



ОКБ
ГИДРОПРЕСС
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «АТОМЭНЕРГОМАШ»

**Акционерное общество
«Ордена Трудового Красного Знамени
и ордена труда ЧССР опытное
конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС»
(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)**

ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск,
Московская область, 142103
Телефон (495) 502-79-20, (495) 502-79-10,
факс (4967) 69-97-83, (4967) 54-25-16
E-mail: grpress@grpress.podolsk.ru
ОКПО 08624607, ОГРН 1085074009503
ИНН 5036092340, КПП 503601001

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор
АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

В.А. Пиминов

2020 г.



№ _____

На № _____

от _____

ОТЗЫВ

**ведущей организации на диссертацию Пироговой Наталии Евгеньевны
«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)**

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горюнина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»). Работа посвящена расчетно-экспериментальному построению физико-эмпирических моделей коррозионного растрескивания под напряжением (КРН).

Актуальность работы. Внутрикорпусные устройства (ВКУ) ВВЭР изготавливаются из хромо-никелевых аустенитных нержавеющей сталей и служат для установки и закрепления активной зоны в корпусе реактора, а также для организации потока теплоносителя внутри реактора. Работоспособность активной зоны реактора зависит от состояния ВКУ, что определяет необходимость тщательного анализа всех возможных механизмов повреждения элементов ВКУ, приводящих к формоизменению и

НИИ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»	
Вх. № 3693	в ДЕЛО
«14» 12 2020 г.	№ _____
Осн. 1 л.	подп. _____
Прил. 8х2 л.	

разрушению, и их учету в обоснованиях безопасности реакторной установки. Разработка реакторов ВВЭР нового поколения с более высокой мощностью и сроком эксплуатации, а также продление эксплуатации работающих реакторов типа ВВЭР, сопровождается проявлением механизмов повреждения, ранее не учитываемых в силу их незначительности на малых временных отрезках. Одним из важнейших факторов, сопутствующим увеличению времени эксплуатации, является высокая дозовая нагрузка и увеличение неравномерности нейтронного облучения на элементы ВКУ и, в первую очередь на выгорodka. Увеличение неравномерного радиационного распухания в совокупности с неравномерным температурным полем приводит к формированию области растягивающих напряжений на внутренней поверхности выгорodka, контактирующей с коррозионной средой теплоносителем первого контура, что является одним из условий проявления КРН. Автором диссертации и его научным руководителем задача исследования формулируется как задача стимулированного облучением коррозионного растрескивания под напряжением, эффект которого ограничивает ресурс элементов ВКУ ВВЭР.

До данной диссертации, по мнению автора, отсутствовала физически обоснованная модель, учитывающая основные механизмы КРН облученных аустенитных сталей в среде теплоносителя I контура ВВЭР и PWR, позволяющая, прогнозировать долговечность ВКУ по критерию коррозионного растрескивания.

В связи с этим диссертационная работа, посвященная определению доминирующих механизмов и разработке методов прогнозирования коррозионного растрескивания под напряжением облученных аустенитных сталей для ВКУ ВВЭР и PWR можно считать актуальной.

Научная новизна работы состоит в получении новых данных о процессах КРН облученных аустенитных сталей в условиях, характерных для рабочих условий ВКУ ВВЭР, и в построении физико-эмпирических расчетных моделей для оценки степени повреждения элементов ВКУ и

прогнозирования ресурса. Можно выделить достижения, имеющие признаки новизны:

- Сформулированы условия инициации КРН облученных аустенитных сталей, и разработана физическая количественная модель, учитывающая доминирующие механизмы, стимулирующие КРН в среде, имитирующей теплоноситель I контура ВВЭР и PWR. Модель позволяет прогнозировать зависимость порогового напряжения от повреждающей дозы и времени.

- Выявлены 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. Показано, что обеднение границ зерен хромом в результате облучения не является доминирующим механизмом КРН.

- Разработан метод экспресс оценки склонности к КРН на базе испытаний миниатюрных образцов на ударный изгиб при низкой температуре, обеспечивающей межзеренное разрушение слабых границ зерен.

- Выявлена низкотемпературная ползучесть облученных аустенитных сталей при температуре в диапазоне $300\div 350^{\circ}\text{C}$. Предложено описание механизма ползучести как результат перестройки микроструктуры, сформированной при облучении, под действием механического нагружения.

