

На правах рукописи



КУЗНЕЦОВ Сергей Павлович

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА
ПРИМЕНИМОСТИ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНОЙ КАТЕГОРИЕЙ
ПРОЧНОСТИ В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛА КОРПУСА
РЕАКТОРА ВВЭР-СКД**

Специальность 2.4.9. - Ядерные энергетические установки, топливный
цикл, радиационная безопасность

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»)

Научный руководитель: *Кулешова Евгения Анатольевна*
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Отделения реакторных материалов и технологий,
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

**Официальные
оппоненты:** *Колпишон Эдуард Юльевич*
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Института металлургии и машиностроения
ГНЦ РФ АО «НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва;

Филиппов Георгий Анатольевич
доктор технических наук, профессор,
директор Научного центра качественных сталей,
ГНЦ ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина»,
г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», г. Москва.

Защита диссертации состоится 12 ноября 2024 г., начало в 15.30, на заседании диссертационного совета 02.1.003.04 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте www.nrcki.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Д.А. Шкаровский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Спрос энергопотребления и соответственно его рост в мире приводит к стремительному развитию энергетики, в том числе и атомной. Атомную энергетику и ее развитие целесообразно рассматривать на длительную перспективу, которая предусматривает разработку и внедрение инновационных технологий, применяемых в реакторных установках (РУ), включая модернизацию корпусных реакторов типа ВВЭР для дальнейшего повышения эффективности, экономичности и безопасности.

Следующий шаг в развитии ВВЭР на долгосрочную перспективу – переход к РУ со сверхкритическим давлением теплоносителя (СКД). Обращение к ВВЭР-СКД обусловлено необходимостью существенного повышения конкурентоспособности реакторов нового поколения. Возможные преимущества такого реактора позволяют считать его перспективным и заслуживающим большого внимания. Реакторы с СКД имеют много общих черт как с существующими водоохлаждаемыми, так и с энергетическими установками на органическом топливе. Однако по-прежнему остаются не решенные проблемы, для урегулирования которых необходимы дальнейшие научные исследования и проектные проработки по направлению выбора материалов при высоких давлении и температуры теплоносителя. Одним из ответственным компонентом РУ ВВЭР является корпус реактора (КР), который эксплуатируется в условиях воды и пара с высоким давлением, подвергается воздействию высоких температур, при этом наибольшую опасность в результате длительного воздействия нейтронного облучения представляет охрупчивание стали КР. Эксплуатируемые в настоящее время стали КР ориентированы, на обеспечение эксплуатации КР ВВЭР при температуре теплоносителя до 330°C и рабочем давлении ~17 МПа. При выборе материала КР ВВЭР-СКД для реализации заданной электрической мощности и сохранения соответствующих габаритных размеров КР, необходимо учитывать дополнительные (по отношению к существующим сталям) требования к материалу КР, эксплуатируемого при повышенных температуре (~400°C) и давлении теплоносителя (≥ 25 МПа). При этом требуется повышенные характеристики кратковременной и длительной прочности, бóльшая термическая и радиационная стойкость стали КР, а также технологическая возможность изготовления удлиненной обечайки активной зоны (АЗ) с толщиной стенки, обеспечивающей проектный ресурс ВВЭР-СКД. Последнее требование обусловлено выводом металла сварного шва как элемента КР, демонстрирующего повышенный темп радиационного охрупчивания, за пределы активной зоны, что потребует, в свою очередь, больших масса-габаритных параметров заготовки под обечайку АЗ КР. Следует отметить, что в настоящее время на современной

технологической базе осуществляется изготовление удлиненной обечайки АЗ КР из эксплуатируемых сталей с толщиной стенки не более ~200 мм.

Для реактора ВВЭР-СКД в АО «НПО «ЦНИИТМАШ» была разработана высокопрочная сталь 10ХН5МФБА-А с повышенной категорией прочности (КП=65+) за счет повышения концентрации никеля и оптимизации содержания других легирующих элементов. Проведенные ранее в НИЦ «Курчатовский институт» исследования и испытания показали высокую радиационную стойкость данной стали, наряду с высокой стойкостью против зернограничного термического охрупчивания, что позволяет рассматривать ее в качестве одного из кандидатных материалов для КР ВВЭР-СКД. В связи с этим становится необходимым проведение комплексного анализа существующих сталей и разработанной стали 10ХН5МФБА-А, включающего оценку их эксплуатационных характеристик, а также возможность использования имеющихся технологий изготовления обечайки и остаться в габаритных размерах КР без значительного утолщения стенки. Это сможет обеспечить транспортировку реактора, а также изготавливать удлиненную обечайку АЗ и вынести сварной шов за пределы зоны интенсивного облучения. Такой подход позволит увеличить запас прочности реактора с позиции сопротивления хрупкому разрушению и, соответственно, увеличить срок службы КР и РУ в целом.

Поэтому проведение сравнительного анализа и выбор кандидатных сталей (из традиционных и разрабатываемой) в качестве материала КР ВВЭР-СКД, а также выполнение сравнительных расчетно-экспериментальных оценок их применимости в условиях эксплуатации РУ типа ВВЭР-СКД является актуальным и необходимым для реализации проекта ВВЭР-СКД.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы явились сравнительные расчетно-экспериментальные оценки применимости традиционных и разрабатываемой сталей КР ВВЭР с различной категорией прочности в эксплуатационных условиях РУ ВВЭР-СКД на основе анализа их радиационной и термической стойкости.

Для достижения цели были выполнены следующие задачи:

- Сравнительный анализ и выбор кандидатных материалов на основе литературных данных эксплуатационных особенностей реакторов типа ВВЭР поколений I-IV, а также степени деградации структуры и свойств, традиционных и разрабатываемой сталей КР в условиях воздействия эксплуатационных факторов реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя (ВВЭР-СКД);

- Сравнительная оценка влияния параметров структуры кандидатных материалов на их служебные характеристики, включая параметры длительной прочности, в условиях эксплуатации КР ВВЭР-СКД;
- Выбор расчетных методик для предварительной оценки применимости сталей КР в условиях эксплуатации КР ВВЭР-СКД;
- Сравнительная расчетно-экспериментальная оценка кратковременной и длительной прочности кандидатных материалов для определения необходимой толщины стенки удлиненной обечайки активной зоны КР ВВЭР-СКД, изготовленной из данных материалов;
- Сравнительная расчетно-экспериментальная оценка сопротивления хрупкому разрушению КР ВВЭР-СКД, изготовленного из кандидатных материалов;
- Анализ применимости кандидатных сталей с различной категорией прочности в качестве материала КР с учетом эксплуатационных условий ВВЭР-СКД (повышенных температуры и давления) на основе расчетно-экспериментальных оценок прочности и сопротивления хрупкому разрушению КР.

Научная новизна и практическая значимость работы

- Впервые выполнены расчетно-экспериментальные предварительные оценки прочности и сопротивления хрупкому разрушению КР из кандидатных материалов для возможности их применимости в качестве материала КР ВВЭР-СКД.
- Впервые на основе расчетно-экспериментальной оценки кратковременных и длительных прочностных характеристик кандидатных материалов показано, что при изготовлении удлиненной обечайки активной зоны КР ВВЭР-СКД из традиционных сталей для реализации заданной электрической мощности и сохранения соответствующих габаритных размеров КР потребуется изготовление обечайки с толщиной стенки ≥ 350 мм, что в настоящее время на современной отечественной технологической базе не реализовано.
- Впервые на основе расчетно-экспериментальной оценки кратковременных и длительных прочностных характеристик стали 10ХН5МФБА-А показано, что в рассматриваемых условиях КР ВВЭР-СКД для удлиненной обечайки активной зоны КР применение данной стали позволит реализовать:
 - изготовление удлиненной обечайки АЗ КР с толщиной стенки (~200 мм), освоенной в современном промышленном производстве;
 - при освоенной толщине стенки удлиненной обечайки АЗ КР в ~200 мм эксплуатировать КР при температуре вплоть до ~400°C;
 - при освоенной толщине стенки удлиненной обечайки АЗ КР в ~200 мм

эксплуатировать КР вплоть до ~60 лет.

