

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, Дремова Владимира Владимировича 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.** Диссертация Исинбаева А.Р. посвящена исследованию природы возникновения и прогнозированию развития радиационной пористости в конструкционных материалах под действием нейтронного облучения. Это направление исследований имеет важное значение для оценки эксплуатационных свойств, повышения надежности и ресурса элементов конструкции ядерных реакторов, а значит, для безопасного продления срока службы реакторов и, как следствие, понижения себестоимости электроэнергии.

**Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Выводы диссертационной работы базируются на аттестованных экспериментальных методиках, в первую очередь электронной микроскопии, позволяющих проводить количественный анализ радиационной пористости, и теоретических расчётах по комплексной модели эволюции точечных дефектов, многие элементы которой были успешно протестированы ранее при анализе первичных радиационных дефектов в других материалах, как автором диссертации, так и в работах других исследователей.

**Достоверность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Достоверность основных научных результатов диссертации Исинбаева А. Р. обеспечивается использованием набора исследовательских методик для определения характеристик пористости, согласованностью полученных по ним экспериментальных и теоретических результатов, их воспроизводимостью и сопоставлением с

современными отечественными и зарубежными научными работами по исследуемой проблематике.

Результаты опубликованы в 7 статьях в изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 6 статей в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, а также докладывались на российских и международных конференциях.

**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. К диссертации приложена справка об использовании результатов диссертационной работы.

**Во введении** обосновывается актуальность исследований, определены цели и задачи, раскрыты научная новизна и практическая значимость, описаны методики, сформулированы положения, выносимые на защиту, достоверность и апробация результатов, личный вклад автора.

#### **В первой главе**

Дан подробный обзор методик и результатов исследований по тематике диссертации. Проанализированы радиационные повреждения конструктивных элементов ядерных реакторов из аустенитных сталей. Затронуты вопросы имитационного облучения и его обоснования. Определены ключевые параметры микроструктуры в привязке к исходной структуре оболочки твэла, которые оказывают влияние на распухание при облучении. Рассмотрены механизмы образования и поведения точечных дефектов, а также способы верификации моделей миграции дефектов с использованием экспериментальных данных. Дано определение остаточного и предельного ресурса оболочки твэла. На основе анализа приведенной информации сформулирована цель и поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** кратко описаны исследованные материалы — стали 07X16H19M2Г2БТФР и 06X16H15M2Г2ТФР — и технологии их обработки. Приведено описание набора использованных в исследовании образцов,

подвергнутых разным дозам облучения при разных температурах. Описаны экспериментальные методы исследования, включая пробоподготовку, гидростатический метод и электронную микроскопию.

**В третьей главе** представлена расчетно-теоретическая кинетическая модель миграции точечных дефектов, основанная на вероятностных и энергетических подходах, учитывающая миграцию, рекомбинацию и взаимодействие дефектов со стоками. Модель содержит довольно большое количество параметров, характеризующих, как дефекты, так и стоки, которые необходимо определить или экспериментально, или в результате микроскопических расчетов.

Приведены основные уравнения, описывающие изменения диаметра пор, их концентрации и пористости материала под облучением. Модернизированная модель учитывает взаимное влияние потоков дефектов и роста пористости. Реализован алгоритм расчета критического диаметра пор, при котором их рост стабилизируется. Приведены результаты расчетов, подтверждающие соответствие модели экспериментальным данным.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований микроструктуры оболочек твэлов после облучения. Для образцов с разными дозами и температурами облучения измерены параметры набухания, распределение и размеры пор в привязке к общей дефектной структуре образцов, включающей форму и размеры зерен, внутриверхнюю плотность двойников и дислокаций.

Экспериментально и теоретически определены критические диаметры пор, при превышении которых их рост обусловлен только потоком генерируемых вакансий. Таким образом, была проведена верификация модели, продемонстрировавшая согласие расчетных и экспериментальным данных.

**В пятой главе** выполнено прогнозирование ресурса оболочек твэлов из сталей 07X16H19M2Г2БТР и 06X16H15M2Г2ТФР, изготовленных по стандартной и усовершенствованной технологиям.

