

ОТЗЫВ

официального оппонента Шабашова Валерия 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. Критическим условием успешного развития ядерной техники, разработки инновационных ядерных реакторов является создание новых конструкционных материалов, обеспечивающих необходимые условия эксплуатации в активной зоне реактора. Несмотря на приоритетность направления и значительное количество публикаций в российской и зарубежной литературе об эволюции структуры в материалах, длительно находящихся под действием быстрых нейтронов и, в частности, перераспределение элементов, изменение химического состава и конгломерации вакансий, сохраняется необходимость накопления информации о связи радиационной пористости со структурным состоянием реальных конструкционных элементов реактора. Учитывая то, что исследования структуры элементов конструкций атомных реакторов, подвергнутых длительному нейтронному облучению, с одной стороны, необходимы для прогнозирования распухания, а с другой, представляют большую сложность, задача диссертационной работы Пастухова В.И. является актуальной, важной и нужной.

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** дано обоснование темы диссертации, поставлены задачи работы, сформулирована научная новизна, актуальность,

Вх. №05-19/1-490
от 29.11.19г.

практическая ценность, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность и приведены данные по апробации работы и публикациям.

Первая глава является обзорной. В ней, на основании большого количества советских и российских литературных данных, рассмотрены структурные повреждения и их эволюция в веществе (прежде всего в металлах и сплавах) при взаимодействии с потоками высокоэнергетических частиц. Рассмотрено образование каскадов атомных смещений и процессы релаксации энергии каскада в кристаллической решетке. Обсуждено влияние температуры на подвижность точечных дефектов, выделены пять стадий, ранжирующих подвижность точечных дефектов различной природы. Обращено внимание на сильное влияние подвижности дефектов в процессе облучения и локальной концентрации на эволюцию микроструктуры, а также, в свою очередь, влияние характеристик облучения материалов на поведение дефектов и трансмутации гелия. Рассмотрены характеристики облучения, физико-химические свойства структуры, влияющие на инкубационную, нестационарную и стационарную стадии набухания. В свете обсуждаемой проблемы рассмотрены некоторые конструкционные материалы активных зон реакторов на быстрых нейтронах и результаты их разработок с учетом структурных факторов, влияющих на набухание. Обоснован выбор материалов реальных ТВЭЛов, методология и методика исследования, сформулирована цель работы.

Во **второй главе** описаны объекты исследования, методика пробоподготовки, физические методы исследования. В качестве материалов выбраны аустенитные стали, используемые в ядерной энергетике ЧС-68, ЭК-164, 10X18H9, а также ферритно-мартенситная ЭП-823. Проведено описание подготовки образцов в «горячих» камерах для проведения структурных исследований оболочек ТВЭЛов после эксплуатации. Описаны методы сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, позволяющих проводить ориентационные исследования, микронзондовый

рентгеноспектральный анализ и оценку числа пор. Дана информация о рентгеноструктурном анализе с использованием дифрактометра, размещенного в «горячей» камере.

В **Третьей главе** описана разработанная в ИРМ методика сканирующей электронной микроскопии с детектором отраженных электронов, позволяющая связать радиационную пористость с мезоструктурой массивных образцов, подвергнутых длительному нейтронному облучению. Проведена верификация полученных результатов методом просвечивающей электронной микроскопии. На основе объединения результатов сканирующей и трансмиссионной электронной микроскопии, создана методика, позволяющая количественно анализировать влияние различных элементов мезоструктуры на радиационное порообразование в материалах. На стали ЭП-823 показано, что совместное использование ориентационной микроскопии с возможностями сканирующей электронной микроскопии позволяет установить различное влияние специальных межзеренных границ на выделение дисперсных карбидов в процессе старения.

Четвертая глава посвящена подробному исследованию с помощью сканирующей электронной микроскопии распределения пористости в ТВЭЛах и ее зависимости от условий облучения, вытекающих из конструктивных особенностей сборок, мезоструктурных элементов материала (плотности двойников, скоплений плоских малоугловых границ) и элементов легирования (молибден-содержащих выделений).

В **Пятой главе** проведено исследование полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в реакторных аустенитных сталях после продолжительного нейтронного облучения. Назван механизм сдвигового превращения (бейнитный), вызванный дестабилизацией аустенита из-за выноса легирующих элементов и напряжений в зоне контакта поверхности ТВЭЛов с теплоносителем.

В **Заключении** сформулированы выводы по результатам работы.

Диссертация написана автором **самостоятельно**. В целом диссертация представляет собой объемную научно-исследовательскую работу, в которой проведен скрупулезный анализ радиационных повреждений аустенитных сталей ЧС-68, ЭК-164, 10Х18Н9 и ферритно-мартенситной стали ЭП-823 по действию нейтронного облучения. Исследована зависимость радиационной пористости от состояния микроструктуры, в том числе наличия и количества в структуре комплексов дефектов кристаллического строения, а именно, скопления малоугловых границ и пакетов двойников деформации. Кроме того, получены данные и проведены исследования влияния продолжительной эксплуатации ТВЭЛов из стабильных сталей ЧС-68 и ЭК-164 при температурах выше 550 °С. Работу предваряет хороший обзор, в котором ясно сформулирована актуальность, обусловленная необходимостью увеличения срока службы внутриреакторных конструктивных элементов, и четко поставлены задачи установления закономерностей формирования радиационных повреждений сталей в зависимости от условий облучения и их мезоструктурного состояния. Специально следует отметить высокий методический уровень работы. Это относится к части пробоподготовки, особенно оригинального метода сканирующей электронной микроскопии и ко всему комплексу физических методов исследования. Работа может являться хорошим методическим пособием для специалистов, работающих в области радиационного материаловедения.