- Впервые на основе сравнительной расчетно-экспериментальной консервативной оценки сопротивления хрупкому разрушению КР с использованием фактических экспериментальных данных механических характеристик сталей показано, что кандидатные стали (15Х2МФА-А мод.А, 15Х2НМФА класс 1 и 10ХН5МФБА-А) обладают достаточной стойкостью к хрупкому разрушению в условиях ВВЭР-СКД, при этом сталь 10ХН5МФБА-А демонстрирует наилучшие свойства.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что проведенный комплексный анализ механизмов радиационного охрупчивания кандидатных сталей КР, а также предварительные расчетно-экспериментальные оценки прочности и сопротивлению хрупкому разрушению КР в условиях повышенных температуры и давления теплоносителя ВВЭР-СКД показали принципиальную возможность создания удлиненной обечайки активной зоны КР ВВЭР-СКД в случае использования стали 10ХН5МФБА-А.

Степень обоснованности и достоверности полученных научных результатов

Достоверность полученных научных результатов основана на комплексном подходе и анализе результатов влияния эксплуатационных факторов реакторов ВВЭР I-IV поколений на степень деградации структуры и свойств кандидатных материалов КР, а также применением фактических экспериментальных данных механических характеристик рассматриваемых сталей для расчетно-экспериментальных оценок прочности и сопротивления хрупкому разрушению кандидатных материалов КР в эксплуатационных условиях ВВЭР-СКД.

Сформулированные в диссертации положения и выводы подтверждены многочисленными результатами исследований и механических испытаний кандидатных сталей КР.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

- Сравнительный анализ и выбор кандидатных материалов КР ВВЭР-СКД на основе служебных характеристик и структурных особенностей традиционных сталей КР (15Х2МФА-А мод.А, 15Х2НМФА класс 1) и стали 10ХН5МФБА-А, на основе особенностей их химических составов и действующих механизмов радиационной повреждаемости в эксплуатационных условиях ВВЭР-СКД.
- Предварительная расчетно-экспериментальная оценка прочностных характеристик кандидатных сталей, показавшая принципиальную возможность изготовления удлиненной обечайки активной зоны КР из стали 10ХН5МФБА-А с толщиной стенки, освоенной в современном промышленном производстве (~200 мм), и отсутствие такой возможности для традиционных сталей КР при

заданных температурно-временных параметрах эксплуатации ВВЭР-СКД.

- Перспективность изготовления удлиненной обечайки АЗ КР из стали 10ХН5МФБА-А в условиях ВВЭР-СКД как обладающей наибольшим из кандидатных материалов сопротивлением хрупкому разрушению КР, изготовленного из этой стали.

Личный вклад автора

- Автор лично выполнил поиск в открытых публикациях, анализ и обобщение информации по особенностям конструкции и эксплуатационным параметрам корпусов как существующих, так и перспективных инновационных реакторов ВВЭР, а также по особенностям деградации структуры и свойств, в процессе эксплуатации, применяемых в настоящее время материалов реакторов ВВЭР;

- Автор лично провел сравнительную расчетно-экспериментальную оценку прочностных характеристик для определения технологической возможности промышленного изготовления удлиненных обечаек АЗ КР, так и сравнительную расчетно-экспериментальную оценку сопротивления хрупкому разрушению КР из существующих и разрабатываемой кандидатных материалов;

- Автор принимал личное участие в фрактографических исследованиях и творческое участие при выборе объектов исследования, изготовлении образцов для структурных исследований, в совместном анализе результатов исследований методами оптической микроскопии;

- Автор лично провел комплексный анализ существующих и перспективных кандидатных материалов КР и, на основе сравнительных расчетно-экспериментальных консервативных оценок, показал принципиальную возможность использования разрабатываемой стали 10ХН5МФБА-А в качестве материала КР ВВЭР-СКД.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов и списка литературы из 139 наименований, содержит 116 страниц, 14 таблиц и 15 рисунков.

Апробация работы

Содержание работы отражено в 2 публикациях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также в материалах и тезисах 5 конференций.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и решаемые задачи, научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Перспективные реакторы и материалы корпусов реакторов типа ВВЭР. Литературный обзор» рассмотрена эволюционная цепочка развития РУ типа ВВЭР поколений I-IV. Выявлены конструктивные особенности реакторов каждого из поколений в зависимости от параметров эксплуатации и уровня технологического развития отечественной промышленности. Так, совершенствование ВВЭР шло по пути увеличения диаметра КР, повышения категории прочности, применяемого материала КР, улучшение термической и радиационной стойкости материала КР, а также вывод металла сварного шва за пределы активной зоны. Последнее конструктивное решение приводит к повышению запаса прочности КР по критерию сопротивления хрупкому разрушению, поскольку, в отличие от основного металла КР, металл сварного шва больше подвержен радиационному повреждению, что связано как с особенностями макроструктуры, так и с бóльшим содержанием вредных примесей. Поэтому при производстве первой промышленной удлиненной обечайки активной зоны КР для проекта ВВЭР-ТОИ был получен слиток массой (415-420) т, который на данный момент является максимально достигнутым по массе в отечественной промышленности, и применение которого позволило уменьшить количество сварных швов в конструкции КР.

Для IV поколения ВВЭР (ВВЭР-СКД) показаны преимущества и отмечены отличительные от действующих ВВЭР особенности, заключающиеся в условиях эксплуатации КР ВВЭР-СКД со сверхкритическими параметрами теплоносителя, а именно: $T \geq 400^\circ\text{C}$, давление ≥ 25 МПа.

Показаны традиционно применяемые материалы КР как в одних из первых проектах, так и в современных проектах ВВЭР, в том числе вновь разработанная АО «НПО «ЦНИИТМАШ» высокопрочная сталь (КП65+) для перспективной РУ со сверхкритическими параметрами теплоносителя.

Известно, что охрупчивание сталей КР зависит от их химического состава и усиливается такими химическими элементами, как фосфор, медь, никель и марганец. Сделан акцент на том, что срок службы КР ВВЭР-СКД ограничивается его склонностью к хрупкому разрушению, а также необходимостью учитывать повышенную до 400°C температуру эксплуатации ВВЭР-СКД, вызывающую ползучесть материала (низкоуглеродистых сталей). В связи с этим становится необходимым определение характеристик длительной прочности материала КР и их дальнейшего учета. Кроме того, в литературе не рассматривалась необходимость учета толщины стенки (в эксплуатационных условиях ВВЭР-СКД) при промышленном изготовлении удлиненной обечайки КР. Эти вопросы были рассмотрены в представленной диссертационной работе.

Во второй главе «Методы исследований и механических испытаний материалов. Расчетные методики для оценки применимости сталей корпусов реакторов в условиях эксплуатации перспективных ВВЭР» показано, что результаты структурных особенностей и механических свойств кандидатных материалов КР в исходном и облученном состояниях, использованные в данной работе при сравнении их применимости в условиях ВВЭР-СКД, получены с применением следующих методик:

- Просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) для анализа радиационных повреждений материалов, поскольку позволяет получать информацию о микроструктуре и химическом составе;
- Растровой электронной микроскопии (РЭМ) для фазового анализа материалов;
- Фрактографического исследования (в том числе, с участием автора при исследовании стали 10ХН5МФБА-А) методами РЭМ для выявления механизма разрушения образцов;
- Дифракции обратно-рассеянных электронов для анализа макро- и микроструктуры, текстуры, построения ориентационных карт зерен, а также распределения ориентаций границ зерен и фазовых выделений, оказывающих существенное влияние на механизмы деградации структуры и свойств реакторных материалов под действием эксплуатационных факторов;
- Оже-электронной спектроскопии для определения концентрации и распределения химических и примесных элементов по поверхности, в том числе по границам зерен;
- Атомно-зондовой томографии (АЗТ) для количественного определения химических элементов в составе фаз;
- Испытания образцов в различных состояниях для получения прочностных и пластических характеристик, а также испытания на вязкость разрушения и ударный изгиб.

