

## ОТЗЫВ

официального оппонента Филиппова Михаила Александровича на диссертационную работу Пастухова Владимира Ивановича «Структурная чувствительность аустенитных сталей к радиационным повреждениям при нейтронном облучении», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении)

Актуальность темы диссертации. Развитие ядерной энергетики, и, в частности, реакторов на быстрых нейтронах, являющихся неотъемлемой частью замкнутого топливного цикла, - одна из приоритетных задач энергетического комплекса Российской Федерации. Проблемой эксплуатации установок на быстрых нейтронах является высокий уровень радиационных повреждений конструкционных материалов, формирующих активную зону реактора. Из-за большого количества факторов, влияющих на поведение материалов под высокоэнергетичным облучением, и их синергетического воздействия, роль структурного состояния и, в частности мезоструктуры, не установлена в полной мере. Распухание, и как следствие формоизменение элементов конструкций в настоящее время является главным фактором, ограничивающим время эксплуатации тепловыделяющих элементов. В связи с этим актуальной задачей является обеспечение стабильности структуры и, соответственно, свойств конструкционных материалов как необходимого условия для увеличения длительности безопасной эксплуатации элементов ядерных реакторов.

Структура и основное содержание работы. Диссертационная работа содержит 84 рисунка и 14 таблиц, изложена на 151 странице машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключений, списка литературы, который включает 197 источников.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, представлена

Вх. МОС-19/1-493  
от 29.11.19г.

научная новизна и практическая значимость, методология и методы исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация полученных результатов.

Первая глава содержит аналитический обзор литературы по теме диссертационной работы, по результатам анализа которого обоснованы постановка цели и задач исследования. Проведен обзор состояния физики радиационного повреждения металлов и сплавов, включая проблему набухания материалов под действием нейтронного облучения. Проведен анализ используемых в настоящее время конструкционных материалов для реакторов на быстрых нейтронах. Проведен обзор формирования структуры ГЦК металлов и сплавов под действием термических и механических обработок, а также проведен анализ стойкости исходной структуры материалов активных зон реакторов к радиационным повреждениям. Следует отметить тщательность проработки вопроса влияния микроструктуры на радиационное набухание аустенитных сталей.

Во второй главе приводится информация об исследованных автором материалах и привлеченных методах исследования.

Третья глава посвящена разработке оригинальных методик анализа мезоструктуры в конструкционных материалах для реакторов на быстрых нейтронах. Показана возможность использования сканирующего электронного микроскопа, оснащенного детектором отраженных электронов для определения количественных характеристик радиационной пористости. Проведено сравнение результатов авторского подхода с обычно применяемым методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Важно отметить, что данный подход прошел апробацию за рубежом.

На основе объединения результатов сканирующей и ориентационной электронной микроскопии создана методика, позволяющая количественно анализировать влияние различных элементов мезоструктуры на радиационное порообразование в материалах.



В четвертой главе представлены результаты применения разработанных методик при исследовании радиационного распухания сталей ЭК164 и ЧС68. Автором продемонстрировано влияние градиента температуры, возникающего в оболочке твэла при эксплуатации, на характеристики радиационной пористости. Показано, что чувствительность методики, приведенной в третьей главе работы, позволяет установить различия в радиационной пористости, связанные с неоднородностью физических условий облучения в пределах одного твэла. Продемонстрировано различное поведение радиационной пористости, связанное с мезоструктурным состоянием.

Проведены исследования влияния структурного состояния стали ЧС68 на распухание, в результате которого обнаружено сильное влияние мезоструктурного состояния. В результате различных термообработок и последующего волочения трубного изделия на короткой оправке формируются структуры, отличающиеся средним размером зерен, кристаллографическими текстурами и плотностью двойников деформации. Показано, что повышение однородности структуры совместно с увеличением плотности двойников деформации приводит к снижению радиационного распухания.

Автором также продемонстрирован эффект образования «галло» пор вокруг специфичных выделений вторых фаз, формирование которых происходит в определенном интервале температур.

