

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Е.В. ЮРЧЕНКО «Исследование и прогнозирование радиационного и теплового охрупчивания материалов эксплуатируемых и перспективных корпусов реакторов ВВЭР», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

В представленном автореферате диссертации **Юрченко Елены Владимировны** отражены результаты проведённых автором расчетов и исследований, посвященных разработке дозо-временных зависимостей, описывающих кинетику охрупчивания материалов корпусов эксплуатирующихся и проектируемых реакторов типа ВВЭР в процессе эксплуатации под действием нейтронного облучения и теплового старения. Кроме того, в работе рассмотрено влияние эффекта флакса на охрупчивание корпусных материалов в связи с действующими механизмами радиационного повреждения с целью возможности использования данных ускоренного облучения для прогнозирования охрупчивания материалов КР ВВЭР при эксплуатации.

Работа имеет несомненную актуальность и практическую значимость полученных результатов, так как они могут быть использованы при научном обосновании срока службы и его продлении для действующих корпусов реакторов ВВЭР, а также при прогнозе ресурса перспективных реакторов нового поколения.

Научная новизна результатов и выводов обусловлена обобщением и статистической обработкой большой базы данных корреляционных связей между сдвигами критической температуры хрупкости, определенными по двум типам испытаний: на ударный изгиб и на вязкость.

Цель исследования достигнута и поставленные задачи выполнены.

Основным достоинством работы, на наш взгляд, является разработка

методологии прогнозирования радиационного охрупчивания корпусных реакторных материалов и получение новых дозо-временных зависимостей для материалов КР ВВЭР, учитывающие влияние примесных и легирующих элементов, а также температуры облучения. Эти результаты вошли в Руководящие документы ОАО «Концерн Росэнергоатом» и в настоящее время используются для продления и обоснования срока эксплуатации действующих КР ВВЭР и обоснования срока эксплуатации проектируемых КР ВВЭР.

Следует также отметить хорошую опубликованность и апробацию основных результатов и выводов диссертации.

По содержанию автореферата можно высказать следующие замечания:

1) В автореферате на странице 10 указано, что влияние Cu и P на радиационное охрупчивание взято аддитивным с учетом линейных коэффициентов

$$C_{eff} = C_P + k \cdot C_{Cu}$$

В ряде работ показано, что P и Cu оказывают взаимно-усиливающее действие на процесс радиационного охрупчивания. Поэтому предположение о том, что вклад меди и фосфора в РО взаимно независим является сомнительным.

2) На странице 13 автором определены значимые для эффекта флакса пороговые содержания меди и фосфора, составляющие 0,06% и 0,005% соответственно для температуры облучения $T_{obl} \geq 270^\circ C$. **Но не указана верхняя температурная граница температуры облучения применимости данных пороговых значений поскольку существует температурная зависимость растворимости Cu в железе.**

3) На странице 14 автореферата автор пишет, что зависимость $\Delta T_i(t)$ имеет немонотонный характер, что, по-видимому, обусловлено

выпадением и коагуляцией карбидов (как показано в работах ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»). По многочисленным работам, проведенным в НИЦ «Курчатовский институт», а также в последнем аттестационном отчете ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» следует абсолютно другой вывод, подтвержденный механическими испытаниями более корректно подобранных образцов, а также ТЭМ и РЭМ исследованиями. А именно: в процессе воздействия эксплуатационных факторов (в данном случае повышенной температуры) вплоть до времен выдержек 200 000 ч. изменения ни плотности, ни размеров карбидных фаз не происходит, что находит отражение в близких значениях предела текучести этих материалов.

4) На страницах 16-17 автореферата автором приведена обработка экспериментальных данных (полученных в том числе и в НИЦ КИ) для МШ стали 15Х2НМФА с содержанием никеля более 1,5 и менее 1,34%. Однако не объяснена причина такого подхода (деления). Также неясно, куда относить данные с промежуточным содержанием никеля (от 1,34 до 1,5%).

5) В автореферате на странице 19 сказано, что материалы КР ВВЭР-1000 имеют низкое содержание фосфора и меди и использовались для анализа флакс-эффекта, когда дислокационные петли и преципитаты (в основном Ni, Mn и Si) контролируют охрупчивание материала. Эффект флакса для материалов КР ВВЭР-1000 определяется не только разницей в плотностях радиационно-индуцированных элементов структуры (таких как преципитаты и дислокационные петли) при облучении с разной плотностью потока быстрых нейтронов, но, в первую очередь, отличиями в протекании сегрегационных процессов, что было доказано многочисленными работами НИЦ КИ.