Результаты исследований и механических испытаний традиционных сталей приведены из предыдущих опубликованных работ, проведенных в НИЦ «Курчатовский институт», а результаты для стали 10Х5НМФБА-А, разработанной АО «НПО «ЦНИИТИМАШ», приведены из работ НИЦ «Курчатовский институт», в которых автор принимал личное участие.

Также приведены расчетные методики для предварительной оценки применимости сталей КР в условиях эксплуатации РУ с ВВЭР-СКД.

Так, предварительная расчетно-экспериментальная оценка кратковременных и длительных прочностных характеристик кандидатных материалов для определения необходимой толщины стенки удлиненной обечайки

АЗ КР ВВЭР-СКД, изготовленной из данных материалов, была выполнена по методике ГОСТ Р 59115.8-2021 «Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет по выбору основных размеров».

Для предварительной расчетно-экспериментальной оценки по критерию сопротивления хрупкому разрушению КР, изготовленного из кандидатных материалов и возможности эксплуатации в условиях ВВЭР-СКД с некоторыми допущениями, была использована современная методика ГОСТ Р 59115.14-2021 «Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на сопротивление хрупкому разрушению корпуса водяного энергетического реактора».

В третьей главе «Сравнительный анализ особенностей деградации структуры и свойств существующих и перспективных материалов корпусов реакторов в условиях воздействия эксплуатационных факторов ВВЭР со сверхкритическими параметрами теплоносителя» проведен аналитический анализ параметров структуры и прочностных характеристик традиционно используемых сталей КР ВВЭР, а также разрабатываемой стали 10ХН5МФБА-А применительно к предполагаемым условиям ВВЭР-СКД. Отмечено, что традиционные корпусные стали КР (15Х2МФА мод.А и 15Х2НМФА класс 1) ориентированы, в первую очередь, на обеспечение эксплуатации КР ВВЭР при температуре теплоносителя до 330°C и рабочем давлении на уровне ~17 МПа, а также характеризуются прочностными характеристиками, удовлетворяющими категории прочности не выше КП-45 и достаточно низкими значениями критической температуры хрупкости. При выборе материала КР одним из важных критерием является референтность, т.е. опыт применения материалов в условиях нейтронного облучения и рабочих температур, приближенных к эксплуатационным условиям ВВЭР-СКД, что может способствовать оценки их применимости при более высоких температурах и давлении теплоносителя.

На основе анализа имеющихся литературных данных в качестве кандидатных материалов КР в условиях ВВЭР-СКД были выбраны традиционно-применяемые корпусные стали с категорией прочности КП=45 типа 15Х2МФА (15Х2МФА мод.А - Ni (0,2-0,4) масс.%) и 15Х2НМФА (15Х2НМФА класс 1 - Ni (1,0-1,3) масс.%), а также разработанная АО «НПО «ЦНИИТМАШ» для этого реактора сталь 10ХН5МФБА-А (Ni (4,9-5,6) масс.%) с повышенной категорией прочности (КП 65+), которая относится к тому же классу сталей, что и традиционно применяемые стали.

Химический состав кандидатных материалов для КР ВВЭР-СКД приведен в таблице 1.

Таблица 1 - Химический состав кандидатных материалов КР ВВЭР-СКД

Материал	С	Si	Mn	Cr	Карбидообразующие элементы		
					Mo	V	Nb
15X2МФА-А мод.А*	0,15-0,18	0,17-0,37	0,3-0,6	2,7-3,0	0,6-0,8	0,25-0,35	0,05
15X2НМФА класс 1**	0,13-0,18	0,17-0,37	0,3-0,6	1,8-2,3	0,5-0,7	0,10-0,12	-
10ХН5МФБА-А***	0,11-0,15	~0,1	~0,03	1,0-1,7	0,82-1,09		

Продолжение таблицы 1

Материал	Ni	S	P	Cu
		Не более		
15X2МФА-А мод.А*	0,2-0,4	0,007	0,007	0,07
15X2НМФА класс 1**	1,0-1,3	0,004	0,005	0,06
10ХН5МФБА-А***	4,9-5,6	0,003	0,005	0,02

* Химический состав стали 15X2МФА-А мод.А приведен в соответствии с ТУ 5.961-11060-2008.

** Химический состав стали 15X2НМФА класс 1 приведен в соответствии с ТУ 0893-013-00212179-2003.

*** Химический состав стали 10ХН5МФБА-А лабораторных плавок приведен на основе литературных данных.

Одной из особенностью рассматриваемых сталей является различное содержание Ni. Как известно, Ni необходим для обеспечения достаточного комплекса прочностных и вязкопластических характеристик и повышения прокаливаемости стали, которая необходима при увеличении толщины стенки корпуса в реакторах повышенной мощности.

Отличительной особенностью стали 10ХН5МФБА-А с повышенной категорией прочности, по сравнению с традиционными материалами, является значимое изменение ее химического состава: содержания Ni составляет (4,9-5,6) масс.%; содержание Mn в 2-3 раза ниже, чем в традиционных сталях при пониженном содержании Si; и малым содержанием примесного элемента P, являющимся основным сегрегирующим элементом. Изменение химического состава стали 10ХН5МФБА-А направлено на необходимость снижения совместного отрицательного взаимодействия Ni с Mn и Ni с P в процессах радиационного и термического охрупчивания.

В таблице 2 приведены доступные обобщенные механические характеристики кандидатных материалов КР ВВЭР-СКД в исходном состоянии.

Из данных указанных в таблице 2 следует, что в исходном состоянии при всех температурах испытаний (в том числе предполагаемых температурах эксплуатации КР ВВЭР-СКД 400°С) сталь марки 10ХН5МФБА-А обладает более высокими значениями по характеристикам кратковременной и длительной прочности по сравнению с традиционными сталями, а также характеризуется рекордно низкой критической температурой хрупкости.

Таблица 2 – Обобщенные механические характеристики в исходном состоянии

Материал	Температура, °С	Предел текучести $R_{p0,2}^T$, МПа	Временное сопротивление R_m^T , МПа	Предел длительной прочности* R_{ml}^T на базе $5 \cdot 10^5$ ч, МПа	Критическая температура хрупкости T_K , °С
Стали 15Х2МФА-А мод.А, 15Х2НМФА класс 1	20	500...550	600...650	н/д	-90...-75
	350	450...500	550...600	н/д	
	400	400...450	500...550	220...300	
	450	300...400	400...500	160...200	
Сталь 10ХН5МФБА-А	20	750...850	900...1000	н/д	-140...-90
	350	700...750	800...850	н/д	
	400	650...700	750...800	340...480	
	450	600...650	700...750	210...280	

*Для стали 10ХН5МФБА-А приведены данные для лабораторных плавок; для сталей 15Х2МФА-мод.А и 15Х2НМФА класс 1 на основе литературных данных.

В результате анализа влияния легирующих элементов кандидатных сталей КР на длительную прочность, поскольку именно эту характеристику становится необходимым учитывать в условиях СКД, отмечено следующее:

- В 1,5-2 раза большее содержание Cr в сталях 15Х2МФА-А мод.А и 15Х2НМФА класс 1 по сравнению со сталью 10ХН5МФБА-А не дает преимуществ с точки зрения характеристик длительной прочности, поскольку необходимо учитывать комплексное легирование с учетом различных механизмов упрочнения;
- Повешенное содержание Ni в эксплуатационных условиях СКД приводит к повышению характеристик длительной прочности;
- Снижение содержания Mn в стали 10ХН5МФБА-А оказывает влияние на повышение характеристик длительной прочности;
- Низкое содержание Cu в стали 10ХН5МФБА-А способствует повышению характеристик длительной прочности;

- Введение Nb в состав стали 10ХН5МФБА-А способствует улучшению характеристик длительной прочности за счет контроля размера зерна в аустенитной матрице и дисперсности структуры.

