

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи



Исинбаев Артур Радионович

**ЭВОЛЮЦИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ
ПОРИСТОСТИ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ**

2.6.17. Материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена в лаборатории конструкционных материалов и нанотехнологий АО «Институт реакторных материалов» и на кафедре термообработки и физики металлов Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор,
ЛОБАНОВ Михаил Львович

Научный консультант: – доктор технических наук,
КОЗЛОВ Александр Владимирович

Официальные оппоненты: – **ЧЕРНОВ Вячеслав Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор,
АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», г. Москва, главный научный сотрудник отдела П-320;

– **ДРЕМОВ Владимир Владимирович**, доктор физико-математических наук, ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Челябинская обл., г. Снежинск, заместитель начальника отделения теоретической физики и прикладной математики;

– **ЯНИЛКИН Алексей Витальевич**, кандидат физико-математических наук, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова», г. Москва, начальник отдела компьютерного материаловедения, подразделения 171.

Защита диссертации состоится «20» декабря 2024 г. в 16:30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.01.04 по адресу: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=6557>.

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ольга Владимировна Селиванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение эффективности атомной отрасли требует постоянного совершенствования материалов и технологий, используемых в ядерных реакторах. Одной из ключевых проблем, с которой сталкиваются инженеры и ученые в этой области, является влияние нейтронного облучения на свойства материалов, в частности, на оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), из аустенитных сталей.

Исследования влияния нейтронного облучения на структуру и свойства материалов имеют большое значение для обеспечения безопасности и долговечности ядерных установок. Под воздействием нейтронов в оболочках ТВЭЛов происходят структурные изменения, включая перераспределение элементов. В частности, в реакторах на быстрых нейтронах, на определенном этапе облучения инициируется формирование газонаполненных полостей – мелких пор, содержащих трансмутационный He. В дальнейшем эти «пузырьки», продолжая захватывать генерируемые облучением избыточные вакансии, перерастают в крупные поры. Этот процесс, известный как распухание, приводит к увеличению общего объема облучаемого материала. Распухание оболочек ТВЭЛов вызывает увеличение их диаметра, что, в свою очередь, уменьшает зазоры между ними в тепловыделяющей сборке (ТВС), через которые проходит жидкий натриевый теплоноситель. Соответственно, уменьшается теплосъём, что является одним из факторов, ограничивающих срок службы ТВС.

Точечные дефекты (ТД) кристаллического строения материала, такие как вакансии, межузельные атомы и их комплексы, оказывают существенное влияние на появление и развитие пор внутри оболочек ТВЭЛов. Возникновение и перераспределение ТД, а также эволюция пор во многом зависит от химического состава стали и ее микроструктуры, включая границы зерен, дислокации и их скопления, двойники (отжига и деформации), и образовавшиеся под действием облучения вторичные дисперсные фазы.

Данная работа посвящена исследованию и моделированию эволюции радиационной пористости в нержавеющей стали аустенитного класса для прогнозирования эксплуатационного ресурса оболочек ТВЭЛов.

Результаты исследования имеют практическое применение, для прогнозирования остаточного и предельного ресурса оболочек ТВЭЛов и поиска путей его повышения. Кроме того, они могут быть использованы при разработке новых материалов, способных продлить срок службы существующих и разрабатываемых установок. Углубленное понимание процессов распухания также способствует развитию фундаментальных

знаний о воздействии нейтронного облучения на материалы, что может найти применение и в других областях науки и техники, что определяет ее актуальность.

Степень разработанности темы. С середины XX века учёные проявляли значительный интерес к изучению воздействия нейтронного облучения на структуру и свойства материалов. Первые попытки систематизировать влияние нейтронов на структуру сталей были предприняты в начале 60-х годов прошлого века. Работы таких учёных, как А. И. Захаров и J. C. Slater, заложили основы для понимания изменений микроструктуры и механических свойств материалов под воздействием нейтронов.

В последующие десятилетия исследования углубились, охватывая изучение процессов облучения и их влияния на микроструктуру материалов. Важный вклад в эту область внесли исследования P. J. Maziasz и S. J. Zinkle, которые расширили понимание фазовых превращений и механических свойств материалов под воздействием нейтронного облучения.

В последнее десятилетие исследования в области радиационного материаловедения аустенитных сталей при действии нейтронного облучения получили новый импульс, благодаря развитию современных методов анализа, таких как компьютерное моделирование и структурная диагностика на микроуровне.

Микроструктура сталей после облучения нейтронами, и, соответственно, физические, механические и химические свойства существенно отличаются от их характеристик в исходном состоянии. Большинство исследователей связывают эти особенности с кинетическим взаимодействием нейтронов с атомами стали, что приводит к образованию первично выбитых атомов с большой энергией и к каскадным столкновениям, сопровождающимся образованием избыточных ТД. Однако детальное описание поведения этих дефектов и их комплексов в сталях до сих пор полностью не разработано и остаётся предметом научных исследований и дискуссий.

Поскольку исходная структура материала, в частности её однородность, оказывает значительное влияние на стойкость к радиационному распуханию, технологии производства оболочек твэлов для использования в реакторах на быстрых нейтронах постоянно совершенствуются.

Мотивирующим фактором для проведения работы явилась необходимость модельной оценки остаточного ресурса оболочек твэлов, отработавших в реакторах на быстрых нейтронах. Повышение ресурса эксплуатации должно сопровождаться работами материаловедческих организаций для обоснования долговечности материалов. Эти мероприятия направлены на увеличение выгорания топлива в ТВС.

Объектом исследования работы являются материалы оболочек твэлов после эксплуатации в реакторе БН-600 до достижения различных повреждающих доз, вызвавших структурные изменения и радиационное набухание аустенитных сталей. Существенный вклад в экспериментальные и теоретические исследования по решению задач по представленному предмету внесли исследователи: Козлов А. В., Портных И. А., Пастухов В. И., Панченко В. Л., Чернов В. М., Дремов В. В., Янилкин А. В., Леонтьева-Смирнова М. В. и другие.

Предметом исследования данной работы является выявление закономерностей радиационного набухания аустенитных сталей при их облучении в реакторах на быстрых нейтронах и их использование для прогнозирования поведения материалов конструкций реакторов на быстрых нейтронах.

Целью работы является моделирование эволюции радиационной пористости в аустенитных сталях под воздействием быстрых нейтронов для разработки аппарата оценки эксплуатационного ресурса оболочек твэлов из аустенитных сталей, лимитированного процессом набухания.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать самосогласованную модель эволюции радиационной пористости в аустенитных сталях на основе описания миграции точечных дефектов с уточненными энергетическими параметрами.

2. Описать зависимость концентрации вакансий и межузельных атомов от характеристик дислокационной и зеренной структуры и характеристик радиационной пористости в аустенитных сталях при радиационном облучении.

3. Смоделировать эволюцию радиационной пористости, учитывающую изменение ее характеристик в аустенитных сталях в процессе облучения, в зависимости от температуры и дозы нейтронного облучения.

4. Экспериментально и теоретически определить критический диаметр радиационных пор, при котором их рост обусловлен притоком вакансий, без необходимости поступления в них атомов гелия. Оценить соответствие численной модели реальным процессам, реализующимся в материале.

5. Разработать алгоритм для оценки остаточного и предельного ресурса безопасной эксплуатации твэлов на основе анализа микроструктуры оболочки, радиационной пористости и условий нейтронного облучения (лимитированного набуханием).

Научная новизна и теоретическая значимость

В ходе проведенных исследований были промоделированы процессы эволюции радиационной пористости при нейтронном облучении с использованием вычислительных методов. Модель была верифицирована

на основе экспериментальных результатов. Основные достижения работы включают следующее:

1. Разработан самосогласованный алгоритм радиационного набухания с применением модели миграции точечных дефектов в аустенитных сталях.