- Экспериментально доказано, что прочность границ зерен аустенитных сталей, облученных в смешанном спектре нейтронов (спектр реакторов типа ВВЭР или PWR) ниже, чем сталей, облученных в реакторах на быстрых нейтронах. Объяснением этого эффекта предложено объяснять, в первую очередь, различной скоростью наработки гелия, возникающего в результате ядерных реакций при взаимодействии нейтронов с ядрами элементов, входящих в состав стали.

- Показано, что пороговая повреждающая доза, ниже которой КРН аустенитных сталей отсутствует, существенно зависит от спектра нейтронов,

которым облучается аустенитная сталь. При облучении смешанным спектром нейтронов пороговая повреждающая доза значительно ниже, чем при облучении в быстром спектре нейтронов.

Достоверность представленных в диссертации результатов подтверждается отработанными методиками экспериментальных исследований типовых образцов из аустенитных сталей и апробированными методами исследования микроструктуры сталей после испытаний. Достоверность результатов подтверждена соответствием полученных расчетных данных и зависимостей оригинальным экспериментальным данным, а также данным из литературных источников, полученных при схожих условиях эксперимента.

Практическая значимость:

1. На основании предложенной физико-эмпирической модели, построенной на основе комплекса экспериментальных исследований, разработаны новые разделы для руководящего документа 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 предложены соответствующие разделы в государственный стандарт ГОСТ «ВОДО-ВОДЯНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР. Расчёт на прочность внутрикорпусных устройств на стадии проектирования и постпроектной стадии» (шифры программы национальной стандартизации 1.2.322-1.058.19 и 1.2.322-1.059.19, соответственно) по расчету долговечности ВКУ по критерию КРН.

2. Разработанная методика экспресс оценки сопротивления КРН облученных аустенитных хромо-никелевых сталей на основе испытаний на ударный изгиб микро (миниатюрных) образцов из этих сталей при низкой температуре позволяет оценивать эффективность компенсирующих мероприятий, например, отжига, а также ранжировать кандидатные материалы для новых ВКУ с точки зрения их стойкости к КРН.

Диссертация состоит из введения, 7 глав и выводов. Содержит 248 страниц текста, включая 135 иллюстраций, 42 таблиц и список литературы из 167 наименований.

Во введении отмечается актуальность, новизна и практическая значимость работы.

В первой главе дан обзор литературы и обоснована постановка задачи исследований.

Во второй главе рассмотрены свойства внутрикорпусных сталей, их склонность к КРН для различных повреждающих доз и разных спектров нейтронов. Приведены методы автоклавных испытаний, испытаний микро образцов, а также приведены методы СЭМ

Третья глава посвящена расчетно-экспериментальным методам определения плотности потока нейтронов, флюенса и повреждающей дозы на основе экспериментально измеренной активности микропроб облученной стали. Микропробы отбирались как с облученных образцов, так и с эксплуатировавшихся элементов ВКУ реакторов.

В четвертой главе приведены результаты автоклавных испытаний образцов на растяжение в воде, имитирующей теплоноситель I контура, а также в воде, обогащенной кислородом. Образцы из сталей облучались в различных энергетических спектрах нейтронов до повреждающих доз в диапазоне от ~ 4 до 150 сна. На основе литературных данных делается заключение, что на КРН влияют обеднение границ зерен хромом, локализованное деформирование, упрочнение, межзеренное проскальзывание, ослабление прочности границ зерен, вызванное генерацией гелия, что послужило основой для планирования дальнейших экспериментов. В главе получено, что обеднение границ хромом и упрочнение не являются причиной КРН в обескислороженной среде теплоносителя I-го контура ВВЭР, так как не происходило разрушения стали по межзеренному механизму.

Автоклавные испытания облученной в реакторе на быстрых нейтронах до 150 сна с радиационно-индуцированным обеднением границ зерен

хромом (с 18 до 10 масс. %) также показали, что этот фактор не оказывает влияния на склонность к межзеренному КРН при испытаниях в обескислороженной ($< 0,01$ мг/кг) среде теплоносителя I-го контура ВВЭР.

Выполненные исследования показали, что энергетический спектр нейтронов оказывает значительное влияние на склонность облученных аустенитных сталей к КРН в водной среде теплоносителя I-го контура ВВЭР, при этом облучение в смешанном спектре нейтронов увеличивает склонность стали к КРН.

