



Акционерное общество
Государственный научный центр
Российской Федерации –
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А.И. Лейпунского
(АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)

Бондаренко пл., д. 1, г. Обнинск Калужской обл., 249033
Телетайп: 183566 «Альфа». Факс: (484) 396 8225, (484) 395 8477
Телефон: (484) 399 8249 (приемная), (484) 399 8412 (канцелярия)
E-mail: postbox@ippe.ru, <http://www.ippe.ru>
ОГРН 1154025000590, ИНН 4025442583, КПП 402501001

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Юрченко Елены Владимировны
“Прогнозирование радиационного и теплового охрупчивания материалов
эксплуатируемых и перспективных корпусов реакторов ВВЭР”,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Выяснение закономерностей радиационного охрупчивания материалов корпусов ВВЭР, обоснование новых моделей и их практическое применение для оценки состояния металла корпусов реакторов являются весьма актуальными задачами как для оценки остаточного ресурса эксплуатирующихся корпусов и возможности продления их срока службы, так и для обеспечения безопасности и ресурса новых реакторных установок, включая ВВЭР-ТОИ.

Отличительной особенностью данной диссертационной работы, посвященной решению этих задач, является использование наиболее полного на сегодня массива экспериментальных данных по изменению свойств материалов ОМ и МШ КР ВВЭР и западных реакторов типа PWR (база данных исследовательских программ и программ образцов-свидетелей, используемая в документах МАГАТЭ («МАГАТЭ БД»); база данных, полученная в рамках ИП ЦНИИ КМ «Прометей» («ИП Прометей»); база данных НИЦ «Курчатовский институт», полученная в рамках программ

образцов-свидетелей («ОС КИ»), база данных для КР АЭУ на ледоколах, базы данных IVAR для модельных сплавов). Это позволило провести подробный анализ основных механизмов охрупчивания материалов КР с учетом влияния нейтронного облучения (флюенс и флакс нейтронов), температуры облучения, химического состава материалов, а также металлургических особенностей получения основного металла (поковка – деформированный металл) и металла сварного шва (литой металл). Использование такой обширной экспериментальной базы обеспечило высокую степень достоверности и обоснованности сделанных автором выводов и рекомендаций.

В результате проведенного исследования получен ряд новых важных результатов.

Обоснована необходимость корректировки действующих нормативных дозовых зависимостей для описания радиационного охрупчивания (нормативный документ ПНАЭ Г-7-002-86) с учетом как влияния примесных элементов (фосфора и меди) на охрупчивание ОМ в стали типа 15Х2МФА, так и влияния теплового старения в стали типа 15Х2НМФА.

Получены новые дозовые зависимости, описывающие радиационное охрупчивание стали типа 15Х2МФА (15Х2МФА, 15Х2МФА-А и 15Х2МФА-А мод. А и мод. Б) и металла ее сварных швов. Обоснованы показатели степени в дозовой зависимости охрупчивания 0,483 для ОМ и 1/3 для МШ. Однако, причины такого различия показателей степени пока не выяснены и могли бы стать объектом дальнейших исследований.

Получены новые дозо-временные зависимости от флюенса нейтронов и времени, описывающие радиационное охрупчивание ОМ и МШ стали типа 15Х2НМФА (15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А и 15Х2НМФА-А класс 1) при одновременном учете воздействия вкладов в охрупчивание, вызванных нейтронным облучением и тепловым старением. Полученные новые дозовые зависимости позволяют прогнозировать сдвиг критической температуры хрупкости от флюенса нейтронов, времени облучения, содержания

легирующих элементов (никель, марганец и кремний) и содержания примесного элемента – меди. Показано, что важную роль в охрупчивании этих сталей играет образование (Ni, Mn и Si) кластеров. Причем предполагается, что образование такого рода кластеров может происходить при отсутствии одного или двух упомянутых элементов. Однако последнее предположение не представляется корректным, так как присутствие только Ni, даже и в значительных концентрациях, не приведет к образованию выделений из-за высокого предела растворимости. В этой связи хотелось бы обратить внимание на возможную важную роль меди. Как показывают приведенные данные (таблицы 1.1 – 1.3 в диссертации) ее содержание в КР, в том числе ВВЭР-1000, выше предельного значения, что должно приводить к выпадению медных или смешанных кластеров. Они, в свою очередь, могут быть зародышами (Ni, Mn и Si) кластеров. В пользу этого предположения может служить Рис. 1.5 диссертации, где показана зависимость значений коэффициента радиационного охрупчивания A_F от содержания Ni для облученной при температуре 270°C стали марки 15X2НМФА-А при различных содержаниях меди.