2. Установлены зависимости между изменениями концентрации точечных дефектов и удельной площадью поверхности радиационных пор в аустенитных сталях. Показано, что при достижении площади поверхности пор определенного критического значения, потоки точечных дефектов в поры становятся практически постоянными, что характеризует стадию стационарного набухания

3. Впервые рассчитанный с учетом условий облучения и индивидуальных характеристик микроструктуры, критический диаметр пор, подтвержден экспериментально определенными значениями, полученными на оболочках ТВЭЛов из аустенитной стали.

Практическая значимость

Исследование процессов набухания оболочек ТВЭЛов из аустенитных сталей под воздействием нейтронного облучения и температуры имеет важное практическое значение для развития атомной промышленности и повышения эффективности работы атомных быстрых реакторов. Полученные результаты вносят значительный вклад в понимание поведения материалов в условиях радиационного воздействия, что критически важно для обоснования безопасности, долгосрочной стабильности и надёжности атомных энергетических установок.

В рамках данной работы были достигнуты следующие практически значимые результаты:

1. Разработан алгоритм оценки количественного определения безопасного эксплуатационного ресурса с использованием характеристик радиационной пористости, позволяющий оценить срок остаточной и предельной эксплуатации ТВЭЛов реакторов на быстрых нейтронах (лимитированный процессом набухания). Это позволит, в перспективе, увеличить срок эксплуатации компонентов ядерных реакторов и обеспечить их безопасное использование. Предложенный алгоритм оценки был успешно протестирован и использован в научно-исследовательской работе «Разработка, верификация модели и прогноз набухания сплавов: ферритно-мартенситных сталей применительно к ЭК181, ЧС139 и аустенитных сталей применительно к ЭК164, ЧС68»

2. Подтверждено, что повышение однородности структурно-фазового состояния аустенитных сталей уменьшает скорость роста радиационных пор при нейтронном облучении, и, соответственно, увеличивает радиационную стойкость оболочек ТВЭЛов.

Методология и методы исследования. В данной работе был использован системный подход, включающий как экспериментальное

исследование, так и теоретическое моделирование процессов набухания аустенитных сталей под воздействием нейтронного облучения.

Проведены комплексные эксперименты на образцах оболочек твэлов из аустенитных сталей, подвергнутых нейтронному облучению в реакторе на быстрых нейтронах, включающие современные методы, такие как просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия. С использованием методов обработки изображений и анализа данных, были определены параметры микроструктуры, такие как удельная площадь границ зерен, плотность дислокаций, плотность двойников, удельная площадь поверхности пор, по которым оценивались изменения, происходившие в облучаемом материале.

Полученные экспериментальные данные в дальнейшем использовались для численного моделирования процессов радиационного набухания, разработки методики и алгоритма прогнозирования эксплуатационного ресурса твэлов с оболочками из аустенитных сталей в реакторах на быстрых нейтронах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Самосогласованная модель эволюции радиационной пористости в аустенитных сталях на основе описания миграции ТД с уточненными энергетическими параметрами и учетом влияния характеристик микроструктуры.

2. Результаты исследования зависимости концентраций вакансий и межузельных атомов, а также скорость изменения среднего диаметра пор от их удельной площади поверхности.

3. Верифицированный алгоритм прогнозирования набухания аустенитных сталей под воздействием нейтронного облучения.

4. Результаты расчета эксплуатационного ресурса оболочек твэлов из аустенитных сталей.

5. Результаты исследования влияния исходного структурно-фазового состояния аустенитных сталей на величину ресурса безопасной эксплуатации твэла.

Степень достоверности результатов подтверждена большим объемом экспериментальных исследований радиационной пористости и характеристик микроструктуры, проведенных на современном аттестованном и поверенном оборудовании, по аттестованным (или апробированным) взаимодополняющим методикам и воспроизводимостью результатов. Полученные в работе результаты хорошо согласуются с опубликованными по теме проведенных исследований данными и дополняют их.

Апробация результатов работы. Основные результаты и материалы работы представлялись на следующих 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.).

Исследования, описанные в данной работе, проведены с использованием исследовательского оборудования акционерного общества «Институт реакторных материалов».

Публикации. По теме работы опубликовано 11 научных трудов, из них 7 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из которых 6 статей в зарубежных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus.

Личный вклад автора. Результаты работ, представленные в диссертации, получены самостоятельно или совместно с соавторами публикаций. Автор принимал участие в проведении экспериментов, расчетов, а также анализе полученных результатов и формулировке выводов. Обсуждение и анализ полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Автор выражает благодарность за существенную помощь в постановке цели и задачей исследования, а также обсуждение результатов бывшему сотруднику АО «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ») доктору технических наук Козлову Александру Владимировичу. Также выражает благодарность за помощь в выполнении исследований сотрудникам АО «ИРМ» канд. физ.-мат. наук Портных Ирине Александровне, канд. техн. наук Пастухову Владимиру Ивановичу, канд. техн. наук Аверину Сергею Александровичу и Панченко Валерию Леонидовичу.

Структура и объем диссертации. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность и продемонстрирована степень разработанности темы диссертационной работы. Описаны объект, предмет, цели и задачи исследования, а также представлено мнение автора о научной новизне, теоретической и практической значимости работы.

Кроме того, изложены положения, выносимые на защиту, и обоснована степень достоверности результатов. Приведен вклад автора в проведенное исследование и результаты научной деятельности.

В первой главе рассмотрены современные представления о нержавеющих сталях аустенитного класса, используемых в качестве материала для оболочек твэлов в составе тепловыделяющей сборки в реакторах на быстрых нейтронах. Проведен анализ литературы, касающийся физических принципов радиационных повреждений материалов при облучении нейтронами. Особое внимание уделено влиянию различных структурных элементов, таких как границы зерен, дислокации, двойниковые границы и поры, на концентрацию точечных дефектов с целью выявления ключевых параметров, необходимых для моделирования процесса набухания оболочек твэлов из аустенитной стали.

Выполнен обзор моделей, описывающих поведение точечных дефектов под воздействием облучения, начиная от ранних теорий («теория или уравнения скоростей») до современных подходов (с использованием методов машинного обучения). Особое внимание уделено верификации теории скоростей и модели миграции точечных дефектов [1] на основе экспериментальных данных, полученных на образцах аустенитных сталей после облучения.

Рассмотрены микроскопические факторы, влияющие на увеличение радиационной стойкости оболочек твэлов из аустенитной стали, с целью продления срока их эксплуатации. Описаны характеристики предельного и остаточного эксплуатационных ресурсов твэлов: предельный ресурс оболочки твэла определяется как максимальный период их безопасной эксплуатации при заданных условиях, а остаточный ресурс – как количество эффективных суток (ЭС) эксплуатации твэла после извлечения из реактора. Показана применимость модели прогнозирования эксплуатационного ресурса [2].

Во второй главе описаны материалы и методы исследования. Материалами исследования в данной работе являлись образцы из аустенитных нержавеющих сталей, 07X16N19M2G2BTФР (ЭК-164) и 06X16N15M2G2TФР (ЧС-68), используемых в атомной промышленности в качестве оболочек твэлов. Марочные химические составы приведены в таблице 1. Для исследования из разных участков оболочек твэлов вырезались образцы, которые при эксплуатации изделия характеризовались различными температурами и величинами повреждающей дозы.

Стали для тонкостенных труб получались методом двойного вакуумного переплава, обеспечивающего низкое содержание вредных примесей и газов. Кристаллизация слитков происходила в атмосфере He. Слитки подвергались гомогенизирующему отжигу при 1200 °С в течение 8

часов с последующей горячей прокаткой на предготовый размер трубной заготовки.

