

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук Поролло Сергея Ивановича на диссертационную работу Макарова Евгения Игоревича «Закономерности радиационной ползучести стали марки 08X18H10T, облучённой до высоких нейтронных повреждающих доз при температурах 330–420°C», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 — «Физика конденсированного состояния» (Диссертационный совет Д 212.278.01 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»)

1. Актуальность темы диссертации Внутрикорпусное устройство (ВКУ) ядерного реактора являются важнейшим элементом его конструкции от надежной работы которого в значительной степени зависит безопасность и экономичность всей реакторной установки. Кроме этого, ВКУ относится к несменяемым элементам конструкции реактора, срок службы которого совпадает с общим сроком его эксплуатации. В течение всего срока эксплуатации, достигающего 60 и более лет, материал ВКУ подвергается интенсивному нейтронному облучению и воздействию теплоносителя, что приводит к деградации его исходных физико-механических свойств. ВКУ реакторов типа ВВЭР представляет собой сложную конструкцию с большим количеством цилиндрических каналов для его охлаждения. Кроме этого, находясь на периферии активной зоны реактора, элементы ВКУ облучаются в значительном градиенте нейтронного потока и температуры. Это приводит к появлению в материале ВКУ как растягивающих, так и сжимающих внутренних напряжений. Влияние растягивающего напряжения на распухание аустенитных сталей хорошо известно. Большое число проведенных экспериментов говорит о том, что растягивающее напряжение приводит к увеличению распухания. Что касается влияния сжимающих напряжений на распухание сталей, то во-первых число таких работ крайне ограничено, и главное, они дают противоречивые и неоднозначные результаты.

Поэтому актуальность диссертационной работы Макарова Е.И., которая посвящена экспериментальному исследованию влияния напряжённого состояния на скорость радиационной ползучести, распухание и характеристики микроструктуры стали марки 08X18H10T, облучённой до различных

повреждающих доз в реакторе БОР-60 при температуре, характерной для работы ВКУ водо-водяных энергетических реакторов не вызывает сомнения.

2. Научная новизна результатов полученных в данной работе заключается в том, что в ней:

– разработаны и испытаны газонаполненные образцы принципиально новой конструкции, в которых одновременно создается растягивающее и сжимающее напряжение при практически одинаковой температуре облучения, как на внешней, так и на внутренней поверхности трубок. Применен разработанный способ испытания материалов при облучении газонаполненных образцов новой конструкции в ядерном реакторе;

– получены новые экспериментальные зависимости деформации радиационной ползучести от повреждающей дозы и величины растягивающего и сжимающего напряжения для газонаполненных образцов стали 08X18H10T, облучённых в реакторе БОР-60 при температурах 330–350°C и 400–420°C. Показано, что при различных уровнях растягивающего и сжимающего напряжения эти зависимости являются линейными;

– на основании полученных экспериментальных результатов рассчитан модуль радиационной ползучести стали 08X18H10T – $(2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$ (МПа·сна)⁻¹ применимый для прочностных расчётов напряженно-деформированного состояния элементов ВКУ ВВЭР для значений повреждающей дозы до 90 сна в интервале температуры облучения от 330 до 350°C. Полученная величина модуля радиационной ползучести стали 08X18H10T хорошо согласуется с имеющимися литературными данными для сталей подобного класса.

3. Практическая значимость диссертации определяется необходимостью исследования радиационной ползучести и распухания стали 08X18H10T для использования в расчётах напряженно-деформированного состояния элементов ВКУ при продлении срока службы внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР-1000 и для обоснования 60-летнего ресурса работы выгородки в новых проектах реактора ВВЭР-1200 (ВВЭР-ТОИ).

4. Общая характеристика работы Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Текст диссертации включает 126 страниц машинописного текста, 65 рисунков, 9 таблиц и список из 65 наименований цитируемой литературы.

Во введении приведен обзор научных исследований по теме диссертации, описаны полученные на настоящий момент результаты и обоснована актуальность темы диссертации, направленной на экспериментальное изучение закономерностей радиационной ползучести и распухания, а также влияния напряжённого состояния на характеристики микроструктуры стали 08X18H10T, облучённой до различных повреждающих доз в реакторе БОР-60 при температуре, характерной для ВКУ ВВЭР. Автором сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость. Приведены структура диссертации, формы апробации и практическая применимость результатов.

В первой главе проведён анализ литературных данных по влиянию нейтронного облучения и напряжения на микроструктуру аустенитных сталей. В частности, рассмотрены зависимости распухания аустенитных сталей от температуры, повреждающей дозы, скорости набора повреждающей дозы. Показана взаимосвязь радиационной ползучести и распухания аустенитных сталей, используемых для оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах. Представлены и проанализированы имеющиеся данные о влиянии типа напряжённого состояния на радиационную ползучесть и радиационное распухание, а также на параметры микроструктуры аустенитных сталей.

