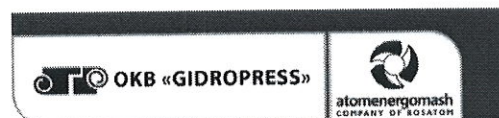


Акционерное общество «Ордена
Трудового Красного Знамени и ордена
труда ЧССР опытное конструкторское
бюро «ГИДРОПРЕСС»
(АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»)



Joint Stock Company
"Experimental and Design Organization
"GIDROPRESS" awarded the Order of the Red
Banner of Labour and CZSR Order of Labour"
(OKB "GIDROPRESS")

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный конструктор

В.А. Пиминов

« 08 » 04 2015г.

О Т З Ы В

ведущей организации АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» о диссертационной работе «**Исследование и прогнозирование радиационного и теплового охрупчивания материалов эксплуатируемых и перспективных корпусов реакторов ВВЭР**» соискателя Елены Владимировны Юрченко по специальности 05.16.09 «Материаловедение (машиностроение)».

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии "Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей" (ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»).

Актуальность работы. Анализ условий эксплуатации реактора типа ВВЭР показывает, что основными повреждающими факторами, способствующими деградации материала корпуса реакторов, являются нейтронное облучение и тепловое старение. Поэтому для оценки ресурса корпуса реактора необходимы знания о кинетике охрупчивания материала под воздействием нейтронного облучения и рабочей температуры.

В связи с надвигающимися исчерпанием срока службы проектов корпусов реакторов актуальны работы по продлению срока службы их ресурса до 60 лет.

Исполнитель Петрова О.Ю.

Телефон ((4967) 65-29-07

Для качественного выполнения комплекса работ по обоснованию продления срока эксплуатации и качественного выполнения комплекса работ по обоснованию продления эксплуатации целесообразно использование нормативных зависимостей, актуализированных с использованием результатов испытаний образцов – свидетелей требуется построение новых нормативных зависимостей.

При проектировании реакторов нового поколения из новых и модифицированных марок сталей актуальным является использование результатов испытаний ускоренно облученных (за малое время) образцов для прогноза охрупчивания материала при менее интенсивном облучении, типичном для облучения стенки корпуса реактора (за длительное время).

Для обеспечения оптимальной технологии изготовления новых и модифицированных сталей необходимо знание пороговых значений концентрации примесных элементов, ниже которых сопротивление хрупкому разрушению материалов не растет.

В связи с этим диссертационная работа Елены Владимировны Юрченко, посвященная исследованию кинетики охрупчивания материалов корпусов реакторов типа ВВЭР (эксплуатирующихся и проектируемых) в процессе эксплуатации под действием нейтронного облучения и теплового старения является актуальной.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана методология прогнозирования радиационного охрупчивания корпусных реакторных материалов и получены новые дозо-временные зависимости для материалов корпусов реакторов ВВЭР, учитывающие влияние примесных и легирующих элементов, а также температуру облучения.
2. Выявлены закономерности и определено влияние интенсивности нейтронного облучения (эффект флакса нейтронов) на радиационное охрупчивание корпусных материалов ВВЭР (сдвиг критической температуры хрупкости) в зависимости от доминирующих механизмов радиационного повреждения.
3. Предложен подход к определению пороговых и предельных значений концентрации примесных элементов и установлены конкретные пороговые и предельные значения содержания фосфора и меди для материалов корпусов реакторов ВВЭР.
4. Разработан новый экспериментально-расчетный метод для прогнозирования теплового старения материалов корпусов реакторов ВВЭР. Получен патент на изобретение №2431342 «Способ оценки степени охрупчивания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в результате теплового старения».

Практическая ценность работы определяется:

- созданием новых нормативных дозовых и дозо-временных зависимостей по оценке охрупчивания материалов корпусов реакторов типа ВВЭР под воздействием облучения;
- оценкой теплового охрупчивания необлучаемых частей корпусов реакторов типа ВВЭР-1000;
- определением конкретных условий облучения и химического состава материалов корпусов реакторов, при которых флакс нейтронов не влияет на сдвиг критической температуры хрупкости материалов.