Таблица 1 – Химический состав сталей 07X16H19M2Г2БТФР и 06X16H15M2Г2ТФР, мас. % [3]

Сталь	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Nb	Ti	V
07X16H19M2Г2БТФР	0,05-0,09	15,0-16,5	18,0-19,5	2,0-2,5	1,5-2,0	0,1-0,4	0,25-0,45	0,15 расчет
06X16H15M2Г2ТФР	0,05-0,08	15,5-17,0	14,0-15,5	1,9-2,5	-	-	0,2-0,5	0,1-0,3
Сталь	B	Co	Si	P	S	N	Fe	Ce
07X16H19M2Г2БТФР	0,001-0,005	-	0,3-0,6	0,010-0,025	-	-	ос-нова	0,15 расчет
06X16H15M2Г2ТФР	0,001-0,005	≤0,02	0,3-0,6	≤0,02	≤0,012	≤0,02	ос-нова	-

Деформационно-термическая схема изготовления твэльных труб из стальных заготовок для создания требуемой заключительной деформации 20% с использованием холодного короткооправочного волочения приведена в таблице 2. Деформация на промежуточных размерах осуществлялась на станах холодной дробной прокатки труб.

Таблица 2 – Деформационно-термическая схема изготовления твэльных труб из стали 06X16H15M2Г2ТФР и 07X16H19M2Г2БТР [4]

№ п/п	Размер изделия, мм	Операция
0	∅65	Горячекатаный пруток
1	∅57x8,5	Обточка, сверление, расточка
2	∅42x4,8	Прокатка, термообработка
3	∅28x2,6	Прокатка, термообработка
4	∅18x1,5	Прокатка, термообработка
5	∅11,6x0,82	Прокатка, термообработка
6	∅7,2x0,48	Прокатка, термообработка
7	∅6,9x0,4	короткооправочное волочение, степень деформации 20%

В данной работе были исследованы оболочки твэлов изготовленные по различным технологическим режимам. Под стандартной технологией подразумевается процесс термической обработки на всех размерах изделия с использованием инерционного нагрева в вакуумной печи VSQ. Температурный режим вакуумных печей характеризовался сравнительно медленным нагревом в области температур рекристаллизации (скорость нагрева ~ 0,5–2 °C/с) и выдержкой 20 минут при 1060 °C.

Под усовершенствованной технологией подразумевается процесс с использованием для термообработки на размерах ∅42x4,8 мм и ∅28x2,6 мм печи VSQ и на других промежуточных размерах, в том числе на предготовом (∅7,2x0,48), в проходной печи форсированного нагрева АТОН. Температура нагрева в установке АТОН поддерживалась в

пределах 1180 ± 10 °С; скорость прохождения оболочки твэла через зону нагрева после финальной холодной деформации составляла 0,0091 м/с.

Твэлы с оболочками из аустенитной стали эксплуатировались в активной зоне реактора на быстрых нейтронах до достижения повреждающей дозы 100 сна. После облучения изделия доставлялись в АО «ИРМ», где проводились первичные исследования, включающие внешний осмотр, разделку, измерение наружного диаметра, электропотенциальное сканирование и гамма-спектрометрический анализ. На основе данных по режимам эксплуатации различных участков оболочек твэлов разрабатывалась схема разделки для вырезки кольцевых образцов для дальнейших исследований.

На кольцевых образцах гидростатическим методом измерялась плотность с использованием аналитических весов Cubis MSU, при погрешности взвешивания не более 0,1 мг. По полученным результатам рассчитывались распухание и пористость участков материала оболочек твэлов. Для гидростатического взвешивания применялся специализированный набор «Sartorius» YDK 01.

Для исследований на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) из кольцевых образцов высотой 3,2 мм вырезались сегменты длиной около 3 мм. Образцы запрессовывались в электропроводящую смолу на установке Struers CitoPress, затем шлифовались и полировались на установке Struers TegraPol 15. Электронно-микроскопические исследования и рентгеноспектральный микроанализ проводились на электронном микроскопе TESCAN Mira3 LMU, оснащенной системой энергодисперсионного анализа x-Act 6 фирмы Oxford Instruments. Изображения структурного состояния получались с использованием детекторов вторичных и отраженных электронов, обеспечивающих топографический и атомный контраст соответственно.

Обработка дифракционных карт производилась с использованием программного обеспечения HKL CHANNEL 5 TANGO. Средний диаметр зерна определялся методом отрезков по СЭМ-изображениям с контрастом, в соответствии ГОСТ Р ИСО 13067-2016.

Для исследований на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) сегменты толщиной 0,010–0,12 мм подготавливались на установке двухструйной электрополировки Twin Jet (Fischione) в охлаждаемом электролите (90% CH_3COOH + 10% HClO_4) при напряжении 30–35 В, с последующей очисткой ионными пучками аргона на установке TEM Mill 1050 (Fischione). Микроскоп оснащен системой Super-X EDS (Thermo Fisher Scientific) для анализа элементного состава методом детектирования характеристического рентгеновского излучения, с пределом обнаружения ~0,1 масс. %. Локальный элементный анализ в сочетании с быстрым преобразованием Фурье позволял идентифицировать мелкодисперсные вторые фазы.

Толщина фольги измерялась с использованием спектрометрии характеристических потерь энергии электронов. Плотность дислокаций и двойниковых границ определялась методом секущих Смита и Гуттмана на светлопольных и темнопольных изображениях. Анализ пористости, распределения пор и гистограмм проводился с помощью программного обеспечения SIAMS Photolab 4.2.3.551.

Для расчетов и визуализации результатов была разработана программа на языке Python с использованием библиотек pandas и matplotlib. Для решения систем уравнений с обратной связью применялся метод конечных разностей.

В **третьей главе** описаны разработанные теоретические модели. В качестве базовой модели использовалась статистическая модель миграции точечных дефектов, разработанная в АО «ИРМ» [1, 2]. Модель миграции ТД основана на описании вероятностных представлений и энергетических характеристик перемещений дефектов в материалах. Модель учитывает энергетические барьеры, которые дефекты должны преодолеть для миграции, и вероятность их поглощения стоками или рекомбинации. В рамках модели присутствуют следующие допущения: 1) процесс миграции ТД описывается через преодоление энергетических барьеров, вероятность перескока через которые подчиняется распределению Больцмана; 2) в модели рассматривается миграция отдельных ТД с учетом их рекомбинации; 3) среда, в которой происходит миграция ТД, является изотропной, пока ТД ни попадет в область прилегающую к стоку (взаимодействие со стоком), из которой он с определенной вероятностью может попасть на сток или удалиться из нее; 4) для каждого вида стоков вводится энергия взаимодействия ТД с ним, через которую выражаются эти вероятности.

В рамках модели миграции ТД были использованы ключевые характеристики радиационной пористости, с использованием экспериментально определенных характеристик микроструктуры: плотности дислокаций и двойников, средние размеры зерен и пор. Вероятность поглощения ТД определенным видом стоков зависит от его удельного объема в материале и энергетических характеристик взаимодействия со стоком. Для достижения точечным дефектом стока рассчитывается время диффузии до каждого из стоков. С его использованием рассчитывается поток каждого вида ТД на сток. Уравнения баланса для вакансий (1) и межузельных атомов (2) с их потоками можно записать в виде [1]:

$$G_v + G_{term} = c_v \cdot (j_{vd} + j_{vg} + j_{vt} + j_{vv}) + c_v \cdot c_i \cdot j_{vr}, \quad (1)$$

$$G_i = c_i \cdot (j_{id} + j_{ig} + j_{it} + j_{iv}) + c_v \cdot c_i \cdot j_{vr}, \quad (2)$$

где c_v , c_i – относительные концентрации вакансий и межузельных атомов; G_v , G_i – интенсивность образования вакансий и межузельных атомов облучением, соответственно; G_{term} – количество образующихся

термических вакансий; J_{vd} , J_{id} , J_{vg} , J_{ig} , J_{vt} , J_{it} , J_{vv} , J_{iv} , J_{vr} – потоки вакансий или межузельных атомов на дислокации, границы зерен, границы двойников, поверхность пор и рекомбинацию. Термической генерацией межузельных атомов в выражении (2) пренебрегали из-за большой энергии их образования, в стали при рабочих температурах оболочек в реакторе БН-600. Выражения для потоков ТД к стокам имеют одинаковую структуру и включают в себя параметр решетки, частоту Дебая, вероятность перескока в соседнее положение, вероятность поглощения стоком ТД и характеристику самого стока (плотности двойниковых границ и дислокаций, размер зерен, площадь пор).

