

На правах рукописи

УДК 621.039.536.2:669.15-194:539.422.22
ГРНТИ 53.49.17



Фоменко Валентин Николаевич

Прогнозирование вязкости разрушения для расчета прочности корпусов реакторов типа ВВЭР на основе испытаний образцов-свидетелей и локального критерия хрупкого разрушения

Специальность: 15.16.09 –материаловедение (машиностроение)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2017

Работа выполнена в **Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»**

Научный руководитель: **Марголин Борис Захарович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мельников Борис Евгеньевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Гидравлика и прочность»
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образо-
вания «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»

Крюков Александр Михайлович
доктор технических наук,
главный научный сотрудник Федерального
бюджетного учреждения «Научно-технический
центр по ядерной и радиационной безопасно-
сти»

Ведущая организация: **Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро «ГИДРОПРЕСС»**

Защита диссертации состоится 4 октября 2017 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д411.006.01 при Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, Шпалерная ул, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте <http://dissovet.cris-m-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=18>.

Автореферат разослан « ____ » июля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д411.006.01,
Заслуженный деятель науки РФ,
д.т.н., профессор



В.А. Малышевский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Корпус для атомных водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) является основным незаменимым элементом реакторной установки, срок эксплуатации которого в значительной мере определяет срок эксплуатации реактора в целом.

Срок эксплуатации корпуса реактора (КР) в большинстве случаев определяется его сопротивлением хрупкому разрушению (СХР), которое в частности зависит от

- уровня дефектности материала КР (основного металла или металла шва);
- уровня нагруженности материала КР при наиболее опасных режимах эксплуатации; обычно это режимы связанные с аварийным расхолаживанием КР;
- уровня трещиностойкости металла КР с учетом деградации материала в процессе эксплуатации под действием нейтронного облучения и повышенной температуры.

Обычно обоснование продления срока эксплуатации КР выполняется на базе нормативных зависимостей, описывающих кинетику охрупчивания материала в процессе эксплуатации, и гарантированных значений критической температуры хрупкости, $T_{к0}$, характеризующих степень охрупчивания материала в исходном состоянии. Следует отметить, что для металла обечаек разных КР, изготовленных из одной и той же марки стали, используются одни и те же нормативные зависимости и одно значение $T_{к0}$. Данный вывод также для металла сварных швов, выполненных по одной и той же технологии.

Ясно, что такой подход не позволяет индивидуализировать оценку срока эксплуатации, так как не учитывает свойства материала конкретного КР.

Наиболее адекватную оценку трещиностойкости материалов КР при охрупчивании в процессе эксплуатации можно получить на базе испытаний образцов-свидетелей (ОС) на трещиностойкость. В качестве таких ОС обычно используются малоразмерные образцы Шарпи с трещиной (SEB-10).

При использовании результатов испытаний ОС на трещиностойкость при расчете КР на СХР возникает задача прогнозирования трещиностойкости в широком диапазоне температур с учетом изменения формы кривой $K_{Jc}(T)$ по мере увеличения степени охрупчивания материала при эксплуатации. Данная задача осложняется тем, что корректные значения трещиностойкости могут быть определены на ОС в узком диапазоне температур испытаний, не совпадающем с диапазоном температур эксплуатации КР. Кроме того при использовании результатов испытаний ОС возникает ряд проблем, связанных с масштабным фактором, ограниченным количеством ОС, а также с пространственной неоднородностью свойств материалов КР. При расчете КР на СХР при аварийном расхолаживании возникают проблемы связанные с неинвариантностью J -интеграла от контура на стадии разгрузки. В связи с изложенным была поставлена следующая цель диссертационной работы.

Цель работы

Целью настоящей работы является разработка методологии прогнозирования температурной зависимости трещиностойкости $K_{Jc}(T)$ на основе испытаний образцов-свидетелей и методики определения размера контура интегрирования J-интеграла для расчета КР типа ВВЭР на СХР.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи.

- Выполнен анализ существующих методов прогнозирования $K_{Jc}(T)$ и выявлены их преимущества и недостатки.

- Выполнена модернизация вероятностной модели хрупкого разрушения «Прометей» и ее инженерного приложения – метода прогнозирования $K_{Jc}(T)$ «Единая кривая» (Unified Curve).

- Проведен комплекс экспериментальных исследований по определению СХР образцов различного типа (гладких цилиндрических образцов, образцов с надрезом и образцов с трещиной) при различных температурах и верифицирована модернизированная модель «Прометей».

- Проведена широкая верификация модернизированного метода «Единой кривой» на базе международной базы данных по трещиностойкости материалов с различной степенью охрупчивания.

- Сформулирована методология определения запасов на пространственную неоднородность свойств материалов КР, стохастическую природу хрупкого разрушения, ограниченное количество испытываемых ОС и тип ОС, используемых для построения расчетной кривой $K_{Jc}(T)$.

- Проведена статистическая обработка экспериментальных данных и определены параметры распределения критической температуры хрупкости, T_K , как характеристики СХР для основного металла и металла шва КР.

- Определен запас на пространственную неоднородность свойств материалов КР на базе параметров распределения критической температуры хрупкости T_K исходя из условия обеспечения требуемой вероятности (частоты, событий в год) разрушения КР.

- Определен запас на ограниченное количество образцов на основе теории статистической обработки данных.

- Определен запас на тип образца посредством сопоставления экспериментальных данных по трещиностойкости образцов SEB-10 и компактных образцов на внецентренное растяжение типа СТ.

- Предложена и обоснована модернизация образцов SEB-10 для получения представительных (не требующих поправок на тип образца) данных по трещиностойкости.

- Разработаны и обоснованы требования к технологии изготовления реконструированных образцов типа СТ из обломков испытанных образцов SEB-10 и типа Шарпи.

- Разработана методика назначения размера контура интегрирования J-интеграла для расчета КР на СХР при аварийном расхолаживании.

Научная новизна работы

1. Модернизирована вероятностная модель хрупкого разрушения «Прометей». В рамках этой модернизации уточнена формулировка условия зарождения микротрещин скола и предложено уравнение для расчета вероятности хрупкого разрушения при произвольной (сложной) истории нагружения материала. Модернизированная модель позволяет описать хрупкое разрушение образцов различного типа (образцы с трещиной, образцы с надрезом, гладкие образцы) при различных температурах испытания для материалов с различной степенью охрупчивания.

2. Модернизирован инженерный метод «Единая кривая», который обеспечивает адекватный прогноз температурной зависимости $K_{Jc}(T)$ для материалов с различной степенью охрупчивания (для значений референсной температуры T_0 от -150°C до 250°C) в широком диапазоне температур испытаний (от -196°C до 350°C).

3. Разработана методология введения и определения системы запасов для прогнозирования $K_{Jc}(T)$ для расчета КР на СХР на основании результатов испытаний образцов-свидетелей (ОС). Система запасов учитывает стохастическую природу хрупкого разрушения, пространственную неоднородность свойств материалов КР, ограниченное количество и тип испытываемых образцов.

3.1. Разработана методика определения запаса на пространственную неоднородность при рассмотрении T_K для зоны постулированного дефекта и зоны вырезки ОС как случайных величин, принадлежащих одной генеральной совокупности, исходя из обеспечения допустимой вероятности (частоты) разрушения КР, при выполнении условия старта трещины по механизму хрупкого разрушения в детерминистической постановке. Выполнен анализ пространственной неоднородности свойств материалов КР ВВЭР-1000. Установлено, что при одинаковой технологии изготовления обечаек различных КР от обечайки к обечайке варьируется только математическое ожидание критической температуры хрупкости T_K , а стандартное отклонение остается неизменным. Данный вывод также справедлив для металла шва. Определены параметры функции распределения T_K для основного металла и для металла шва.

3.2. Предложена процедура определения запаса на ограниченное количество образцов, испытанных на трещиностойкость.

3.3. Для повышения представительности результатов испытаний ОС и исключения необходимости учета запаса на тип образца

- предложена и обоснована модификация образцов Шарпи с трещиной (SEB-10), заключающаяся в изготовлении глубоких боковых канавок суммарной глубиной 50% от толщины образца;

- разработаны и обоснованы требования к технологии изготовления реконструированных образцов типа СТ из обломков испытанных образцов SEB-10 и типа Шарпи.

4. Разработана методика определения размера контура интегрирования J -интеграла для расчета КР на СХР при аварийном расхолаживании.

Практическая значимость работы

Разработанная методология построения расчетной зависимости $K_{JC}(T)$ для материалов корпусов реакторов типа ВВЭР на основе испытаний ОС и определенные значения запасов на стохастическую природу хрупкого разрушения, неоднородность свойств материалов КР, ограниченное количество испытываемых ОС и тип образца вошли в следующие руководящие документы АО «Концерн «Росэнергоатом» утвержденные «Ростехнадзором» 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», 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», 1.3.2.01.0061-2009 «Положение по контролю механических свойств металла эксплуатирующихся корпусов реакторов типа ВВЭР-1000 по результатам испытаний образцов-свидетелей», а также в одобренный МАГАТЭ документ «Guidelines for integrity and lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation «VERLIFE» 2014.

Разработанная методика расчета J-интеграла для анализа КР на СХР при его аварийном расхолаживании вошла в методики МТ 1.1.4.02.1204-2017 «Расчет на СХР корпусов реакторов ВВЭР-440 (В-179, В-230) с учетом их отжига при продлении срока эксплуатации до 60 лет» и «Расчет на СХР корпусов реакторов АЭС с ВВЭР-1000, в том числе прошедших отжиг при продлении срока эксплуатации до 60 лет» которые проходят процедуру одобрения в АО «Концерн «Росэнергоатом» и в «Ростехнадзоре».

Разработанный инженерный метод «Модернизированная единая кривая» вошел в методику МТ 1.1.4.02.1204-2017 «Расчет на СХР корпусов реакторов ВВЭР-440 (В-179, В-230) с учетом их отжига при продлении срока эксплуатации до 60 лет».

На базе указанных выше методик выполнено обоснование продления сроков эксплуатации до 60 лет КР ВВЭР-1000 блоков №1 и 2 Калининской АЭС, блоков №2, 3 и 4 Балаковской АЭС, блока №5 Нововоронежской АЭС и блока №5 АЭС Козлодуй (Болгария), а также обоснован срок эксплуатации 60 лет КР ВВЭР-1200 АЭС Ханхикиви (Финляндия) и выполняется обоснование продления сроков эксплуатации до 60 лет КР ВВЭР-440.

Основные положения выносимые на защиту

Модернизация вероятностной модели хрупкого разрушения «Прометей»

Модернизация инженерного метода прогнозирования температурной зависимости трещиностойкости «Единая кривая»,

Методология получения зависимости $K_{JC}(T)$ для расчета КР на СХР на основании результатов испытаний ОС.

Методика определения запаса на пространственную неоднородность.

Методика определения запаса на количество образцов.

Обоснование модификации ОС типа SEB-10, заключающейся в изготовлении глубоких боковых канавок суммарной глубиной 50% от толщины образца.

Значения величин запасов неоднородность свойств материалов КР, ограниченное количество и тип испытываемых ОС.