Разработанные дозо-временные зависимости и оценки теплового старения включены руководящие документы:

- 1 МТ 1.2.1.15.0232-2014 «Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-440 (В-213) при продлении срока эксплуатации до 65 лет. Методика».
- 2 РД ЭО 1.1.2.09.0789-2012 «Методика определения вязкости разрушения по результатам испытаний образцов-свидетелей для расчета прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР-1000»,
- 3 РД ЭО 1.1.2.99.0920-2014 «Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов водородных энергетических реакторов на стадии проектирования. Методика»,
- 4 РД ЭО 1.1.3.99.0871-2012 «Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000 при продлении срока эксплуатации до 60 лет».

Упомянутые руководящие документы одобрены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (РОСТЕХНАДЗОР).

Полученные закономерности по влиянию интенсивности потока нейтронов (флакса нейтронов) на сдвиг критической температуры хрупкости послужили обоснованием корректности получения дозовых зависимостей для стали 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б корпусов реакторов ВВЭР-1200 (поколение 3+) на базе результатов испытаний ускоренно облученных образцов.

Полученные дозовые и дозо-временные зависимости для материалов ВВЭР включены в международный код МАГАТЭ “Unified procedure for lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs “Verlife”, 2003-2012”.

На базе разработанных руководящих документов ведется обоснование продления срока эксплуатации реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000.

На базе РД ЭО 1.1.2.99.0920-2014 «Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпусов водородных энергетических реакторов на стадии проектирования. Методика» дано

обоснование срока эксплуатации 60 лет для новых проектов ВВЭР – ВВЭР-ТОИ (поколение 3+).

Зависимости, прогнозирующие радиационное охрупчивание от температуры облучения, были использованы в проекте новой редакции методики «Определение параметров гидравлических испытаний корабельных ППУ при эксплуатации с учетом проведения «мокрого» отжига».

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы могут быть применены при оценке ресурса корпусов эксплуатируемых и проектирующихся реакторов типа ВВЭР и других легководных реакторов. Результаты работы могут представлять интерес и практическую ценность для следующих предприятий: АО «Опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС», АО «ОКБМ им. И.И.Африкантова», АО «АЭП», ОАО «ВНИИАМ», ОАО «ГНЦ НИИАР», ФГУП «ГНЦ ФЭИ им. А.И. Лейпунского», РНЦ «Курчатовский институт», «НИКИЭТ имени Н.А. Доллежала» и других, а также для кафедр ВУЗов, занимающихся радиационным материаловедением.

Структура и объем работы. По материалам диссертации опубликовано 14 работ в ведущих российских и зарубежных рецензируемых научных журналах и изданиях. Из них 4 работы опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 1 патент РФ и 6 работ в международных изданиях, включенных в международные базы цитируемости.

Во введении обоснована актуальность работы по разработке моделей и получению дозо-временных зависимостей для прогнозирования охрупчивания материалов эксплуатируемых и перспективных корпусов реакторов ВВЭР. Перечислены цели диссертационной работы и решаемые задачи. Приведены основные положения, выносимые автором на защиту, представлена научная новизна полученных результатов и их практическая значимость.

В первой главе дан обзор литературы по изменению свойств материалов корпусов реакторов ВВЭР и западных PWR в процессе эксплуатации, проведен подробный анализ основных механизмов охрупчивания металлов с ОЦК решеткой. Показано, что основными факторами, влияющими на радиационное охрупчивание материалов корпусов реакторов, являются нейтронное облучение (флюенс и флакс нейтронов), температура облучения, химический состав материалов, а также металлургические особенности получения основного металла (поковка – деформированный металл) и металла сварного шва (литой металл). Дан анализ влияния каждого из факторов на охрупчивание материалов КР. Обозначены

проблемы, имевшиеся на момент начала работы над диссертацией, сформулированы и обоснованы цели работы и решаемые задачи.

