



«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ИСЭ СО РАН,
д.ф.-м.н.
И.В. Романченко
«27» апреля 2024 г.

ОТЗЫВ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) на диссертационную работу Сабурова Николая Сергеевича «Стойкость к замедленному гидриднему растрескиванию оболочек твэлов из сплавов циркония», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов»

Соискатель Сабуров Н.С. в своей диссертации представляет результаты исследований взаимосвязи легирующего состава циркониевых оболочек твэлов со стойкостью к зависящему от времени механизму разрушения, названному замедленное гидридное растрескивание (ЗГР), которое считается одним из вероятных процессов деградации циркониевых компонентов в активной зоне водоохлаждаемых реакторов. Таким образом, диссертационная работа связана с актуальной для атомной промышленности задачей, включающей в себя определение температурных зависимостей основных параметров ЗГР для оболочек твэлов из трёх сплавов разных систем легирования циркония с оценкой стойкости этих сплавов к ЗГР.

Диссертация состоит из введения с описанием общей характеристики работы, шести глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложений с актом внедрения и практического использования результатов. Полный текст диссертации изложен на 136 страницах, библиография включает 178 наименований.

Во введении сформулированы актуальность работы, ее цель, основные научные положения, новизна и практическая значимость результатов исследования, обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций.

Глава 1 содержит аналитический обзор литературы по теме исследований, включающий особенности поведения растворенного водорода в цирконии, его диффузионную подвижность, механизм и модельные представления о ЗГР, которые с ним связаны. Приведены основные параметры ЗГР ($K_{\text{И}}$ – пороговый коэффициент интенсивности напряжений и $V_{\text{ЗГР}}$ – скорость стабильного роста трещины) и проанализировано влияние на их величину внешних и внутренних факторов. Рассмотрены используемые методы испытаний на ЗГР. По результатам аналитического обзора автор сформулировал цель и задачи диссертационного исследования.

В главе 2 описаны материалы исследования, которыми послужили оболочечные трубы из сплавов циркония трёх разных систем легирования (Zircaloy-4, Э635М и Э110опт), находящихся в близком структурном состоянии. Представлены методы исследования, используемые в работе, включая наводороживание оболочечных труб, наведение усталостных трещин и анализ изломов после испытания на ЗГР.

В главе 3 автором проанализированы применяемые в лабораторных условиях методы испытаний на ЗГР, которые на практике оказались трудоемкими и затратными в реализации. Сабуровым Н.С. представлены результаты разработки нового метода испытаний на ЗГР, называемого метод «постоянного перемещения». Разработанный метод в сравнении с другими имеет ряд преимуществ, что положительно влияет на сокращение длительности экспериментов и количество образцов для получения требуемого результата.

Глава 4 посвящена описанию полученных экспериментальных результатов по определению основных параметров ЗГР ($V_{\text{ЗГР}}$ и $K_{\text{И}}$). Для исследованных сплавов построены

температурные зависимости $V_{ЗГР}$ и K_{IH} . Показано, что для всех сплавов имеется температура, ниже которой $V_{ЗГР}$ подчиняется соотношению Аррениуса, а K_{IH} изменяется слабо. Выше этой температуры ЗГР перестает подчиняться соотношению Аррениуса и $V_{ЗГР}$ резко снижается вплоть до нулевых значений. Из температурных зависимостей $V_{ЗГР}$ и K_{IH} для каждого сплава определены температура иммунитета к ЗГР и минимальное значение K_{IH} . Отмечено, что наибольшей стойкостью к ЗГР обладает сплав Э110опт, для которого температура иммунитета и минимальное значение K_{IH} составляют соответственно 265 °С и 11,5 МПа·√м.

В главе 5 представлены результаты исследования изломов после испытаний на ЗГР с помощью лазерного конфокального микроскопа. Показано, что процесс ЗГР сопровождается образованием на поверхности трещины характерного рельефа в виде чередования участков хрупкого разрушения гидридов и вязких перемычек (бороздок) разрушения матрицы сплава. Отмечено, что в зависимости от локальной величины K_I , меняющейся в процессе роста трещины, расстояние между бороздками уменьшается в испытаниях на скорость ЗГР и увеличивается в испытаниях на K_{IH} . Сопоставлением результатов фрактографического анализа с экспериментальными данными по K_{IH} и $V_{ЗГР}$ установлена взаимосвязь рельефа гидридной трещины со стойкостью сплавов к ЗГР.

