

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Чернова Ивана Ильича на диссертационную работу Макарова Евгения Игоревича «Закономерности радиационной ползучести стали марки 08X18H10T, облученной до высоких нейтронных повреждающих доз при температурах 330–420 °С», 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»)

Актуальность работы

Развитие атомной энергетики в ближайшие годы будет связано не только со строительством новых атомных станций, но и с продлением назначенного срока службы действующих ВВЭР, что отражено во многих межотраслевых программах как одно из важных направлений политики Госкорпорации «Росатом».

Определение закономерностей низкотемпературной радиационной повреждаемости аустенитных коррозионно-стойких сталей при температурах облучения в интервале 280–460 °С, а также влияния сжимающих и растягивающих напряжений на радиационное распухание и ползучесть внутрикорпусных устройствах (ВКУ) при возможных повреждающих дозах 5–100 сна является актуальным направлением исследований в реакторном и радиационном материаловедении. Данные, полученные в рамках рассматриваемой диссертационной работы, необходимы для создания базы данных по физико-механическим свойствам материала ВКУ для обоснования продления срока службы ВКУ ВВЭР-1000 до 60 лет для оценки степени деформации радиационной ползучести, распухания, изменения физико-механические свойства аустенитных сталей с ростом повреждающей нейтронной дозы до 150 сна в интервале температур облучения, характерных для ВКУ ВВЭР.

В связи с вышеотмеченным, диссертационная работа Макаров Е.И., посвященная экспериментальному определению закономерностей радиационной ползучести и влияния напряженного состояния на деформацию ползучести и характеристики микроструктуры стали марки 08X18H10T, облученной до различных значений повреждающей дозы в реакторе БОР-60 при температуре, характерной для ВКУ водо-водяных энергетических реакторов, является крайне **актуальной**.

Общая характеристика работы

Диссертация Макарова Е.И. состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Текст диссертации включает 126 страниц машинописного текста, 65 рисунков, 9 таблиц и список из 65 библиографических наименований цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность исследований, приведены цель и решаемые задачи, указаны новизна, теоретическая и практическая значимость работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена литературному обзору по теме диссертационной работы и выявлена степень исследованности по теме диссертации. Рассмотрены зависимости распухания аустенитных сталей от условий облучения и показано наличие взаимосвязи радиационной ползучести и распухания аустенитных сталей, используемых для оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах и ВКУ. Представлены и проанализированы имеющиеся данные о влиянии вида напряженного состояния на радиационную ползучесть и радиационное распухание, а также на параметры микроструктуры аустенитных сталей.

В главе 2 рассмотрены методические вопросы исследования, включая применяемый конструкционный материал для газонаполненных образцов (ампул). Приведены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния газонаполненных образцов, методики до и послереакторных исследований, а также описаны условия облучения образцов в реакторе БОР-60.

В главе 3 приведены результаты исследования зависимости изменения диаметра газонаполненных ампул, выполненных из аустенитной стали 08X18H10T, от повреждающей дозы при температуре облучения 330–350 °С. Показано, что дозные зависимости деформации ползучести для газонаполненных образцов разной конструкции описываются линейной зависимостью при разных уровнях напряжения. Автором рассчитано среднее значение модуля радиационной ползучести для повреждающей дозы 40–90 сна, который для стали марки 08X18H10T составил $(2,4 \pm 0,4) 10^{-6}$ (МПа·сна)⁻¹. Приведенные результаты исследования микроструктуры материала газонаполненных образцов показали наличие равноосных зерен аустенита и равномерно распределенных в объеме материала глобулярных выделений второй фазы Ti(C, N), частиц радиационно-индуцированной мелкодисперсной G-фазы (Me₆Ni₁₆Si₇), дислокационных петель, в частности петель Франка, а также двойников деформации. Поры при использованной температуре облучения в материале всех исследованных образцов при данной температуре облучения отсутствовали. С ростом сжимающего и растягивающего напряжений концентрация петель в облученной стали 08X18H10T увеличивалась, а средний размер петель не изменялся с ростом как растягивающего, так и сжимающего напряжения.

В главе 4 автором представлены результаты проведенных в реакторе БОР-60 исследований газонаполненных образцов аустенитной стали 08X18H10T, облученных в интервале температуры 400–420 °С. Показано, что деформация ползучести прямо пропорциональна повреждающей дозе и растягивающему тангенциальному напряжению. Закономерности эволюции пористости в облученной нейтронами стали 08X18H10T в аустенизированном состоянии совпадают с известными общи-

ми закономерностями развития пористости в сталях аустенитного класса, заключающимися в следующем.

– Наличие одинаковых структурных составляющих в облученных образцах – дислокаций, дислокационных петель, вакансионных пор и др. На инкубационном периоде распухания (до 17 сна) влияние сжимающего и растягивающего напряжений на концентрацию и размеры дислокационных петель и вакансионных пор одинаковое.

– Наличие распухания с высокой объемной долей пор, достигающей 10 % при ПЭМ исследованиях, независимо от типа напряжения в газонаполненных образцах аустенизированной стали 08X18H10T, облученной до повреждающей дозы 36 сна.