Требования к технологии изготовления реконструированных образцов типа СТ из обломков испытанных ранее образцов на трещиностойкость (SEB-10) и на ударную вязкость (типа Шарпи), при которых практически обеспечивается идентичность значений трещиностойкости, полученных на реконструированных и стандартных образцах типа СТ.

Методика определения размера контура интегрирования при расчете J-интеграла, для оценки сопротивления хрупкому разрушению КР ВВЭР при его аварийном расхолаживании

Достоверность результатов

Экспериментальные исследования проводились согласно российским и международным стандартам на сертифицированном оборудовании. Достоверность результатов подтверждается соответствием результатов расчетов экспериментальным данным. Представленные расчетные модели разрабатывались на базе теории вероятности, теории деформирования твердого тела, а также механике и физике разрушения. Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) выполнялся методом конечных элементов (МКЭ) с использованием сертифицированного и лицензионного программного комплекса ANSYS.

Апробация работы

Материалы, представленные в диссертации, были доложены на следующих конференциях:

- Международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации АЭС», Пушкин, Россия 2008.
- «ASME Pressure Vessels and Piping Conference», Prague, Czech Republic, 2009.
- Международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации АЭС», Пушкин, Россия 2010.
- Международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации АЭС», Пушкин, Россия 2012.
- «International Workshop on physics-based modelling of material properties and experimental observations with special focus on Fracture and Damage» Mechanics, Antalya, Turkey, 2013.
- «International Conference on Fracture», Beijing, China, 2013.
- МНТК, АО «Концерн «Росэнергоатом», Москва, Россия, 2014.
- International workshop «RPV Embrittlement and Surveillance Programmes», Prague, Czech Republic, 2015.
- Отраслевой семинар «Физика радиационных повреждений материалов атомной техники, Москва, ВНИИАМ, 2015.
- Международная конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «Гидропресс», Подольск, 2017.

Личный вклад автора

Лично автором проведен расчет МКЭ НДС образцов. Разработана программа для расчета вероятности разрушения образцов при произвольной истории нагружения материала. Разработана программа экспериментальных исследований различных типов образцов, изготовленных из основного металла

и металла шва КР ВВЭР-1000. Проведена обработка результатов испытаний. Разработана программа для расчета вероятности разрушения КР с постулированным дефектом с учетом данных по неразрушающему контролю. Определены численные значения запасов на пространственную неоднородность, тип образца и количество образцов.

Автором и научным руководителем выполнены модернизация модели хрупкого разрушения «Прометей» и метода «Единой кривой». Разработана методология получения зависимости $K_{JIC}(T)$ для расчета КР на СХР на основании результатов испытаний ОС и разработаны методики определения необходимых запасов. Проведено обоснование модификации ОС типа SEB-10 с глубокими канавками. Разработаны требования к технологии изготовления реконструированных образцов типа СТ. Разработана методика определения размера контура интегрирования при расчете J-интеграла, для оценки КР на СХР при его аварийном расхолаживании.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 19 работ в ведущих российских и зарубежных журналах. Из них 11 работ опубликовано в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Получен 1 патент РФ .

Объем и структура работы

Диссертация состоит из 6 глав и выводов по диссертации. Работа изложена на 263 страницах, включая 76 рисунков и 18 таблиц. Библиографический указатель состоит из 162 источников.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 проводится анализ существующей процедуры расчета корпусов ВВЭР и PWR (Pressurized water reactor) на СХР.

Показано, что расчетная зависимость трещиностойкости от температуры, $K_{JIC}(T)$, определяется на основе нормативных зависимостей в виде $K_{JIC}(T-T_{tr})$, где T_{tr} – некоторая референсная температура, которая характеризует температурную зависимость вязкости разрушения для заданной степени охрупчивания материала. Величина T_{tr} определяется также по нормативным зависимостям вида

$$T_{tr} = T_{tr0} + f(F, t), \quad (1)$$

где T_{tr0} – гарантированное значение T_{tr} для материала в исходном (до эксплуатации) состоянии, $f(F, t)$ – дозовая или дозовременная зависимость сдвига T_{tr} , F – флюенс нейтронов, t – время эксплуатации.

Нормативные зависимости $K_{JIC}(T-T_{tr})$ и $f(F, t)$ и величина $T_{tr}^{исх}$ не учитывают различие в свойствах материала того или иного корпуса реактора (КР) и являются едиными для данной марки стали. То же относится к металлу сварных швов, выполненных по одной и той же технологии.

Расчет КР ВВЭР-1000 на СХР по существующей процедуре, основанной на нормативных зависимостях, показал, что продление их срока эксплуатации КР до 60 лет в ряде случаев невозможно без учета индивидуальных свойств материалов КР. Такой учет наиболее адекватно может быть выполнен при использовании результатов испытаний ОС на трещиностойкость (как правило,

образцов типа Шарпи с трещиной (SEB-10)), которые изготовлены из того же материала, что и рассматриваемые элементы КР и облучаются вместе с КР. Следует отметить, что согласно действующим на момент начала данной работы нормативным документам ОС использовались только для подтверждения нормативных дозовых зависимостей.

Использование результатов испытаний ОС для построения $K_{Jc}(T)$ при расчете КР на СХР сопряжено с рядом неопределенностей, которые должны быть учтены посредством введения соответствующих запасов. К таким неопределенностям в первую очередь следует отнести стохастическую природу хрупкого разрушения, неоднородность свойств материалов КР, ограниченное количество испытываемых образцов-свидетелей, а также возможное различие вязкости разрушения представительных образцов СТ и малоразмерных ОС.

Кроме указанных проблем необходимо учитывать изменение формы кривой $K_{Jc}(T)$ по мере увеличения степени охрупчивания материала в процессе эксплуатации КР. Выполненные исследования показали, что наиболее подходящими методами для определения $K_{Jc}(T)$ на базе испытаний ОС является модель хрупкого разрушения «Прометей» и ее инженерное приложение метод «Единой кривой» (Unified Curve). Эти методы позволяют прогнозировать трещиностойкость сталей КР ВВЭР и ферритных сталей. Анализ указанных модели и метода выявил их недостатки, которые должны быть устранены для получения адекватного прогноза $K_{Jc}(T)$ для любого (включая сильно охрупченное) состояния материала и любой температуры, при которой происходит хрупкое разрушение.

Кроме материаловедческих проблем при расчетах КР на СХР при аварийном расхолаживании существует следующая проблема: наличие немаломасштабной зоны пластической деформации у вершины трещины не позволяет использовать аппарат линейной механики разрушения, а применение J-интеграла затруднено, поскольку упругопластическое деформирование сопровождается немонотонным нагружением, т. е. отличается от простого нагружения. Как известно, J-интеграл при немонотонном нагружении теряет инвариантность к размеру контура интегрирования.

В связи с изложенным следует решить задачу по разработке процедуры расчета J-интеграла при немонотонном нагружении в условиях аварийного расхолаживания КР.

На основе анализа, выполненного в главе 1, формулируется цель и задачи диссертации.

В главе 2 выполнен анализ и модернизация вероятностной модели хрупкого разрушения «Прометей». Модернизированная модель названа «Прометей-М». Модернизация заключалась в следующем.

1. Предложена более точная формулировка условия зарождения микротрещин скола. Ранее в условии зарождения в качестве функции тензора напряжений использовалось максимальное главное напряжение σ_1 . Это соответствует случаю, когда ориентация σ_1 совпадает с ориентацией максимального локального напряжения в голове дислокационного скопления, σ_{loc} , и дает консервативную оценку параметра контролирующего зарождение микротрещин σ_{nuc} .

Учитывая, что ориентация σ_{loc} имеет случайный характер, в среднем вклад номинальных напряжений в σ_{nuc} определяется не величиной σ_1 , а шаровой компонентой тензора напряжений $\sigma_m = \sigma_{ii}/3$. Таким образом новое условие зарождения микротрещин записывается в виде

$$\sigma_{nuc} \equiv \sigma_m + m_T \cdot m_\varepsilon \cdot \sigma_{eff} \geq \sigma_d, \quad (2)$$

где σ_d – критическое напряжение зарождения микротрещины скола, $\sigma_{eff} = \sigma_{eq} - \sigma_Y$ – эффективное напряжение, σ_{eq} – интенсивность напряжений, σ_Y – предел текучести, m_T и m_ε параметры зависящие от температуры и пластической деформации соответственно. Параметр m_T контролирует величину (ширину) притупления, а m_ε его длину.

2. Предложена более общая корреляционная зависимость между m_T и температурозависимой частью предела текучести σ_{YS} . Из физических соображений показано, что в общем случае зависимость m_T от σ_{YS} является нелинейной монотонно возрастающей функцией, имеющей асимптоту. Новая зависимость $m_T(\sigma_{YS})$ в записывается в виде

$$m_T = g \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot \sigma_{YS})), \quad (3)$$

где $g=94$ и $\lambda=7 \cdot 10^{-3}$ 1/МПа - константы материала, не зависящие от температуры, материала или типа образца.

3. Показано, что уравнение для расчета вероятности хрупкого разрушения элементарной ячейки, использованное в модели «Прометей», в ряде случаев сложного нагружения может давать неадекватный результат. Предложено новое уравнение для расчета вероятности разрушения элементарной ячейки при ее произвольном нагружении

$$P_f = \int_0^{\varepsilon_N} \delta \cdot \frac{\partial P_{nuc}}{\partial \varepsilon} \cdot P_{prop}^{max}(\varepsilon, \varepsilon_N) d\varepsilon, \quad (4)$$

где ε_N – значение параметра ε , для которого рассчитывается величина P_f ($\varepsilon = \int d\varepsilon_{eq}^p$ – накопленная пластическая деформация); P_{nuc} – вероятность зарождения микротрещин, которая характеризует долю элементарных ячеек, в которых зарождение микротрещин происходит в рассматриваемый момент времени; P_{prop} – вероятность распространения микротрещин, которая характеризует долю элементарных ячеек, в которых происходит старт и распространение микротрещин, при условии, что процесс зарождения происходит во всех элементарных ячейках; $P_{prop}^{max}(\varepsilon, \varepsilon_N)$ – максимальное значение P_{prop} в интервале от ε до ε_N ; δ – функция, рассчитываемая по формуле

$$\delta = \begin{cases} 1, & \text{если } \sigma_{nuc}(\varepsilon) = \max \sigma_{nuc}^{0,\varepsilon} \text{ и } \frac{d\sigma_{nuc}}{d\varepsilon} > 0 \\ 0, & \text{если } \sigma_{nuc}(\varepsilon) < \max \sigma_{nuc}^{0,\varepsilon} \text{ или } \frac{d\sigma_{nuc}}{d\varepsilon} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

($\max \sigma_{nuc}^{0,\varepsilon}$ – максимальное значение σ_{nuc} в интервале от 0 до ε).

На рис. 1 и 2 показано, что модель «Прометей-М» позволяет описать хрупкое разрушение образцов различного типа для стали с различной степенью охрупчивания при одних и тех же параметрах модели.

