонова Д.В. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой рассмотрены и решены некоторые актуальные материаловедческие проблемы в области сухого хранения ОЯТ. Кроме того, проведены исследования ключевых моментов использования сплава 42ХНМ в качестве перспективного материала оболочек толерантных твэлов. Необходимо отметить, что все полученные в работе результаты имеют принципиально важное прикладное применение в разрабатываемых тематиках.

Тематика диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.14.03 - «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации». Диссертационная работа по своему содержанию и оформлению удовлетворяет критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученых степеней согласно требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 и «Изменениям, которые вносятся в Положение о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства российской Федерации №335 от 21.04.2016, а её автор, Сафонов Денис Валерьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

**Официальный оппонент:**

Кандидат технических наук,  
доцент кафедры



08.10.2021

Белов В.А.

Металловедения и физики прочности НИТУ МИСиС, доцент

Почта: [belov.v@misis.ru](mailto:belov.v@misis.ru)

Адрес: г. Москва, Ленинский проспект, д.4

Телефон: 8-495-955-00-89

Подпись Белова В.А.  
удостоверяю

подпись  
печать

ФИО  
Проректор

**И.М. ИСАЕВ**