Определяющими параметрами в рамках модели миграции ТД являются энергии миграции, энергии образования и связи дефектов со стоками. Часть этих характеристик была заимствована из литературных данных, а часть (например, энергии миграции) определялась по результатам проведенных в ИРМ экспериментальных исследований. В рамках работы был применен метод параметрической оптимизации. При этом подходе параметры энергий миграции (таблица 3), подбирались таким образом, чтобы обеспечить наилучшее соответствие экспериментальным данным и теоретически предсказанным значениям.

Эволюция пористости рассчитывается при условии продолжения облучения с неизменной температурой и скоростью накопления повреждающей дозы.

Таблица 3 – Энергетические характеристики собственных точечных дефектов в сталях 06X16H15M2Г2ТФР (1) и 07X16H19M2Г2БТР (2)

Характеристика	Значение энергий для аустенитных сталей, эВ	
	1	2
Энергия образования вакансии	1,8	
Энергия образования межузельного атома	4,2	
Энергия миграции вакансии	1,13–1,14	1,17–1,18
Энергия миграции межузельного атома	0,27	
Энергия связи вакансии с дислокацией	0,2	
Энергия связи межузельного атома с дислокацией	0,8	
Энергия связи вакансии с границами зерен	0,15	
Энергия связи межузельного атома с границами зерен	0,6	
Энергия связи вакансии с границами двойников	0,1	
Энергия связи межузельного атома с границами двойников	0,2	
Энергия связи вакансии с порой	1,7	
Энергия связи межузельного атома с порой	4,2	

Изменения микроструктуры, за исключением характеристик пористости, происходящие при продлении облучения, не учитываются, поэтому все характеристики микроструктуры, кроме пористости, остаются постоянными. Основные уравнения описывают изменение среднего диаметра пор (4) и концентрации пор (5), на основе которых можно рассчитать изменение пористости материала (6):

$$\Delta d_a = v \cdot \Delta t \cdot (d_a \cdot F_v \cdot 0.13 + 1), \quad (4)$$

$$\Delta n = v \cdot \Delta t \cdot n \cdot F_v / 2, \quad (5)$$

$$\Delta P = a \cdot j \cdot F_v \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где n – концентрация, Δn – изменение концентрации за время Δt , v – скорость увеличения диаметра поры, F_v – удельная площадь поверхности пор, суммирование ведется по вакансионным порам, Δd_a – изменение среднего диаметра за время Δt , d_a – средний диаметр пор, ΔP – изменение пористости (доля объема, занимаемого порами).

Рассчитывалась несбалансированная плотность потока вакансий (7), являющаяся разностью:

$$j = j_{v+} - j_{v-} - j_{i+} \quad (7)$$

где j_{v+} – вакансий, поступающих в пору; j_{v-} – вакансий, испаряющихся из поры; j_{i+} – поступающих в пору межузельных атомов.

Базовая модель позволяет провести расчет потоков ТД на различные стоки, по их известным характеристикам, но для прогнозирования распухания надо еще учесть, что эти характеристики в процессе облучения изменяются. Модернизация модели, представленная в работе, заключалась в описании взаимосогласованного процесса (рисунок 1): изменения характеристик радиационной пористости (в частности, ее роста) за счет потоков, поступающих в поры ТД и, связанного с ним, изменения концентрации ТД в кристаллической матрице, приводящая к изменению их потоков в поры.

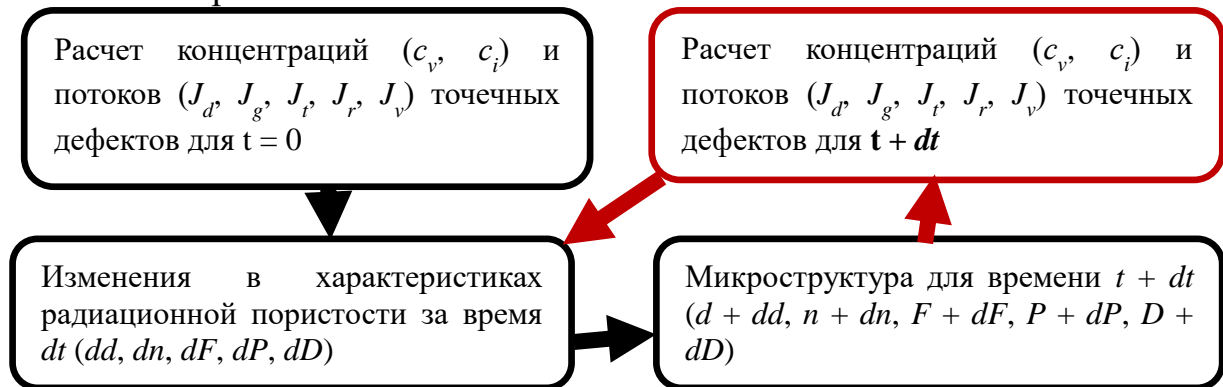


Рисунок 1 – Схема расчета изменения пористости с учетом микроструктуры для сталей 06X16H15M2Г2ТФР и 07X16H19M2Г2БТР. D –повреждающая дозы, сна; t – время, с

В работе был применен самосогласованный алгоритм расчета критического диаметра, для верификации результатов вычислений. При формировании зародыша поры происходит объединение избыточных вакансий и трансмутационного He. При достижении критического диаметра пор их рост происходит за счет поступления в них вакансий, без необходимости поступления дополнительного количества, стабилизирующего He.

Итерационный алгоритм для вычисления критического диаметра поры (рисунок 2) предполагает, что в начале расчета задаются

характеристики микроструктуры и радиационной пористости для определения концентраций и потоков ТД. После этого устанавливается начальное количество атомов He. Вычисляется изменение размера зародыша поры при поглощении вакансий. Увеличение размера происходит до момента, пока внешнее и внутреннее давление не стабилизируется, после чего необходимо поступление дополнительных атомов He. Расчет проводится с учетом модели миграции ТД на основе, которой рассчитываются концентрация и потоки ТД. Расчет критического диаметра продолжается пока не выполнится условие (8).

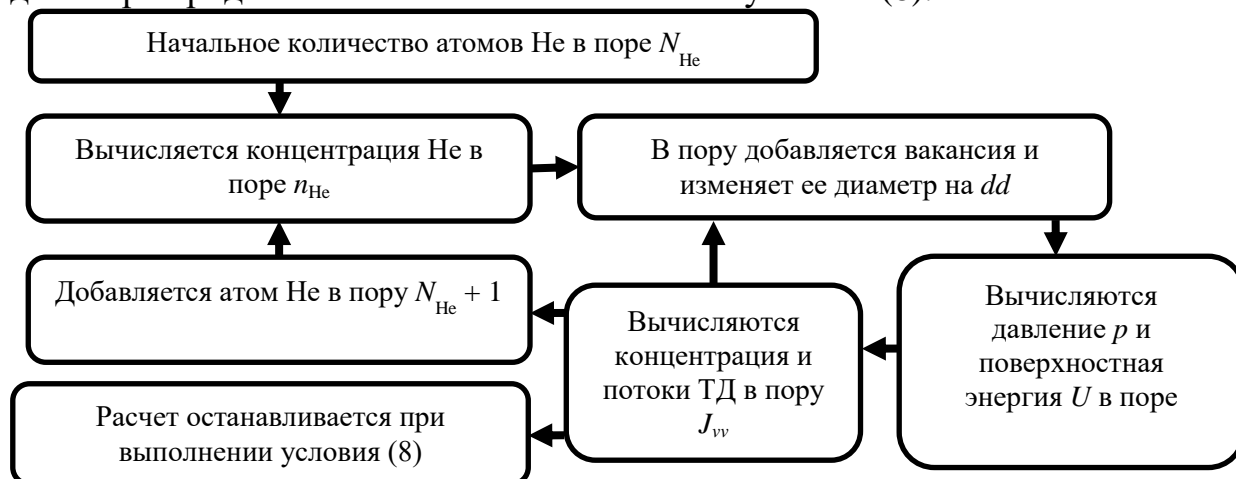


Рисунок 2 – Схема расчета критического диаметра поры для сталей 06X16H15M2Г2ТФР и 07X16H19M2Г2БТР

Условие достижения критического диаметра описывается следующим выражением:

$$J_{vv} = J_{vv+} - J_{vv-} - J_{iv+} \geq 0 \quad (8)$$

где J_{vv} – результирующий поток вакансий в пору; J_{vv+} – поток вакансий в пору; J_{vv-} – поток вакансий из поры; J_{iv+} – поток межузельных атомов в пору.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований участков оболочек твэлов вырезанных из оболочки твэла из стали 06X16H15M2Г2ТФР (таблица 4).