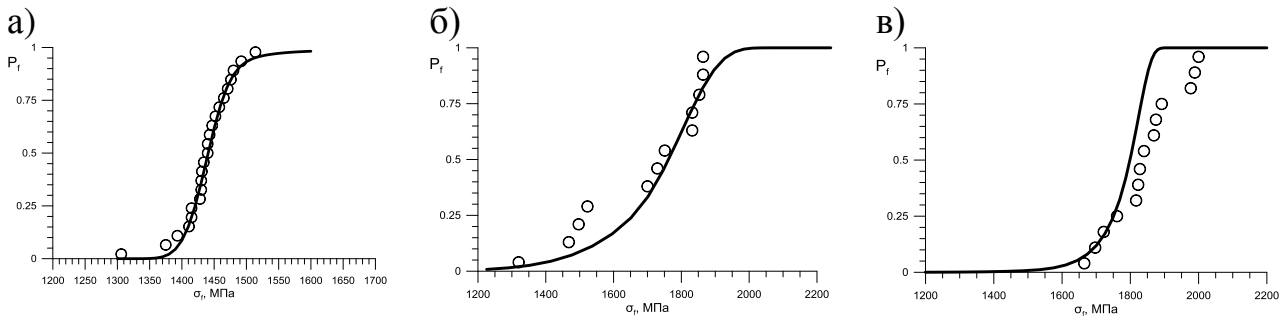


Рисунок 1 – Зависимости вероятности разрушения от разрушающего напряжения для гладких цилиндрических образцов при $T=-196^{\circ}\text{C}$ (а) и цилиндрических образцов с надрезом при $T=-140^{\circ}\text{C}$ (б) и $T=-100^{\circ}\text{C}$ (в) из стали 15X2НМФА-А в охрупченном состоянии: \bigcirc – экспериментальные данные, линия – расчет по модели «Прометей-М».

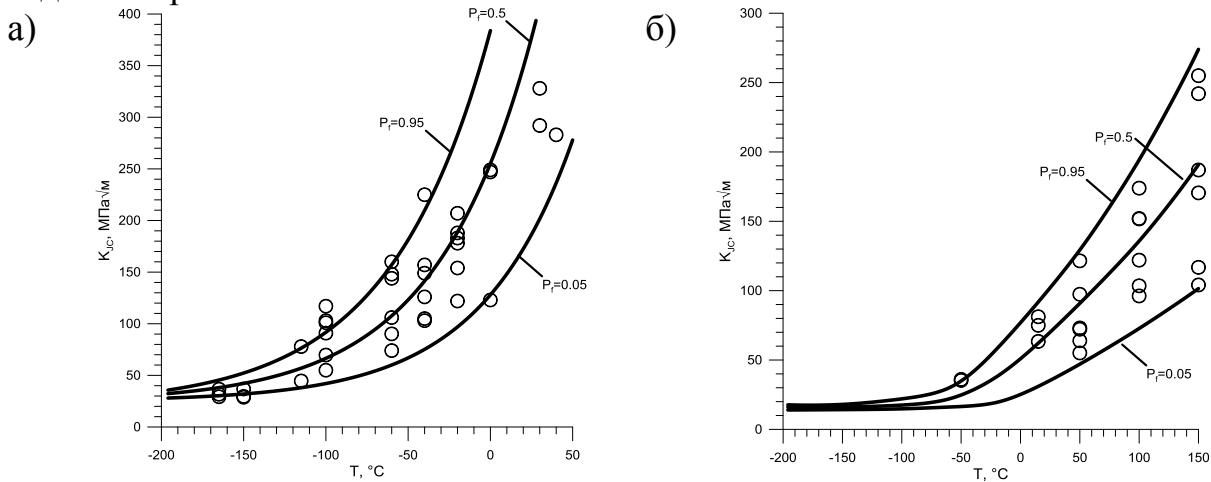


Рисунок 2 – Зависимости K_{Jc} от T для стали 15X2НМФА-А в исходном (а) и охрупченном (б) состояниях: \bigcirc – экспериментальные данные, полученные на образцах СТ-2 ($B=50\text{мм}$), линии – расчет по модели «Прометей-М».

В главе 3 с физических позиций проанализирован метод «Единой кривой» («Unified Curve» (UC)), полученный на основе модели хрупкого разрушения «Прометей» и предназначенный для прогнозирования температурной зависимости $K_{Jc}(T)$. На основе численного моделирования зависимостей $K_{Jc}(T)$ с помощью модернизированной модели «Прометей-М» проведено улучшение метода UC. Усовершенствованный метод назван «Модернизированная единая кривая» («Advanced Unified Curve» (AUC)).

Моделирование трансформации $K_{Jc}(T)$ в процессе нейтронного облучения проводилось с помощью модели «Прометей-М» по трем вариантам.

В первом варианте рассматривалось охрупчивание материала по неупрочняющему механизму, когда охрупчивание материала происходит не за счет увеличения предела текучести, а исключительно за счет образования сегрегаций фосфора на различных межфазных границах, а также на границах зерен.

Во втором варианте рассматривалось охрупчивание материала по упрочняющему механизму, когда охрупчивание материала происходит исключительно за счет увеличения предела текучести.

В третьем варианте рассматривалось охрупчивание материала, происходящее по двум механизмам одновременно: упрочняющему и неупрочняющему. Данный вариант охрупчивания наиболее типичен при облучении корпусных реакторных сталей.

Все зависимости $K_{JC}(T)$, полученные при моделировании охрупчивания материала по 3-м вариантам, были нормализованы с помощью зависимости вида

$$Y \equiv \frac{K_{JC(\text{med})} - K_{JC}^{\text{shelf}}}{K_{JC(\text{med})}^{100} - K_{JC}^{\text{shelf}}} = f(T), \quad (6)$$

где $K_{JC(\text{med})}^{100}$ – медианное значение трещиностойкости при $T = 100^\circ\text{C}$;

K_{JC}^{shelf} – медианное значение трещиностойкости на нижнем шельфе кривой $K_{JC}(T)$. В качестве K_{JC}^{shelf} принималось значение $K_{JC(\text{med})}$ при $T = -200^\circ\text{C}$.

Как видно на рис. 3, для каждого варианта моделирования охрупчивания все кривые $K_{JC}(T)$ сворачиваются практически в единую кривую. Именно поэтому инженерный метод прогнозирования $K_{JC}(T)$ назван «Единой кривой» (Unified Curve). На рис. 4 приведены три кривые, каждая из которых является результатом осреднения семейства кривых, представленных на рис. 3а (кривая 1 на рис. 4), 3б (кривая 2 на рис.4) и 3в (кривая 3 на рис. 4), то есть для трех вариантов моделирования охрупчивания. Как видно из рисунка 4, при $T \leq 165^\circ\text{C}$ зависимости $Y(T)$ для трех вариантов совпадают. При $T > 165^\circ\text{C}$ кривые $Y(T)$, полученные для различных вариантов, несколько различаются. Расчет по варианту 3 дает промежуточную кривую $Y(T)$ между кривыми, рассчитанными по варианту 1 и варианту 2. Этот результат достаточно очевиден, так как вариант 3 соответствует моделированию охрупчивания одновременно по двум механизмам: неупрочняющему (вариант 1) и упрочняющему (вариант 2). Учитывая, что наиболее типичной ситуацией при нейтронном облучении является охрупчивание материала одновременно по двум механизмам, для АУС была выбрана зависимость $Y(T)$, рассчитанная по варианту 3. На рисунке 5 представлены кривые $Y(T)$, рассчитанные по УС и по АУС. Видно, что при $T < 130^\circ\text{C}$ кривые совпадают, а при $T > 130^\circ\text{C}$ кривая для УС ниже, чем для АУС. Уравнение для прогнозирования $K_{JC}(T)$ по методу АУС для вероятности разрушения $P_f = 0,5$ и длины фронта трещины 25 мм представлено в виде

$$K_{JC}(T) = K_{JC}^{\text{shelf}} + \Omega \cdot a_1 \cdot \left(1 + \text{th} \left(\frac{T - a_2}{a_3} \right) \right), \text{МПа} \sqrt{\text{м}} \quad (7)$$

где $K_{JC}^{\text{shelf}} = 30 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$; T – температура, $^\circ\text{C}$; если $T < 130^\circ\text{C}$, $a_1 = 1$, $a_2 = 130^\circ\text{C}$, $a_3 = 105^\circ\text{C}$; если $T \geq 130^\circ\text{C}$, $a_1 = 1,99$, $a_2 = 216^\circ\text{C}$, $a_3 = 157^\circ\text{C}$; Ω – параметр, контролирующий степень охрупчивания материала; с увеличением степени охрупчивания Ω уменьшается.

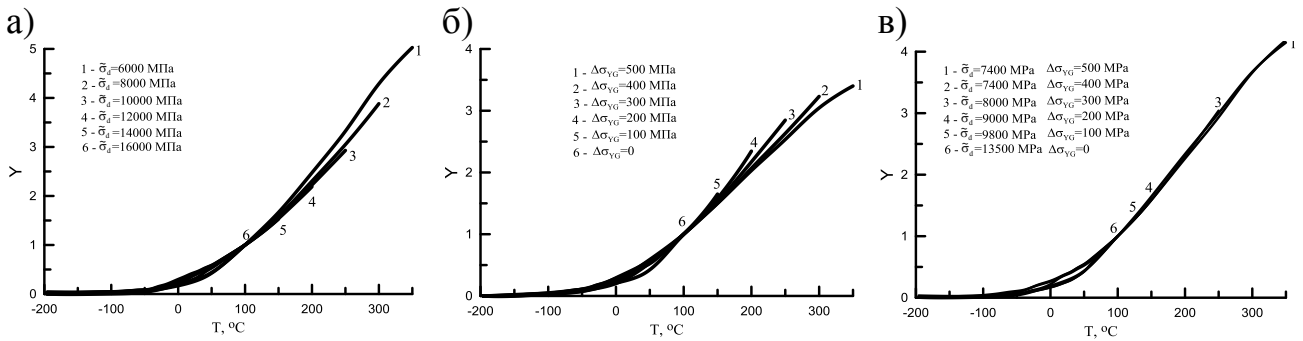


Рисунок 3 – Зависимости Y от температуры для варианта 1 (а), варианта 2 (б) и варианта 3 (в).

На рис.6 видно, что прогноз AUC хорошо описывает экспериментальные данные при разных степенях охрупчивания материала.

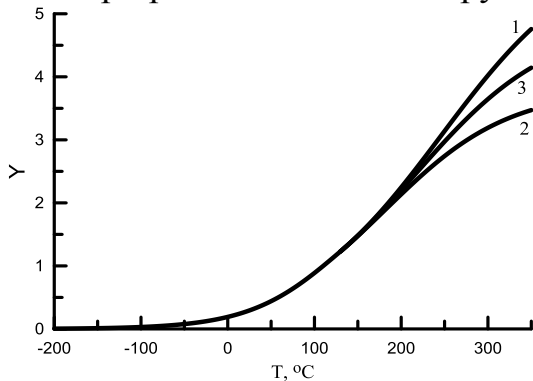


Рисунок 4 – Сопоставление осредненных кривых $Y(T)$, рассчитанных по вариантам 1, 2 и 3 (номера кривых соответствуют номерам вариантов).