Во второй главе приведены характеристики и расчёт напряженно-деформированного состояния исследуемых образцов, описаны условия их испытания и методики до и послереакторных исследований. В работе исследовали газонаполненные образцы двух конструкций: традиционная газонаполненная ампула и образец, состоящий из двух коаксиальных трубок между которыми находился газ под давлением. Оболочки всех газонаполненных образцов были изготовлены из стали 08X18H10T в аустенизированном состоянии, которая в настоящее время является материалом ВКУ действующих и разрабатываемых реакторов типа ВВЭР. Проведен расчет напряженно-деформированного состояния газонаполненного образца новой конструкции методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS Mechanical. Показано, что при заданной температуре облучения газ, закачиваемый в межтрубное пространство, создаёт во внутренней трубке сжимающее, а во внешней трубке растягивающее напряжение. Радиальным напряжением из-за малой толщины оболочек можно

пренебречь. При этом в обеих трубках осевое напряжение приблизительно в два раза меньше тангенсального.

Описаны методики исследования газонаполненных образцов, которые включали в себя: измерение длины и диаметра газонаполненных ампул, определение плотности материала оболочек методом гидростатического взвешивания, оптическую металлографию и трансмиссионную электронную микроскопию, измерение микротвёрдости, определение химического состава стали эмиссионно-спектральным методом.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты исследования радиационной ползучести, набухания и микроструктуры стали 08X18H10T, облучённой при температуре 330–350°C. Показано, что дозовая зависимость деформации радиационной ползучести для газонаполненных образцов различной конструкции при всех напряжениях описывается линейной функцией. В интервале повреждающих доз 40–90 сна определен модуль радиационной ползучести для стали 08X18H10T, который оказался равным $(2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$ (МПа·сна)⁻¹. Приведены результаты исследования микроструктуры облученной стали 08X18H10T, которая состояла из равноосных зёрен аустенита и равномерно распределённых в объёме стали глобулярных выделений второй фазы Ti (C, N), частиц радиационно-индуцированной мелкодисперсной G-фазы (Me₆Ni₁₆Si₇), дислокационных петель, а также двойников деформации. Поры во всех исследованных образцах отсутствовали. Показано, что с ростом и сжимающего и растягивающего напряжения концентрация петель в облучённой стали 08X18H10T увеличивается. При этом средний размер петель равный 9 нм практически не изменяется с ростом как растягивающего, так и сжимающего напряжения.

Четвертая глава посвящена исследованию ползучести и набухания на газонаполненных образцах новой конструкции, облучённых до максимальной повреждающей дозы 36 сна при температуре 400–420°C. При этих условиях в микроструктуре облученных образцов появляются вакансионные поры и деформация газонаполненных образцов под облучением происходит как за счёт ползучести, так и за счет набухания. Приведены дозные зависимости изменения диаметра, длины и модуля радиационной ползучести газонаполненных образцов стали 08X18H10T, облученных до повреждающей дозы 36 сна при температуре 400–420°C. Представлены результаты

исследования микроструктуры стали 08X18H10T, облученной до повреждающей дозы в 17 сна и 36 сна. Показано, что после облучения до дозы 17 сна концентрация дислокационных петель и вакансионных пор в стали возрастает увеличением абсолютных значений сжимающего и растягивающего тангенциального напряжения, при этом размеры пор и петель практически не меняются. Результаты ТЭМ-исследований материала газонаполненных образцов после облучения до повреждающей дозы 36 сна показали наличие следующих структурных составляющих: частиц вторичных фаз, дислокационных петель, а также вакансионных пор разного размера и концентрации. Приведены зависимости объёмной доли, среднего размера и концентрации пор в стали 08X18H10T от величины сжимающего и растягивающего напряжения.

В **заключении** представлен список основных результатов работы.

В представленной диссертационной работе можно выделить следующие наиболее значимые результаты:

- обоснован и применён методический подход к исследованию влияния сжимающего и растягивающего напряжения на скорость радиационной ползучести, распухание и микроструктуру стали 08X18H10T, включающий использование газонаполненных образцов новой конструкции и способа их испытания при облучении в ядерном реакторе;

- в интервале повреждающих доз от 5 до 90 сна и температуры облучения 330–350°C и 400–420°C получены линейные зависимости увеличения диаметра газонаполненных образцов стали 08X18H10T, облучённых в реакторе БОР-60 при растягивающих напряжениях до 180 МПа и сжимающих до 133 МПа;

- на основе полученных экспериментальных данных рассчитан модуль радиационной ползучести стали 08X18H10T, равный $(2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-6} \text{ (МПа} \cdot \text{сна)}^{-1}$ для значений повреждающей дозы до 90 сна в интервале температуры облучения 330–350°C;