Что касается ползучести по механизму межзеренного проскальзывания, то испытания показали отсутствие стадии с постоянной скоростью удлинения образца.

Пятая глава посвящена исследованию влияния облучения на прочность границ зерен и, следовательно, влиянию облучения на КРН. Для построения зависимости прочности границ зерен от облучения были разработаны и испытаны на ударный изгиб микро (миниатюрные) образцы. Образцы были облучены в диапазоне от 4 до 125 сна в разных энергетических спектрах нейтронов. Удельная энергия межзеренного разрушения определяет прочность границ зерен. Сделано предположение, что снижение прочности границ зерен связано не только с увеличением концентрации гелия, но и с ростом зернограницных радиационно-индуцированных сегрегаций.

В шестой главе сформулированы основы эмпирической модели прогнозирования КРН. Обсуждаются результаты, полученные в предыдущих главах. Сформулированы положения о протекании процессов на уровне зерен для «третьей стадии ползучести». Предполагается, что коррозионные трещины, инициируемые с поверхности образца, растут вследствие ползучести и локальных разрушений. Приводится зависимость скорости ползучести от исследуемых процессов повреждения при механическом нагружении.

Седьмая глава описывает практическое применение модели прогнозирования КРН в расчетах на прочность ВКУ ВВЭР. Приводится зависимость порогового напряжения инициации КРН в ГОСТ и объясняется,

что «все точки, соответствующие образцам, в которых наблюдалась инициация КРН, лежат выше прогнозной зависимости» из ГОСТа, т.е. является консервативной. Отмечается, что консервативным является оценка времени до разрушения.

В качестве замечаний по диссертационной работе можно отметить следующие:

1. В представленной диссертационной работе дан анализ доминирующих механизмов КРН облученных аустенитных сталей для ВКУ ВВЭР и PWR, однако отсутствуют данные по КРН сварных соединений этих сталей.

2. В диссертации недостаточно обоснована правомерность использования данных по КРН облученных образцов (постреакторные испытания) применительно к оценке коррозионного растрескивания, происходящего в процессе эксплуатации элементов ВКУ, при котором происходит такое явление как радиационная ползучесть.

3. В работе приведено слишком малое количество экспериментов на КРН облученных до одинаковой дозы образцов, испытанных при циклическом нагружении, для того, чтобы делать вывод о большей консервативности режима с постоянной нагрузкой.

Отмеченные замечания не снижают актуальности, научной новизны и практической ценности диссертационной работы.

В целом следует отметить, что диссертация Н.Е.Пироговой посвящена важной как с научной, так и с практической точек зрения теме, а именно, изучению механизмов КРН облученных аустенитных сталей для ВКУ ВВЭР и PWR. Работа выполнялась в течение продолжительного времени, является результатом многочисленных экспериментов, в том числе, с облученными образцами и содержит новые научные результаты. Автореферат отражает содержание диссертационной работы. Текст диссертации подробно освещает

постановку задач, экспериментальные и расчетные методы их решения. Результаты диссертационной работы хорошо освещены в научных публикациях автора и доложены на научных семинарах и конференциях высокого уровня.

На основе изложенного можно сделать вывод, что диссертация Натальи Евгеньевны Пироговой является законченной научной работой, вносящей существенный вклад в исследование механизмов КРН и разработку методов прогнозирования КРН облученных аустенитных сталей для ВКУ ВВЭР и PWR, и представляет теоретическую и практическую ценность.

Диссертационная работа Пироговой Н.Е. на тему «Определение доминирующих механизмов и разработка методов прогнозирования коррозионного растрескивания под напряжением облученных аустенитных сталей для ВКУ ВВЭР и PWR», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, по актуальности, научной новизне, практической и теоретической значимости отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Пирогова Наталья Евгеньевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение).

Диссертационная работа заслушана и обсуждена на расширенном заседании секции № 9 НТС АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (Протокол № 4 от 16 ноября 2020 г.).

Отзыв составили:

Заместитель генерального конструктора
по научной работе – начальник отдела,
доктор технических наук



Семишкин Валерий Павлович

Начальник группы
отдела прочности



Евдокименко Владимир Викторович

Ведущий конструктор
отдела материаловедения



Комолов Владимир Михайлович