После испытаний на длительную прочность стали 10ХН5МФБА-А автором показано, что разрушение носит вязкий транскристаллитный характер (межзеренного разрушения не выявлено) и происходит по механизму зарождения и роста деформационных пор на неметаллических включениях. Также в результате длительных температурных выдержек показано, что сталь 10ХН5МФБА-А обладает стабильным структурно-фазовым состоянием и отсутствием значимых эффектов деградации структуры, ответственных за возможное снижение характеристик длительной прочности, поскольку плотность, тип и состав карбидных выделений не претерпевают значительных изменений.

В работе проанализировано влияние химических элементов на радиационное охрупчивание материалов КР. Известно, что снижение стойкости сталей к радиационному охрупчиванию определяется и усиливается с повышением содержания P, Cu, Ni и Mn, что, в свою очередь, сопровождается трансформацией структуры в процессе эксплуатации сталей. При анализе структуры и свойств кандидатных сталей КР применительно к эксплуатационным условиям СКД следует отметить ряд факторов, учет которых позволил нивелировать возможное отрицательное влияние увеличенного содержания Ni в стали 10ХН5МФБА-А и использовать повышенную концентрацию Ni с целью повышения категории прочности (КП=65+).

Первым фактором является то, что Ni и Mn синергетически влияют на процесс образования преципитатов. Увеличение содержания Ni способствует увеличению плотности Ni-Si-Mn преципитатов, однако, уменьшение концентрации Mn до низких значений (даже в случае повышенного содержания Ni) способствует снижению склонности стали к образованию Ni-Si-Mn-преципитатов и, соответственно, снижению темпа радиационного охрупчивания сталей КР.

Вторым фактором, является более высокая предполагаемая температура эксплуатации реактора ВВЭР-СКД ($\geq 400^\circ\text{C}$), при которой для традиционных сталей КР не выявлено образования радиационно-индуцированных преципитатов в связи с интенсификацией диффузионных процессов и подавлению образования стабильных комплексов радиационных дефектов за счет их рекомбинации, которые могут выступать местами зарождения для радиационно-индуцированных преципитатов.

Учитывая, что механические характеристики стали 10ХН5МФБА-А получены после ее ускоренного облучения в исследовательском реакторе, то

необходимо учитывать «эффект флакса», который связан также с содержанием Ni в сталях КР, и заключается в недостаточной степени протекания процессов зернограничного накопления Р и зернограничного охрупчивания при ускоренном облучении за счет меньшей длительности температурного воздействия.

Поэтому третьим фактором, который позволил нивелировать возможное отрицательное влияние увеличенного содержания Ni, является снижение удельного зернограничного содержания вредных примесей, включая фосфора, за счет рафинирования стали, а также создания протяженной зернограничной поверхности (создание мелкозернистой структуры). Это дает возможность повышения термической стойкости, стали с повышенным содержанием Ni.

Определяющим с точки зрения целостности КР ВВЭР является критерий хрупкого разрушения. Рассматриваемые кандидатные материалы характеризуются о.ц.к.-структурой, для которой свойственно наличие температурного интервала вязко-хрупкого перехода, в котором наблюдается резкое изменение характера разрушения материала от вязкого к хрупкому характеру разрушения на температурной зависимости работы разрушения при испытаниях на ударный изгиб. Характеристикой состояния стали является величина критической температуры хрупкости на критериальном уровне работы разрушения. Мерой изменения критической температуры хрупкости, которая характеризует стойкость стали к хрупкому разрушению, вследствие деградации свойств материала по мере истечения срока службы КР, являются сдвиг критической температуры хрупкости ΔT_K (по испытаниям на ударный изгиб) и температуры ΔT_{100} (по испытаниям на вязкость разрушения), которые отражают степень термического и радиационного охрупчивания в рассматриваемых условиях эксплуатации.

Обобщенные экспериментальные результаты испытаний лабораторной плавки стали 10ХН5МФБА-А на ударный изгиб и вязкость разрушения в различных состояниях, наряду с аналогичными данными для сталей 15Х2МФА-А мод.А и 15Х2НМФА класс 1 приведены в таблице 3.

Из таблицы 3 следует, что даже после воздействия термообработки по специальному режиму, провоцирующему зернограничное охрупчивание, а также после облучения при 400°C в изломах образцов стали 10ХН5МФБА-А не выявлено хрупкого межзеренного разрушения. В то же время в стали 15Х2НМФА класс 1 после аналогичной температуры облучения доля хрупкого межзеренного разрушения составляет 5%, а после провоцирующей охрупчивающей термообработки наблюдается увеличение доли хрупкого межзеренного разрушения до 30%, что свидетельствует об увеличении уровня зернограничной сегрегации. Эти эксперименты свидетельствуют о большей термической

стойкости стали 10ХН5МФБА-А по сравнению со сталью 15Х2НМФА класс 1, связанной с ее меньшей склонностью к образованию зернограницной сегрегации.

Реакторные испытания для стали 15Х2МФА-А мод.А при 400°С не проводили, однако, нет оснований считать, что в данной стали эта хрупкая межзеренная структурная составляющая излома может присутствовать с учетом ее отсутствия при более жестких условий провоцирующей охрупчивающей термообработки.

Таблица 3 – Обобщенные экспериментальные результаты испытаний лабораторных плавок кандидатных сталей в различных состояниях

Материал	Состояние	Флюенс, $\times 10^{23} \text{ м}^{-2}$	$T_{\text{к}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{\text{к}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{100}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_{100}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\eta^1_{\text{max}}, \text{ \%}^{**}$
15Х2МФА-А мод.А	Исходное	-	-72	-	-	-	0
	Охрупченное	-	-69	3	-	-	0
	Облученное	5,4 (300°С)	-42	30	-	-	0
15Х2НМФА класс 1	Исходное	-	-90	-	-	-	-
	Охрупченное	-	-55	35	-	-	30
	Облученное	4,5 (300°С)	-44	46	-	-	0
		4,4 (400°С)	-73	17	-	-	5
10ХН5МФБА-А ²	Исходное	-	-131	-	-120	-	0
	Охрупченное	-	-141	-*	-89	*	0
	Облученное ³	5,4 - 5,6 (400°С)	-135	-4	-125	-5	0
		12,2 (400°С)	-148	-17	-104	16	0

* - сдвиги невозможно определить из-за различия плавок в исходном и охрупченном состояниях;

** - максимальная доля хрупкого межзеренного разрушения в направлении распространения трещины при ударных испытаниях.

¹ Определение доли хрупкого межзеренного разрушения для стали 10ХН5МФБА-А проведены автором совместно с к.т.н. Д.А. Мальцевым.

² Результаты испытаний на ударный изгиб и вязкость разрушения стали 10ХН5МФБА-А получены сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» под руководством к.т.н. Д.А. Журко.

³ Эксперимент по ускоренному нейтронному облучению стали 10ХН5МФБА-А проведен сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт» под руководством д.т.н. Д.Ю. Ерака.

После облучения при 400°С (см. таблицу 3) радиационно-индуцированные преципитаты и радиационные дефекты (дислокационные петли) не образуются в сталях 15Х2НМФА класс 1 и 10ХН5МФБА-А, и тем более нет оснований предполагать, что они будут образовываться при той же температуре облучения в

стали 15X2МФА-А мод.А. Данный факт объясняется тем, что при повышенной температуре облучения происходит отжиг радиационных дефектов (дислокационных петель), которые являются центрами зарождения преципитатов.

Из таблицы 3 также видно, что в результате облучения стали 10ХН5МФБА-А при температуре 400°С в диапазоне флюенсов нейтронов $(5,4-12,2) \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$ отсутствуют закономерные сдвиги ΔT_{100} и ΔT_K . В то же время при той же температуре облучения до близких флюенсов быстрых нейтронов ($E \geq 0,5 \text{ МэВ}$) для стали 15X2НМФА класс 1 наблюдается небольшой сдвиг ΔT_K , не превышающий 17°С.