– Концентрация вакансионных пор во всех образцах зависит от уровня напряжения и составляет $(1,4 \div 4,0) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Сжимающее напряжение, как и растягивающее, ускоряет процесс развития вакансионной пористости в сторону увеличения распухания за счет роста размеров пор при практически неизменяющемся значении их концентрации, что характерно для процессов коалесценции.

В расчетах по разным методикам получены значения коэффициента влияния растягивающего напряжения на распухание – $P = (0,005 \pm 0,002) \text{ МПа}^{-1}$ и $P = (0,007 \pm 0,002) \text{ МПа}^{-1}$, которые хорошо согласуются с данными для других сталей аустенитного класса.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- впервые разработаны и испытаны газонаполненные образцы новой конструкции; разработанные способы испытания материалов, защищенные двумя патентами РФ, применены при облучении газонаполненных образцов новой конструкции в ядерном реакторе;

- получены новые экспериментальные зависимости деформации от повреждающей дозы и значений растягивающего и сжимающего напряжений газонаполненных образцов из стали 08X18H10T, облученных в реакторе БОР-60 в интервалах температуры 330–350 и 400–420 °С;

- на основе полученных экспериментальных данных рассчитан модуль радиационной ползучести стали 08X18H10T который на стадии установившейся ползучести составил $(2,4 \pm 0,4)10^{-6} \text{ (МПа} \cdot \text{сна)}^{-1}$ для уровней повреждающей дозы до 90 сна в интервале температуры облучения от 330 до 350 °С, необходимый для проведения прочностных расчетов для обоснования срока службы внутрикорпусных устройств ВВЭР.

- на основе обобщения и анализа полученных данных построены зависимости параметров микроструктуры и пористости (распухания) стали марки 08X18H10T, облученной в реакторе БОР-60 в интервалах температуры облучения 330–350 и 400–420 °С, от значений растягивающего и сжимающего напряжений.

Научная и практическая значимость

Результаты диссертационной работы, без сомнения, найдут свое применение в области радиационного материаловедения и теоретических расчетах, описывающих влияния растягивающих и сжимающих напряжений на радиационную ползучесть и распухание стали 08X18H10T. Экспериментальные результаты, в том числе модуль радиационной ползучести, полученные автором, использованы в прочностных расчетах при продлении срока службы внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000 и для обоснования срока службы выгородки на 60 лет в новых проектах ВВЭР-1200 (ВВЭР-ТОИ).

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается воспроизводимостью полученных экспериментальных данных на большом количестве исследованных образцов. Экспериментальные данные получены на аттестованном оборудовании с применением сертифицированных методик испытаний, а также наличием системы обеспечения качества в АО «ГНЦ НИИАР».

Результаты работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, хорошо апробированы на специализированных российских и международных научных конференциях и семинарах, получены два патента – на изобретение и полезную модель.

Выводы соответствуют поставленной цели и решаемым задачам.

Автореферат и публикации автора полностью отражают содержание диссертационной работы.

Замечания по работе

1. В диссертационной работе нет рассмотрения и, тем более, обсуждения взаимосвязи полученных данных по микроструктуре материала газонаполненных образцов стали 08X18H10T с механизмами ползучести, например ИНПА и т.д.

2. Хотелось бы видеть в работе, почему «сжимающее напряжение, как и растягивающее, ускоряет процесс развития вакансионной пористости в сторону увеличения распухания за счет роста размеров пор при практически неизменяющемся значении их концентрации», т.е. механизмы такого процесса?

3. Было бы уместно обсудить влияние размерного фактора газонаполненных образцов (баллончиков) на полученные результаты по модулю радиационной ползучести стали 08X18H10T.

4. Вопрос по табл. 2.1 (стр. 48): почему в стали высокая концентрация Mn – до 2%, т.е. он добавлен специально, т.к. в российских железных рудах обычно всего до 0,8% Mn?

5. На многих рисунках очень неразборчивые надписи, например, рис. 2.3, 2.6, 2.7 и т.д.

6. К сожалению, стоит отметить наличие ряда орфографических и грамматических ошибок и опечаток, встречающихся в тексте диссертационной работы. Хотя, если работа большая, избавиться от них трудно.

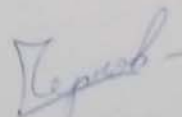
Заключение

Считаю, что указанные замечания не снижают значимость полученных автором результатов и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Диссертация Макаров Е.И. удовлетворяет требованиям 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 ее автор, Макаров Евгений Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,
профессор, доктор физико-математических наук, профессор отделения ядерной физики и технологий офиса образовательных программ Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт»

30 мая 2020 года.



/ И.И. Чернов /

Сведения об оппоненте:

Чернов Иван Ильич,

доктор физико-математических наук,

ученое звание – профессор.

Специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Адрес: 115409 г. Москва, Каширское шоссе, 31

Телефон: +7 916 156 92 28

e-mail: i_chernov@mail.ru

Место работы: Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт» (НИЯУ МИФИ).

Должность: профессор отделения ядерной физики и технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ.

Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ



Моконова Н.С.