Вторая глава посвящена исследованию радиационного охрупчивания стали типа 15X2МФА (15X2МФА, 15X2МФА-А и 15X2МФА-А мод. А и мод. Б) и металла ее сварных швов. Стали 15X2МФА и 15X2МФА-А используются для изготовления корпусов реакторов ВВЭР-440, а сталь 15X2МФА-А мод. А и Б предусматривается для изготовления корпусов реакторов новых реакторных установок, включая ВВЭР-ТОИ. Проведен анализ имеющихся нормативных дозовых зависимостей для описания радиационного охрупчивания стали типа 15X2МФА (15X2МФА, 15X2МФА-А) и металла ее сварных швов. Разработаны и представлены новые дозовые зависимости, с учетом влияния содержания примесных элементов. Изучена кинетика охрупчивания стали типа 15X2МФА и металла ее сварных швов в диапазоне температур облучения от рабочих до технически достижимых на корпусах реакторов АЭУ на ледоколах и других судах и получена температурная зависимость коэффициента радиационного охрупчивания, позволяющая проводить оценку эффективности проведения «мокрого» отжига для частичного восстановления свойств. Введены понятия пороговых и предельных значений содержания фосфора и меди с точки зрения их влияния на радиационное охрупчивание материалов. Выполнена оценка пороговых и предельных значений содержания фосфора и меди для материалов КР ВВЭР и получены их конкретные значения.

Третья глава посвящена исследованию радиационного охрупчивания стали типа 15X2НМФА (15X2НМФА-А и 15X2НМФА-А класс 1) и металла ее сварных швов. Эти стали используются для изготовления корпусов реакторов ВВЭР-1000, кроме того использование стали 15X2НМФА-А класс 1 предусмотрено для изготовления корпусов реакторов новых реакторных установок (ВВЭР-ТОИ). Показано, что сталь типа 15X2НМФА и металл ее сварных швов охрупчиваются в процессе эксплуатации как за счет нейтронного облучения, так и за счет теплового старения. Показано, что допущение, принятое в ПНАЭ Г-7-002-86 об отсутствии влияния теплового старения ($\Delta T_t = 0$), при $F > 1 \times 10^{22}$ нейтр/м² и $T_{обл} = 250-300$ °С не является корректным. Охрупчивание за счет теплового старения происходит на фоне охрупчивания за счет нейтронного облучения. Предложены новые дозо-временные зависимости, в которых учитывается содержание таких легирующих элементов как никель, марганец и кремний, а также, в случае повышенного содержания, меди.

Получена температурная зависимость коэффициента радиационного охрупчивания, позволяющая оценить влияние температуры облучения на охрупчивание материалов стали типа 15X2НМФА и металла ее сварных швов.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния интенсивности нейтронного облучения (флакса нейтронов) на охрупчивание материалов корпусов реакторов ВВЭР в зависимости от доминирования того или иного механизма радиационного повреждения. Исследование влияния эффекта флакса на охрупчивание материалов корпусов реакторов ВВЭР выполнено теоретически и посредством сопоставления результатов испытаний образцов-свидетелей и результатов испытаний образцов, облученных высоким флаксом нейтронов в рамках исследовательских программ, а так. Проведен анализ эффекта флакса нейтронов при доминировании различных механизмов охрупчивания материалов корпусов реакторов.

Показано, что при контролировании радиационного охрупчивания упрочняющим механизмом за счет образования дислокационных петель и неупрочняющим, сегрегационным механизмом эффект флакса пренебрежительно мал. При доминировании упрочняющего механизма за счет образования барьеров в виде преципитатов или кластеров флакс может влиять на радиационное охрупчивание материалов корпусов реакторов, причем это влияние отрицательное: с увеличением флакса ΔT_F уменьшается. Основными элементами, образующими преципитаты, являются Ni, Mn и Cu. На основании экспериментальных данных для материалов КР типа ВВЭР, а также для материалов корпусов реакторов типа PWR (сталь SA533B) и для модельных сплавов установлено, что эффект флакса начинает проявляться при суммарном содержании никеля и марганца $C_{Ni} + C_{Mn} \approx (1,8 \div 1,9) \%$. Такой вывод соответствует материалам с малым содержанием меди $C_{Cu} < 0,12 \%$. Медь имеет меньшую растворимость в α -железе, чем никель и марганец, но оказывает более сильное влияние на радиационное охрупчивание материала, чем эти элементы. Поэтому эффект флакса начинает проявляться даже при относительно небольшом ее содержании $C_{Cu} > 0,10 \%$.