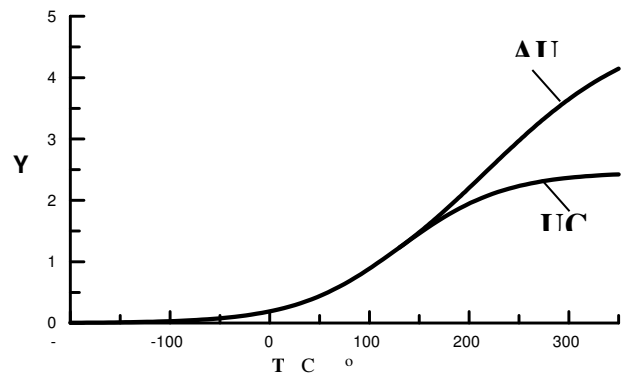


Рисунок 5 – Сопоставление кривых $Y(T)$, рассчитанных по UC.

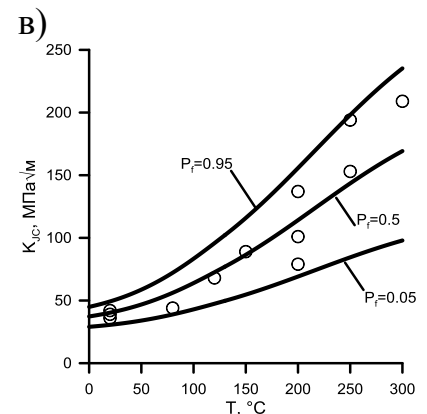
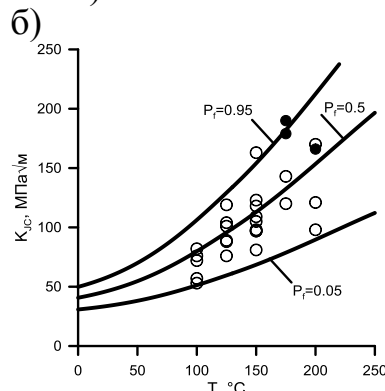
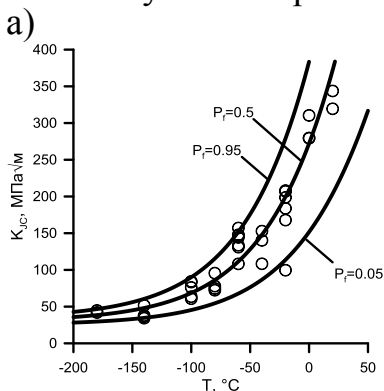


Рисунок 6 – Зависимости K_{IC} от T для толщины 25 мм при вероятности разрушения P_f равной 0.05, 0.5 и 0.95 полученные с помощью AUC; точки – экспериментальные данные.

- (а) – материал в исходном состоянии, образцы (сталь 15ХЗНМФА, $T_0 = -67,4^\circ\text{C}$),
- (б) – материал со средней степенью охрупчивания, (облученный шов KS01, $T_0 = 137^\circ\text{C}$),
- (в) – материал с высокой степенью охрупчивания (17MoV8 steel, $T_0 = 180^\circ\text{C}$).

На базе обширной базы данных по трещиностойкости материалов (44 набора данных с T_0 от -150°C до 250°C) проведено сравнение AUC и UC, а также AUC с наиболее распространенным инженерным методом – методом «Master Curve» (MC). Для сравнения AUC, UC и MC использованы следующие параметры.

$$\text{Параметр } \delta \text{ рассчитывается по формуле } \delta = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \sum_{j=1}^M (K_{JC(\text{med})j}^{\text{pr}} - K_{JC(\text{med})j}^{\text{exp}})^2}, \quad (8)$$

где M – количество температур испытаний, $K_{JC(\text{med})j}^{\text{pr}}$ – прогнозируемое медианное значение K_{JC} , рассчитанное с помощью МС, УС или АУС при температуре T_j ; $K_{JC(\text{med})j}^{\text{exp}}$ – экспериментальное медианное значение K_{JC} , рассчитанное на основании экспериментальных данных, полученных при температуре испытаний $T=T_j$.

$$\text{Параметр } \sigma \text{ рассчитывается по формуле } \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (K_{JC(\text{mean})i}^{\text{pr}} - K_{JCi}^{\text{exp}})^2}, \quad (9)$$

где N – общее количество испытанных образцов, K_{JCi}^{exp} – экспериментальное значение K_{JC} , полученное для i -го образца, $K_{JC(\text{mean})i}^{\text{pr}}$ – прогнозируемое математическое ожидание для значений K_{JC} , рассчитанное с помощью МС, УС или АУС при температуре испытаний i -го образца.

$$\text{Параметр } Z \text{ рассчитывается по формуле } Z_{\text{МС-АУС}} \equiv \frac{\ln L^{\text{МС}}}{r} - \frac{\ln L^{\text{АУС}}}{r} \quad (10)$$

где L – параметр метода наибольшего правдоподобия, который может быть рассчитан по формуле

$$L = \prod_{i=1}^N \frac{[4(K_{JC(i)} - K_{\min})^3]^{\delta_i}}{(K_0 - K_{\min})^{4\delta_i}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{K_{JC(i)} - K_{\min}}{K_0 - K_{\min}}\right)^4\right), \quad (11)$$

где $\delta_i=1$, если значение $K_{JC(i)}$ корректно, и $\delta_i=0$, если значение $K_{JC(i)}$ некорректно, $K_0 - K_{\min} = (K_{JC(\text{med})}^{\text{pr}} - K_{\min}) \cdot [\ln(2)]^{-1/4}$ и $K_{JC(\text{med})}^{\text{pr}}$ рассчитываются согласно МС, УС или АУС. Если $Z_{\text{МС-АУС}} < 0$, то АУС описывает экспериментальные данные более адекватно, чем МС

При сравнении методов АУС, УС и МС показано, что для материала в исходном состоянии и при низкой степени охрупчивания ($T_0 < -50^\circ\text{C}$) все методы описывают экспериментальные данные практически одинаково, т.е. предпочтение в использовании какого-либо метода для этого случая отсутствует. При средней степени охрупчивания материала ($-50^\circ\text{C} < T_0 < 150^\circ\text{C}$) методы АУС и УС описывают экспериментальные данные практически одинаково, но лучше чем МС. При высокой степени охрупчивания материала ($T_0 > 150^\circ\text{C}$) метод АУС имеет преимущество как перед МС так и перед УС. Поэтому для прогнозирования $K_{JC}(T)$ при любой степени охрупчивания материала рекомендуется использовать метод АУС.

На рис. 7 представлены результаты сравнения АУС и МС по критериям Z , δ и σ .

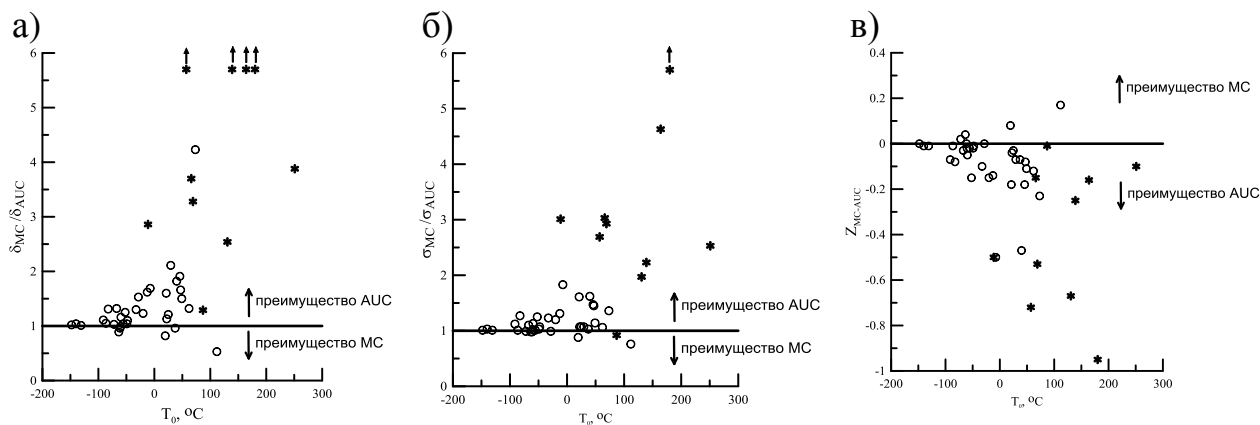


Рисунок 7 – Результаты сравнения AUC и MC по критериям δ (а), σ (б) и Z (в): значком * выделены те наборы данных, в которых имеются значения K_{JC} , полученные при $T > 130$ °C.

В главе 4 выполнен анализ различных типов образцов-свидетелей и сформулированы предложения по повышению достоверности результатов их испытаний. Рассмотрены возможные пути повышения достоверности результатов испытаний ОС.

Первый путь получения температурной зависимости трещиностойкости, позволяющий дать адекватный прогноз трещиностойкости материала на базе результатов испытаний образцов SEB-10 сводится к введению коэффициента запаса на тип образца $\delta T_{type} \equiv T_{100}^{CT} - T_{100}^{SEB-10}$, где T_{100}^{CT} и T_{100}^{SEB-10} – значения T_{100} (температуры при $K_J = 100$ МПа $\sqrt{м}$ для зависимости $K_{JC}(T)$ при $B = 25$ мм и вероятности разрушения $P_f = 0.5$) полученные на компактных образцах на внецентренное растяжение типа СТ и стандартных образцах SEB-10 соответственно. Было выполнено сопоставление результатов испытаний стандартных образцов SEB-10 и СТ для материалов корпусов реакторов с различной степенью охрупчивания. На основании анализа экспериментальных данных, представленных на рис.8 для образцов SEB-10 без канавок и со стандартной глубиной боковых канавок определена величина запаса на тип образца: $\delta T_{type} = 15$ °C.

Второй путь повышения достоверности результатов, полученных на ОС, базируется на модификации образцов SEB-10 посредством нанесения на них глубоких (суммарной глубиной 50 % от толщины образца) боковых канавок. Обозначим эти образцы SEB-10/50. Было выполнено сопоставление результатов испытаний образцов SEB-10 с канавками 50% и образцов СТ для материалов корпусов реакторов с различной степенью охрупчивания. На основании анализа экспериментальных данных, представленных на рис.9 для образцов SEB-10/50 определена величина запаса на тип образца: $\delta T_{type} = 0$ °C.

Для обработки результатов испытаний образцов SEB-10/50 была модернизирована стандартная процедура расчета J-интеграла. (В стандартной процедуре глубина канавок ограничена величиной 25%.) Эта модернизация заключалась в корректировке расчета упругой части J-интеграла.

