

Отзыв официального оппонента

НИЦ «Курчатовский институт» ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 3834	в ДЕЛО
«28» 12 2020 г.	№
Осн. 1 л.	подп.
Прил. 8+2 л.	

на диссертационную работу Пироговой Натальи Евгеньевны на тему
«Определение доминирующих механизмов и разработка методов прогнозирования
коррозионного растрескивания под напряжением облученных аустенитных сталей для
ВКУ ВВЭР и PWR»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Определяющая роль в структуре атомной энергетики принадлежит реакторам типа ВВЭР и PWR, которые составляют ее экономическую основу. Успешная эксплуатация этого типа реакторов существенным образом зависит от важнейших научно-технических решений по проблемам безопасности и эффективной работоспособности активных зон и корпусов реакторных установок. Опыт эксплуатации действующих и экстремальные параметры проектируемых реакторов типа ВВЭР, необходимость расчетного и экспериментального обоснования продления срока службы несменяемых конструкций - ВКУ, сосредоточили внимание исследователей на материаловедческих проблемах аустенитных хромоникелевых сталях, основного конструкционного материала ВКУ. Последние в реакторах типа ВВЭР и PWR подвергаются наибольшему дозовым нагрузкам, которые почти в 1000 раз превосходят дозовые нагрузки, приходящиеся на корпус реактора. Наиболее облучаемым элементом ВКУ является выгородка, которая непосредственно примыкает к активной зоне реактора.

Из-за градиента плотности потока нейтронов по толщине выгородки происходит неравномерный γ -разогрев, и возникает градиент температуры по толщине выгородки. Сочетание этих факторов приводит к неравномерному распуханию по толщине выгородки, что в свою очередь вызывает появление растягивающих напряжений на внутренней стороне выгородки, контактирующей с теплоносителем первого контура. Таким образом, присутствуют три неблагоприятных фактора: высокие дозовые нагрузки, растягивающие напряжения и воздействие коррозионной среды (теплоносителя), оказывающие влияние на ВКУ реакторов типа ВВЭР и PWR. Сочетание этих факторов может привести к коррозионному растрескиванию под напряжением элементов ВКУ, и, поскольку они являются незаменимыми элементами, то КРН может стать фактором, ограничивающим ресурс реакторной установки. Таким образом, выявление доминирующих механизмов, стимулирующих КРН облученных аустенитных сталей, является важной задачей. Также важным является создание физически обоснованной

модели, позволяющей прогнозировать долговечность ВКУ по критерию коррозионного растрескивания. В связи с этим тема диссертационной работы является актуальной.

Научная новизна работы связана, в первую очередь, с тем, что диссертантом выявлены и четко сформулированы три доминирующих механизма, стимулирующих КРН облученных аустенитных сталей в водной среде, имитирующей теплоноситель I контура ВВЭР и PWR: радиационно-индуцированное ослабление прочности границ зерен, межзеренное проскальзывание и локализованное деформирование. Во-вторых, сформулирован критерий инициации КРН облученных аустенитных сталей, и разработана физически обоснованная количественная модель, учитывающая доминирующие механизмы, стимулирующие КРН в водной среде, имитирующей теплоноситель I контура ВВЭР и PWR. Модель позволяет прогнозировать зависимость порогового напряжения от повреждающей дозы и время до инициации КРН при немонотонном нагружении, когда напряжения превышают пороговые. Далее, впервые экспериментально выявлена связь между энергией межзеренного разрушения (прочностью границ зерен) и сопротивлением КРН; установлено наличие низкотемпературной неустановившейся ползучести облученных аустенитных сталей при $T \approx 300-350$ °С. Экспериментально доказано, что прочность границ зерен аустенитных сталей и, соответственно, стойкость к КРН, облученных в смешанном спектре нейтронов (спектр реакторов типа ВВЭР или PWR) ниже, чем сталей, облученных в реакторах на быстрых нейтронах. Предложена трактовка обнаруженного явления, и оно связывается с различной скоростью наработки гелия, возникающего в результате ядерных реакций при взаимодействии нейтронов с разным энергетическим спектром с легирующими и примесными элементами хромоникелевых сталей.

