



Адрес: 140180, Московская обл., г.
Жуковский, ул. Жуковского, д.1
тел./факс (499) 503-95-29
info@expresstest.ru

Общество с ограниченной ответственностью
«НАУЧНО-СЕРТИФИКАЦИОННЫЙ УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И РЕСУРСА КОМПОНЕНТОВ
ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ
«ЦЕНТР МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И РЕСУРСА»
ООО «НСУЦ «ЦМиР»

Исх. № 143/17 от 04.12.2017

О Т З Ы В

На диссертационную работу **Бубякина Сергея Александровича** «Влияние длительных температурных выдержек и облучения на механизмы зарождения хрупкой трещины и напряжение отрыва сталей корпусов реакторов ВВЭР-1000», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Диссертационная работа Бубякина С.А. посвящена изучению механизмов хрупкого разрушения корпусов ядерных реакторов ВВЭР-1000 и разработки технологии реконструкции образцов типа СТ с целью расширения экспериментальной базы данных образцов-свидетелей для обоснования возможности продления ресурса материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 до 60 лет и более.

На современном этапе развития атомной энергетики продление проектных сроков службы РУ (реакторной установки) АЭС становится жизненно необходимой задачей для атомной отрасли, как в России, так и за рубежом. Сверхпроектные сроки эксплуатации накладывают особые требования к объективной оценке хрупкой прочности металла корпусов ядерных реакторов. При анализе хрупкого разрушения следует учитывать не только изменение уровня исходных механических свойств (в первую очередь, трещиностойкости), но и те структурные особенности сталей, которые могут способствовать развитию разрушения. На ближайшие 40 лет атомная энергетика России будет базироваться на продлении РУ с ВВЭР-1000.

Обеспечение живучести корпусов реакторов предусматривает анализ зарождения и развития трещин с обоснованием их стабильности при всех возможных режимах эксплуатации, включая аварийные. В соответствии с принятыми современными расчетными оценками предельное состояние корпуса реактора определяется началом нестабильного роста трещины, т.е. хрупкого разрушения. Принятая современная расчетная оценка хрупкого разрушения включает следующие стадии: прогнозирование сдвига

температурной зависимости вязкости разрушения металла сварного шва соединяющего обечайки активной зоны корпуса реактора $K_{IC} = f(T)$; анализ напряженно-деформированного состояния при наихудшем режиме нагружения в этой зоне, связанной с аварийным заливом холодной воды; определение геометрии, размера и места расположения постулируемой поверхностной полуэллиптической трещины с последующим расчетом коэффициента интенсивности напряжения K_I^{max} в зависимости от температуры в каждый момент времени для наиболее глубокой точки полуэллипса в процессе аварийного охлаждения корпуса реактора; определение приемлемых условий нагружения корпуса реактора по требованию $K_I^{max} \leq K_{IC}$. Такой расчетно-экспериментальный подход живучести корпуса реактора по характеристикам статистической трещиностойкости имеет очевидные преимущества по сравнению со старой схемой, так как позволяет учитывать остаточные напряжения и влияние двухосности напряженного состояния, а также абсолютных размеров дефектов на характеристики хрупкого разрушения. Но, пожалуй, главным положительным аспектом предложенного подхода является его физичность при оценке степени охрупчивания и закономерностей сдвига исходной температурной зависимости значений вязкости разрушения под воздействием эксплуатационного воздействия, так как только вязкость разрушения является характеристикой рочности испытуемого материала. Такой вид испытаний у нас стал проводиться сравнительно недавно, но именно он позволил более корректно прогнозировать сдвиг критической температуры хрупкости при больших флюенсах.

Таким образом, для точного расчета на сопротивление хрупкому разрушению с целью продления срока службы необходимо иметь надежную базу данных по вязкости разрушения. Разработка технологии реконструкции образцов типа СТ позволяет не только расширить базу данных по хрупкой прочности сталей КР, но и получать более корректные результаты, чем в случае испытания образцов типа SE(B).

Уточнить представление о механизмах хрупкого разрушения позволяет также локальный подход с определением локальных напряжений отрыва в зависимости от действия определяющих эксплуатационных факторов.

В связи с этим актуальность темы диссертации посвященной анализу данных по трещиностойкости металла КР ВВЭР-1000 не вызывает сомнения.

Важным в диссертационной работе является разработка и описание методики реконструкции образцов типа СТ, по которой получен патент на

изобретения, а также выпущена и введена в действие методика в АО «Концерн Росэнергоатом»: МТ 1.2.5.05.0974-2014 «Методика реконструкции образцов типа СТ для испытаний на вязкость разрушения материалов корпусов реакторов типа ВВЭР при продлении срока службы». Разработке этой методике посвящены **3 и 4 главы** диссертационной работы. Для выполнения этой работы автором совместно с соисполнителями¹ были сделаны расчеты и определены оптимальные варианты изготовления реконструированных СТ образцов, в которых остаточные сварочные напряжения и их градиент в центре металла вставки были минимальными; определены границы допустимых различий в механических свойствах между материалами вставки и обоймы; установлен оптимальный режим электронно-лучевой сварки (ЭЛС) образцов типа СТ.