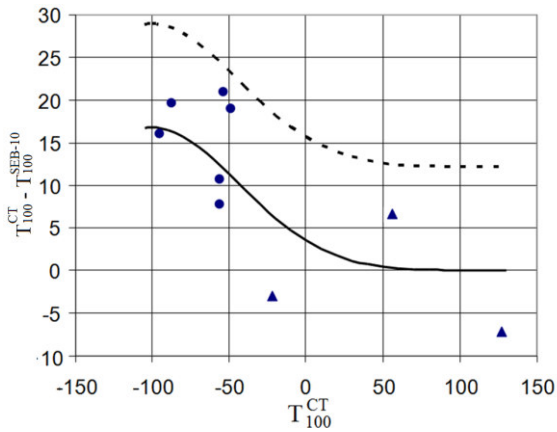


Рисунок 8 – Зависимость $T_{100}^{CT} - T_{100}^{SEB-10}$ от степени охрупчивания материала
 ● - металл в исходном состоянии,
 ▲ - металл в охрупченном состоянии,
 ——— — средняя кривая,
 - - - - - верхняя граница одностороннего доверительного интервала для вероятности 95%.

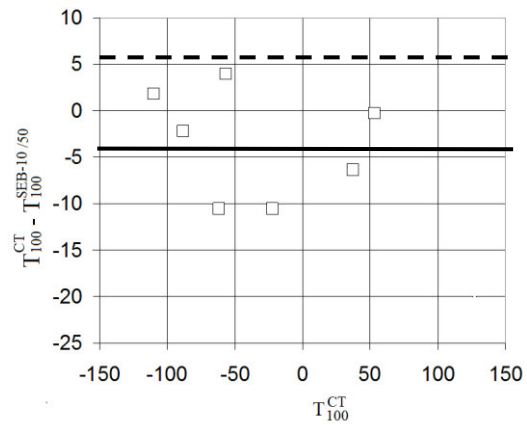


Рисунок 9 – Зависимость $T_{100}^{CT} - T_{100}^{SEB-10/50}$ от степени охрупчивания материала.
 ——— — средняя кривая,
 - - - - - верхняя граница одностороннего доверительного интервала для вероятности 95%.

Для корректировки K_e^{ASTM} (значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) рассчитанного на основании упругой части J-интеграла согласно стандартной процедуре) на базе серии расчетов МКЭ в трехмерной постановке было получено уравнение:

$$K_e = K_e^{ASTM} \cdot (0,53 \cdot (B_N / B)^2 - 1,39 \cdot B_N / B + 1,86), \quad (12)$$

где B – толщина образца, B_N – толщина нетто-сечения образца.

Верификация предложенной процедуры проведена посредством сопоставления результатов расчетов по предложенной процедуре с численными расчетами J-интеграла с помощью МКЭ в трехмерной постановке при упруго-пластическом поведении материала с использованием метода податливости. Разница в значениях J-интеграла, рассчитанных с помощью МКЭ и по предлагаемой процедуре не превышает 4%.

Третий путь может быть основан на изготовлении (реконструкции) образцов СТ из обломков испытанных образцов типа SEB-10 или образцов Шарпи. Суть этой технологии заключается в следующем. Из обломка испытанного ранее облученного образца-свидетеля изготавливают вставку, а из необлученного металла – обойму, по форме и размерам соответствующую стандартному образцу СТ (см. рис. 9а). При этом вершина трещины располагается во вставке, изготовленной из обломков ранее испытанного образца.

Однако при сварке в жесткий контур возникают растягивающие остаточные сварочные напряжения (ОСН), которые могут внести значительные искажения в результаты испытаний.

Для снижения ОСН был предложен способ сварки, позволяющий избежать приварку вставки к обойме по замкнутому контуру в цельную жесткую обойму (см. рис. 9а). Суть этого способа состоит в том, что обойму изготавли-

вают не цельной, а составной, состоящей из отдельных элементов, которые последовательно приваривают к вставке (см. рис. 9б).

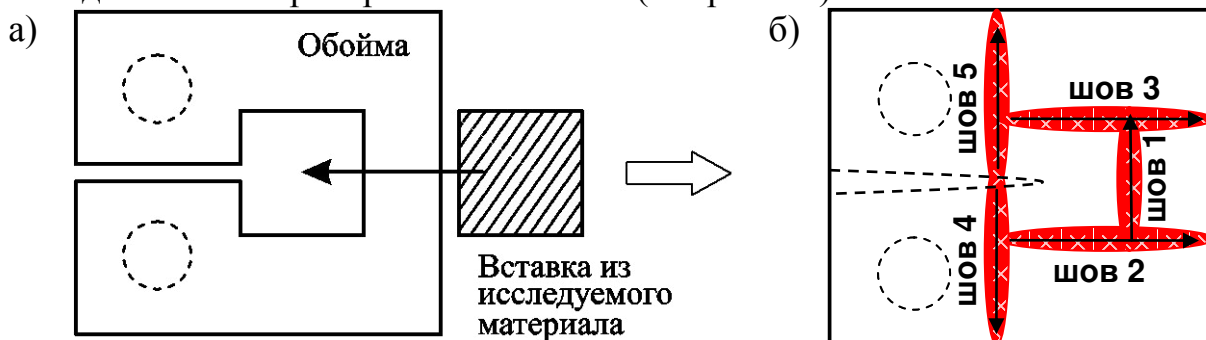


Рисунок 9 – Схема реконструкции образца СТ-0,5 и порядок выполнения сварных швов для одного из оптимальных вариантов.

Были рассмотрены различные варианты реконструкции образцов СТ. Распределения ОСН для них существенно отличаются друг от друга, что связано в основном с различной последовательностью выполнения швов. На основании выполненных расчетов были выбраны оптимальные варианты изготовления образцов СТ, для которых ОСН вблизи вершины трещины минимальны.

Кроме выбора оптимальных вариантов реконструкции образцов СТ были назначены требования к материалу обоймы исходя из критериев «идентичности» НДС вблизи вершины трещины реконструированных образцов и стандартных (однородных) образцов.

В качестве таких критериев принимались два условия:

(а) по «напряжениям»: $\max \left(\frac{|q_1^{\text{рек}} - q_1^{\text{одн}}|}{q_1^{\text{одн}}}, \frac{|q_2^{\text{рек}} - q_2^{\text{одн}}|}{q_2^{\text{одн}}} \right) < 0,1$, где $\bar{r} = r / (J / \sigma_{0,2}) = 5$,
 $q_1^{\text{рек}} = (\sigma_1 / \sigma_{0,2}^{\text{вставки}})_{\text{рек}}$, $q_1^{\text{одн}} = (\sigma_1 / \sigma_{0,2})_{\text{одн}}$, $q_2^{\text{рек}} = (\sigma_1 / \sigma_{\text{eq}})_{\text{рек}}$, $q_2^{\text{одн}} = (\sigma_1 / \sigma_{\text{eq}})_{\text{одн}}$;

(б) по «деформациям»: $|\delta^{\text{рек}} - \delta^{\text{одн}}| / \delta^{\text{одн}} < 0,1$, где $\delta^{\text{рек}}$, $\delta^{\text{одн}}$ – раскрытие вершины трещины для реконструированного и однородного образца СТ.

Выполнен расчет НДС однородных и реконструированных образцов СТ-0.5 с различными сочетаниями пределов текучести вставки и обоймы. Получен диапазон допустимых значений предела текучести обоймы в зависимости от предела текучести вставки, в котором обеспечивается «идентичность» НДС однородных и реконструированных образцов. Этот диапазон показан на рис. 10.

Выполнена верификация полученных оптимальных вариантов реконструкции образцов СТ-0.5 посредством сравнения вероятности разрушения рассчитанной с помощью модели «Прометей-М» для однородных и реконструированных образцов.

Выполнено сопоставление экспериментальных данных по трещи-

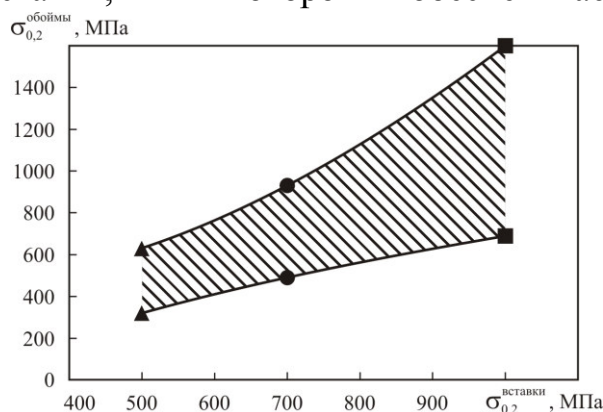


Рисунок 10 – Диапазон допустимых значений предела текучести металла обоймы в зависимости от предела текучести металла вставки (заштри-

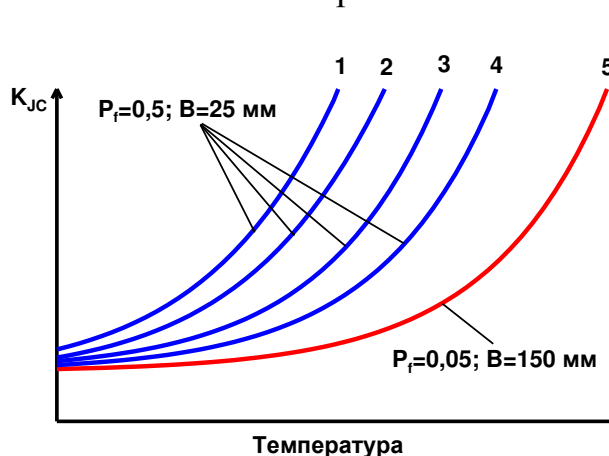
нотойкости стандартных и реконструированных, с учетом разработанных требований, образцов СТ-0.5. Экспериментальные исследования выполнены в ИРМТ НИЦ «Курчатовский институт».

В главе 5 представлена разработанная методика построения расчетной кривой $K_{Jc}(T)$ для расчета КР на СХР на основе испытаний ОС.

Разработанная методика позволяет получить индивидуальный прогноз трещиностойкости для конкретного материала КР и учитывает изменение формы кривой $K_{Jc}(T)$ при охрупчивании материала.

Разработанная методика построения расчетной кривой $K_{Jc}(T)$ включает систему запасов, учитывающих стохастическую природу хрупкого разрушения, неоднородность свойств материалов КР (основного металла и металла шва), ограниченное количество испытываемых образцов-свидетелей, а также возможное различие вязкости разрушения полномасштабных образцов и мало-размерных образцов-свидетелей.

Схема построения расчетной кривой $K_{Jc}(T)$ с учетом указанных выше запасов показана на рис. 11.



- 1 – кривая, построенная по результатам испытаний ОС;
- 2 – кривая, построенная на базе кривой 1 с учетом запаса на ограниченное количество ОС;
- 3 – кривая, построенная на базе кривой 2 с учетом запаса на пространственную неоднородность материала КР (метод определения этого запаса представлен ниже);
- 4 – кривая, построенная на базе кривой 3 с учетом запаса на тип образца (метод определения этого запаса представлен ниже);
- 5 – расчетная кривая $K_{Jc}(T)$ – кривая, построенная с учетом всех рассмотренных запасов для длины фронта трещины $V=150$ мм и вероятности хрупкого разрушения $P_f=0,05$.

Рисунок 11 – Схема построения кривой $K_{Jc}(T)$ для расчета КР на СХР на основе испытаний ОС.