Таблица 4 – Характеристики образцов из стали 07X16H19M2Г2БТР изготовленных по стандартной технологии после эксплуатации в реакторе

Номер образца	Доза облучения, сна	Температура облучения, К	Распухание (по гидростатике), %	Распухание (по ПЭМ), %
1	73	717 (444 °С)	3,0	3,2
2	87	755 (482 °С)	5,0	4,4
3	93	787 (514 °С)	6,1	6,5
4	92	817 (544 °С)	4,8	5,1

Для каждого образца были также определены значения распухания, измеренные гидростатическим методом, которые показывают объективность результатов, полученных на ПЭМ.

Твэлы имеют сложную микроструктуру, которая изменяется по высоте в зависимости от повреждающей дозы и температуры. Основные изменения наблюдаются в характеристиках микроструктуры, включая размеры зерен, плотности двойников и дислокаций, распределение пор по размерам. Некоторые области вблизи двойниковых границ обеднены порами (рисунок 3, а). Карбиды типа $M_{23}C_6$ и M_6C расположены как внутри зерен, так и на их границах (рисунок 3, б).

В образцах выявлены две системы пор: мелкие (до $5\div 10$ нм), связанные с дислокациями и выделениями вторых фаз, и крупные, также ассоциированные с дислокациями (рисунок 3, в). Для мелких пор характерно равномерное распределение по всей кристаллической решетке. Крупные поры зачастую оказываются связанными с вторичными фазами, такими как G-фаза (рисунок 3, г). По результатам анализа микроструктуры можно идентифицировать радиационно-индуцированные фазы, такие как G-фаза, γ' -фаза M_3Si , а также карбиды типа $M_{23}C_6$ и M_6C . Эти фазы присутствуют во всех образцах. На основе изображений микроструктуры были экспериментально определены значения микроструктуры: плотности дислокаций (ρ_d), плотности двойников (S_t), средний диаметр зерен (d_g) и удельная площадь пор (F_v) (таблица 5).

С использованием уравнений уточненной модели миграции точечных дефектов (1–6) были рассчитаны концентрации вакансий и межузельных атомов для образцов 1–4. Значения характеристик радиационного распухания представлены в таблице 4, значения характеристик микроструктуры после облучения нейтронами представлены в таблице 5. Расчет изменения концентраций ТД в зависимости от удельной поверхности пор показал, что с ее ростом концентрация ТД в материале уменьшается, асимптотически стремясь к постоянному значению.

Таблица 5 – Характеристики участков оболочки твэла из стали 07X16H19M2Г2БТФР изготовленных по стандартной технологии после 790 суток эксплуатации

Номер образца	T, K	$G \cdot 10^{-6},$ сна/с	$D, \text{сна}$	$\rho_d \cdot 10^{14},$ м^{-2}	$d_g \cdot 10^{-5}, \text{м}$	$S_t \cdot 10^5, \text{м}^{-1}$	$F_v \cdot 10^6, \text{м}^{-1}$
1	717	1,22	73	3,2	1,2	4,1	7,85
2	755	1,46	87	3,6	1,35	3,1	5,66
3	787	1,56	93	3,5	1,3	3,0	5,17
4	817	1,55	92	3,0	1,24	2,9	4,25

G – скорость изменения повреждающей дозы, D – повреждающая доза

Потоки вакансий в поры, можно использовать для описания их роста:

$$\frac{dd}{dt} = j_v \cdot 2a \quad (9)$$

где a – параметр решетки, dd – изменение диаметра за время dt .

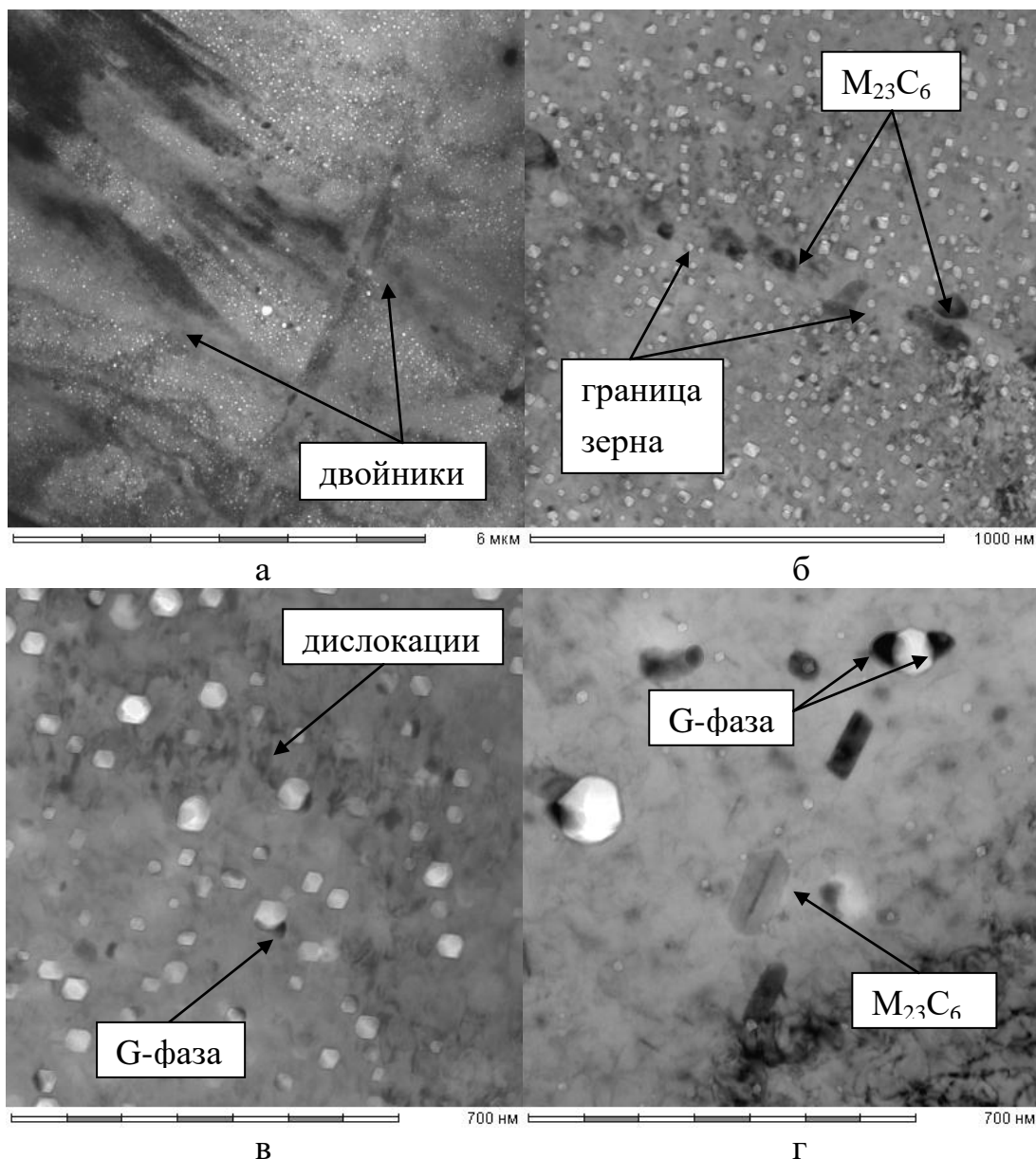


Рисунок 3 – Микроструктура исследованных образцов вырезанных из оболочки твэла (белые округлые участки соответствуют крупным порам): а – двойниковые границы при температуре облучения ~ 755 К; б – граница зерна и карбиды при температуре ~ 717К; в – дислокации при температуре ~ 787 К; г – вторичные фазы при температуре ~ 817 К

Используя полученные значения концентраций ТД и уравнение (9) были рассчитаны зависимости скорости изменения диаметра от удельной поверхности пор (рисунок 4).

