

СОВЕТ 8/9

**Высокотехнологический научно-исследовательский
институт неорганических материалов имени академика
А.А.Бочвара (АО «ВНИИНМ»).**

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНТА

доктора физико-математических наук, профессора, Чернова Вячеслава Михайловича 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. Современное развитие атомной энергетической промышленности требует увеличения ресурса, повышения надежности и экономической эффективности ядерных быстрых реакторов. Такие характеристики реакторов (эффективная работоспособность, повышение длительности топливных кампаний) в значительной (определяющей) мере зависят от используемых конструкционных материалов в конструкциях их активных зон (оболочек твэлов). Одним из современных конструкционных материалов, используемых в активных зонах действующих и проектируемых быстрых реакторов, являются аустенитные хромоникелевые стали. Для таких сталей ограничивающим фактором их применения является высокое радиационное распухание, превышающее его допустимый уровень при эксплуатации реакторов. Определение причин, физических механизмов и разработка обоснованных моделей высокодозного радиационного распухания аустенитных сталей всё ещё остаётся научно и практически важной, но недостаточно изученной проблемой. Ещё нет физически обоснованного знания и моделей распухания аустенитных сталей (оболочек твэлов) при высокодозных облучениях в быстрых ядерных реакторах.

В рецензируемой диссертации проведено актуальное и достаточное научное и практически важное исследование причин и механизмов радиационного распухания аустенитных хромо-никелевых сталей (на примере двух типов практически используемых сталей 07X16H19M2Г2БТФР и 06X16H15M2Г2ТФР), что определяет важное значение полученных в ней результатов как теоретическую основу для дальнейшего повышения эффективности эксплуатации действующих и проектируемых быстрых энергетических реакторов (длительности их топливных кампаний).

В диссертационной работе достаточно хорошо и обосновано поставлена научная задача об определении (уточнении имеющихся) физических механизмов зарождения и эволюции радиационной пористости в аустенитных сталях в зависимости от их композиционных составов, структурно-фазовых состояний и режимов облучения. Хорошо обоснована необходимость решения поставленной задачи, результаты которого важны для дальнейшего повышения эффективности и безопасности эксплуатации быстрых ядерных установок. Достаточно обоснованы и исследованы физические механизмы распухания исследованных двух типов аустенитных сталей, используемых в действующих и планируемых быстрых реакторах и построены обоснованные модели для прогнозирования их эксплуатационного ресурса (длительностей топливных кампаний, работоспособности оболочек твэлов).

Актуальность исследования обусловлена необходимостью дальнейшего повышения в реакторах уровня выгорания топлива, что возможно при увеличении ресурса компонентов реакторов (оболочек твэлов). Представленные подходы формируют теоретическую основу для дальнейшего повышения эффективности эксплуатации действующих и проектируемых ядерных быстрых энергетических реакторов.

Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации. Основные положения диссертационной работы базируются на обоснованной необходимости

ориентированных фундаментальных исследований, применения современных методов теоретического и экспериментального анализов. Диссертантом предложена и достаточно обоснована самосогласованная модель миграции радиационных точечных дефектов, которая учитывает характеристики микроструктуры сталей и описывает эволюцию радиационной пористости.

В диссертации обоснован и эффективно использован комплекс экспериментальных, теоретических и моделирующих исследований, включая:

- высокоразрешающие экспериментальные исследования микроструктуры облученных сталей с применением просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии;

- гидростатические методы измерения пористости облученных сталей;

- разработка моделей и численное моделирование зарождения и эволюции радиационной пористости сталей.

Научные выводы автора достаточно обоснованы. Достоверность результатов подтверждена хорошим согласованием полученных расчетных данных с экспериментальными, что свидетельствует о достаточной надежности предложенной методики и полученных результатов для изучения радиационной пористости аустенитных сталей.

Достоверность положений, выводов, результатов и рекомендаций, сформулированных в диссертации достаточно обоснованы, что обеспечивается выбранной и обоснованной методологией исследования, хорошим знанием исследуемой проблемы, её имеющихся результатов и перспектив развития.