Задача определения запаса на пространственную неоднородность материала формулируется следующим образом. Требуется определить величину запаса δT_{NH} при котором с заданной вероятностью будет выполняться условие

$$T_K^{3Д} < T_K^{OC} + \delta T_{NH}, \quad (13)$$

где $T_K^{3Д}$ – значение T_K для зоны локализации дефекта (точнее локализации вершины постулированной трещины); T_K^{OC} – значение T_K , определенное по результатам испытаний ОС.

Вероятностную трактовку условия (13) можно представить в виде

$$P(T_K^{3Д} < T_K^{OC} + \delta T_{NH}) = \bar{P}_\Delta, \quad (14a)$$

или

$$P(\Delta T_K < \delta T_{NH}) = \bar{P}_\Delta, \quad (14b)$$

где $\Delta T_K = T_K^{3Д} - T_K^{OC}$, $P(T_K^{3Д} < T_K^{OC} + \delta T_{NH})$ и $P(\Delta T_K < \delta T_{NH})$ - вероятности событий указанных в скобках; \bar{P}_Δ - некоторая заданная вероятность.

Было показано, что для основного металла консервативная оценка δT_{NH} может быть выполнена при исключении радиального направления из рассмотрения задачи, так как ОС вырезаются из худшего места по толщине обечайки (средняя треть). Учитывая то, что ОС могут быть вырезаны случайным образом из любой зоны пробного кольца поковки с точки зрения её расположения относительно координат Z и Θ и зона с дефектом (ЗД) – также имеет случайные координаты Z и Θ можно принять, что случайные величины $T_K^{3Д}$ и T_K^{OC} принадлежат к одной и той же генеральной совокупности, описываемой в основном металле нормальным распределением $T_K^{\Theta Z}$, которое характеризуется математическим ожиданием $M(T_K^{\Theta Z})$ и стандартным отклонением $\sigma(T_K^{\Theta Z})$. Тогда распределение ΔT_K для основного металла, характеризующее разность двух случайных величин T_K , принадлежащих одной и той же генеральной совокупности (см. (14)), описывается математическим ожиданием $M_{OM}^\Delta = 0$ и стандартным отклонением σ_{OM}^Δ равными:

$$\sigma_{OM}^\Delta = \sqrt{2} \sigma(T_K^{\Theta Z}). \quad (15)$$

Обозначение системы координат и схемы вырезки образцов из основного металла и металла сварного шва показаны на рис. 12.

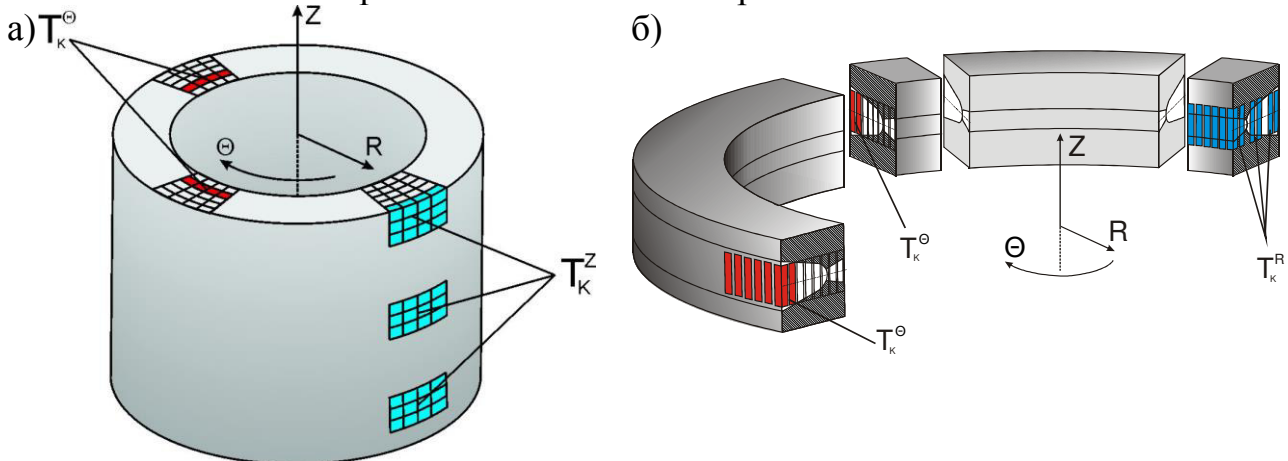


Рисунок 12 – Обозначение системы координат и схемы вырезки образцов из основного металла (а) и металла сварного шва (б).

Исходя из условия (14) величина δT_{NH} для обечайки может быть рассчитана по формуле

$$\delta T_{NH}^{OM} = z_{\bar{P}_\Delta} \cdot \sigma_{OM}^\Delta, \quad (16)$$

где $z_{\bar{P}_\Delta}$ - квантиль нормированного нормального распределения, соответствующая доверительной вероятности \bar{P}_Δ .

Таким образом, для оценки запасов на пространственную неоднородность материалов КР δT_{NH}^{OM} и $\delta T_{NH}^{МШ}$ необходимо и достаточно знать стандартные отклонения распределений T_K для обечайки КР и для сварного шва, а также значения доверительной вероятности \bar{P}_Δ . Информация о математических ожиданиях распределений T_K не требуется.

Рассмотрим процедуру определения \bar{P}_Δ . Прежде всего следует отметить, что запас δT_{NH} предназначен для введения его в расчетную зависимость $K_{JC}(T)$,

которая используется в детерминистическом расчете КР на СХР. Обычно принято назначать доверительную вероятность равной 0,95 для которой при одностороннем интервале, $z_{\bar{P}_\Delta} = 1,645$. Ясно, что достаточность такой величины не может быть оценена на основании детерминистического расчета КР на СХР. Поэтому основная цель определения величины \bar{P}_Δ заключается в одновременном рассмотрении детерминистического и вероятностного расчета КР на СХР.

Запас δT_{NH} однозначно зависит от \bar{P}_Δ : с увеличением \bar{P}_Δ величина δT_{NH} увеличивается. Следовательно, корректное назначение величины \bar{P}_Δ позволяет ввести адекватную величину запаса δT_{NH} .

Величина \bar{P}_Δ определяется из следующего условия: при выполнении детерминистического условия в виде $nK_I = K_C(T - \delta T_{NH})$ (17) вероятность разрушения КР, P_f^{KP} , не должна превышать принятую нормативную величину, равную 10^{-7} разрушений в год.

Для определения вероятности разрушения КР при изменении размера единичного дефекта a от 0 до $0,25t$ была получена формула

$$P_f^a = P^{AC} \int_{a=0}^{a=0,25t} f^{def} \cdot (1 - P^{detect}(S^{def})) \cdot P_{fa} da, \quad (18)$$

где P^{AC} – частота наступления режима аварийной ситуации, измеряемая числом событий в год; f^{def} – плотность распределения дефектов по размерам; P^{detect} – вероятность обнаружения дефекта площадью S^{def} неразрушающим ультразвуковым контролем; $(1 - P^{detect})$ – вероятность пропуска дефекта площадью S^{def} ; P_{fa} – вероятность разрушения КР с дефектом заданных размеров при наступлении режима АС; t – толщина стенки КР.

Функции f^{def} , P^{detect} и P_{fa} зависят от a .

При наличии в КР нескольких дефектов, применяется концепция наислабейшего звена, согласно которой нестабильное развитие хотя бы одного из дефектов приводит к разрушению КР в целом. Тогда $P_f^{KP} = 1 - (1 - P_f^a)^n$, (19) где P_f^{KP} – вероятность разрушения КР при наличии в нем n дефектов; P_f^a – вероятность разрушения КР в предположении, что в нем имеется только один дефект.

Учитывая то, что при одной и той же технологии изготовления обечаек КР (или выполнения сварных швов) варьируется математическое ожидание T_K , а стандартное отклонение T_K не изменяется, была разработана процедура для определения стандартных отклонений T_K для ОМ и МШ. На базе экспериментальных исследований металла 16 обечаек из стали 15X2НМФА-А и металла 12 производственных сварных соединений, изготовленных по штатной технологии для КР ВВЭР-1000, с учетом доверительных интервалов, были получены следующие значения стандартных отклонений распределений T_K для корпусов ВВЭР-1000: для основного металла $\sigma[T_K^{OZ}] = 10,41^\circ\text{C}$; для металла сварного шва $\sigma[T_K^{ROZ}] = 11,16^\circ\text{C}$.

На основании разработанной методологии были определены следующие запасы на пространственную неоднородность: для основного металла $\delta T_{NH}^{OM} = 24,2^\circ\text{C}$, для металла шва $\delta T_{NH}^{MШ} = 26,0^\circ\text{C}$.

Для инженерных оценок принята единая консервативная величина запаса δT_{NH} как для основного металла так и для металла шва $\delta T_{NH} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$.

Была получена следующая расчетная зависимость $\bar{K}_{JC}(T)$ для основного металла и металла шва при длине фронта трещины $\bar{V} = 150 \text{ мм}$ (для максимального постулированного дефекта) и вероятности разрушения $P_f = 0,05$

$$\bar{K}_{JC}(T) = k \cdot \left[K_{JC}^{shelf} - K_{min} + \Omega_{расч} \cdot a_1 \cdot \left(1 + \text{th} \left(\frac{T - \delta T_{type} - a_2}{a_3} \right) \right) \right] + K_{min}, \text{ МПа} \sqrt{\text{м}} \quad (20)$$

где k – коэффициент учитывающий пересчет с вероятности разрушения $P_f = 0,5$ на $P_f = 0,05$ и с длины фронта трещины 25 мм на номинальную длину 150 мм, $k = 0,33$; $K_{JC}^{shelf} = 30 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$; $K_{min} = 20 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$; T – температура, $^\circ\text{C}$; если $T < 130 \text{ }^\circ\text{C}$, $a_1 = 1$, $a_2 = 130 \text{ }^\circ\text{C}$, $a_3 = 105 \text{ }^\circ\text{C}$; если $T \geq 130 \text{ }^\circ\text{C}$, $a_1 = 1,99$, $a_2 = 216 \text{ }^\circ\text{C}$, $a_3 = 157 \text{ }^\circ\text{C}$; $\Omega_{расч}$ – параметр материала, характеризующий расчетную температурную зависимость трещиностойкости материала в текущем состоянии, $\text{МПа} \sqrt{\text{м}}$; δT_{type} – запас учитывающий тип образцов: при использовании стандартных образцов SEB-10 $\delta T_{type} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, при использовании образцов SEB-10 с глубокими (50%) канавками или образцов СТ $\delta T_{type} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Параметр $\Omega_{расч}$ с учетом запасов на количество образцов и запаса на пространственную неоднородность, учитывая взаимную независимость неопределенностей $\bar{\delta \Omega}_{sp}$ и $\bar{\delta \Omega}_{NH}$, рассчитывается по формуле

$$\Omega_{расч} = \Omega \cdot \left(1 - \sqrt{(\bar{\Omega}_{sp})^2 + (\bar{\Omega}_{NH})^2} \right). \quad (21)$$

В формуле (21) коэффициент запаса на ограниченное количество образцов, $\bar{\Omega}_{sp}$, определяется по формуле $\bar{\Omega}_{sp} \equiv \Omega_{sp} / \Omega = 0,45 / \sqrt{N}$, (22)

где Ω_{sp} значение параметра Ω с учетом запаса на количество образцов N , испытанных для определения Ω .

