

ОТЗЫВ

официального оппонента Неустроева Виктора Степановича 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. В России имеется большой опыт эксплуатации ядерных реакторов на быстрых нейтронах. В настоящее время эксплуатируется два атомных энергоблока (БН-600 и БН-800) и планируется дальнейшее развитие этой технологии. Актуальной проблемой материалов (оболочек твэлов, внутрикорпусных устройств и материалов корпусов) таких реакторов является их радиационное распухание, влияющее на работоспособность элементов и конструкций. В большей степени, эта проблема касается оболочек тепловыделяющих элементов, в которых распухание может достигать больших значений, превышающих 10-15 %. Уменьшение склонности материалов к радиационному распуханию или контроль данного процесса может существенно повысить эксплуатационные качества материалов. Последнее определяет экономическую эффективность эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах, и, соответственно, актуальность и научную значимость представляемой работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, который включает 197 источников. Диссертационная работа содержит 84 рисунка и 14 таблиц, изложена на 151 странице машинописного текста.

Во **введении** изложена актуальность и степень разработанности темы исследования, цели и задачи работы, научная и теоретическая значимость, практическая значимость работы, методология и методы исследования, основные положения, которые выносятся на защиту.

В **первой главе** представлен аналитический обзор литературы по теме диссертационной работы. Проведен обзор механизмов радиационного повреждения металлов и сплавов. Особое внимание автор уделил аустенитным сталям, используемым в настоящее время в ядерной энергетике, формированию их структуры под воздействием температуры и механической обработки и их стойкости к радиационным повреждениям, в частности радиационному распуханию. По результатам анализа были сформулированы цель и задачи в диссертационном исследовании.

Вх. Ж05-19/1-515
от 05.12.19г.

Во **второй главе** содержится информация об исследованных автором материалах и используемых методах исследования.

Третья глава посвящена разработке подходов и локальных методов для исследования радиационной пористости на больших масштабах. На основании проведенных исследований разработана методика исследования радиационной пористости при помощи сканирующего электронного микроскопа, оснащенного детектором отраженных электронов. Проведен анализ методики в сравнении с просвечивающей электронной микроскопией и показана хорошая сходимость результатов. Приведены результаты ее апробации в зарубежной лаборатории. Показана высокая информативность результатов, получаемых с использованием разработанного подхода, при исследованиях структуры облученных образцов традиционными методами ПЭМ, СЭМ и ориентационной микроскопии.

В **четвертой главе** представлены результаты апробации разработанных методик и подходов для исследования радиационной пористости сталей ЧС68 и ЭК164. В результате проведенных исследований продемонстрировано, что в оболочке твэла наблюдается пространственная зависимость характеристик радиационной пористости, обусловленная влиянием градиента температуры в оболочках твэлов. Приведены результаты, свидетельствующие о том, что повышение однородности структурного и текстурного состояния, одновременно с увеличением плотности двойников деформации приводит к снижению величины радиационного распухания.

Автором обнаружен важный эффект образования специфического распределения пор, в виде кольца на плоскости шлифа, вокруг выделений вторых фаз, содержащих бор. Интересно также и то, что формирование подобного распределения пор происходит в определенном интервале температур.

Пятая глава посвящена изучению вопроса влияния нейтронного облучения на фазовое $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. Показано, что в результате перераспределения легирующих элементов, связанного с их выносом в теплоноситель, на наружной поверхности оболочек твэлов наблюдается $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. Максимальное проявление обнаруженного эффекта наблюдается на оболочках твэлов, облученных при температурах выше 550 °С.

Особое внимание было уделено изучению влияния продолжительного нейтронного облучения на структуру аустенитной стали 10X18H9, в которой в тонком поверхностном слое реализуется сдвиговое фазовое $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. Распад аустенита происходит при комнатной температуре при

релаксации внутренних напряжений, связанных с радиационными повреждениями материала. Показано, что склонность стали 10X18H9 к сдвиговому фазовому превращению зависит от накопленной повреждающей дозы, и в меньшей степени от температуры эксплуатации.

В конце диссертации приведено заключение, в котором суммируются основные результаты диссертационной работы.

Диссертация **обладает внутренним единством** и написана автором **самостоятельно**.