Для подтверждения идентичности механизмов хрупкого разрушения стандартных и реконструированных образцов были использованы результаты фрактографических исследований как первичных источников зарождения хрупких трещин («лидеров»), так и их вклада в значения трещиностойкости с учетом влияния облучения и температуры.

В **4 главе** установлены аналитические зависимости между структурными параметрами поверхности излома и трещиностойкостью в зависимости от типа «лидера». Использование «лидеров» для понимания кинетики разрушения достаточно часто применяется при анализе усталостного повреждения, но при анализе хрупкого разрушения встречается не часто. Хотя в данной диссертационной работе это сделано применительно к материалам корпусов реакторов ВВЭР-1000, тем не менее, эта методика может иметь универсальный характер, поскольку позволяет в любом материале, испытанном на трещиностойкость, определять «лидеры», характерные для данного материала и по этим данным оценивать источники инициирующие развитие хрупкой трещины. Автором правильно сделан выбор в качестве параметра трещиностойкости критическое раскрытие вершины усталостной трещины (СТОД), что позволило ему провести корректный анализ результатов испытаний как стандартных, так и реконструированных образцов при различных температурах, несмотря на уже существующую для этих сталей температурную зависимость предела текучести.

¹ Следует отметить, что как в диссертации, так и автореферате автор делает ссылки в случае проведения части работ другими исследователями.

В 5 главе реализована предложенная автором оригинальная методика определения критического локального напряжения отрыва для сильно охрупченных и отожженных до исходного состояния образцов с кольцевым надрезом, испытанных на одноосное статическое растяжение. С помощью схемы Иоффе можно оценивать способность металла переходить в хрупкое состояние не только под влиянием понижения температуры, но и под действием многих других факторов, влияющих на уровень предела текучести и напряжения отрыва.

Для определения механизмов хрупкого разрушения, приводящих к снижению локального напряжения отрыва, нужно было определить «слабые места» в материале. В этом случае привлечение, наряду с фрактографическими исследованиями, также и расчетной модели для определения напряженно-деформированного состояния явилось удачным решением, позволившим определить для каждого из типов «лидеров» критические локальные напряжения отрыва. При этом было доказано, что причиной снижения локального напряжения отрыва в сильно охрупченных образцах явилось снижение когезивной прочности границ зерен вследствие образования зернограницных сегрегаций фосфора.

К общим достоинствам представленной работы можно отнести следующее:

- Разработка и внедрение методики реконструкции образцов типа СТ для расширения базы и получения корректных данных по трещиностойкости образцов на продленный срок их эксплуатации;

- Использование методики фрактографического анализа, позволяющего выявлять различные типы источников хрупкого разрушения и их связь с параметрами трещиностойкости для подтверждения идентичности механизмов хрупкого разрушения в стандартных и реконструированных образцах;

- Использование оригинальной расчетно-экспериментальной методики определения критического локального напряжения отрыва для исследуемых типов «лидеров» после испытания образцов с кольцевым надрезом на одноосное статическое растяжение, позволившей выявить причину снижения трещиностойкости в сильно охрупченном материале..

Степень обоснованности и достоверности полученных результатов диссертационной работы подтверждается использованием большим объемом материаловедческих испытаний, подтвержденных исследованиями и анализом обработки экспериментальных данных, а также корректно построенных и реализованных натуральных экспериментов.

Материалы диссертации достаточно широко опубликованы в печати и доложены на научно-технических конференциях.

По работе могут быть сделаны следующие замечания:

1) В работе указано, что температура центральной вставки из исследуемого образца должна не превышать рабочую температуру корпуса реактора. При это указано, что температура центральной вставки не должна превышать 270 °С, однако рабочая температура корпуса реактора ВВЭР-1000 ~290 °С. Хотелось бы получить разъяснение по этому вопросу.

2) Почему на подготовительном этапе работы был использован только модельный материал после термического охрупчивания, и не были использованы материалы в облученном состоянии?

3) Для охрупченных корпусных сталей было бы более корректно определять локальные напряжения отрыва на цилиндрических образцах с наведенной кольцевой усталостной трещиной в облученном состоянии.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Бубякина С.А., которая по своему названию, содержанию, объему, теоретической и экспериментальной значимости, а также практической ценности полученных результатов, отвечает критериям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 05.14.03 – «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации», а автор заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук.

Генеральный директор,
Эксперт МАГАТЭ, д.т.н.
Раб. Тел. +7(499)503-95-29 доб. 100
e-mail: info@expresstest.ru

М.Б.Бакиров

Подпись Бакирова М.Б.



Заверяю
Специалист ОК
Раб. Тел. +7(499)503-95-29 доб. 101
e-mail: info@expresstest.ru

О.В.Малиновская