

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук, Янилкина Алексея Витальевича на диссертацию Исинбаева Артура Радионовича «Эволюция и прогнозирование радиационной пористости в изделиях из аустенитной стали», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

**Актуальность диссертационной работы.** Развитие направления реакторов на быстрых нейтронах является необходимым для разработки и внедрения замкнутого ядерного топливного цикла, что актуально для атомной промышленности. Повышение ресурса и надежности конструкционных материалов ядерных реакторов при интенсивном нейтронном облучении, которое реализуется в реакторах на быстрых нейтронах требует решения ключевой проблемы - минимизации радиационного распухания материалов оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ).

В диссертации исследуется развитие радиационной пористости в аустенитных сталях под воздействием нейтронного облучения, что важно для безопасности и долговечности ядерных установок. Автор разрабатывает модели для прогнозирования ресурса оболочек ТВЭЛОВ и оптимизации их производства.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения предельного выгорания топлива путем увеличения ресурса оболочек ТВЭЛОВ и других компонентов реакторов. Представленные подходы формируют теоретическую основу для повышения эффективности атомных реакторов нового поколения.

**Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Основные положения диссертационной работы базируются на экспериментальных данных радиационной пористости и теоретических расчётов на основе статистической модели образования и миграции точечных дефектов.

Методы, использованные в исследовании, включают: экспериментальные исследования с применением различных методов электронной микроскопии;

гидростатического метода и моделирования радиационной пористости на основе численных методов расчета движения точечных дефектов.

Научные выводы автора обоснованы. Достоверность результатов подтверждена сравнением теоретических и экспериментальных данных.

**Достоверность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Достоверность основных научных результатов диссертации Исинбаева А. Р. обеспечивается выбранной методологией исследования, результатами анализа современных отечественных и зарубежных научных трудов по исследуемой проблематике.

Полученные результаты опубликованы в 7 статьях, в журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 6 статей в журналах, индексируемых в международной базе Scopus и Web of Science, а также докладывались на российских и международных конференциях и семинарах: Выездная сессия Научного Совета РАН по проблеме "Радиационная физика твердого тела" (г. Заречный 2019 г.), Научно-техническая школа-семинар по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов (г. Екатеринбург 2019 г.), 13-й Международный Уральский Семинар "Радиационная физика металлов и сплавов" (г. Кыштым, 2019 г.), X Всероссийская молодежная конференция "Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения" (г. Димитровград 2021 г.), Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред РНИКС-2021 (г. Екатеринбург 2021 г.), XXI Международная научно-техническая уральская школа-семинар металловедов – молодых ученых (п. Березит 2022 г.).

Алгоритм расчета критического диаметра прошел апробацию и использован на предприятии АО «Институт реакторных материалов», о чём свидетельствует соответствующая справка об использовании результатов диссертационной работы.

Все изложенное позволяет сделать вывод о достоверности положений, выносимых на защиту.

**Структура и основное содержание работы.** Диссертация изложена на 124 страницах, содержит 15 таблиц, 42 рисунка, 60 формул. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, основных выводов, списка сокращений и списка использованной литературы из 139 источников.

Во **введении** диссертации обоснована актуальность исследуемой темы, сформулированы цели и задачи работы, раскрыты научная новизна и практическая значимость. Описаны примененные методики исследования, определены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности полученных данных, представлена апробация результатов, а также обозначен личный вклад автора.

**В первой главе** анализируются аустенитные нержавеющие стали для оболочек твэлов в реакторах на быстрых нейтронах и физические принципы их радиационных повреждений при нейтронном облучении.

Особое внимание уделено влиянию структурных элементов на концентрацию точечных дефектов для моделирования набухания оболочек твэлов.

Обозреваются модели поведения точечных дефектов под облучением, от теории скоростей до современных методов машинного обучения, с верификацией на экспериментальных данных.

Рассмотрены микроскопические факторы повышения радиационной стойкости оболочек твэлов для продления срока их эксплуатации, описаны характеристики предельного и остаточного ресурсов твэлов и показана применимость модели прогнозирования ресурса.

**Во второй главе** представлены материалы и методы исследования. Изучались образцы аустенитных нержавеющих сталей 07X16N19M2Г2БТФР и 06X16N15M2Г2ТФР, применяемых для оболочек твэлов. Образцы вырезались из различных участков оболочек с разными условиями эксплуатации.

Стали получали методом двойного вакуумного переплава с горячей прокаткой. Изготовление твэльных труб включало финальную деформацию 20% методом холодного волочения.

Исследовались оболочки, изготовленные по стандартной и усовершенствованной технологиям термообработки. После облучения до дозы 100 сна проводились измерения плотности и электронно-микроскопические исследования.

Данные обрабатывались с использованием специализированного программного обеспечения, включая разработанную программу на Python.

**В третьей главе** представлены теоретические модели на основе статистической модели миграции точечных дефектов (ТД). Модель учитывает энергетические барьеры миграции дефектов и вероятности их поглощения стоками или рекомбинации, опираясь на допущения о поведении ТД в изотропной среде и их взаимодействии со стоками.

Ключевые характеристики радиационной пористости моделируются с использованием экспериментально определенных микроструктурных параметров, таких как плотность дислокаций, двойников и средние размеры зерен и пор. Уравнения баланса для вакансий и межузельных атомов описывают потоки ТД на различные стоки и рекомбинацию.

Параметры модели, включая энергии миграции, образования и связи дефектов со стоками, были оптимизированы для наилучшего соответствия экспериментальным данным. Эволюция пористости рассчитывается при непрерывном облучении с неизменными условиями.