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

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в разработке самосогласованного алгоритма для расчета радиационного распухания на основе кинетической модели миграции точечных дефектов с учетом реальной микроструктуры образцов из аустенитных сталей. Установлены зависимости между концентрацией точечных дефектов и удельной поверхностью радиационных пор, позволяющие описать стадию стационарного распухания. В работе впервые рассчитан критический диаметр пор, при котором их рост стабилизируется, с учетом условий облучения и микроструктуры, что подтверждено в результате статистической обработки экспериментальных данных по микроструктуре облученных оболочек оболочках твэлов из аустенитной стали.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке алгоритма для оценки сроков остаточной и предельной безопасной эксплуатации твэлов реакторов на быстрых нейтронах. В работе также получены дополнительные к уже имеющимся в литературе данным о то, что однородность структурно-фазового состояния аустенитных сталей повышает стойкость оболочек твэлов к радиационному распуханию, что также имеет непосредственное практическое значение, как рекомендация при выборе и обработке сталей для оболочек твэлов.

**Замечания по диссертационной работе (в порядке значимости):**

1. Модель миграции дефектов содержит большое число параметров, характеризующих, как сами дефекты, так и стоки. Значения этих параметров полностью определяют получаемый результат. Однако, в работе приводится только таблица со значениями параметров и ссылки на работы, в которых они были определены. Принимая во внимание важность корректной параметризации модели, в диссертации было необходимо провести подробное обсуждение происхождения и точности определения констант модели;

2. В таблице 3.1 для двух исследуемых аустенитных сталей приводится один набор констант модели. Неясным остается откуда возникает различие в конечных результатах;
3. Не приведено описание количественного расчета источников дефектов, которые являются параметрами кинетической модели;
4. Для схемы на рис. 3.3 остается неясным способ вычисления давления и поверхностной энергии;
5. Положение №2 на стр.9 сформулировано не четко - «... исследования зависимости концентраций вакансий и межузельных атомов...» - зависимости от чего?
6. Выводы на стр. 24 и 30 противоречат друг другу. На стр. 24 констатируется, что высокая плотность дефектов может приводить к подавлению распухания. На стр. 30 последний абзац фактически говорит об обратном, т.е. что снижение дефектности (увеличение размера зерен) приводит к более легкой миграции к границам, где и происходит рекомбинация.
7. На стр. 59 некорректное определение вероятности достижения стока при втором перескоке.
8. Смысл комментария после формулы (3.7) не ясен, комментарий не корректен в плане определения площади поверхности стока.
9. Диссертация содержит довольно большое количество описок и небрежное оформление графиков.

### **Заключение**

Несмотря на перечисленные выше замечания диссертационная работа Исинбаева Артура Радионовича на тему «Эволюция и прогнозирование радиационной пористости в изделиях из аустенитной стали», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, заслуживает общей положительной оценки. Работа является завершенным научно-квалификационным исследованием, в результате которого решены важные практические задачи.

Диссертация Исинбаева А. Р. «Эволюция и прогнозирование радиационной пористости в изделиях из аустенитной стали» соответствует научной специальности 2.6.17 «Материаловедение» согласно пунктам 1, 5 и 13 паспорта специальности.

Автореферат диссертации А. Р. Исинбаева полностью отражает содержание диссертации, обладает логичной структурой и последовательностью 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:**

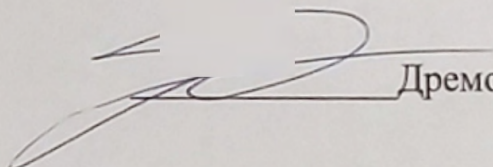
доктор физико-математических наук,  
ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»,  
г. Снежинск, Челябинская область,  
заместитель начальника отделения  
теоретической физики и прикладной математики  
Дремов Владимир Владимирович

**Контактная информация:**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский  
Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский  
институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина»,  
456770, Снежинск, Челябинская область, ул. Васильева, 13,  
E-mail: v.v.dryomov@vniitf.ru  
Телефон: 8 (351-46) 5-47-30

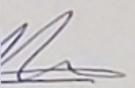
Дата: 10 декабря 2024 г.

Подпись

  
Дремов В.В.

Подпись Дремова В.В. заверяю  
ученый секретарь  
НТС РФЯЦ-ВНИИТФ



  
/Ногин Владимир Николаевич