Обобщая полученные данные по результатам испытаний кандидатных сталей на ударный изгиб и структурного анализа образцов, можно отметить, что в облученных при 400°С кандидатных сталях 15X2НМФА класс 1 и 10ХН5МФБА-А, и вероятно, для стали 15X2МФА-А мод.А не наблюдается типичное для сталей КР при облучении 300°С изменение T_K и T_{100} в сторону более высоких температур. На практике все это позволяет полагать о большом запасе устойчивости к термошоку, в случае штатной проектной аварии с заливом холодной воды и даже предположить, что в подобных условиях хрупкое разрушение не произойдет.

Таким образом, проведенный автором анализ экспериментальных данных влияния облучения при температуре 400°С на фазовый состав, долю хрупкого межзеренного разрушения (уровень зернограницной сегрегации) и служебные характеристики кандидатных сталей показал, что стали 15X2МФА-А мод.А, 15X2НМФА класс 1 и 10ХН5МФБА-А обладают достаточно высокой стойкостью к радиационному охрупчиванию и могут быть рассмотрены в качестве кандидатных материалов для КР ВВЭР-СКД.

Для оценки кандидатных материалов КР ВВЭР-СКД с точки зрения требований к прочностным характеристикам, а также сопротивления хрупкому разрушению необходимы: расчетно-экспериментальная оценка прочностных характеристик материалов с учетом характеристик длительной прочности, а также расчетно-экспериментальная оценка сопротивления хрупкому разрушению КР из всех кандидатных материалов.

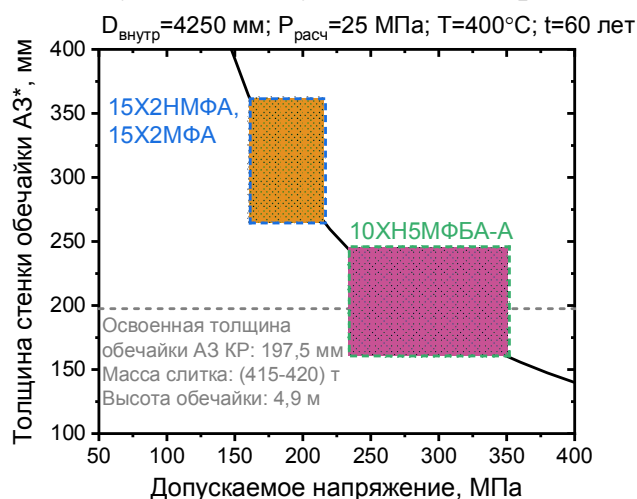
Четвертая глава «Сравнительная расчетно-экспериментальная оценка прочностных характеристик кандидатных сталей для определения толщины стенки удлиненной обечайки активной зоны корпуса реактора ВВЭР-СКД» посвящена предварительной расчетно-экспериментальной оценки прочности традиционных сталей КР и разрабатываемой стали 10ХН5МФБА-А с повышенной категорией прочности (КП-65+), выявившей возможность изготовления из стали 10ХН5МФБА-А удлиненной обечайки АЗ КР ВВЭР-СКД с

толщиной стенки, освоенной в современном промышленном производстве (~200 мм). При этом учитывали, что эксплуатация КР ВВЭР-СКД происходит при температурах, вызывающих ползучесть кандидатных материалов, поэтому расчет проводился с учетом их характеристик длительной прочности.

Предварительная расчетно-экспериментальная оценка выполнялась в соответствии с методикой ГОСТ Р 59115.8-2021.

Следует отметить, что удлиненная обечайка АЗ КР предусматривается во всех современных проектах ВВЭР в связи с возможностью вывода сварных швов (как материалов с наибольшим темпом радиационного охрупчивания) из активной зоны.

На рисунке 1 для традиционных сталей типа 15Х2МФА и 15Х2НМФА (синяя область), а также для стали 10ХН5МФБА-А (зеленая область) построена зависимость требуемой толщины стенки удлиненной обечайки АЗ КР от величины оцененных действующих допускаемых напряжений для данных сталей.



* с учетом длительной прочности

Рисунок 1 - Зависимость требуемой толщины стенки обечайки АЗ КР ВВЭР-СКД от допускаемого напряжения (■ - стали 15Х2МФА-А мод.А, 15Х2НМФА класс 1; ■ - сталь 10ХН5МФБА-А)

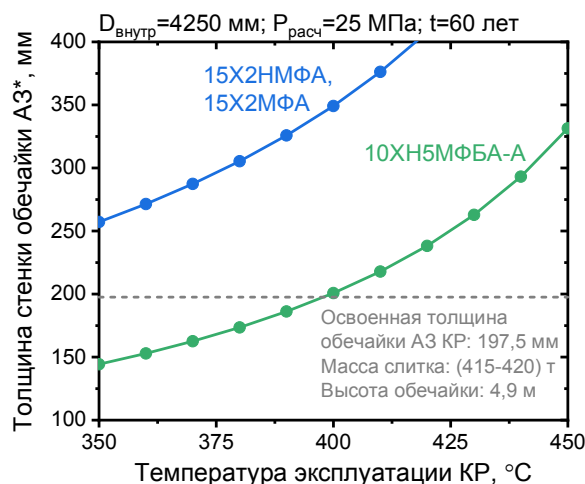
Из рисунка 1 следует, что в рассматриваемых условиях ВВЭР-СКД для удлиненной обечайки АЗ КР только применение стали 10ХН5МФБА-А позволит обеспечить сопоставимую с освоенной в настоящее время отечественной промышленностью толщину стенки обечаек КР в области АЗ.

На рисунке 2 для кандидатных материалов при рассматриваемых параметрах эксплуатации ВВЭР-СКД представлены расчетно-экспериментальные зависимости требуемой толщины стенки удлиненной обечайки АЗ КР для обеспечения заданной температуры эксплуатации.

На рисунке 2 видно, что эксплуатацию ВВЭР-СКД при $T \geq 400^\circ\text{C}$ с удлиненной обечайки АЗ КР с толщиной стенки, освоенной в отечественной

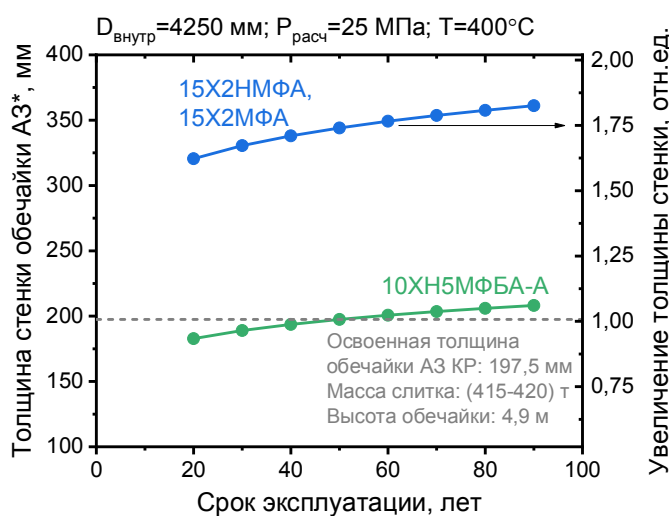
промышленности (~200 мм) возможно только при использовании стали 10ХН5МФБА-А.

На рисунке 3 приведены расчетно-экспериментальные зависимости требуемой толщины стенки удлиненной обечайки АЗ в процессе эксплуатации КР ВВЭР-СКД для обеспечения заданного срока службы.