Пятая глава посвящена изучению вопроса влияния продолжительного нейтронного облучения на фазовое  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение в реакторных аустенитных сталях. На высоколегированных сталях, используемых для изготовления оболочек твэлов, в результате перераспределения легирующих элементов, связанного с их выносом в теплоноситель, в поверхностном слое выявлено наличие  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения. Наблюдаемый эффект характерен для материала оболочек, облученных при температурах выше 550 °С.

Показано, что облученная в течение продолжительного времени аустенитная сталь 10X18H9 демонстрирует повышенную склонность к распаду аустенита при комнатной температуре. Фазовое  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращение реализуется в тонком поверхностном слое при релаксации изотропных внутренних напряжений, связанных с радиационными повреждениями материала. Возможности метода позволили определить структурные элементы, а именно специальные границы РСУ  $\Sigma 3$ , на которых образуются зародыши новой фазы и показать выраженную кристаллографическую направленность распада, инициированную как исходными ориентировками зерен аустенита, так и действием напряжений, направленных нормально к плоскости исследуемой поверхности. Наблюдаемый спектр отклонений межфазных разориентаций между аустенитной и ферритной фазами является близким к ориентационным соотношениям Курдюмова-Закса.

Показано, что склонность стали 10X18H9 к сдвиговому фазовому превращению зависит от накопленной повреждающей дозы, и в меньшей степени от температуры эксплуатации.

В конце диссертации приведены основные выводы по работе.

Диссертация написана автором самостоятельно, в соответствии с определенной логикой, а именно: 1) разработка методик, позволяющих на новом качественном уровне оценивать радиационные повреждения материалов; 2) использование методик для анализа конкретных ситуаций; 3) получение новой информации о процессах в материалах; 4) разработка рекомендаций по использованию методик для оценки радиационных повреждений и возможностей увеличения длительности эксплуатации изделий с учетом внешних условий и создания в них определенных микроструктурных состояний. То есть работа обладает внутренним единством.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в определении влияния градиента температур на характеристики



радиационной пористости. Показано влияние локального структурного состояния на развитие радиационной пористости в аустенитных сталях. Установлено, что образование сферических скоплений пор, повышенной концентрации, у определенных выделений вторых фаз зависит от температуры облучения. Зафиксировано, что для стали 10X18H9 в результате длительного облучения повышается склонность аустенита к распаду по сдвиговому механизму. Выявлены условия реализации распада, а также связь образующейся фазы с мезоструктурным состоянием материала.

Практическая значимость полученных результатов состоит в разработке методики количественного исследования характеристик радиационной пористости с использованием инструментария сканирующей электронной микроскопии. На основе совмещения сканирующей электронной и ориентационной микроскопий разработана методика количественного анализа влияния мезоструктуры на радиационное порообразование. Разработанная методика включает в себя как анализ количественных характеристик радиационной пористости, так и анализ количественных характеристик межкристаллитных границ. Показано, что увеличение удельной поверхности границ РСУ  $\Sigma 3$ , относящихся к двойникам деформации, по отношению к границам общего типа приводит к увеличению длительности стадий инкубационного и переходного радиационного набухания, а также к снижению общего набухания при близких условиях облучения. Это предполагает возможность снижать радиационное набухание ГЦК-материалов за счет управления исходным мезоструктурным состоянием материала.

Личный вклад автора состоит в самостоятельном проведении структурных исследований методами сканирующей и просвечивающей микроскопии, в том числе с применением EBSD-анализа, разработке оригинальных методик получения и анализа результатов СЭМ и ориентационной микроскопии, позволившим внести получить новую информацию о влиянии нейтронного облучения на материалы.

Автореферат диссертации соответствует диссертационной работе по всем квалификационным признакам: по цели, задачам исследования, основным положениям, определению актуальности, научной значимости, новизны, практической ценности и др. По теме диссертационной работы опубликовано 15 научных трудов, из них 9 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК РФ, из которых 7 в журналах, индексируемых в базах WoS и Scopus.