В главе 6 на основе полученных экспериментальных данных и анализа литературы определены прогнозные значения ключевых параметров ЗГР для оболочек твэлов из сплавов Zircaloy-4, Э635М и Э110опт в состоянии облучения. Для прогноза возникновения ЗГР в оболочках твэлов при эксплуатации и сухом хранении отработавшего ядерного топлива автором представлена оценка выполнения для этого необходимых условий по концентрации водорода, предельной температуре и напряжениям. Показано, что при нормальной эксплуатации в реакторах ВВЭР/PWR, и в условиях сухого хранения, с соблюдением в обоих случаях допустимых требований по напряжениям в твэле, проявления ЗГР в оболочках не прогнозируется.

Актуальность диссертационной работы. Циркониевые сплавы различного химического состава широко используются в качестве материалов конструктивных элементов активных зон атомных энергетических реакторов. Актуальность исследований, направленных на изучение ЗГР определяется в том числе наблюдавшимися случаями образования сквозных трещин в оболочках твэлов, развитие которых связывалось с данным механизмом разрушения. Оценить стойкость оболочек твэлов, к разрушению по механизму ЗГР при эксплуатации и послереакторном обращении возможно только если для рассматриваемого материала в конкретных условиях определены или могут быть спрогнозированы основные параметры ЗГР, которые рассматриваются автором в настоящей работе.

Научная новизна результатов исследований. Для испытаний на ЗГР оболочек твэлов разработан и впервые применён метод определения K_{IH} с зафиксированным раскрытием трещины в образце, позволяющий в одном эксперименте получать также $V_{ЗГР}$.

Впервые для оболочек твэлов в сопоставимых металлургических состояниях из трёх сплавов циркония Zircaloy-4, Э635М и Э110опт получены значения K_{IH} и $V_{ЗГР}$, и их температурные зависимости. Стойкость к ЗГР сплавов в приведенной последовательности возрастает с очевидным превосходством Э110опт, особенно под облучением в результате меньшего радиационного упрочнения.

Впервые экспериментально показано, что межбороздчатое расстояние в изломе гидридной трещины, характеризующее критическую длину гидрида, зависит от локальной величины K_I , меняющейся в процессе экспериментов.

Практическая значимость и достоверность. Данные по стойкости к ЗГР циркониевых сплавов разных систем легирования следует учитывать при разработке и обосновании новых модификаций сплавов с высоким сопротивлением такому виду разрушения. Кроме того, как отмечено в акте об использовании, разработанный метод «постоянного перемещения» внедрен для испытаний в АО «ВНИИНМ», а экспериментальные данные будут использованы в коде СТАРТАП для построения модели роста трещины ЗГР в условиях сухого хранения отработавших ТВС. Достоверность

результатов диссертации обеспечена её выполнением на современном сертифицированном оборудовании, с применением комплекса взаимодополняющих методов исследований, представительностью объёма экспериментов, воспроизводимостью результатов и их согласованностью с известными данными по проблеме.

Апробация работы. Материалы диссертации достаточно полно представлены на множестве научных конференций разного уровня.

Публикации. Основные положения работы, полученные результаты и выводы достаточно полно отражены в 8 статьях, опубликованных в научно-технических журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, или входящих в международную базу данных цитирования Scopus. Общее число публикаций – 23.

Личный вклад автора. Персональный вклад автора отражен в выносимых на защиту положениях, а вклад диссертанта в полученные результаты, после проведения семинара и знакомства с диссертационной работой, является определяющим.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов:

1. Изучение взаимосвязи химического и фазового составов (характеризуемых различными типами диаграмм, в том числе диаграммами состояния) с физическими, механическими, химическими и другими свойствами сплавов.

4. Теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий на изменение структуры и свойств металлов и сплавов, их моделирование и прогнозирование.

5. Теоретические и экспериментальные исследования механизмов деформации, влияния фазового состава и структуры на зарождение и распространение трещин при различных видах внешних воздействий, их моделирование и прогнозирование.

8. Исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях, выбор и рекомендация наиболее экономичных и надежных металлических материалов для конкретных технических назначений с целью сокращения металлоемкости, увеличения ресурса работы, повышения уровня заданных физических и химических характеристик деталей машин, механизмов, приборов и конструкций.

В целом диссертация представляет собой цельную, завершённую работу, написанную грамотным научно-техническим языком. Работа хорошо структурирована, отличается логикой изложения и четкой взаимосвязью её отдельных частей.

По результатам представленной работы необходимо сделать несколько замечаний:

1. Согласно данным главы 2 образцы для испытаний содержали водород на уровне 120-150 ppm. Возможно ли, что при более высокой концентрации водорода в образцах значения верхнего температурного предела и порогового коэффициента интенсивности напряжений для сплавов были бы другими?

2. Работа посвящена изучению параметров ЗГР, однако для контроля кинетики роста трещины не используются более чувствительные методы, такие как метод акустической эмиссии или разности потенциалов, широко применяемые в экспериментах на разрушение.

3. Одной из характеристик, определенных в работе, является энергия активации скорости ЗГР (Q), однако в работе не раскрыт её физический смысл.

4. Известно, что некоторое количество частиц гидридов после эксплуатации может иметь радиальное направление, однако в работе не отражено, как повлияет такая их ориентация на стойкость сплавов к ЗГР.

5. Не раскрыты использованные в главе 2 понятия «сопоставимые металлургические состояния», «близкое структурное состояние».

6. В главе 5 представлены результаты исследования изломов после испытаний на ЗГР с помощью лазерного конфокального микроскопа. Показано, что в сплаве Zircaloy-4 (без ниобия в составе), критическая длина гидроксида в вершине трещины уменьшается более

существенно, и наблюдение бороздок в образцах после испытаний по определению скорости роста трещины ЗГР с использованием световой микроскопии практически невозможно. Следовало бы пояснить, почему диссертант в этом случае не использовал для исследований приборы с большей разрешающей способностью, к примеру, сканирующий электронный микроскоп.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы Сабурова Н.С., выполненной на высоком экспериментальном и теоретическом уровне. В работе получены новые результаты, имеющие научную и практическую значимость, их достоверность не вызывает сомнений. Цель работы достигнута, задачи решены, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Диссертационная работа Сабурова Н.С. «Стойкость к замедленному гидриднему растрескиванию оболочек твэлов из сплавов циркония» соответствует специальности 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» и удовлетворяет требованиям «Положений о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете «МИСиС», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор диссертации Сабуров Николай Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Диссертация обсуждена и одобрена на экспертном научном семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) (протокол № 6 от 25.04.2024 г.), на котором присутствовало 19 специалистов (в том числе 3 доктора и 7 кандидатов наук) в области металловедения, термической обработки металлов и сплавов, физики плазмы, пучков заряженных частиц и их применения.

Полное название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический 2/3, тел.: +7(3822)491544, факс: +7(3822)492410

E-mail: contact@hcei.tsc.ru, адрес в интернете: <https://www.hcei.tsc.ru>

Отзыв составил:

Главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники

ИСЭ СО РАН, д.ф.-м.н., доцент Иванов Юрий Федорович

634055, г. Томск, пр. Академический 2/3, ИСЭ СО РАН,

тел.: +7(3822)491713, E-mail: Yu.F.Ivanov@opee.hcei.tsc.ru



Ю.Ф. Иванов

Подпись Иванова Ю.Ф. удостоверяю,

Учёный секретарь ИСЭ СО РАН, к.т.н.,

634055, г. Томск, пр. Академический 2/3,

ИСЭ СО РАН, тел.: +7(3822)491947,

E-mail: krysina@opee.hcei.tsc.ru



О.В. Крысина