Впервые введены понятия *пороговых* и *предельных* значений содержания фосфора и меди с точки зрения их влияния на радиационное охрупчивание материалов. *Пороговое* значение определяет минимальное содержание примесных элементов, ниже которого сопротивление охрупчиванию не увеличивается (сдвиг критической температуры хрупкости не уменьшается). *Предельное* значение определяет максимальное содержание примесных элементов, выше которого сопротивление охрупчиванию не уменьшается (сдвиг критической температуры хрупкости не увеличивается). Получены оценки пороговых и предельных значений содержания фосфора и меди для материалов КР ВВЭР.

Выяснено влияние интенсивности нейтронного облучения (флакса нейтронов) на радиационное охрупчивание материалов КР ВВЭР для различных механизмов охрупчивания. Показано, что в случае упрочняющего

механизма за счет образования дислокационных петель и неупрочняющего сегрегационного механизма эффект флакса нейтронов мал. При доминировании упрочняющего механизма за счет образования барьеров в виде преципитатов, флакс нейтронов может влиять на радиационное охрупчивание корпусных материалов: с увеличением флакса нейтронов ΔT_F уменьшается. Следует отметить, что при анализе неупрочняющего сегрегационного механизма рассматривалось радиационное ускорение диффузии фосфора лишь по вакансионному механизму. Однако в условиях облучения междоузельный механизм может давать еще больший вклад в ускорение диффузии из-за существенной энергии связи подразмерных атомов фосфора в составе смешанных гантелей.

Предложен новый метод прогнозирования теплового охрупчивания корпусных реакторных сталей за счет зернограницных сегрегаций фосфора при температуре эксплуатации КР ВВЭР, использующий нейтронное облучение. Метод базируется на сильном ускорении диффузии фосфора в условиях нейтронного облучения. Используются результаты испытаний материала, состаренного при повышенной, относительно температуры эксплуатации, температуре (для определения теплового коэффициента диффузии), а также результаты испытаний отожженного после облучения материала.

Оценена корреляция между сдвигом критической температуры хрупкости (ΔT_k) и сдвигом референсной температуры (ΔT_{100}), позволяющая прогнозировать изменение температурной зависимости вязкости разрушения при эксплуатации КР ВВЭР на базе результатов испытаний образцов на ударную вязкость.

Результаты диссертации имеют большое научное и практическое значение. Предложенные дозовые и дозо-временные зависимости охрупчивания материалов КР ВВЭР и полученные оценки теплового старения необлучаемых частей КР ВВЭР 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. Они также включены в международный код МАГАТЭ и ряд утвержденных методик.

Сделанные выше при анализе полученных результатов замечания не ухудшают общей высокой оценки диссертационной работы, скорее, они могут служить стимулом для дальнейших исследований и углубления этих результатов. Актуальность темы диссертации, использование для верификации полученных результатов максимальной на сегодня базы данных, объем выполненной диссертантом работы, высокая научная и практическая ценность полученных результатов позволяют сделать вывод о том, что диссертация соответствует требованиям ВАК, а диссертант заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук.

Печенкин Валерий Александрович,
к.ф.-м.н, снс, начальник лаборатории ГНЦ РФ-ФЭИ
Служебный телефон: (484)3998019,
e-mail: vap@ippe.ru



Подпись В.А. Печенкина заверяю:

Ученый секретарь ГНЦ РФ - Физико-энергетического института
им. А.И. Лейпунского,
кандидат физико-математических наук



О.Е. Кононов