* с учетом длительной прочности

Рисунок 2 - Зависимость требуемой толщины стенки от температуры эксплуатации обечайки АЗ КР ВВЭР-СКД (■ - стали 15X2МФА-А мод.А, 15X2НМФА класс 1; ■ - сталь 10ХН5МФБА-А)



* с учетом длительной прочности

Рисунок 3 - Зависимость требуемой толщины стенки от срока эксплуатации обечайки АЗ КР ВВЭР-СКД (■ - стали 15X2МФА-А мод.А, 15X2НМФА класс 1; ■ - сталь 10ХН5МФБА-А)

На рисунке 3 видно, что эксплуатацию ВВЭР-СКД в течение 60 лет и более с удлиненной обечайкой АЗ КР толщиной стенки ~200 мм возможно только при использовании стали 10ХН5МФБА-А. При этом применение традиционных сталей в качестве материала КР при тех же параметрах ВВЭР-СКД потребует увеличение толщины стенки примерно в 1,75 раза больше, чем освоенные толщины в промышленности для современных ВВЭР. Учитывая, что для освоенной толщина стенки удлиненной обечайки АЗ КР, не превышающей

~200 мм, масса слитка ориентировочно составляет (415-420) т, то в случае увеличения толщины стенки требуемая масса слитка может составлять более 500 т, что в настоящее время на современной отечественной технологической базе не реализовано.

В случае необходимости увеличения температуры эксплуатации до 450°C и давления до 30 МПа, позволяющие достигнуть повышения КПД реакторной установки ВВЭР-СКД, при использовании стали 10ХН5МФБА-А потребуется значительно меньшего увеличения толщины стенки обечайки КР, чем при использовании традиционных сталей, а соответственно имеются хорошие предпосылки для ее промышленной реализации.

Таким образом, предварительная расчетно-экспериментальная оценка прочностных характеристик (кратковременных и длительных) показала, принципиальную возможность изготовления удлиненной обечайки активной зоны КР из стали 10ХН5МФБА-А (с повышенной категорией прочности КП65+) с толщиной стенки, освоенной в современном промышленном производстве (~200 мм), и отсутствие такой возможности для традиционных сталей КР при заданных температурно-временных параметрах эксплуатации ВВЭР-СКД.

Преимущество использования стали 10ХН5МФБА-А обусловлено большим значением категории прочности (ориентировочно, КП65), а также более высокими характеристиками длительной прочности, по сравнению с традиционными сталями 15Х2МФА-А мод.А и 15Х2НМФА класс 1.

Применение стали 10ХН5МФБА-А позволит использовать имеющиеся технологии изготовления заготовок и остаться в габаритных размерах КР без значительного утолщения стенки, позволяющих обеспечить транспортировку, а также изготовить удлиненную обечайку АЗ и вынести сварной шов, расположенный напротив АЗ. Такой подход позволит увеличить запас прочности реактора с позиций сопротивления хрупкому разрушению и, соответственно, увеличить срок службы КР и РУ в целом.

В пятой главе «Сравнительная расчетно-экспериментальная оценка сопротивления хрупкому разрушению корпуса реактора ВВЭР-СКД, изготовленного из кандидатных материалов» проанализировано поведение кандидатных материалов удлиненной обечайки АЗ КР, в которой отсутствуют сварные соединения напротив АЗ. Данный подход позволяет оценить реальное поведение основного металла в наиболее облучаемой зоне, поскольку металл сварных швов имеет меньшую радиационную стойкость и может внести свой вклад при сопоставлении полученных данных по основному металлу.

Для удлиненной обечайки АЗ КР ВВЭР-СКД рассматривались варианты применения кандидатных материалов из сталей 15Х2МФА-А мод.А, 15Х2НМФА класс 1 и 10ХН5МФБА-А.

При проведении предварительной расчетно-экспериментальной оценки сопротивления хрупкому разрушению КР учитывалось, что в настоящее время по результатам концептуальных разработок были сформулированы только технические предложения по проекту РУ с ВВЭР-СКД. Более детальная проработка перспективного ВВЭР, в том числе выбор нагрузок, соответствующих нормальным и аварийным режимам эксплуатации, еще предстоит выполнить на последующих стадиях разработки проекта.

Основной характеристикой сопротивления хрупкому разрушению КР является температурная зависимость вязкости разрушения, которая рассчитывалась согласно методике ГОСТ Р 59115.14-2021 по формуле (1).

$$\bar{K}_{JC}(T) = 0,52 \cdot \left[K_{JC}^{shelf} - K_{min} + \Omega \cdot a_1 \cdot \left(1 + th \left(\frac{T - a_2}{a_3} \right) \right) \right] + K_{min}, \quad (1)$$

где K_{JC}^{shelf} – уровень нижнего шельфа вязкости разрушения; a_1, a_2, a_3 – коэффициенты; Ω – параметр материала, контролирующий степень охрупчивания

Зависимость (1) $\bar{K}_{JC}(T)$ отвечает длине фронта трещины $\bar{B}=25$ мм и вероятности хрупкого разрушения $P_f=0,05$.

Параметр Ω вычислялся в соответствии с методикой по формуле:

$$\Omega = \frac{70}{a_1 \cdot \left(1 + th \left(\frac{T_{100} - a_2}{a_3} \right) \right)} \quad (2)$$

Расчет T_{100} проводился в соответствии с методикой по формуле:

$$T_{100} = T_{100}^{start} + \Delta T_k, \quad (3)$$

Для элементов облучаемой области КР: $\Delta T_k = \Delta T_F + \Delta T_T + \delta T_k$, (4)

где ΔT_F – сдвиг критической температуры хрупкости вследствие влияния нейтронного облучения; ΔT_T – сдвиг критической температуры хрупкости вследствие температурного старения; δT_k – температурный запас на неоднородность свойств, обусловленную облучением.

В качестве исходной информации по вязкости разрушения используется зависимость $\bar{K}_{JC}(T)$ (1). Однако, в качестве расчетной зависимости вязкости разрушения, отвечающей вероятности хрупкого разрушения $P_f=0,05$, для расчетной трещины с длиной фронта B принимается в соответствии с методикой зависимость в виде:

$$K_C = \left(\frac{\bar{B}}{B} \right)^{1/4} \cdot (\bar{K}_{JC} - K_{min}) + K_{min}, \quad (5)$$

где $B = \min \left(2 \cdot c \sqrt{1 + 4,6 \left(\frac{a}{2 \cdot c} \right)^{1,65}}, 200 \right)$ – протяженность фронта полуэллиптической трещины.

Значения некоторых коэффициентов для традиционных сталей КР, согласно методике могут быть использованы только в условиях эксплуатируемых ВВЭР, а именно при температуре облучения $T \leq 310^\circ\text{C}$ и флюенсе нейтронов (с энергией $E \geq 0,5$ МэВ) в зависимости от применяемой стали КР: $F \leq 3,0 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$ для стали 15Х2МФА-А мод.А и $F \leq 6,4 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$ для стали 15Х2НМФА класс 1, что обусловлено подтверждением большим массивом экспериментальных данных. В связи с этим для сравнения кандидатных сталей КР по критерию сопротивления хрупкому разрушению предварительная расчетно-экспериментальная оценка проводилась со следующими допущениями.

Во-первых, выбор аварийных режимов с термошоком в данной работе основан на анализе опыта проектирования и эксплуатации традиционных ВВЭР. Исходные события и сценарии протекания режимов подбирались таким образом, чтобы достигались максимально опасные условия для КР с позиции сопротивления хрупкому разрушению (низкая температура, высокие напряжения). Таким образом, выбран наиболее консервативный сценарий развития проектной аварии для типичных ВВЭР, при котором происходит аварийное расхолаживание. Местоположение, ориентация, поведение постулируемых расчетных трещин и ряд других положений было принято априори для выбранного условного аварийного режима.

Во-вторых, вязкость разрушения удлиненной обечайки АЗ КР определялась как для проектируемых РУ ВВЭР в соответствии с методикой.

В-третьих, для стали 10ХН5МФБА-А, а также для стали 15Х2НМФА класс 1 при сравнительной оценке использовали экспериментальные характеристики, полученные при испытаниях, характерных для условий СКД, а именно при температуре облучения 400°C .