Практическая значимость работы заключается разработке новых разделов в руководящем документе РД ЭО 1.1.2.99.0944-2013 «Методика расчета прочности и остаточного ресурса внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет» и государственных стандартах ГОСТ «ВОДО-ВОДЯНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР. Расчёт на прочность внутрикорпусных устройств на стадии проектирования и постпроектной стадии» по расчету долговечности ВКУ по критерию КРН. Кроме того, предложена методика экспресс оценки сопротивления КРН облученных аустенитных хромо-никелевых сталей на базе испытаний миниатюрных образцов из этих сталей на ударный изгиб при низкой температуре, обеспечивающей межзеренное разрушение слабых границ зерен. А также проведена оценка погрешности расчетного определения флюенса быстрых нейтронов и повреждающей дозы с использованием программного средства КАТРИН-2.5 на основе расчетно-

экспериментального определения этих параметров по результатам экспериментально измеренных удельных активностей микропроб облученной 321 стали.

Достоверность и обоснованность научных результатов подтверждается тем, что экспериментальные исследования проводились согласно российским и международным стандартам на сертифицированном оборудовании. Расчетные методы использовали теорию статистической обработки результатов, а также математические методы решения нелинейных уравнений. Модели строились на базе методов механики повреждений и физики прочности. Достоверность результатов обусловлена соответствием полученных расчетных данных и зависимостей оригинальным экспериментальным данным, а также данным из литературных источников, полученных при схожих условиях эксперимента.

Общая характеристика диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав и выводов по диссертации. Работа изложена на 248 страницах, включая 135 рисунков и 42 таблицы. Библиографический указатель состоит из 167 источников.

Во **введении** обоснована актуальность проблемы определения доминирующих механизмов КРН облученных аустенитных сталей для ВКУ ВВЭР, а также необходимость разработки методов прогнозирования долговечности ВКУ ВВЭР по критерию КРН.

В **первой главе** рассмотрены конструкция ВКУ ВВЭР и PWR и условия их эксплуатации. Проведен обзор литературы и дан анализ влияния основных эксплуатационных факторов: нейтронного облучения, температуры эксплуатации и теплоносителя I-го контура ВВЭР – на физико-механические характеристики и склонность к КРН хромоникелевых аустенитных сталей, к классу которых принадлежат материалы ВКУ.

Во **второй главе** приведены характеристики материалов, использовавшихся для исследований на склонность к КРН: стали типа 321 (08X18H10T и 12X18H10T), 304 (аналог российской стали типа X18H9) и 316 (аналог российских сталей типа X16H11M3), которые были облучены до различных повреждающих доз в разных спектрах нейтронов. Приведено описание методов исследования.

В **третьей главе** приведено описание расчетно-экспериментального метода определения плотности потока, флюенса нейтронов и повреждающей дозы в единицах смещения на атом с использованием экспериментально измеренной активности микропроб облученного материала, из которого были изготовлены образцы для испытаний на КРН. Сравнение плотности потока, флюенса быстрых нейтронов и повреждающей дозы, полученных расчетно-экспериментальным путем с использованием экспериментально измеренных удельных активностей микропроб металла чехла канала для нейтронных измерений со значениями, рассчитанными по ПС КАТРИН-2.5 в ОКБ

«ГИДРОПРЕСС», показало, что различие между ними не превышает 2 %. В этой главе также приводится сравнение дозовых нагрузок, полученных с использованием экспериментально измеренных активностей микропроб образцов, облученных в реакторе БОР-60, с дозовыми нагрузками, определенными с использованием нейтронных активационных детекторов.

В четвертой главе приведены результаты автоклавных испытаний образцов на растяжение из сталей марок 321, 304 и 316 в воде высоких параметров, имитирующей теплоноситель I-го контура ВВЭР, а также в воде, обогащенной кислородом. Испытания проводились при различных режимах нагружения.

Было показано, что КРН 321 стали (08X18H10T), облученной в ВВЭР, в основном происходит по хрупкому межзеренному (МЗ) механизму независимо от режима нагружения образцов. Также было показано, что обеднение границ хромом и упрочнение в результате наклепа не являются причиной КРН 321 стали в обескислороженной среде теплоносителя I-го контура ВВЭР, так как не происходило разрушения стали по межзеренному механизму.

