

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации»

Диссертационная работа посвящена исследованию воздействия эксплуатационных факторов на хрупкую прочность сталей корпусов атомных реакторов (КР), необходимого для расширения базы данных по трещиностойкости и научного обоснования сроков безопасной эксплуатации и возможности продления ресурса материалов КР ВВЭР-1000 до 60 лет. Поэтому **актуальность темы работы**, направленной на решение этой важнейшей задачи, не вызывает сомнений.

Автором четко сформулированы цель и основные задачи исследования, успешное выполнение которых позволило получить целый ряд важных результатов, составляющих **научную новизну и практическую значимость работы**. К наиболее важным результатам относятся: разработка методики и обоснование возможности применения для экспериментальных исследований и оценки деградации свойств материала КР реконструированных образцов из испытанных половинок образцов типа Шарпи и SE(B); разработка расчетно-экспериментальной методики оценки значений локального напряжения отрыва для образцов из стали-прототипа КР ВВЭР-1000 в отожденном и охрупченном состояниях после длительного воздействия рабочей температуры и определение этих значений для ряда состояний материалов; получение более представительных экспериментальных данных по вязкости разрушения в рамках реализации программ образцов-свидетелей, что позволяет повысить достоверность прогнозов изменения свойств материалов КР; определение взаимосвязи между источником зарождения хрупкой трещины и соответствующим ему локальным напряжением отрыва для понимания механизмов охрупчивания материала после длительного

воздействия рабочей температуры на примере цилиндрических образцов с кольцевым надрезом, испытанных на одноосное статическое растяжение.

Изложенные в тексте диссертации результаты работы свидетельствуют о полном и квалифицированном выполнении поставленных задач, что позволило автору получить новые научные результаты необходимые для их дальнейшего использования в практике работ по обоснованию продления сроков эксплуатации КР.

Результаты работы изложены в пяти главах диссертации.

Первая глава (с.10-56) представляет собой содержательный анализ литературных данных (107 отечественных и иностранных источников) по хрупкому разрушению сталей корпусов реакторов, в которых были рассмотрены методы определения трещиностойкости материалов, влияние эксплуатационных факторов на хрупкое разрушение, а также физико-механические модели хрупкого разрушения при кратковременном статическом нагружении и локальный критерий хрупкого разрушения сталей. Кроме того, показано, что данные по трещиностойкости материалов в большинстве своём получены на образцах типа SE(B). Однако данные, полученные по результатам испытаний малоразмерных образцов типа SE(B)-10 имеют завышенные значения вязкости разрушения, по сравнению с образцами типа СТ и не могут быть использованы для прогнозирования реальной формы кривой трещиностойкости. Поэтому для получения корректных данных по вязкости разрушения необходимо расширять базу данных по трещиностойкости материалов за счет разработки и применения метода реконструкции образцов типа СТ из имеющихся образцов-свидетелей.

Вторая глава (с.57-61) посвящена описанию исследуемых материалов в различных состояниях и методов исследования. При этом обоснованно выбраны современные методы испытаний и исследований, необходимые и достаточные для решения поставленных в работе задач.

В третьей главе (с.62-76) представлена разработка методики реконструкции образцов типа СТ из половинок испытанных образцов Шарпи или SE(B) с размерами $10 \times 10 \times 10$ мм и $10 \times 10 \times 20$ мм. Представлены результаты по разработке оптимальных режимов технологии реконструкции образцов применительно к существующему современному оборудованию для электронно-лучевой сварки.

В теоретической части работы верифицированы оптимальные варианты реконструкции путем проведения трехмерных численных расчетов с

использованием вероятностной модели хрупкого разрушения и экспериментальных исследований; 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 (пределах текучести) исследуемого металла и материала оправки для получения корректного значения вязкости разрушения в реконструированном образце.

При практической отработке методики реконструкции образцов типа СТ были решены следующие задачи:

1) Установлен оптимальный режим электронно-лучевой сварки (ЭЛС) образцов типа СТ из половинок испытанных образцов типа Шарпи и SE(B) (напряжение $U=40$ кВ и ток сварки $I = 35$ мА), предотвращающий перегрев центральной вставки свыше рабочей температуры корпуса реактора, что предотвратило изменение фазового состава материала.

2) Определен диапазон допустимых значений предела текучести обоймы $\sigma_{0,2}^{\text{обоймы}}$ в зависимости от значения предела текучести вставки $\sigma_{0,2}^{\text{вставки}}$: при $\sigma_{0,2}^{\text{вставки}}=1000$ МПа максимальное значение $\sigma_{0,2}^{\text{обоймы}}=1600$ МПа.

3) Минимизированы остаточные сварочные напряжения и зона термического влияния ($\sim 1,5$ мм в обе стороны от сварного шва) в свариваемых заготовках путем двухсторонней сварки.

В четвертой главе (с.77-118) для установления идентичности механических характеристик и структурного состояния стандартных и реконструированных образцов были проведены испытания изготовленных образцов из материалов основного металла и металла сварного шва на вязкость разрушения, а также выполнены исследования поверхностей разрушения испытанных образцов.

Механические испытания показали хорошую сходимость значений вязкости разрушения в стандартных и реконструированных образцах.