Показано (рисунок 4), что скорость роста диаметра пор резко снижается до определенного уровня и стремится к постоянной величине. Это согласуется с литературными данными о стационарной фазе набухания с постоянной скоростью. Показано (рисунок 4), что скорость роста диаметра пор резко снижается до определенного уровня и стремится к постоянной величине. Это согласуется с литературными данными о стационарной фазе набухания с постоянной скоростью.

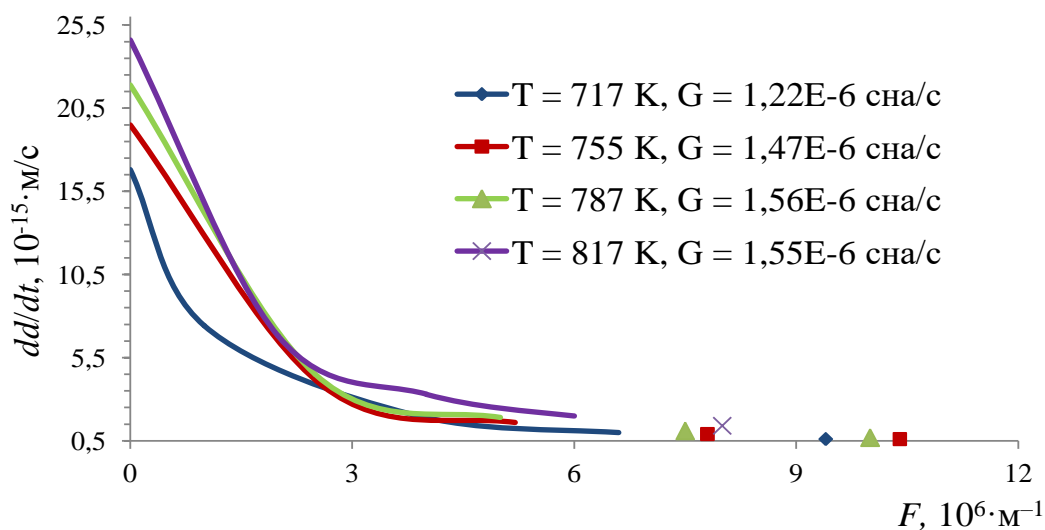


Рисунок 4 – Рассчитанные значения изменения скорости роста пор при разных значениях удельной площади их поверхности для образцов из стали 06X16H15M2Г2ТФР, изготовленных по стандартной технологии

Для верификации модели было проведено сравнение значения критического диаметра поры полученного экспериментально и по результатам расчета. Экспериментальные критические диаметры поры получили из гистограмм распределения пор по размерам (рисунок 5).

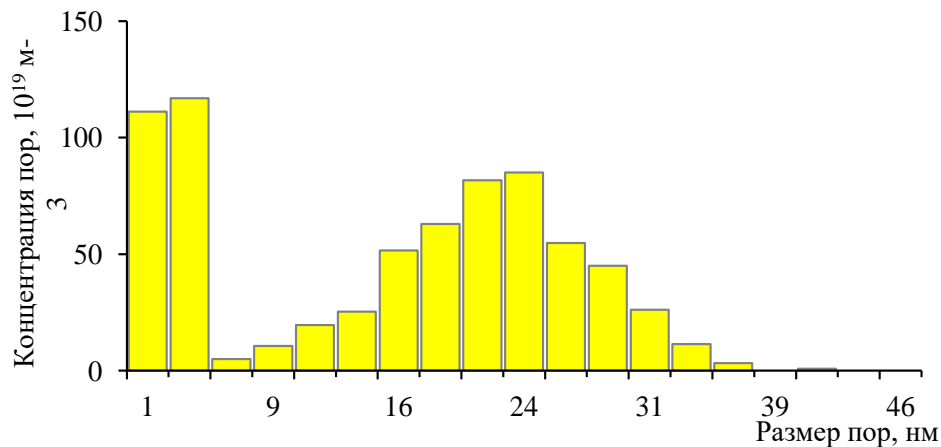


Рисунок 5 – Экспериментально полученное распределение пор по размерам в образце, с параметрами облучения: $T = 717 \text{ K}$, $G = 1,22 \cdot 10^{-6} \text{ сна/с}$, $D = 72,6 \text{ сна}$ (образец 1, таблица 4)

На рисунке 5 видно, что присутствует бимодальное распределение пор. Первый пик характеризуется большой концентрацией и малым диаметром пор, второй пик имеет меньшую концентрацию, но большие размеры пор. Для того, чтобы экспериментально определить критический диаметр необходимо между пиками определить участок с минимальной концентрацией пор, который соответствует критическому диаметру.

При достижении этого значения поры начинают свой рост только за счет поступления в них вакансий, без необходимости поступления дополнительного количества трансмутационного He для уменьшения эффективного поверхностного натяжения.

На основе разработанного самосогласованного алгоритма расчета критического диаметра (рисунок 2) и характеристик микроструктуры (таблица 5) были рассчитаны значения критического диаметра пор (рисунок 6). Для всех образцов, кроме 4-го, расчетное значение критического диаметра пор находится в пределах погрешности экспериментального значения.

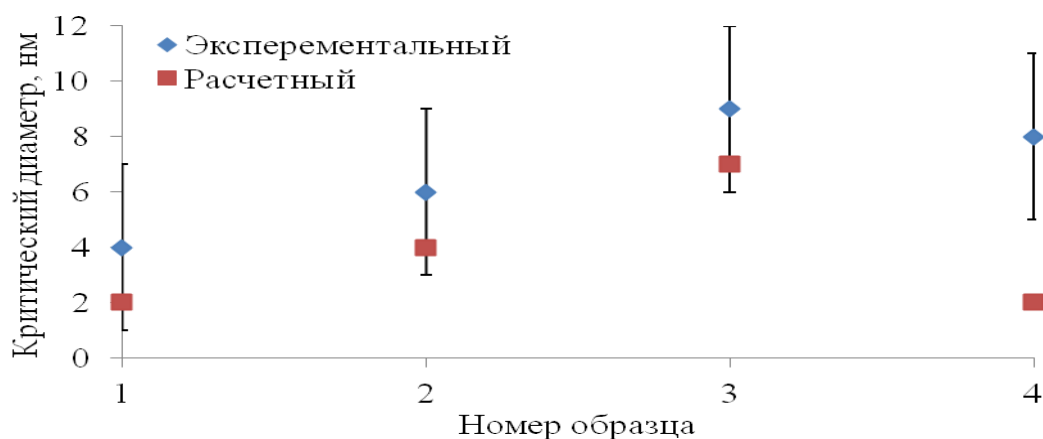


Рисунок 6 – Расчетный и экспериментальный критический диаметр пор для образцов из стали 06X16H15M2Г2ТФР изготовленных по стандартной технологии. 1 – $T = 717$ К, $G = 1,22 \cdot 10^{-6}$ сна/с; 2 – $T = 755$ К, $G = 1,47 \cdot 10^{-6}$ сна/с; 3 – $T = 787$ К, $G = 1,56 \cdot 10^{-6}$ сна/с; 4 – $T = 817$ К, $G = 1,55 \cdot 10^{-6}$ сна/с

Тенденция к снижению критического диаметра при высокой температуре, которая соответствует образцу 4, сохраняется как для экспериментальной, так и для расчетной величины. По результатам верификации можно считать, что самосогласованная модель имеет удовлетворительную сходимость с реальными процессами, происходящими в материале при длительном радиационном облучении.