Коэффициент запаса на пространственную неоднородность рассчитывается по формуле

$$\bar{\Omega}_{NH} \equiv \Omega_{NH} / \Omega = 1 - 1 + \text{th} \left(\frac{T_{100} + \delta T_{NH} - a_2}{a_3} \right) / \left(1 + \text{th} \left(\frac{T_{100} - a_2}{a_3} \right) \right), \quad (23)$$

где Ω_{NH} значение параметра Ω с учетом запаса на пространственную неоднородность материала, $T_{100} = a_3 \cdot \text{arcth} \left(\frac{100 - K_{JC}^{shelf}}{\Omega} - 1 \right) + a_2, \text{ }^\circ\text{C}$. (24)

В главе 6 решается задача разработки методики выбора размера контура интегрирования J -интеграла для обеспечения адекватного расчета КР на СХР при аварийном расхолаживании.

При расчете КР на СХР при аварийном расхолаживании необходимо рассчитать K_J (значение КИН полученное на основе J -интеграла) как при нагружении так и при разгрузке до уровня 0,9 от максимального значения зависимости $K_J(T)$. В этом случае применение J -интеграла может быть затруднено: при нагружении, отличном от простого, J -интеграл зависит от контура интегрирования. В частности при разгрузке, уменьшение размера контура интегрирования приводит к увеличению темпа падения J .

Как видно из рисунка 13 расчетный срок эксплуатации КР зависит от размера контура интегрирования, использованного при расчете J-интеграла.

Размер контура интегрирования J-интеграла, обеспечивающий корректный расчет КР на СХР, может быть выбран из следующих положений.

1. При нагрузке J-интеграл однозначно контролирует НДС вблизи вершины трещины при любых размерах контура интегрирования S . При разгрузке изменение НДС в зоне, ограниченной контуром S , однозначно контролируется двумя параметрами: величиной ΔJ , соответствующей разности максимального и текущего значений J , и R_C – размером контура интегрирования S . При увеличении размера контура S величина разгрузки, обеспечивающей одно и тоже значение ΔJ , будет расти. Следовательно при нагрузке и при разгрузке НДС в зоне ограниченной

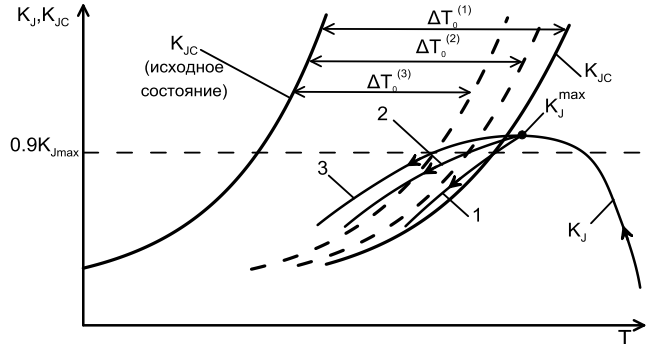


Рисунок 13 – Схема расчета ресурса КР для различных размеров контуров интегрирования R_C : для контура 1 расчетный ресурс максимален и соответствует величине $\Delta T_0^{(1)}$, для контура 3 расчетный ресурс минимален и соответствует величине $\Delta T_0^{(3)}$.

контуром S однозначно контролируется зависимостью $J(t, R_C)$, где t – некоторый параметр характеризующий историю нагружения.

2. При заданной температуре вероятность хрупкого разрушения контролируется НДС внутри рабочего объема вблизи вершины трещины. Вне его вероятность инициации хрупкого разрушения близка к нулю.

3. Для расчета КР на СХР контур S может быть принят как минимальный контур охватывающий рабочий объем. Рабочий объем у вершины трещины может быть определен из условия

$$P_f^{WV} / P_f^{SP} \geq \eta, \quad (25)$$

где P_f^{WV} и P_f^{SP} – вероятность хрупкого разрушения при рассмотрении процессов зарождения и развития микротрещин соответственно только в рабочем объеме образца и во всем образце; $\eta = 0,99$. Расчет вероятности разрушения выполнен с помощью модели «Прометей».

Для различных сочетаний T_0 и T были рассчитаны зависимости P_f^{WV} от K_J при варьировании размера контура интегрирования R_C . Были определены пары: минимальное значение K_J и размер контура интегрирования R_C , для которых выполняется условие (25) при $\eta = 0,99$ (см рис. 14). На базе выполненных расчетов получена зависимость для определения минимального размера контура интегрирования J-интеграла для расчета КР на СХР.

$$[R_C^*] = \begin{cases} 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot (K_J)^{1,51} + 0,05 & \text{при } K_J \geq 40 \text{ МПа } \sqrt{\text{м}} \\ 0,15 & \text{при } K_J < 40 \text{ МПа } \sqrt{\text{м}} \end{cases}. \quad (26)$$

Для обеспечения инвариантности J-интеграла к размеру контура и сходимости J-интеграла при решении геометрически нелинейной задачи $[R_C]$ должен превышать 2δ , где $\delta = J / (m \cdot \sigma_{\text{flow}})$, $\sigma_{\text{flow}} = (\sigma_Y + \sigma_{ul}) / 2$; σ_{ul} – предел прочности;

коэффициент m зависящий от вида напряженного состояния и варьируется от 1 до 2,5. Для консервативной оценки принимается $m=1$.

Как видно на рис. 15, кривая 1, рассчитанная по формуле (26), лежит выше кривой 2, рассчитанной из условия $[R_C] = 2\delta$. Таким образом, можно заключить, что расчетная кривая 1 является консервативной по отношению к кривой 2.

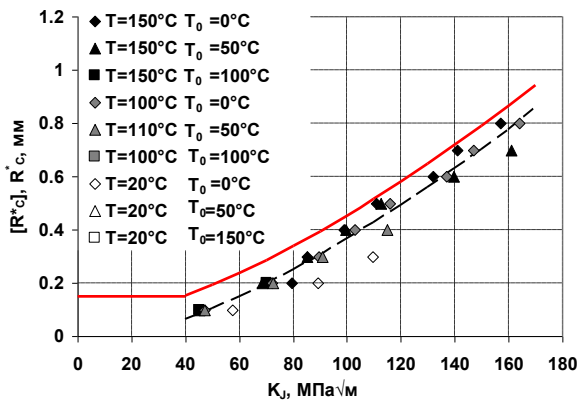


Рисунок 14 – Расчетные зависимости R_C^* от K_I , — — — аппроксимация расчетных точек R_C и K_I ; — — — расчетная кривая (26).

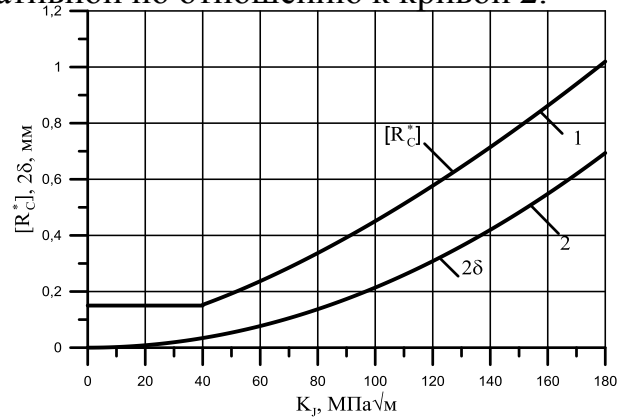


Рисунок 15– Расчетные зависимости $[R_C^*]$ и 2δ от K_I : 1 – расчетная кривая $[R_C^*]$ (26); 2 – кривая, полученная из условий $[R_C^*] = 2\delta$.

Выводы по диссертации

1. Выполнена модернизация вероятностной модели хрупкого разрушения «Прометей». В рамках этой модернизации предложены: более точная формулировка условия зарождения микротрещин скола и новое уравнение, позволяющее рассчитывать вероятность хрупкого разрушения при произвольной (сложной) истории нагружения материала. Проведена верификация модернизированной модели, названной «Прометей-М». Показано, что эта модель позволяет описать хрупкое разрушение образцов различного типа и геометрии, при различных температурах испытания для материалов с различной степенью охрупчивания. Таким образом, модель «Прометей-М» позволяет использовать результаты испытаний любого типа образца, включая малоразмерные образцы-свидетели для прогнозирования трещиностойкости материала для таких объектов, как корпуса реакторов (КР) с постулируемым дефектом.

2. Проведен анализ инженерного метода прогнозирования температурной зависимости трещиностойкости $K_{Jc}(T)$, названного метод «Единой кривой» (Unified Curve, сокращенно UC). Показано, что этот метод дает чрезмерно консервативные прогнозы $K_{Jc}(T)$ для материалов с высокой степенью охрупчивания при температурах, превышающих 150°C . Метод «Единой кривой» модернизирован на базе модели «Прометей-М» Этот метод, названный «Модернизированной Единой кривой» (Advanced Unified Curve, сокращенно AUC), позволяет получать адекватный прогноз $K_{Jc}(T)$ для материала с любой степенью охрупчивания в диапазоне температур испытаний от -200 до $+350^{\circ}\text{C}$. Метод «Модернизированной Единой кривой» верифицирован для материалов с различной степенью охрупчивания (значения референсной температуры T_0 варьировались от -150°C до 250°C).

3. Проведено сравнение AUC с используемыми в настоящее время методами: со стандартизированным в США методом «Мастер кривой» («Master Curve», сокращенно MC, standard ASTM E 1921) и методом UC. Показано, что для материала в исходном состоянии и при низкой степени охрупчивания ($T_0 < -50^{\circ}\text{C}$) методы AUC, UC и MC описывают экспериментальные данные практически одинаково, т.е. предпочтение в использовании какого-либо метода для этого случая отсутствует. При средней степени охрупчивания материала ($-50^{\circ}\text{C} < T_0 < 150^{\circ}\text{C}$) методы AUC и UC описывают экспериментальные данные практически одинаково, но лучше чем MC. При высокой степени охрупчивания материала ($T_0 > 150^{\circ}\text{C}$) метод AUC имеет преимущество, как перед MC, так и перед UC. Поэтому для прогнозирования $K_{Jc}(T)$ при любой степени охрупчивания материала рекомендуется использовать метод AUC.

4. Проведен анализ достоверности результатов испытаний образцов-свидетелей (ОС) типа Шарпи с трещиной (SEB-10). Показано, что величина трещиностойкости, получаемая на этих образцах, завышена по сравнению с представительными образцами типа СТ (компактные образцы на внецентренное растяжение). Поэтому расчет КР на сопротивление хрупкому разрушению (СХР) на базе испытаний ОС типа SEB-10 является неконсервативным.

Для получения адекватной оценки трещиностойкости на базе испытаний ОС предложены три подхода, связанные с обработкой результатов испытаний и модернизацией ОС типа SEB-10 (см. 5, 6 и 7 вывод).