Ранее экспериментально было показано, что в исходном состоянии из всех кандидатных материалов сталь 10ХН5МФБА-А демонстрирует самые низкие значения T_{100} (\leq минус 120°C) и также она обладает высокой термической стойкостью (отсутствием изменений T_K в сторону более высоких температур и отсутствием хрупкого межзеренного разрушения после охрупчивающей термообработки). Исходя из этого следует предположить низкий темп радиационного охрупчивания при температуре облучения 400°C . В связи с этим при оценке сопротивления хрупкому разрушению КР из стали 10ХН5МФБА-А при температуре 400°C были использованы фактические экспериментальные значения T_{K0} и T_{100} , а также результаты сдвигов ΔT_T и ΔT_F .

При сравнительной оценке сопротивления хрупкому разрушения КР при температуре 400°C для стали 15X2НМФА класс 1 использовались имеющиеся фактические экспериментальные значения T_{K0} и результаты сдвигов ΔT_T , ΔT_F также как и для стали 10ХН5МФБА-А. В отсутствии фактических данных для стали 15X2МФА-А мод.А допустили, что при 400°C она будет проявлять свойства, близкие к свойствам стали 15X2НМФА класс 1, поскольку в исходном состоянии данные стали обладают близкими свойствами.

Результаты предварительной оценки изменения температуры T_{100} кандидатных материалов для удлиненной обечайки АЗ КР в процессе эксплуатации при 400°C с учетом фактически полученных данных представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Итоговое значение T_{100} для кандидатных материалов КР при 400°C

Материал	T_{100}^{start}	ΔT_T	ΔT_F		$\square T_K$	T_{100} на конец срока службы
			F, м ⁻²	значение		
15X2НМФА класс 1 (факт.), 15X2МФА-А мод.А	-128	35	$4,4 \cdot 10^{23}$	17	38	-38
10ХН5МФБА-А (факт.)	-120	0	$5,4 \cdot 10^{23}$	0	38	-82

* Значения T_{K0} (для определения T_{100}^{start}) и сдвигов ΔT_T и ΔT_F для стали 15X2НМФА класс 1 приведены в соответствии с ранее полученными экспериментальными данными.

В таблице 4 для стали 10ХН5МФБА-А (факт.) приведены фактические значения T_{100} в исходном состоянии (для определения T_{100}^{start}), а также результаты сдвигов ΔT_T и ΔT_F , ранее полученные в НИЦ «Курчатовский институт» по результатам испытаний лабораторных плавок.

На рисунке 4 представлены результаты предварительной расчетно-экспериментальной оценки вязкости разрушения кандидатных материалов в процессе эксплуатации при 400°C для сталей 15X2МФА-А мод.А, 15X2НМФА класс 1 и 10ХН5МФБА-А. Также на рисунке 4 представлены результаты предварительной расчетно-экспериментальной оценки вязкости разрушения для традиционных сталей КР в условиях СКД с учетом значений категории прочности, длительной прочности и требуемой толщины стенки в процессе эксплуатации предполагаемого КР. С учетом возможной толщины стенки удлиненной обечайки АЗ КР ~350 мм в случае применения сталей 15X2МФА-А мод.А, 15X2НМФА класс 1 и 197,5 мм в случае применения стали 10ХН5МФБА-А при температуре эксплуатации 400°C, глубины трещин по расчетной методике составили 15 мм и 13,825 мм для сталей 15X2МФА-А мод.А, 15X2НМФА класс 1 и 10ХН5МФБА-А соответственно. С учетом подраста трещины для толщины стенки 350 мм ее глубина составила 16,1 мм. Подрост

трещины для толщины стенки 350 мм принят консервативно, как для рассмотренного постулируемого дефекта при толщине стенки 197,5 мм.

Из сравнительной расчетно-экспериментальной оценки, приведенной на рисунке 4 и таблицы 4, следует, что обечайка АЗ КР, выполненная из стали 10ХН5МФБА-А (факт.), обладает лучшими свойствами с позиции сопротивления хрупкому разрушению по сравнению с обечайкой, выполненной из сталей 15Х2НМФА класс 1 (факт.), 15Х2МФА-А мод.А, даже несмотря на облучение при большем флюенсе.

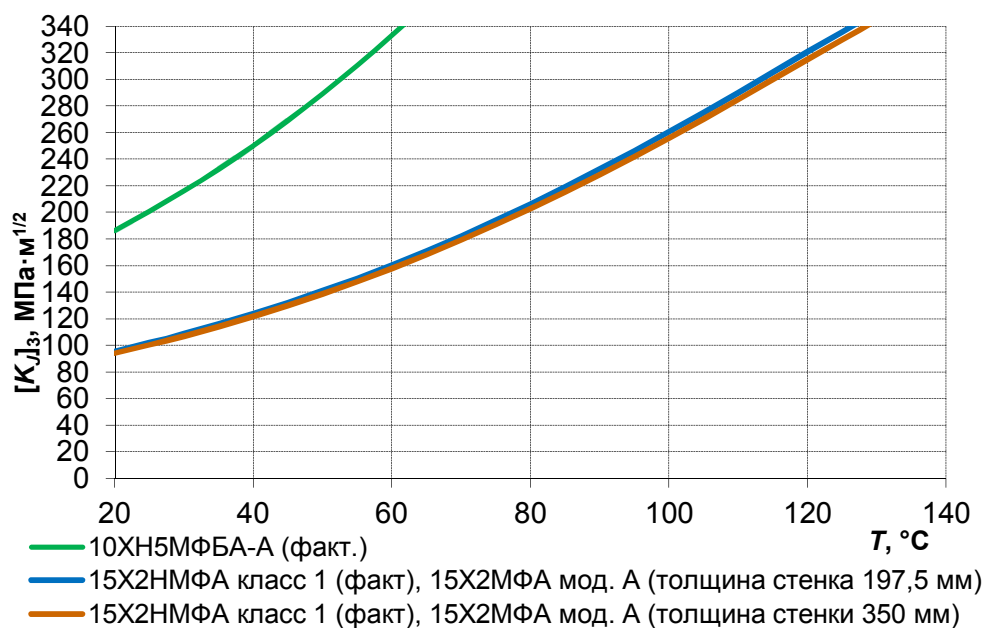


Рисунок 4 – Результаты оценки сопротивления хрупкому разрушению КР из различных кандидатных сталей при температуре эксплуатации 400°С

Таким образом, в соответствии с полученными фактическими экспериментальными данными (см. таблицу 3) показано, что материал удлиненной обечайки АЗ КР, выполненный из стали 10ХН5МФБА-А, обладает лучшими свойствами с позиции сопротивления хрупкому разрушению относительно материала, выполненного из традиционных сталей КР.

Сопоставление результатов выполненной оценки сопротивления хрупкому разрушению КР из различных кандидатных материалов сталей при температуре эксплуатации 400°С (см. рисунок 4) с проведенными в НИЦ «Курчатовский институт» оценками коэффициента интенсивности напряжений для постулируемой трещины в цилиндрической части КР при аварийном режиме (заливе воды) (выполнены д.т.н. Ал-др.С. Киселевым с помощью программы UZOR 1.0) показало, что все кандидатные материалы обечайки АЗ КР не достигают допускаемых значений критической температуры хрупкости, соответствующих исчерпанию ресурса, т.е. все кандидатные материалы обладают достаточным сопротивлением хрупкому разрушению в условиях ВВЭР-СКД.

В шестой главе «Анализ применимости исследуемых сталей с различной категорией прочности для возможности использования в качестве

материала корпуса реактора ВВЭР-СКД» показано, что наиболее подходящими материалами из известных сталей КР в качестве кандидатных материалов для КР ВВЭР-СКД являются стали 15Х2МФА-А мод.А, 15Х2НМФА класс 1, а также разрабатываемая сталь 10ХН5МФБА-А с повышенной категорией прочности. Все эти стали демонстрируют достаточно высокую термическую и радиационную стойкость при температуре облучения $\sim 400^\circ\text{C}$. На основе предварительных расчетно-экспериментальных оценок кратковременной и длительной прочности кандидатных материалов показано, что при изготовлении удлиненной обечайки АЗ КР ВВЭР-СКД из кандидатных сталей 15Х2МФА-А мод.А и 15Х2НМФА класс 1 потребуется изготовление обечайки с толщиной стенки ≥ 350 мм, что в настоящее время на современной отечественной технологической базе не реализовано.