В пятой главе представлены результаты прогнозирования ресурса оболочки твэла из аустенитной стали, а также выполнены сравнительные расчеты для образцов оболочек твэлов, изготовленных из различных марок стали с использованием разных технологий.

Расчеты проводились с использованием программы, написанной на языке Python по алгоритму, представленному на рисунке 1. Временной шаг при единичной итерации в расчетах был равен одной минуте.

Для всех образцов были выполнены микроструктурные исследования, получены значения характеристик радиационной пористости, микроструктуры, критического диаметра пор, а также проведено прогнозирование распухания.

В качестве исходных параметров прогнозирования используются параметры пористости, плотности двойниковых границ и дислокаций, размер зерен. Были рассчитаны временные зависимости пористости для всех образцов (рисунок 7). Сплошные линии (пористость) пересекают прерывистую линию (порог пористости) при значении 0,13 отн. ед., что соответствует максимальному распуханию в 15% и определяет предельный ресурс эксплуатации, лимитированный распуханием.

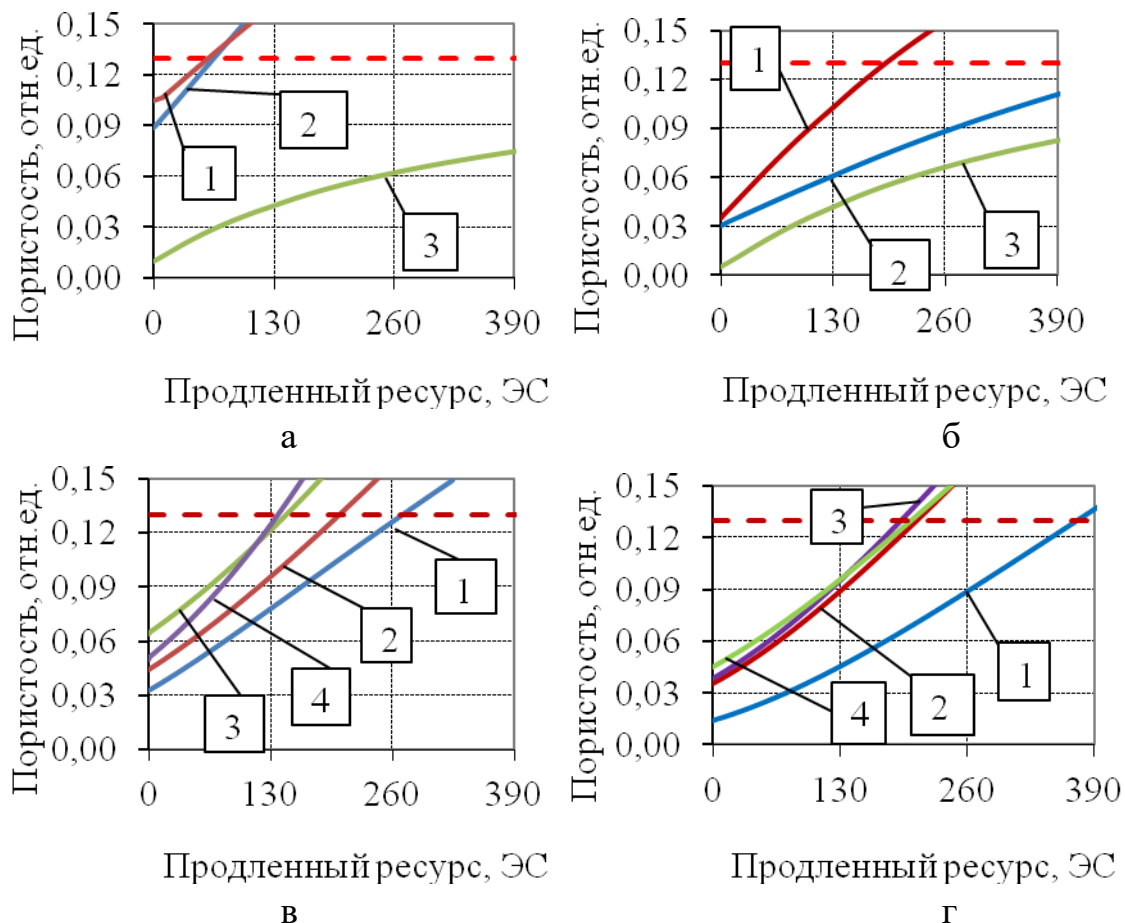


Рисунок 7 – Зависимость концентрации пор от продленного времени в (эффективных сутках) для образцов из стали 07X16N19M2Г2БТР с технологией изготовления: а – стандартной, б – усовершенствованной (начало отсчета времени соответствует – 572 ЭС); для стали 06X16N15M2Г2ТФР с технологией изготовления: в – стандартной (790 ЭС), г – усовершенствованной (880 ЭС)

Определяющим ресурс твэла из стали 07X16N19M2Г2БТР, изготовленного по стандартной технологии, был участок с температурой 817 К (544 °С) и повреждающей дозой 92 сна, остаточный ресурс равен 138 ЭС. Это в совокупности с отработанным ресурсом эксплуатации в 790 ЭС равняется 928 ЭС безопасной эксплуатации.

Для оболочки твэла из стали 07X16N19M2Г2БТР, изготовленной по улучшенной технологии минимальный остаточный ресурс наблюдался у участка с температурой облучения 775 К (502 °С) и повреждающей дозой

99 сна, остаточный ресурс равен 192 ЭС. Это в совокупности с отработанным ресурсом эксплуатации в 880 ЭС равняется 1072 ЭС безопасной эксплуатации.

Для оболочки твэла из стали 06X16H15M2Г2ТФР не все так однозначно. Исходя из гистограмм распределения пор по размерам, можно утверждать, что участки, соответствующие повреждающей дозе порядка 80 сна, достигли завершающего этапа стадии нестационарного распухания, что не дает возможность с использованием разработанных программ определить безопасный ресурс эксплуатации для всех образцов.

Для оболочки твэла из стали 06X16H15M2Г2ТФР, изготовленной по стандартной технологии, минимальный остаточный ресурс наблюдался у участка с температурой облучения 762 К (489 °С) и повреждающей дозой 77 сна, остаточный ресурс равен 55 ЭС. Это в совокупности с отработанным ресурсом эксплуатации в 572 ЭС равняется 627 ЭС безопасной эксплуатации.

Для оболочки твэла из стали 06X16H15M2Г2ТФР, изготовленной по улучшенной технологии, минимальный остаточный ресурс наблюдался у участка с температурой облучения 790 К (517°С) и повреждающей дозой 80 сна, остаточный ресурс равен 192 ЭС. Это в совокупности с отработанным ресурсом эксплуатации в 572 ЭС равняется 764 ЭС безопасной эксплуатации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе описания миграции точечных дефектов с уточненными энергетическими параметрами и учетом влияния характеристик пористости разработана самосогласованная модель эволюции радиационной пористости в аустенитных сталях 06X16H15M2Г2ТФР и 07X16H19M2Г2БТР для прогнозирования процесса распухания. Определен набор характеристик радиационной пористости, достаточный для количественного описания процесса распухания и прогнозирования времени продления эксплуатации внутриреакторных конструкций.

2. На основе описания поступления в зародыши пор атомов трансмутационного He в аустенитной стали, вакансий и межузельных атомов, с использованием модели миграции ТД разработан итерационный алгоритм расчета критического диаметра, при достижении которого размер поры увеличивается без необходимости поступления в нее He. Величина критического диаметра определяется плотностью дислокаций, площадями поверхности двойников и границ зерен и собственно радиационных пор, а также температурой и условиями облучения.