Интересными и оригинальными являются выбранный автором фрактографический метод исследований поверхностей разрушения стандартных и реконструированных образцов и методика выявления источников хрупкого разрушения – «лидеров» при образовании и развитии хрупких трещин. С использованием растрового микроскопа им были

определены в каждом из испытанных образцов «лидеры», их типы (неметаллическое включение или структурная граница) и расстояния от них до выращенной усталостной трещины. Определены соотношения каждого типа «лидера» и их связь с параметром трещиностойкости критическое раскрытие вершины усталостной трещины - crack tip open displacement (CTOD). Анализ экспериментальных данных, проведенный с помощью теста Чоу, показал, что в пределах разброса зависимости CTOD(CID) для одинаковых типов лидеров для стандартных и реконструированных образцов СТ в исследованных материалах отличаются незначительно. Эти результаты явились дополнительным подтверждением идентичности механизмов хрупкого разрушения в стандартных и реконструированных образцах.

В пятой главе (с. 119-129) была решена задача определения локального напряжения отрыва, которая способствует лучшему пониманию механизмов охрупчивания материалов корпусов реакторов при длительном воздействии на корпусные стали высокой рабочей температуры.

Для решения этой задачи было предложено использовать образцы с кольцевым надрезом, испытанные на одноосное статическое растяжение. Выбор такой геометрии образца обусловлен тем, что кольцевой надрез создает максимальные нормальные напряжения отрыва в центре образца, что позволяет корректно определить напряжение отрыва. Проводили исследование на образцах в сильно охрупченном и исходном (отожженном) состояниях.

Для оценки локального напряжения отрыва применяли расчетно-экспериментальную методику определения напряженно-деформированного состояния для каждого испытанного образца для чего использовались значения разрушающих нагрузок ($F_{\text{разр}}$), полученных по результатам испытаний образцов с кольцевым надрезом. В результате были получены температурные зависимости локального напряжения отрыва для каждого типа «лидера» в образцах в разных состояниях. С использованием расчетно-экспериментальных зависимостей распределений компонент напряжений по сечению испытанных образцов из корпусной стали с кольцевым надрезом определены величины локального напряжения отрыва для «лидеров» различного типа, при этом установлено, что локальное напряжение отрыва в

образцах в охрупченном состоянии ниже, чем после отжига в течение 50 ч при 680 °С (1880 МПа и 2110 МПа), что свидетельствует о снижении напряжения отрыва в охрупченных образцах за счет зернограничной сегрегации фосфора.

Показано, что источником зарождения хрупкой трещины в стали в охрупченном состоянии являются только структурные интекристаллитные границы, в отожженном состоянии – неметаллическое включение, а также присутствуют транскристаллитные структурные границы, что свидетельствует об уменьшении когезивной прочности границ в охрупченном состоянии. Автором убедительно доказано, что полученные результаты для охрупченного и отожженного состояний, при использовании статистического анализа с применением теста Чоу показал, при линейной аппроксимации принадлежат разным совокупностям данных. При этом для отожженного состояния значения локального напряжения отрыва по границам зерен выше, чем для охрупченного состояния. При этом основным «лидером» в изломах охрупченных образцов были границы зерен. Падение локального напряжения отрыва для «лидеров» в охрупченных образцах свидетельствовало о снижении когезивной прочности границ зерен из-за увеличения концентрации зернограничной сегрегации фосфора.

Результаты работы получены с использованием современного исследовательского и испытательного оборудования путем проведения большого объема экспериментов с качественной обработкой получаемых данных методами математической статистики, что обеспечивает их **достоверность и гарантирует обоснованность сделанных выводов.**

Вместе с тем необходимо сделать некоторые замечания и рекомендации:

1. Оценку идентичности результатов испытания на вязкость разрушения стандартных и реконструированных образцов в облученном состоянии проводили с использованием образцов типа SE(B), а не типа CT. Насколько это корректно?
2. Из текста диссертации не совсем понятно как определяли долю каждого из «лидеров» в образцах сталей в разном состоянии, данные о

которых приведены на рисунках 4.14; 4.16; 4.18; 4.21? Какова статистика таких измерений?

3. При описании статистической обработки результатов и сравнении по тесту Чоу зависимостей CTOD(CID), полученных для стандартных и реконструированных образцов, автору следовало бы более подробно описать в тексте диссертации процедуру и результаты такого анализа.

4. На странице 124 диссертации при описании данных фрактографического анализа и определения «лидеров» в изломах образцов в охрупченном и отожженном образцах указано, что при температуре – 135°C «в отожженном образце излом был полностью вязкий». Отсюда не ясно о каком источнике зарождения хрупкой трещины - «лидере» можно говорить в полностью вязком ямочном изломе, где поры (зародыши ямок) всегда образуются на частицах.

5. Представляется интересным увидеть данные о влиянии не только длительного воздействия рабочей температуры, но и реакторного облучения на локальное напряжение отрыва образцов с кольцевым надрезом на материале КР ВВЭР-1000 промышленного исполнения.

Сделанные замечания не снижают ценность и общую положительную оценку работы.

Диссертационная работа написана ясным технически грамотным языком, хорошо оформлена, содержит большое число иллюстраций, достаточных для понимания и оценки полученных результатов.

Все основные результаты опубликованы в 15 статьях и докладах, в том числе, в 3 журналах из списка ВАК, а также в одном свидетельстве о регистрации патента на изобретение. Кроме того, выпущена и введена в действие в АО «Концерн Росэнергоатом» 1 методика по реконструкции образцов типа СТ.

Автореферат диссертации полностью отражает ее основное содержание.

В целом диссертация представляет собой законченное научное исследование, в котором получены новые практически значимые научные результаты, необходимые для развития материаловедения и технологий конструкционных материалов для корпусов атомных реакторов.

Диссертация полностью соответствует требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней и паспорту специальности, а ее автор Бубякин Сергей Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Металловедения
и физики прочности НИТУ «МИСиС»

Никулин С.А.

119991, г. Москва, Ленинский проспект,4
Тел. 495-9550032
kancela@misis.ru