Полученные результаты опубликованы в 7 научных 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. Ряд результатов диссертации (алгоритм и программа расчёта критического диаметра пор и пористости сталей) прошел апробацию и

использован на предприятии АО «Институт реакторных материалов», о чём свидетельствует соответствующая справка об использовании результатов диссертационной работы.

Все изложенное позволяет сделать заключение об обоснованности, достоверности и практической важности положений и результатов, выносимых на защиту.

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

Во **Введении** хорошо обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы её цели и задачи, раскрыты научная новизна и практическая значимость, описаны примененные методики исследования, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности полученных данных, апробация результатов, а также определён значимый личный вклад автора.

В первой главе представлены современные данные о нержавеющих сталях аустенитного хромоникелевого класса, применяемых для оболочек твэлов в быстрых реакторах. Проведен литературный анализ радиационных повреждений материалов. Сделан обоснованный акцент на определение роли структурных элементов (границ зерен, дислокаций, двойников и пор) в формировании концентрации радиационных точечных дефектов, что является ключевым параметром для построения моделей и моделирования распухания.

Сделанный обзор проблемы распухания аустенитных сталей достаточно хорошо охватывает эту проблему, включая механизмы и модели образования и поведения радиационных дефектов с использованием компьютерного моделирования и верификации модели миграции дефектов на основе полученных экспериментальных данных. Рассмотрены факторы повышения радиационной стойкости сталей (оболочек твэлов) и характеристики их

эксплуатационного (максимальный безопасный срок службы) и остаточного ресурса (количество эффективных суток эксплуатации после планового извлечения из реактора). Хорошо подтверждена применимость созданной в диссертации модели прогнозирования эксплуатационного ресурса исследованных сталей (оболочек твэлов).

Во **второй главе** приводятся данные об исследованных объектах из выбранных сталей (07X16N19M2Г2БТФР, 06X16N15M2Г2ТФР), применяемых для оболочек твэлов в реакторах на быстрых нейтронах (действующих и проектируемых). Образцы для исследований получены из сталей после их реакторного облучения при различных условиях облучения (температурах, дозах). Подробно описаны и достаточно обоснованы использованные экспериментальные методы исследований (пробоподготовка образцов, гидростатический метод, электронная микроскопия), их аппаратурные и методические особенности.

В **третьей главе** представлена разработанная модель миграции точечных дефектов (ТД), основанная на вероятностных подходах и энергетических характеристиках. Модель обоснованно учитывает энергетические барьеры миграции ТД, их рекомбинацию и взаимодействие со стоками разного типа и параметров (плотности дислокаций, границ зерен, пор). Энергетические характеристики ТД, включая энергии их миграции и взаимодействия со стоками разной природы, определены или экспериментально или обоснованно взяты из литературы. Полученные основные уравнения и модели хорошо описывают характеристики формирования и эволюции пор и пористости в целом (изменения диаметра и концентрации пор, потоки ТД). Важен предложенный алгоритм расчета критического диаметра пор, при котором их рост стабилизируется за счет поступления вакансий. Предложенная модель, численное моделирование и полученные результаты хорошо соответствуют полученным в диссертации экспериментальным данным.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований микроструктуры оболочек твэлов из аустенитных сталей после их эксплуатации в реакторе. Для образцов с разными дозами и температурами облучения исследована их пористость и характеристики, включая размеры зерен, плотности дефектов (двойников, дислокаций), распределение по размерам пор. Важным результатом является обнаружение и характеристики двух систем пор: мелких (диаметром 5–10 нм), равномерно распределенных по матрице, и более крупных, ассоциированных с дислокациями и вторичными фазами (G-фаза, $M_{23}C_6$). Проведенные расчеты потоков вакансий в поры подтвердили теоретический результат, что скорость роста пор достигает стационарного уровня (в согласовании с имеющимися литературными данными).

Экспериментально и теоретически определены критические диаметры пор, за пределами которых их рост обусловлен только поступлением вакансий. Верификация модели миграции точечных дефектов показала ее соответствие экспериментальным данным, подтверждая применимость модели для описания радиационного распухания исследованных сталей.