6) На странице 21 автореферата сказано, что экспресс оценка теплового старения материалов КР только на базе результатов испытаний образцов, состаренных при повышенной температуре, не дает адекватных результатов, так как равновесная концентрация фосфора уменьшается с ростом температуры. **Равновесная концентрация фосфора на межзеренной границе, в самом деле, уменьшается с увеличением температуры. Однако поскольку динамика сегрегационных процессов определяется, прежде всего, коэффициентом диффузии фосфора в многокомпонентной системе на основе железа, провоцирующая термообработка при повышенной температуре позволяет получить концентрацию фосфора до 0,2-0,3 монослоев фосфора за довольно непродолжительное время (~2-3 тыс.ч). Как показали исследования, проведенные в НИЦ КИ, такая концентрация фосфора характерна для образцов свидетелей (сталь 15Х2НМФА) со временем облучения ~ 200 000 ч. Поэтому проведение тепловых выдержек при повышенных температурах, при условии правильно выбранного режима, дает консервативные представления о тепловом старении исследуемых материалов.**

7) В автореферате на странице 20 предложен новый метод для прогнозирования охрупчивания корпусных реакторных материалов за счет зернограницных сегрегаций фосфора, развитие которых протекает в необлучаемых частях КР типа ВВЭР при температуре эксплуатации.

Основная идея метода заключается в следующем. При облучении коэффициент диффузии вакансий, определяющий диффузию фосфора, увеличивается на порядки. При этом равновесная концентрация фосфора на границах зерен и межфазных границах зависит только от температуры и практически не зависит от нейтронного облучения. Следовательно, оценку «фосфорного» охрупчивания за срок эксплуатации 60 лет и более можно выполнить на базе испытаний образцов, облученных в течение нескольких

месяцев при $T_{\text{обл.}} = T_{\text{экспл.}}$ КР с последующим отжигом при температуре 450°C. Далее автор приводит данные, что после облучения доля хрупкого межзеренного облучения не превышает 12%, а после проведения отжига при 450°C в течение ~100ч данный показатель достигает 70%. Этот результат вызывает сомнение. Во-первых, в НИЦ «Курчатовский институт» неоднократно проводили отжиги в широком интервале температур ускоренно облученных образцов сталей КР, и никогда доля хрупкого межзеренного разрушения для сталей КР ВВЭР-1000 не превышала 20%. Во-вторых, автор правильно указывал, что равновесная концентрация фосфора на границах зерен и межфазных границах зависит только от температуры и практически не зависит от нейтронного облучения. При этом чем ниже температура выдержки, тем выше равновесная концентрация фосфора. Каким образом при отжиге при более высокой температуре, чем температура облучения зернограницная сегрегация фосфора могла так резко возрасти, что доля хрупкого межзеренного разрушения достигла 70%?

Однако автором проведена огромная работа по оценке состояния различных сталей КР в различных состояниях, что позволило оценить ресурс эксплуатируемых реакторов вплоть до продленного до 60 лет срока эксплуатации, а также оценить ресурс перспективных корпусов реакторов ВВЭР. Поэтому отмеченные замечания не умаляют ценности выполненной работы.

В целом, исходя из представленного автореферата, можно сделать вывод, что по уровню и объёму проведенных исследований, интересным новым экспериментальным данным, их аналитической обработке и практической значимости, диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование и соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Юрченко Елена Владимировна заслуживает присвоения ей ученой степени кандидата

технических наук по специальности 05.16.00 – Материаловедение
(машиностроение).

Заместитель руководителя Комплекса
по реакторным материалам и технологиям,
д.т.н., профессор



Борис Аронович Гурович

Федеральное государственное
бюджетное учреждение
«Национальный исследовательский центр»
«Курчатовский институт»
(НИЦ «Курчатовский институт»)
пл. Академика Курчатова, д.1, Москва, 123182
Тел.: (499) 196-95-39, факс: (499) 196-17-04
E-mail: nrcki@nrcki.ru, www.nrcki.ru

Подпись заверяю
Заместитель директора по научной работе
главный ученый секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»,
Д.ф-м.н., профессор



Виктор Игоревич Ильгисонис