Несомненна **научная новизна работы**, в которой можно выделить:

1) Определение влияния градиента температур в оболочке твэла на характеристики радиационной пористости в материале оболочки.

2) Обнаружение влияния соотношения между двойниковыми и большеугловыми границами на объемную долю радиационных пор в аустенитных сталях ЧС68 и ЭК164.

3) Обнаружение образования сферических скоплений пор, повышенной концентрации, у определенных выделений вторых фаз на основе молибдена и бора, следующей за зоной обеднения по порам.

4) Определение для стали 10X18H9 в результате длительного облучения повышения склонности аустенита к гамма-альфа распаду по сдвиговому механизму. Выявлены условия реализации распада, а также связь образующейся фазы с мезоструктурным состоянием материала.

Практическая значимость полученных результатов состоит в:

1) Разработке методик исследования характеристик радиационной пористости и локального структурного состояния с использованием инструментария сканирующей электронной микроскопии. Разработанная методика включает в себя как анализ количественных характеристик радиационной пористости, так и анализ количественных характеристик межкристаллитных границ;

2) Предложении снижения радиационного распухания (объемной доли радиационных пор) за счет управления исходным мезоструктурным состоянием аустенитных сталей, используемых для производства оболочек твэлов.

Личный вклад автора несомненен и состоит в самостоятельном планировании и 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 получить новую информацию о влиянии нейтронного облучения на структуру материалов.

Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Следует отметить хорошую апробацию и опубликованность работы. По **теме диссертационной работы опубликовано** 15 научных трудов в рецензируемых научных журналах из списка ВАК и в журналах, индексируемых в базах WoS и Scopus.

Основные положения и выводы диссертационной работы **достоверны и обоснованы**. Достоверность обеспечена использованием современного оборудования, воспроизводимостью результатов исследования, взаимодополняющих методов структурного анализа. Полученные результаты не противоречат и дополняют ранее опубликованные данные по теме исследовательской работы, при этом уточняют и конкретизируют представления о влиянии нейтронного облучения на радиационную стойкость реакторных аустенитных сталей.

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. На рис. 4.18 из подрисуночной подписи не ясно какая из прямых относится к концентрации, а какая к диаметру.
2. Нет объяснения относительной координаты при вырезке образцов для исследовании твэлов, а это важно с точки зрения дозно-температурных условий облучения и сравнения данных для разных твэлов.
3. Все исследования распухания проведены на стадии, когда распухание меньше 8%, то есть стадии либо инкубационного, либо переходного периода. Как распространить выводы на стационарную стадию распухания?
4. От чего сильнее зависит содержание α -фазы в стали 10X18N9 (при всех оговорках сделанных в диссертации), от величины распухания или повреждающей дозы?
5. Важный вопрос при определении величины распухания – переход от концентрации пор на единицу площади, используемой в работе, к их концентрации на единицу объема, для возможности расчета величины распухания. Необходимо было привести некоторые основные предположения и формулы, чтобы можно было сравнить полученные данные с данными других исследователей, работающих в области радиационного и реакторного материаловедения.

Заключение по работе

Сделанные замечания не снижают научной и практической значимости проведенной работы и носят характер уточнений и пожеланий.

В целом можно заключить, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в рамках которой проведено много уникальных экспериментальных исследований, разработаны оригинальные методики анализа структуры материалов после нейтронного облучения. Показана возможность за счет создания в материалах определенных микроструктурных состояний увеличить длительность эксплуатации конструкционных элементов ядерных реакторов на быстрых нейтронах.

По объёму, научному уровню и ценности результатов диссертационная работа Пастухова В. И. соответствует критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ (п. 9), а её автор **Пастухов Владимир Иванович**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении).

Официальный оппонент
Главный научный сотрудник,
доктор технических наук, доцент,
Виктор Степанович Неустроев
Отделение реакторного материаловедения
АО «ГНЦ НИИАР», Ульяновская область,
г. Димитровград, Западное шоссе, 9
Тел: (84235)72992,
e-mail: neustroev@niiar.ru


02.12.2019
В.С. Неустроев

Подпись д.т.н. Неустроева В.С. заверяю:
Ученый секретарь АО «Государственный
научный центр – Научно-исследовательский
институт атомных реакторов»,
кандидат технических наук




Ю.А. Валиков