5. Предложена процедура расчета температурной зависимости трещиностойкости, позволяющая дать адекватный прогноз трещиностойкости материала на базе результатов испытаний образцов типа SEB-10. Эта процедура сводится к введению коэффициента запаса на тип образца.

6. Предложена модернизация ОС типа SEB-10: создание на этих образцах глубоких боковых канавок суммарной глубиной 50% от толщины образца. Эта модернизация обеспечивает увеличение стеснения деформирования у вершины трещины. Разработана инженерная процедура расчета трещиностойкости на базе результатов испытаний образцов SEB-10 с глубокими канавками. Проведена широкая верификация применения таких образцов.

7. Предложена технология реконструкции образцов СТ из обломков образцов типа SEB-10, испытанных на вязкость разрушения, или обломков образцов Шарпи, испытанных на ударную вязкость. На базе комплекса расчетов МКЭ определена последовательность выполнения сварных швов, при которой обеспечивается минимальный уровень остаточных сварочных напряжений в зоне материала у вершины трещины. Определены допустимые значения предела текучести обоймы в зависимости от предела текучести вставки, при которых НДС реконструированных образцов близко к НДС стандартных образцов. Сформулированы требования к технологии изготовления реконструированных образцов типа СТ, при которых практически обеспечивается идентичность значений трещиностойкости, полученных на реконструированных и стандартных образцах типа СТ. Получен патент на изобретение на технологию реконструкции образца.

8. На основе проведения экспериментальных исследований металла контрольных сварных соединений и отрезных колец обечаек КР ВВЭР-1000 показано, что сопротивление хрупкому разрушению в терминах критической температуры хрупкости (T_K) имеет разброс, как по объему основного металла (ОМ) и так и по объему металла шва (МШ), т.е. T_K для конкретного места КР является случайной величиной. Показано, что при одной и той же технологии изготовления обечаек КР варьируется математическое ожидание T_K , а стандартное отклонение не изменяется. Данный вывод так же справедлив для металла швов, выполненных по одной и той же технологии. Определены значения стандартного отклонения для ОМ и МШ корпусов ВВЭР-1000.

9. Введен запас δT_{NH} на пространственную неоднородность ОМ и МШ. Этот запас определен как разность между значением T_K , полученным на базе испытаний ОС, и значением T_K в зоне постулированного дефекта. Предложена методика определения запаса на пространственную неоднородность. Методика базируется на положении, что запас δT_{NH} должен быть равен величине, при которой вероятность разрушения КР будет меньше, чем нормативная величина при условии остужения детерминистического критерия хрупкого разрушения ($K_I=K_{JC}$) при расчете КР на СХР. Для расчета величины данного запаса требуется информация только о стандартном отклонении T_K и не требуется знание математического ожидания T_K . Это дает возможность использовать одну и ту же величину запаса, как для различных обечаек одного и того же КР, так и для различных КР, независимо от паспортных значений T_K , если эти корпуса реакторов изготовлены по

одной и той же технологии. Аналогичный вывод также справедлив для сварных швов КР.

10. Сформулированы принципы получения зависимости $K_{Jc}(T)$ для расчета КР на СХР на основании результатов испытаний ОС. Разработана необходимая для этого система запасов, учитывающих стохастическую природу хрупкого разрушения, неоднородность свойств материалов КР, ограниченное количество испытываемых ОС и различие в трещиностойкости полномасштабных образцов и маломасштабных ОС. Определены численные значения этих запасов. Получены основные уравнения для получения зависимости $K_{Jc}(T)$ для расчета КР на СХР на основании результатов испытаний ОС.

11. Показано, что при использовании J-интеграла для оценки сопротивления хрупкому разрушению КР ВВЭР при его аварийном расхолаживании, расчетный ресурс КР зависит от выбора размера контура интегрирования, так как при указанном режиме расчет на СХР включает в себя не только стадию нагружения материала у вершины трещины, но и некоторую стадию разгрузки. Сформулирован подход к выбору размера контура интегрирования, при котором обеспечивается адекватная оценка сопротивления хрупкому разрушению КР. Суть подхода заключается в следующем. Контур интегрирования при расчете на СХР должен огибать только зону у вершины трещины, называемую рабочим объемом, которая вносит доминантный (99%) вклад в вероятность хрупкого разрушения элемента конструкции. Получена зависимость минимального размера контура интегрирования $[R_c^*]$ от K_J .

Основные результаты диссертации отражены в 19-ти статьях в рецензируемых журналах, из них 11-ть статей опубликовано в журналах из перечня ВАК, защищены 1-м патентом РФ.

1. В.А. Николаев, Б.З. Марголин, **В.Н. Фоменко**, Л.Н. Рядков. Применение малоразмерных образцов с глубокими боковыми канавками для прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения. Часть 1. Экспериментально-расчетные исследования. **Вопросы материаловедения**, 2008, №.3 (55), стр.41-59.
2. Б.З. Марголин, **В.Н. Фоменко**. Применение малоразмерных образцов с глубокими боковыми канавками для прогнозирования температурной зависимости вязкости разрушения. Часть 2. Анализ напряженно-деформированного состояния и применимости критериев разрушения, **Вопросы материаловедения**, 2008, №.3 (55), стр.60-71,
3. Б.З.Марголин, **В.Н.Фоменко**, А.Г.Гуленко, и др. Прогнозирование расчетной температурной зависимости вязкости разрушения материалов корпусов реакторов на основе результатов испытаний образцов-свидетелей, **Вопросы материаловедения**, 2008, №.3 (55), стр.111-124.
4. Б.З. Марголин, **В.Н. Фоменко**, А.Г. Гуленко, и др. Построение расчетной температурной зависимости вязкости разрушения корпусных реакторных материалов: общие принципы и результаты, **Тяжелое машиностроение**, 2008, декабрь №12.
5. Б.З. Марголин, **В.Н. Фоменко**, А.А. Вакуленко, В.А. Пиминов, А.А. Чернобаева. Определение запасов на пространственную неоднород-

ность свойств материала при расчете сопротивления хрупкому разрушению корпусов реакторов ВВЭР-1000. Сообщение 1 – Теоретический анализ, **Вопросы материаловедения**, 2016, №1 (85), стр.134-150.

6. Б.З. Марголин, **В.Н. Фоменко**, А.И. Минкин, А.А. Вакуленко, А.А. Чернобаева. Определение запасов на пространственную неоднородность свойств материала при расчете сопротивления хрупкому разрушению корпусов реакторов ВВЭР-1000. Сообщение 2. Экспериментальные исследования, **Вопросы материаловедения**, 2016, №1 (85), стр.151-161.
7. Б. З. Марголин, В. И. Костылев, **В. Н. Фоменко**, И. Ф. Акбашев, В. В. Матковский. Выбор размера контура интегрирования J-интеграла для расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов типа ВВЭР при аварийном расхолаживании, **Вопросы материаловедения**, 2016, №1 (85), стр.162-179.
8. Б. З. Марголин, В. И. Костылев, **В. Н. Фоменко**, Д. А. Журко, С. А. Бубякин, А. П. Бандура. Разработка методики реконструкции образцов типа СТ из металла испытанных образцов-свидетелей корпусов реакторов ВВЭР-1000. Часть 1. Расчетное обоснование, **Вопросы материаловедения**, 2015, №4 (84), стр.187-205.
9. Д. А. Журко, С. А. Бубякин, А. П. Бандура, Б. З. Марголин, В. И. Костылев, **В. Н. Фоменко**. Разработка методики реконструкции образцов типа СТ из металла испытанных образцов-свидетелей корпусов реакторов ВВЭР-1000. Часть 2. Экспериментальные исследования, **Вопросы материаловедения**, 2015, №4 (8), стр.206-210.
10. Б.З. Марголин, **В.Н.Фоменко**, А.Г. Гуленко, В.И. Костылев, В.А. Швецова. Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 1. Развитие модели Прометей. **Вопросы материаловедения**, 2016, № 4(88), с. 120-150.
11. Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко, **В.Н.Фоменко**, В.И. Костылев. Дальнейшее развитие модели Прометей и метода Unified Curve. Часть 2. Развитие метода Unified Curve. **Вопросы материаловедения**, 2016, № 4(88), с. 151-178.
12. B. Z. Margolin, **V. N. Fomenko**, A study of suitability of various criteria for fracture toughness prediction on small-sized specimens, *Strength of Materials*, 41 (4), 2009, pp 345–355.
13. B.Z. Margolin, V.A. Shvetsova, A.G. Gulenko, **V.N. Fomenko**. Prediction of fracture toughness for WWER RPV integrity assessment on the basis of the Unified Curve approach and surveillance specimens testing., *Proceedings of PVP2009 2009 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic, PVP2009-77082.
14. B.Z. Margolin, V.A Nikolaev, **V.N, Fomenko**, L.N. Ryadkov. Modification of pre-cracked Charpy specimens for surveillance specimen programs *Proceedings of PVP2009 2009 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, July 26-30, 2009, Prague, Czech Republic, PVP2009-77096.
15. B. Margolin, B. Gurovich , V. Shvetsova, **V. Fomenko**, A. Gulenko, D. Zhurko, M. Korshunov, E. Kuleshova. Fracture toughness prediction for highly irradiated RPV materials: From test results to RPV integrity assessment, *Journal of Nuclear Materials*, 2013, №432, pp 313–322.

16. V. A. Nikolaev, B. Z. Margolin, L. N. Ryadkov, **V. N. Fomenko**. Analysis of applicability of small-sized specimens to prediction of temperature dependence of fracture toughness, *Strength of Materials*, 41 (2), 2009, pp 119–134.
17. B.Z. Margolin, B. A. Gurovich, **V.N. Fomenko**, A. A. Vakulenko, et al. Methodology of Including Spatial Nonuniformity of Material Properties in the Brittle Fracture Resistance Calculation for WWER-1000 Reactor Pressure Vessels. Part 1. Theoretical Analysis, *Strength of Materials*, May 2015, 47, (3), pp 385-399.
18. B. Z. Margolin, **V. N. Fomenko**, A. I. Minkin, A. A. Vakulenko, A. A. Chernobaeva, Methodology of Including Spatial Nonuniformity of Material Properties in the Brittle Fracture Resistance Calculation for WWER-1000 Reactor Pressure Vessels. Part 2. Experimental Investigations, *Strength of Materials*, July 2015, 47, (4), pp 515-523.
19. B.Z. Margolin, **V.N. Fomenko**, A.G. Gulenko, V.I. Kostylev, V.A. Shvetsova. Further improvement of the Prometey model and Unified Curve method part 1. Improvement of the Prometey model, *Engineering Fracture Mechanics*, 2017.
20. Патент РФ на изобретение №2582626. Способ изготовления сварного составного образца типа СТ для испытаний на трещиностойкость облученного металла. Бюл. №12. 2016.

Подписано в печать 28.06.2017. Формат 60x48 1/16.

Печать офсетная. Усл. п. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1.05.

Тираж 90 экз. Заказ №2/109.

Отпечатано в типографии НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», 191015, Санкт-Петербург, улица Шпалерная, дом 49.

Лицензия на полиграфическую деятельность

Лр №020644 от 13 октября 1997.