- при температуре облучения 330–350°C и повреждающей дозе 36 сна и при температуре облучения 400–420°C и дозе 17 сна, когда распухание стали близко к нулю, концентрация дислокационных петель и пор возрастает с ростом как сжимающего так и растягивающего тангенциального напряжения, при этом размер петель и пор не зависит от величины напряжения;

– при температуре облучения 400–420°C и повреждающей дозе 36 сна, когда распухание стали превышает 8 %, как сжимающее, так и растягивающее напряжение приводит к увеличению объемной доли пор за счёт роста среднего размера пор при постоянной концентрации;

– модуль радиационной ползучести стали 08X18H10T, полученный в данной работе использовался в расчётах напряженно-деформированного состояния при продлении срока службы ВКУ реакторов ВВЭР-1000 и для обоснования 60-летнего срока эксплуатации выгородки в новых проектах реакторов ВВЭР-1200 (ВВЭР-ТОИ).

5. Обоснованность научных положений и выводов Диссертационная работа Е.И. Макарова представляет собой цельное научное исследование. Все экспериментальные данные получены на современном аттестованном оборудовании. Автором изучены и критически проанализированы известные работы по исследованию радиационной ползучести и распуханию аустенитных сталей, корректно использованы научные методы для обоснования полученных результатов и выводов. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации Е.И. Макарова, являются обоснованными. Достоверность полученных результатов и выводов основана на анализе автором ранее выполненных научно-исследовательских работ по теме диссертации и подтверждается сравнением полученных в ходе выполнения работы экспериментальных данных с известными из литературы теоретическими и экспериментальными результатами.

6. Публикации, отражающие основное содержание диссертации Основные результаты диссертации изложены в 4 публикациях в научно-технических журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций. По теме диссертационной работы получены 2 патента на изобретение и полезную модель. В публикациях достаточно полно отражены главные результаты диссертации. Результаты работы были апробированы на 12 международных и 3 российских специализированных конференциях и семинарах.

7. Автореферат Автореферат полностью соответствует диссертации и опубликованным по ней работам.

8. Замечания по работе Представленная работа выполнена на высоком научном уровне. Вместе с тем, по диссертационной работе можно сделать следующие замечания:

1. Название диссертации не в полной мере отражает ее суть и содержание, поскольку кроме радиационной ползучести, значительная часть диссертационной работы посвящена исследованию набухания и микроструктурных характеристик облученной стали 08X18H10T;
2. На стр. 55 при описании НДС образца, состоящего из одной трубки, допущена ошибка: вместо $\sigma_z=2 \cdot \sigma_0$ нужно писать $\sigma_z=1/2 \cdot \sigma_0$;
3. На странице 41 в 9 строке снизу в слове «вызванная» и на странице 114 в 5 строке сверху в слове «значение» допущены опечатки;
4. На некоторых графиках (см., например, рис.4.19) выбран крайне неудобный масштаб по оси Y;
5. На графиках, показанных на рисунках 3.11–3.12 и 4.19–4.21, не нанесены характеристики петель и пор в исследуемой стали при нулевом напряжении, хотя в соответствующих таблицах они имеются.

9. Заключение Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа Макарова Евгения Игоревича является законченным научным трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. Выводы, основанные на большом и достоверном экспериментальном материале, хорошо обоснованы, обладают научной новизной и представляют как научную, так и практическую ценность. Сочетание научной новизны, достоверности результатов и практической значимости позволяет заключить, что диссертационная работа Макарова Е.И. на тему **«Закономерности радиационной ползучести стали марки 08X18H10T, облучённой до высоких нейтронных повреждающих доз при температурах 330–420°C»** представляет собой законченную научно-квалификационную работу и отвечает критериям, установленным в п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 01 октября 2018 г. № 1168), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Макаров Евгений Игоревич, заслуживает

присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
кандидат технических наук, ведущий
научный сотрудник Акционерного
общества «Государственный научный
центр Российской Федерации – Физико-
энергетический институт имени
А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)



С.И. Поролло

26.03.2020г.

Подпись С.И. Поролло заверяю:

Заместитель генерального директора по
науке и инновационной деятельности
Акционерного общества «Государственный
научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени
А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ –
ФЭИ»), кандидат экономических наук,
доцент



/ Н.Г. Айрапетова

Сведения об оппоненте:

Поролло Сергей Иванович,
кандидат технических наук

Специальность 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Адрес: (249033) г. Обнинск, Калужской обл., пл. Бондаренко, 1

Телефон: +7 (484) 399-87-08

e-mail: porollo@ippe.ru

Место работы: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

Должность: ведущий научный сотрудник лаборатории 24 Отделения инновационных реакторных материалов и технологий (лаб. 24 ОИРМиТ АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»).