Выполненные оценки показывают, что для материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 с $C_{Ni} + C_{Mn} \geq 1,9 \%$, увеличение флакса нейтронов в 100 раз по сравнению с флаксом, характерным для облучения корпусов реакторов приводит к уменьшению ΔT_F менее, чем на 20 %.

В пятой главе представлен, разработанный в рамках диссертации, инженерный метод прогнозирования теплового охрупчивания корпусных реакторных сталей за счет зернограницных сегрегаций фосфора, развитие которых может протекать при температуре эксплуатации корпусов реакторов типа ВВЭР. Метод базируется на результатах испытаний материала, состаренного при повышенной относительно температуры эксплуатации температуре (в интервале температур проявления отпускной хрупкости), а также на испытаниях, отожденного после облучения материала. Старение при температуре тепловой

хрупкости позволяет оценить коэффициент диффузии. Испытание отожженного после непродолжительного облучения материала позволяет определить охрупчивание материала за время, намного превышающее все возможные эксперименты - более 100 лет. Также в данной главе рассмотрена верификация предложенного метода.

В шестой главе проведено сопоставление радиационного охрупчивания различных корпусных материалов, оцененного по результатам испытаний на ударный изгиб и на вязкость разрушения. Из проведенного сопоставления получено, что значения сдвигов критической температуры хрупкости, полученные по результатам испытаний на ударный изгиб, и значения сдвигов критической температуры хрупкости, полученные по результатам испытаний на вязкость разрушения, могут быть связаны линейной зависимостью $\Delta T_{100} = k \cdot \Delta T_{41,47Дж}$ при $k = 1$.

В выводах сформулированы основные результаты работы.

В качестве **замечаний** по диссертационной работе можно отметить следующее.

1. Обычно термическое фосфорное старение напрямую зависит от времени выдержки. В автореферате, в отличие от диссертации, отсутствует какое-либо объяснение, почему при облучении при том же механизме охрупчивания, флакс эффект отсутствует.
2. В формулах (18) и (19) показатель степени в члене, учитывающем содержание меди, равен 1/3. Эта величина, согласно Главе 2, соответствует темпу радиационного охрупчивания металла сварных швов. Почему для основного металла не применяется соответствующая величина показателя степени в указанных формулах?
3. Из автореферата не ясно, образуются ли под нейтронным облучением Ni-Mn-Si преципитаты в стали типа 15Х2МФА и металле ее сварных швов и оказывают ли они влияние на радиационное охрупчивание данных материалов.
4. Образцы-свидетели, результаты испытаний которых используются автором, облучаются в реакторах в ненагруженном состоянии. В тоже время материал корпуса реактора подвержен одновременному воздействию напряжений и нейтронному облучению. Из автореферата не ясно, учитывается ли совместное воздействие напряжений и нейтронного облучения на охрупчивание металла.
5. В автореферате и диссертации при описании практической значимости работ в п.4 вместо «интенсивности» должно быть «плотности».

Отмеченные недостатки не затрагивают по существу сформулированные автором положения и выводы работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена актуальной и практически важной теме, содержит новые научные результаты. Достоверность выполненных разработок оценена путем верификации разработанных моделей и методов с экспериментальными результатами по охрупчиванию материалов корпусов реакторов ВВЭР под воздействием нейтронного облучения и теплового старения. Результаты диссертационной работы в полной мере отражены в научных публикациях автора и доложены на научных форумах различного уровня. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

На основе изложенного можно заключить, что диссертация Елены Владимировны Юрченко является научной работой, вносящей существенный вклад в развитие исследований радиационного и теплового охрупчивания корпусных материалов, применяемых в реакторных установках типа ВВЭР, представляет теоретическую и прикладную ценность.

Работа удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение), а ее автор Юрченко Елена Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Отзыв рассмотрен и одобрен на расширенном заседании отделения конструкционной целостности отделения 3.00 АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (Протокол № 8 от 08 апреля 2015 года).

Заместитель генерального директора
по научной работе, д.т.н, профессор

А.С. Зубченко

Заместитель генерального конструктора –
начальник отделения
конструкционной целостности

С.И. Сероштан

Начальник отдела материаловедения

В.М. Комолов

Ученый секретарь отделения
конструкционной целостности

О.Ю. Петрова