Сравнительные расчетно-экспериментальная оценка прочностных характеристик, а также расчетно-экспериментальная оценка на сопротивление хрупкому разрушению показали, что в соответствии с полученными фактическими экспериментальными данными (см. таблицу 3) материал удлиненной обечайки АЗ КР, выполненный из стали 10ХН5МФБА-А, обладает наилучшими свойствами по сравнению с остальными кандидатными материалами.

На основе доступных экспериментальных данных и расчетных зависимостей сделан предварительный выбор стали 10ХН5МФБА-А в качестве материала КР ВВЭР-СКД на основании того, что:

- сталь характеризуется повышенными прочностными характеристиками при 400°C , удовлетворяющими КП-65+ и критической температурой хрупкости в исходном состоянии на уровне -131°C , что является самым низким значением T_{K0} и, соответственно, T_{100} из кандидатных материалов;
- сдвиги критической температуры хрупкости ΔT_K и ΔT_{100} после провоцирующей охрупчивающей термообработки практически равны нулю, что свидетельствует о высокой термической стойкости данной стали;
- после облучения при 400°C до интервала флюенса быстрых нейтронов $(5,4-12,2) \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$, включающего проектный флюенс за 60 лет эксплуатации КР типичных ВВЭР, отсутствует радиационно-индуцированные преципитаты и радиационные дефекты, что свидетельствует об очень высокой радиационной стойкости данной стали при температуре облучения 400°C (ΔT_K и $\Delta T_{100}=0$);
- характеристики длительной прочности стали 10ХН5МФБА-А выше, чем для других кандидатных материалов, что дает преимущества для выбора данной стали в качестве материала КР ВВЭР-СКД, поскольку эксплуатационные параметры КР

ВВЭР-СКД ($T \geq 400^\circ\text{C}$ и давление ≥ 25 МПа) требуют учета характеристики длительной прочности;

- предварительная расчетно-экспериментальная оценка кратковременных и длительных прочностных характеристик кандидатных материалов показала, что в рассматриваемых условиях ВВЭР-СКД для удлиненной обечайки АЗ КР только применение стали 10ХН5МФБА-А с повышенной категорией прочности (КП=65+) и длительной прочностью при 400°C на базе $5 \cdot 10^5$ ч $R_{\text{mt}}^T = 340 \dots 480$ МПа создается:

- технологическая возможность изготовления удлиненной обечайки АЗ КР с толщиной стенки, освоенной в современном промышленном производстве (~200 мм);
- при освоенной толщине стенки удлиненной обечайки АЗ КР в ~200 мм возможность эксплуатации КР вплоть до 400°C ;
- при освоенной толщине стенки удлиненной обечайки АЗ КР в ~200 мм возможность эксплуатации КР ~60 лет.

- предварительная расчетно-экспериментальная оценка сопротивления хрупкому разрушению КР показала, что удлиненная обечайка АЗ КР, выполненная из стали 10ХН5МФБА-А, обладает лучшими свойствами с позиции сопротивления хрупкому разрушению по сравнению с обечайкой, выполненной из сталей 15Х2МФА-А мод.А, 15Х2НМФА класс 1.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнен обзор и анализ литературных данных для выбора кандидатных материалов, обладающих комплексом свойств, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым к КР ВВЭР-СКД.

2. В результате анализа структурных особенностей и служебных характеристик традиционных сталей КР ВВЭР и стали с категорией прочности КП65+ определены в качестве кандидатных материалов КР ВВЭР-СКД стали 15Х2МФА-А мод.А, 15Х2НМФА класс 1, 10ХН5МФБА-А на основе значений их критической температуры хрупкости в исходном состоянии, а также на результатах изучения деградации структуры и уровня зернограницной сегрегации в указанных сталях после охрупчивающей термообработки и облучения в эксплуатационных условиях ВВЭР-СКД.

3. На основе предварительных расчетно-экспериментальных оценок кратковременной и длительной прочности кандидатных материалов показано, что при изготовлении удлиненной обечайки АЗ КР ВВЭР-СКД из кандидатных сталей 15Х2МФА-А мод.А и 15Х2НМФА класс 1 потребуется изготовление обечайки с

толщиной стенки ≥ 350 мм, что в настоящее время на современной отечественной технологической базе не реализовано.

4. На основе предварительных расчетно-экспериментальных оценок кратковременной и длительной прочности для удлиненной обечайки АЗ КР установлено, что применение стали 10ХН5МФБА-А показывает технологическую возможность изготовления удлиненной обечайки АЗ КР с толщиной стенки, освоенной в современном промышленном производстве (~ 200 мм).

5. На основе предварительных расчетно-экспериментальных оценок кратковременной и длительной прочности для удлиненной обечайки АЗ КР установлено, что применение стали 10ХН5МФБА-А при освоенной толщине стенки удлиненной обечайки АЗ КР в ~ 200 мм способствует повышению температуры эксплуатации КР вплоть до 400°C .

6. На основе предварительных расчетно-экспериментальных оценок кратковременной и длительной прочности для удлиненной обечайки АЗ КР установлено, что применение стали 10ХН5МФБА-А при освоенной толщине стенки удлиненной обечайки АЗ КР в ~ 200 мм способствует возможности эксплуатации КР до ~ 60 лет.

7. Предварительная расчетно-экспериментальная оценка сопротивления хрупкому разрушению КР показала, что все кандидатные материалы обладают достаточным сопротивлением хрупкому разрушению в условиях ВВЭР-СКД, однако, материал удлиненной обечайки активной зоны КР, выполненный из стали 10ХН5МФБА-А с повышенной категорией прочности, обладает наилучшими свойствами с позиции сопротивления хрупкому разрушению.

8. В перспективе при совершенствовании технологической базы стали 15Х2МФА-А мод.А, 15Х2НМФА класс 1 и 10ХН5МФБА-А могут быть рекомендованы в качестве материалов удлиненной обечайки активной зоны КР ВВЭР-СКД.

Основные публикации по теме диссертации:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Расчетно-экспериментальные предварительные оценки возможности применения высоконикелевых сталей для корпусов ВВЭР будущих поколений / Е.А. Кулешова, И.В. Федотов, **С.П. Кузнецов** // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2023. - №2. – С. 96–104.
2. Оценка влияния параметров структуры на характеристики длительной прочности высоконикелевой стали для корпусов перспективных реакторов типа ВВЭР / Е.А. Кулешова, И.В. Федотов, А.А. Потехин, Д.А. Мальцев, **С.П.**

Кузнецов, И.А. Иванов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2024. – №2. – С. 103–115.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 5 конференциях:

- Молодежной научно-практической конференции «Материалы и технологии в атомной энергетике», 23-24 июня 2021 г, Москва, Россия.
- Межотраслевая научно-техническая конференция «Реакторные материалы атомной энергетике», 06-09 сентября 2021 г., Екатеринбург, Россия.
- XXII Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, 13-14 апреля 2022 г., Подольск, Россия.
- XXIII Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам, 12-13 апреля 2023 г., Подольск, Россия.
- XI-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур» - ПРОСТ 2023, 18-20 апреля 2023 г., Москва, Россия.

Автор выражает благодарность заместителю генерального конструктора – начальнику отделения конструкционной целостности АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» Ведерникову П.А., а также советнику генерального конструктора АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» Пиминову В.А. за полезные советы и плодотворное обсуждение при выборе расчетных методик, использованных при оценках прочности и сопротивления хрупкому разрушению корпуса реактора, изготовленного из исследуемых сталей.