Основные положения и выводы диссертационной работы достоверны и достаточно обоснованы. Это обеспечено использованием современного оборудования, взаимодополняющих методов структурного анализа, воспроизводимостью результатов исследования. Полученные результаты согласуются с ранее опубликованными данными по теме исследовательской работы, при этом уточняют и конкретизируют представления о влиянии нейтронного облучения на материалы.

Текст диссертации представляет собой самостоятельную научно-квалификационную работу, не содержит заимствованного материала без ссылок на автора или источник заимствования. Диссертационное исследование не содержит результатов научных работ, выполненных в соавторстве, без ссылок на соавторов.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Не приведена полная методика расчёта распухания, определённого при помощи ПЭМ и СЭМ. Автором даётся ссылка на использованную литературу [150, 151] и не раскрыты в полной мере особенности определения распухания.
2. Образование зон с более крупными порами вблизи внутренних и наружных поверхностей в оболочке твэла при повышенных температурах в верхней части автор объясняет наличием дополнительных диффузионных потоков вследствие взаимодействия с внутритвэльной атмосферой и теплоносителем. Существует ряд работ, указывающих на влияние



напряжённого состояния на распухание, которое реализуется в виде растягивающих напряжений у наружной поверхности и сжимающих – у внутренней. В работе не обсуждается такое явление как радиационная ползучесть, которое может иметь место в твэлах при неравновесной концентрации вакансий у наружной и внутренней поверхностей.

3. В работе не раскрыт в полной мере характер влияния специальных границ с числом совпадающих узлов 3 (двойниковых) на образование и эволюцию точечных дефектов, и, соответственно, пор. Автором приведены экспериментальные результаты, которые с одной стороны, свидетельствуют об их нейтральности по отношению к порам: на них поры отсутствуют. С другой стороны, на ряде изображений на границе РСУ с числом совпадающих узлов 3 присутствуют поры, имеющие большие размеры по сравнению со средним.

4. Для механизма фазового  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения аустенитной стали 10X18H9 после облучения автором введено понятие «бейнитное». На основании каких признаков делается отличие от обычного мартенситного превращения?

5. Наличие грамматических и стилистических ошибок, отмеченных по тексту.

#### Заключение по работе

Вышеуказанные замечания не снижают общий высокий уровень представленной работы. Диссертация представляет собой завершённую работу, в рамках которой проведено большое количество уникальных экспериментальных исследований.

Диссертационная работа Пастухова В. И. «Структурная чувствительность аустенитных сталей к радиационным повреждениям при нейтронном облучении» соответствует паспорту научной специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении), а именно п.1 – Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и

эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий, п.2 – Разработка научных основ выбора материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям изготовления и эксплуатации изделий и конструкций.

Диссертационная работа Пастухова В. И. является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, в которой разработаны оригинальные методики анализа структуры облученных нейтронами материалов, а также показана возможность увеличения длительности эксплуатации конструкционных элементов ядерных реакторов на быстрых нейтронах за счет создания в материалах определенного структурного состояния.

Считаю, что Пастухов Владимир Иванович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении).

Официальный оппонент:

профессор кафедры металловедения

Уральского федерального университета имени

первого Президента России Б.Н. Ельцина,

профессор, доктор технических наук

*M*

Филиппов Михаил Александрович

Дата подписания отзыва: «*29*» ноября 2019 г.

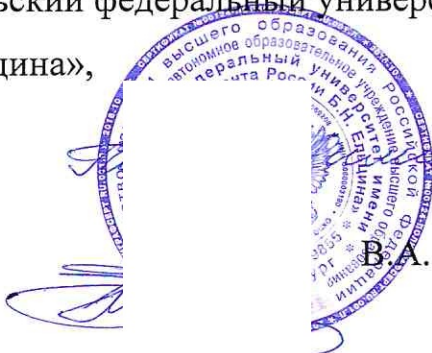
Адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 28

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

Тел. +7 (343) 375-44-38

T-mail: Filma1936@mail.ru

Ученый секретарь УрФУ



*Морозова М.А.*  
В.А. Морозова