Модернизация модели включает самосогласованный учет изменений пористости и концентраций ТД в процессе облучения. Разработан итерационный алгоритм для расчета критического диаметра поры, учитывающий объединение вакансий и трансмутационного гелия и стабилизацию давления внутри поры до выполнения определенного условия.

**В четвертой главе** описаны экспериментальные исследования образцов оболочек твэлов из стали 06X16H15M2Г2ТФР при различных дозах облучения и температурах. Полученные данные о микроструктуре материалов, включая распределение пор и наличие радиационно-индуцированных фаз, свидетельствуют о глубоком понимании автором процессов, происходящих в

материалах под воздействием облучения. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по критическому диаметру пор подтверждает адекватность разработанной модели.

**В пятой главе** представлены результаты прогнозирования ресурса оболочек твэлов из аустенитной стали и сравнительные расчеты для образцов, изготовленных из разных марок стали и по различным технологиям. Расчеты выполнены с помощью программы на Python по разработанному алгоритму с шагом в одну минуту.

Проведены микроструктурные исследования, определены характеристики радиационной пористости и критический диаметр пор, выполнено прогнозирование распухания. В качестве исходных параметров использованы пористость, плотность двойниковых границ и дислокаций, размер зерен. Вычислены временные зависимости пористости, показавшие пересечение порога при значении 0,13 отн. ед., что соответствует максимальному распуханию 15% и определяет предельный ресурс эксплуатации.

**В заключении** диссертационной работы сформулированы выводы и соответствующие перспективы развития работы.

#### **Научная новизна и практическая значимость**

Автор разработал самосогласованный алгоритм радиационного распухания на основе модели миграции точечных дефектов в аустенитных сталях, что существенно дополняет теоретическую базу в этой области. Установлены зависимости между концентрацией точечных дефектов и удельной площадью поверхности радиационных пор, позволяющие описать стадию стационарного распухания. Впервые рассчитан критический диаметр пор с учетом условий облучения и микроструктуры, что подтверждено экспериментальными данными на оболочках твэлов из аустенитной стали.

Практическая значимость работы заключается в разработке алгоритма для оценки безопасного эксплуатационного ресурса твэлов на основе характеристик радиационной пористости. Это позволяет прогнозировать срок остаточной и предельной эксплуатации твэлов в реакторах на быстрых

нейтронах, что способствует увеличению срока службы компонентов ядерных реакторов и повышению их безопасности. Кроме того, подтверждено, что однородность структурно-фазового состояния аустенитных сталей увеличивает радиационную стойкость оболочек твэлов, что имеет прямое практическое применение в атомной промышленности.

Вместе с тем по диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В качестве базовой модели была использована модель миграции точечных дефектов, на основе которой была разработана самосогласованная модель эволюции радиационной пористости. Вклад автора в базовую модель не был полноценно раскрыт в рамках диссертационной работы.

2. В раздел 3 приведена самосогласованная модель с уточненными энергетическими параметрами. Согласно тексту, были сделаны уточнения величин энергий миграции на основе описания результатов дилатометрических измерений. В диссертации отсутствует процедура подбора параметров, достигнутая точность описания экспериментальных данных. Также для подбора энергии миграции междоузлий требуется проведение специальных экспериментов при низких температурах.

3. Ключевым параметром для расчета критического размера является энергия поверхностного натяжения. Отсутствует информация об используемом значении данной величины. Также в модели отсутствует формула для расчета описания влияние гелия. В схеме на рисунке 3.3 лишь показано, что вычисляется давление в поре. Также отсутствует описание уравнения состояния для расчета давления гелия в зародыше.

### **Заключение**

Отмеченные недостатки и замечания не снижают в целом положительную оценку диссертационной работы Исинбаева Артура Радионовича на тему «Эволюция и прогнозирование радиационной пористости в изделиях из аустенитной стали», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, которая является законченной научно-квалификационной

работой, выполненной на высоком уровне. Достижение поставленной в диссертационном исследовании цели сопряжено с решением целого комплекса задач, имеющих теоретическое и прикладное значение. В результате диссертантом проведен большой объем экспериментальных исследований, теоретических расчетов.

Диссертация Исинбаева А. Р. «Эволюция и прогнозирование радиационной пористости в изделиях из аустенитной стали» соответствует научной специальности 2.6.17. Металловедение, т. к. область исследований соответствует паспорту специальности по пунктам 1, 5 и 13.

Автореферат диссертации А. Р. Исинбаева полностью соответствует тексту диссертации, отражает ее основное содержание, имеет логически грамотное построение и последовательность изложения результатов исследования.

По результатам диссертационного исследования автором опубликовано достаточное количество научных работ. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.9-14 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Исинбаев Артур Радионович, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

**Официальный оппонент:**

кандидат физико-математических наук,  
ФГУП «ВНИИА», г. Москва, начальник отдела  
компьютерного материаловедения  
подразделение 171,  
Янилкин Алексей Витальевич

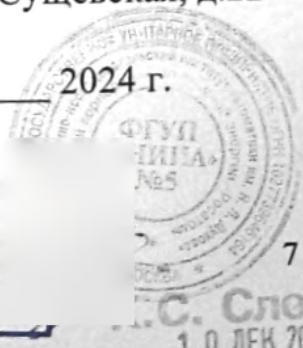
**Контактная информация:**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»,  
127030, г. Москва, ул. Сушевская, д.22

«10» декабря

2024 г.

**Личную подпись**  
*Янилкина А. В.*  
Заверяю Нач канцелярии  
ФГУП «ВНИИА» *С.С.*



С. Слонов  
10 ДЕК 2024