3. Получены зависимости концентраций вакансий и межузельных атомов от удельной площади поверхности пор для образцов из сталей 06X16H15M2Г2ТФР и 07X16H19M2Г2БТР, подвергнутых радиационному облучению. Показано, что при любых параметрах микроструктуры и характеристиках облучения с увеличением площади поверхности пор

концентрации как вакансий, так и межузельных атомов уменьшаются по зависимостям близким к экспоненциальным, стремясь к некоторым постоянным значениям. Это приводит к стабилизации скорости увеличения диаметра пор, характерной для стадии стационарного распухания.

4. Рассчитаны для различных параметров микроструктуры и условий облучения значения критических диаметров пор. На основе экспериментальных измерений критических диаметров радиационных пор показана удовлетворительная сходимость модели с реальными процессами, происходящими в материале при длительном нейтронном облучении.

5. С использованием измеренных характеристик радиационной пористости (удельная площадь поверхности пор) и микроструктуры (размер зерна, плотность дислокаций и двойников) в рамках уточненного описания миграции точечных дефектов при радиационном облучении анализируемых сталей промоделирована наиболее вероятная дальнейшая эволюция радиационной пористости в зависимости от температуры и повреждающей дозы в процессе продления облучения быстрыми нейтронами.

6. Разработан способ оценки ресурса безопасной эксплуатации твэлов с оболочками из сталей 06X16H15M2Г2ТФР и 07X16H19M2Г2БТР по критерию достижения предельного распухания оболочек твэлов. Способ включает расчет предельно допустимого распухания оболочки твэла на основе характеристик радиационной пористости, сформировавшейся к заключительному этапу стадии нестационарного распухания, с учетом условий нейтронного облучения.

7. Расчетами по модели подтверждено, что повышение однородности исходного структурно-фазового состояния сталей 06X16H15M2Г2ТФР и 07X16H19M2Г2БТР, за счет скоростного нагрева полуфабрикатов в процессе их термических обработок, и однородности термического нагрева на подготовительном этапе оболочки (перед финальной холодной деформацией) в проходной печи, обеспечивает повышенный предельный ресурс эксплуатации твэлов при длительном радиационном облучении.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Полученные результаты могут служить основой для дальнейших исследований, имеющихся и создания новых материалов с улучшенными характеристиками для атомных реакторов.

Применительно к теме работы в будущем планируются разработка методов прогнозирования радиационной пористости с учетом использования и характеристик выделений вторичных фаз в качестве стоков.

Список используемой литературы

1. Козлов А. В. Зависимость концентрации точечных дефектов в аустенитной стали ЧС-68 от скорости их генерации и температуры при нейтронном облучении / Козлов А. В. // Физика металлов и металловедение. 2009. – Т. 107. – №. 6. – С. 574–581.
2. Козлов А. В. Модель заключительного этапа стадии нестационарного радиационного набухания металлов / Козлов А. В., Портных И.А., Исинбаев А. Р. // Физика металлов и металловедение. 2020. – Т. 121. – № 7. –С. 675–681.
3. Поплавского В. М. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий. Том 5. Свойства реакторных сталей и сплавов / Под общей редакцией доктора технических наук, профессора В. М. Поплавского // В.П. Бобков, А. И. Блохин, В. Н. Румянцев, В. А. Соловьев, В. П. Тарасиков. Москва, ИздАТ. 2014. – С. 584.
4. Спицын Е. В. Исследование влияния режимов аустенитизирующего отжига на структурное состояние и характеристики длительной прочности и ползучести твэльных труб из аустенитной стали ЧС68-ИД / Спицын Е. В., Целищев А. В., Буданов Ю. П. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: материаловедение и новые материалы. 2015. – №. 2. – С. 4–14.

Список опубликованных работ по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Kinev E. A. Swelling of nitride fuel under different experimental irradiation temperatures at the early burnout stages / Kinev E. A., Yarkov V. Yu., **Isinbaev A. R.**, Beltyukov I. L., Tarasov B. A., Ivanov A. Yu. // Izvestiya Wysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika. 2024. – № 01. – P. 87–95. 0,50 п.л./0,16 п.л. (Scopus).
2. Lobanov M. L. Crystallographic features of shear $\gamma - \alpha$ transformation in steel 10KH18N10T subjected to radioactive irradiation / Lobanov M. L., Pastukhov V. I., Redikultsev A. A., **Isinbaev A. R.**, Zorina M.A. // Metal Science and Heat Treatment. 2022. – V. 64. – № 7-8. – P. 430-435. 0,31 п.л./0,13 п.л. (Scopus).
3. **Isinbaev A. R.** Development of radiation porosity in the material of fuel-element cladding produced by different technologies for fast neutron reactors and its influence on the fuel assembly service life in the BN-600 reactor / **Isinbaev A. R.**, Portnykh I. A., Kozlov A. V. // Physics of Metals and Metallography. 2022. – V. 123. – № 5. – P. 528-534. 0,38 п.л./0,26 п.л. (Scopus).
4. Portnykh I. A. Development of radiation porosity in austenitic EK164-ID c.d. steel irradiated at 715–815 K to damage doses of 72–92 dpa / Portnykh I. A., Kozlov A. V., **Isinbaev A. R.** // Russian Metallurgy (Metally). 2021. – V. 2021. – № 3. – P. 290-296. 0,38 п.л./0,26 п.л. (Scopus).

5. Kozlov A. V. Model of the final stage of nonstationary radiation swelling of metals / Kozlov A. V., Portnykh I. A., **Isinbaev A. R.** // Physics of Metals and Metallography. 2020. – V. 121. – № 7. – P. 611-617. 0,38 п.л./0,26 п.л. (Scopus).

6. **Isinbaev A. R.** Influence of radiation porosity created in austenitic steel upon neutron irradiation on the concentration of intrinsic point defects / **Isinbaev A. R.**, Portnykh I. A., Kozlov A. V. // Physics of Metals and Metallography. 2020. – P. 121. – С. 89. 0,31 п.л./0,18 п.л. (Web of science).

7. **Исинбаев А. Р.** Прогнозирование остаточного ресурса твэлов с оболочкой из стали ЭК164 после эксплуатации в реакторе БН-600 с достижением максимальной повреждающей дозы 99 сна / **Исинбаев А. Р.**, Козлов А. В., Портных И. А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2019. – №. 5. – С. 75–82. 0,43 п.л./0,30 п.л.

Другие публикации

8. Nikul'chenkov N. N. Size determination of microstructure elements for nanocrystalline finemet-type alloy / Nikul'chenkov N. N., **Isinbaev A. R.** // В сборнике: Уральская школа молодых металлургов = Ural School for Young Metal Scientists. Материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Екатеринбург, 2022. – С. 154–157. 0,19 п.л./0,13 п.л.

9. Голосов О. А. Экспериментальные исследования коррозии стали AISI 316L в обоснование ресурса хранения сорбционных колонн АЭС «Фукусима-дайичи» / Голосов О. А., Хвостов С. С., Глушкова Н. В., Бахтина Е. А., Цупрун Ю. И., **Исинбаев А. Р.**, Козлова А. А., Ярков В. Ю. // В книге: Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов. тезисы докладов. Акционерное общество «Институт реакторных материалов». Москва, 2022. – С. 18–19. 0,06 п.л./0,04 п.л.

10. **Исинбаев А. Р.** Вычисление критического диаметра пор для аустенитной стали ЧС68 после облучения нейтронами / **Исинбаев А. Р.**, Козлов А. В., Портных И. А. // В сборнике: Уральская школа молодых металлургов = Ural School for Young Metal Scientists. Материалы XXI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Екатеринбург, 2022. – С. 496–499. 0,19 п.л./0,13 п.л.

11. **Исинбаев А. Р.** Сравнение остаточного и предельного ресурсов твэлов с оболочками из сталей марок ЧС68 и ЭК164 при эксплуатации в реакторе БН-600 / **Исинбаев А. Р.**, Козлов А. В., Портных И. А. // В книге: Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения. Тезисы докладов X Всероссийской молодёжной конференции. Димитровград, 2021. – С. 47–48. 0,06 п.л./0,04 п.л.