В **пятой главе** выполнено прогнозирование ресурса оболочек твэлов из исследованных сталей (07X16H19M2Г2БТР, 06X16H15M2Г2ТФР), изготовленных по двум технологиям (стандартной, улучшенной). Обоснована предложенная модель распухания и её численное моделирование с учетом параметров радиационной структуры (пористости, плотности двойниковых границ, дислокаций и размеров зерен).

Для одной из исследованных стали (07X16H19M2Г2БТР стандартной технологии) предельный ресурс составил 928 эффективных суток, включая остаточный ресурс 138 эффективных суток. Для улучшенной технологии этот показатель увеличился до 1072 эффективных суток с остаточным ресурсом 192 эффективных суток.

Для другой исследованной стали (06X16H15M2Г2ТФР стандартной технологии) предельный ресурс составил 627 эффективных суток, а для улучшенной технологии – 764 эффективных суток.

Сделанный прогноз дальнейшего распухания сталей подтвердил, что улучшенные технологии увеличивают ресурс эксплуатации оболочек твэлов из исследованных сталей.

В **заключении** диссертационной работы хорошо сформулированы основные выводы, их научная и практическая важность и перспективы дальнейшей работы.

Научная новизна и практическая значимость

В целом, полученные в диссертации результаты отличаются обоснованной научной постановкой, значительной новизной и позволяют выявить возможности их практического использования. Исследованная радиационная пористость сталей и предложенные модели формирования и развития пористости с учётом композиционных составов и структурно-фазовых состояний сталей и условий облучения, характеристик микроструктуры, критического диаметра пор, подтвержден экспериментально определенными значениями. Представляют интерес и важность результаты по влиянию исходной структуры сталей (оболочек твэлов) на величину их остаточного и предельного ресурсов эксплуатации. Достоинством диссертации является использование большого количества взаимно дополняющих современных структурно-чувствительных методик исследований в хороших аппаратурных вариантах.

Необходимо сделать некоторые замечания по выполненной диссертационной работе, являющиеся в значительной мере пожеланиями для её дальнейшего продолжения. Необходимо более детальное определение:

1. Особенности и различия механизмов зарождения пор, их эволюции (распухания) и уровней распухания в двух исследованных сталях разных композиционных составов и возможности дальнейшей модификации их

композиционных составов, режимов термомеханических обработок для уменьшения распухания.

2. Влияние радиационно-индуцированных фаз в облучаемых сталях на скорость формирования и роста пор и пористости в целом.

3. Влияние начальных структурно-фазовых состояний сталей и условий их облучения (интенсивности, температурные градиенты) на скорости зарождения и эволюцию в них радиационной пористости.

Заключение

В целом выполненная диссертационная работа Исинбаева Артура Радионовича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на достаточно высоком научном уровне. Достижение поставленных целей в диссертационном исследовании выполнено. В диссертации успешно решён согласованный в рамках единой тематики комплекс достаточно обоснованных теоретических и экспериментальных научных исследований, результаты которых имеют значительную новизну, важное научное и практическое значение.

Диссертация Исинбаева А. Р. «Эволюция и прогнозирование радиационной пористости в изделиях из аустенитной стали» соответствует научной специальности 2.6.17. Материаловедение и соответствует паспорту специальности по пунктам:

1. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций (химической, нефтехимической, энергетической, машиностроительной, легкой, текстильной, строительной);

5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и

функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды;

13. Развитие методов прогнозирования и оценка остаточного ресурса металлических, неметаллических и композиционных материалов.

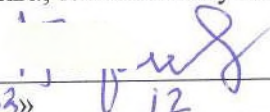
Автореферат диссертации А. Р. Исинбаева полностью соответствует тексту диссертации, отражает ее основное содержание, имеет логически грамотное построение и обоснованную последовательность получения и изложения результатов исследования.

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:

доктор физико-математических наук, профессор,
АО «ВНИИНМ», г. Москва, главный научный сотрудник отдела П-320


«03» 12 _____ Чернов Вячеслав Михайлович
2024 г.

Контактная информация:

Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»).

Адрес: АО «ВНИИНМ», 123098, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а,
Э-почта: VMChernov@bochvar.ru

Первый зам. Генерального директора
- директор по развитию

Адрес: АО «ВНИИНМ», 123098, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а.



А.А. Перцев