Автоклавные испытания образцов из 304 и 316 сталей показали, что КРН этих материалов происходит по двум механизмам: хрупкому межзеренному и хрупкому транскристаллитному.

Согласно выполненным исследованиям, энергетический спектр нейтронов оказывает существенное влияние на склонность облученных аустенитных сталей к КРН в водной среде теплоносителя I-го контура ВВЭР. Облучение в смешанном спектре нейтронов увеличивает склонность материала к КРН.

Анализ результатов автоклавных испытаний показал, что основными доминирующими механизмами для КРН 321, 316 и 304 сталей являются: ослабление границ зерен, межзеренное проскальзывание и локализованное деформирование. Причем локализованное деформирование играет существенную роль для 304 и 316 сталей, тогда как для 321 стали оно значительно подавлено за счет радиационно-индуцированных выделений карбидов титана и G-фазы.

Сравнение режимов нагружения показало, что при одном и том же уровне максимальных напряжений режим с постоянной нагрузкой является более консервативным (повреждающим), чем циклическое нагружение.

В пятой главе показано влияние облучения на прочность границ зерен и её связь с КРН. Как было показано в четвертой главе, снижение прочности границ зерен в результате нейтронного облучения, по-видимому, является ключевым фактором,

определяющим сопротивлением КРН аустенитных сталей марок 321, 304 и 316, по крайней мере, для случаев, когда доминирует межзеренное разрушение.

Для определения прочности границ зерен облученных сталей марок 321, 316 и 304 были разработаны миниатюрные образцы на ударный изгиб и проведены их испытания.

Анализ экспериментальных данных показал, что с увеличением повреждающей дозы происходит снижение прочности границ зерен. Также было показано, что энергетический спектр нейтронов оказывает сильное влияние на прочность границ зерен. При одинаковых повреждающих дозах прочность границ зерен материала, облученного в смешанном спектре нейтронов, типичном для реакторов ВВЭР или PWR, ниже, чем для материала, облученного в быстром спектре, типичном для реакторов на быстрых нейтронах. Влияние повреждающей дозы и энергетического спектра на прочность границ зерен, в первую очередь, связано с увеличением концентрации гелия в границах зерен.

На основании результатов испытаний миниатюрных образцов на ударный изгиб при низкой температуре, обеспечивающей межзеренное разрушение при слабых границах зерен, была разработана методика экспресс-оценки сопротивления КРН облученных аустенитных сталей.

В шестой главе представлена разработанная модель, позволяющая прогнозировать долговечность ВКУ по критерию КРН.

Было показано, что деформирование облученных аустенитных сталей при постоянной нагрузке и температурах испытания в диапазоне 300÷350 °С происходит на фоне неустановившейся ползучести. Диаграммы деформирования образцов при постоянной нагрузке включали две выраженные стадии ползучести, а именно первую и третью стадию, вторая, стационарная стадия, отсутствовала. Деформирование на третьей стадии ползучести соответствует развитию коррозионного разрушения, т.е. развитию коррозионных трещин, которые инициируются с поверхности, поскольку в тех экспериментах, где скорость ползучести уменьшалась до нуля, третья стадия ползучести отсутствовала, и образец не разрушался. Процессы деформирования и повреждения материала, протекающие на первой стадии ползучести, подготавливают зарождение поверхностных коррозионных трещин в конце этой стадии.

Таким образом, в качестве критерия инициации КРН был принят момент разрушения пассивирующей пленки, когда деформация ползучести достигает некоего критического значения, соответствующего переходу от первой стадии ползучести к третьей. Исходя из представленных экспериментальных данных, можно принять, что эта величина не зависит от уровня напряжений и марки аустенитной стали. Таким образом, в

качестве критерия инициации КРН диссертантом рассматривается разрыв пассивирующей пленки.

Следуя логике диссертанта, для реализации развития межзеренных трещин по механизму КРН сразу после их зарождения необходимо выполнить следующие условия:

а) наличие непрерывного деформирования образца для разрушения продуктов коррозии в полости развивающейся трещины;

б) наличие межзеренного проскальзывания; только в этом случае образуются межзеренные микротрещины при локализованном внутризеренном деформировании, происходящем в облученных аустенитных сталях. При отсутствии межзеренного проскальзывания локализованное деформирование обеспечивает общее пластическое деформирование образца без образования микротрещин на границах зерен.