Научная новизна результатов диссертационной работы

В работе впервые получен ряд научных результатов, наиболее важными из которых являются следующие:

- 1) С применением удачно выбранной и усовершенствованной методики сканирующей микроскопии проведен статистический анализ радиационной пористости на уровне отдельных кристаллитов в отдельных ТВЭЛах и на масштабном уровне всей сборки.

2) Установлены зависимости радиационной пористости от градиента температуры и приведены данные по порообразованию в разных областях ТВЭЛов и в зависимости от их расположения в сборке.

3) Установлена связь характеристик порообразовании со структурой: межкристаллитными границами, двойниками деформации, дисперсными карбидами.

4) 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.

5) Представленные автором результаты позволяют ставить задачи как для фундаментального радиационного материаловедения по оптимизации химического состава и термомеханической обработке сталей, так и для разработчиков (конструкторов и технологов) реакторов на быстрых нейтронах.

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 получить новую информацию о влиянии нейтронного облучения на материалы.

Достоверность и обоснованность полученных научных результатов, положений и выводов диссертации обеспечена высококвалифицированным использованием широкого комплекса современных взаимодополняющих экспериментальных методов исследования структуры, а также достаточно полным применением современных представлений материаловедения для анализа полученных экспериментальных закономерностей.

Диссертационное исследование не содержит результатов научных работ, выполненных в соавторстве, без ссылок на соавторов.

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.

Научная значимость и практическая ценность.

Высокая научная значимость результатов диссертационной работы связана с получением новых данных по закономерностям формирования радиационных повреждений при длительном облучении аустенитных сталей. Обоснована важная роль градиента температур, вида межкристаллитных границ, двойников деформации и дисперсных выделений в формировании радиационной пористости в ТВЭЛах. Выявлено и обоснована склонность нержавеющей стали 10X18Н9 к распаду аустенита по сдвиговому механизму с образованием альфа-мартенсита. Полученные результаты представляют интерес как в связи с прикладными вопросами создания новых радиационно-стойких материалов, так и для решения фундаментальных вопросов фазовых превращений при интенсивной радиационном воздействии.

Практическая значимость работы заключается в том, что ее результаты могут быть использованы при разработке новых сталей аустенитного и ферритно-мартенситного класса, содержащих высокую плотность плоских дефектов, а также методов и режимов их обработки, обеспечивающих значительное повышение эксплуатационных свойств изделий ядерной техники, например ТВЭЛов и их сборки.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В части работы, посвященной исследованию закономерностей влияния мезоструктуры на порообразование сталей недостаточно описано влияние предварительной высокотемпературной термомеханической обработки на формирование плоских дефектов (межкристаллитных границ, двойников деформации и др.), а также дисперсных частиц в исходной структуре.

2. В выводах при общем констатирующем характере установленных закономерностей влияния различных элементов мезоструктуры и условий облучения на порообразование, автор не раскрывает в полной мере понятие «распухание» и не дает теоретических обоснований этих закономерностей или ссылок на подобные исследования других авторов.

3. При рассмотрении механизмов порообразования в работе не приводится анализ твердорастворного расслоения, вызванного насыщением структуры радиационными дефектами. Это особенно касается стали ЭП-823, в которой возможно расслоение по хрому с образованием α' -фазы, сигма-фазы и др. Расслоение по хрому может также влиять на выделение частиц вторых фаз с измененным составом элементов легирования сталей.

4. В части работы посвященной формированию альфа-мартенсита в поверхностных слоях из стали 10X18N9 было бы желательно провести градиентный анализ содержания альфа-фазы от поверхности ТВЭЛа в объеме со стороны топлива и теплоносителя. Это позволит уточнить роль «граничных условий» в полиморфном гамма-альфа переходе при облучении. В связи с анализом гамма-альфа превращения указан «бейнитный» механизм, однако отсутствует обоснование этого утверждения.

5. При оформлении диссертации допущено много грамматических и стилистических ошибок.

Заключение по работе

Сделанные замечания не оказывают влияния на общую положительную оценку работы, ее основные выводы и положения, выносимые на защиту. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствуют 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» специальности 05.16.09 –
Материаловедение (в машиностроении).

Автореферат соответствует содержанию диссертации и правильно отражает положения и выводы диссертационной работы.

Диссертационная работа Пастухова В.И. «Структурная чувствительность аустенитных сталей к радиационным повреждениям при нейтронном облучении» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. Работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ», предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (в машиностроении).

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник лаборатории механических свойств
федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской
академии наук, доктор физико-математических наук
Шабашов Валерий Александрович

Дата подписания отзыва: «29» ноября 2019 г.

Адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской
академии наук

Тел: +7 (343) 378-38-21, e-mail: shabashov@imp.uran.ru

Подпись Шабашова В.А. заверено

Ученый секретарь ИФМ УрО РАН



_____ Арапова И.Ю.