В данной главе предложено уравнение, описывающее низкотемпературную ползучесть с учетом развития межзеренных микротрещин. На основании экспериментальных данных определены коэффициенты в этом уравнении. Важным следствием предложенной модели является существование порогового напряжения, зависящего от дозы, ниже которого не происходит разрушения по механизму КРН при бесконечно большом времени испытаний. Также из уравнения ползучести было получено выражение для времени до разрушения по механизму КРН при напряжениях, превышающих пороговое. Было показано хорошее соответствие прогнозных зависимостей для порогового напряжения и времени до разрушения имеющимся экспериментальным данным.

В седьмой главе показано применение модели прогнозирования долговечности ВКУ по критерию КРН, описанной в шестой главе, при разработке государственного стандарта ГОСТ Р «ВОДО-ВОДЯНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР. Расчёт на прочность внутрикорпусных устройств на стадии проектирования и постпроектной стадии». Стандарт предназначен для расчетного обоснования прочности элементов ВКУ ВВЭР на стадии проектирования с учетом изменения свойств материалов этих элементов под действием эксплуатационных факторов за назначенный срок службы. Предложенная модель использовалась для анализа реализации критического события – зарождения трещины при статическом нагружении по механизму коррозионного растрескивания в элементе конструкции в процессе эксплуатации.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертации, они отражают достижение целей работы и получение исчерпывающих результатов при решении поставленных в работе научно-технических задач.

Диссертация и автореферат написаны грамотным техническим языком, содержат достаточное количество экспериментальных данных, теоретических выкладок, иллюстраций для оценки результатов работы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации, публикации по теме диссертации отражают ее основное содержание.

Замечания и вопросы по диссертации.

1 Повреждающие дозы, набранные изучаемым материалом, в одном случае определяются при помощи измерения активности микропроб самого металла, а в другом используются нейтронные активационные детекторы. Какой метод дает более адекватную информацию?

2 Утверждение, что влияние повреждающей дозы и энергетического спектра нейтронов на прочность границ зерен, в первую очередь, связано с увеличением концентрации гелия на границах зерен, является дискуссионным. Как в таком случае, проявляется роль водорода и радиационно-индуцированных сегрегаций?

3 В качестве критерия инициации КРН рассматривается разрыв пассивирующей пленки на активной поверхности стали(образца). Каким образом учитывались физико-механические характеристики пленки, и по каким критериям оценивались их зависимости от флюенса, температуры, времени испытаний, концентрации кислорода? Каким образом практически можно перейти к описанию реального разрушения элемента ВКУ, используя представленный механизм КРН?

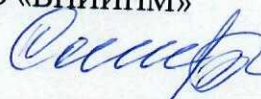
4 Создало ли использование разработанной модели в актуализированной версии ГОСТа предпосылки к уменьшению консервативности прочностных расчетов элементов ВКУ ВВЭР по сравнению с предыдущей версией?

Приведенные выше замечания не снижают актуальность, научную новизну, практическую ценность диссертации, а также общую оценку работы, выполненной на высоком научном и методическом уровне.

Считаю, что представленная к защите диссертационная работа Н.Е. Пироговой является законченной научно-квалификационной работой, включающей комплекс результатов экспериментальных, расчетных и теоретических исследований, приводящих к существенному продвижению в понимании механизмов КРН и вносящих значительный практический вклад в методы оценки прочности и долговечности ВКУ ВВЭР и PWR. Научная общественность ознакомлена с основными результатами работы, опубликованными в России и за рубежом, а также доложенными на российских и международных научно-технических конференциях.

Представленная работа полностью соответствует требованиям, сформулированным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, и предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Пирогова Наталья Евгеньевна заслуживает присуждения искомой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение).

Начальник научно-исследовательского отдела
конструкционных материалов и изделий АО «ВНИИНМ»
кандидат технических наук, доцент



М.В. Леонтьева-Смирнова

специальность 05.16.01. – «Металловедение и термическая обработка металлов».

E-mail: mvleontyeva-smirnova@bochvar.ru
ls-mv@yandex.ru

Подпись Леонтьевой-Смирновой М.В. заверяю,
Генеральный директор АО «ВНИИНМ»,
кандидат химических наук



Л.А. Карпюк