



КАШТАНОВ Александр Дмитриевич

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ВЫБОРА
МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ИХ ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ
РЕАКТОРОВ С ТЯЖЕЛЫМИ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМИ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ**

Специальность: 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт
конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального
исследовательского центра «Курчатовский институт»»

Официальные оппоненты:

академик РАН, доктор технических наук, профессор
Леонтьев Леопольд Игоревич, советник РАН, Российская академия наук
(г. Москва)

доктор технических наук, ст. науч. сотр. **Ланин Александр Алексеевич**,
заведующий отделом 13 ОАО «Научно-производственное объединение по
исследованию и проектированию энергетического оборудования
им. И.И. Ползунова» (г. Санкт-Петербург)

доктор технических наук **Логачева Алла Игоревна**,
начальник отделения «Металлические материалы и металлургические технологии»
АО «Композит» (г. Королев, Московская обл.)

Ведущая организация:

**ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС»** (г. Москва)

Защита состоится « 25 » июня 2020г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного
совета Д 212.229.03 при Федеральном государственном автономном
образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-
Петербург, ул. Политехническая, 29, главный корпус, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО
«СПбПУ» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан " " апреля 2020г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.03
кандидат технических наук



Швецов О.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Быстрые реакторы с момента начала становления атомной энергетики рассматривались в качестве основы ее развития. Их преимущества определяются уникальным избытком нейтронов – теоретически ~ 2,87 по сравнению с 2,42 для тепловых реакторов. Этот потенциал, помимо энергетического применения, можно использовать и для воспроизводства ядерного топлива, и для решения других принципиальных проблем ядерной энергетики.

Реакторы на тепловых, или медленных, нейтронах работают на обогащенном уране-235, которого всего 0,7% в ископаемом уране. Реакторы на быстрых нейтронах (быстрые реакторы) способны нарабатывать плутоний, вовлекая в энергопроизводство идущий сейчас в отвалы уран-238, которого в добытом сырье 99,3%. Реакторы на быстрых нейтронах считаются оптимальным способом использования урановых ресурсов. В таких реакторах возможно использовать до 80% энергии загруженного урана, по сравнению с ~ 1% в современных реакторах на тепловых нейтронах. Кроме того, в качестве топлива для быстрых реакторов может использоваться как природный уран и торий, так и обедненный уран (отвалы обогатительного производства, отработавшее топливо тепловых реакторов), а также оружейный плутоний.

Быстрые реакторы являются единственной доказанной технологией, способной обеспечить почти неограниченные поставки энергии, не зависящие от топливных ресурсов. Кроме того, применение реакторных установок на быстрых нейтронах позволит реализовать технологию «замкнутого пристанционного цикла», когда на одной площадке размещаются оба типа реакторов: ядерные энергетические установки (ЯЭУ) на тепловых нейтронах, вырабатывающие энергию; РУ на быстрых нейтронах нарабатывающая топливо для ЯЭУ и фабрика по переработке ядерного топлива, обеспечивающая загрузку реакторной установки на тепловых нейтронах.

В быстрых реакторах в качестве теплоносителя не может быть использована вода, так как она является замедлителем нейтронов. В таких реакторах в качестве теплоносителей применяются натрий и сплавы на основе натрия, свинец и сплавы на основе свинца. Однако применение жидкометаллических теплоносителей на основе свинца требует решения ряда материаловедческих проблем, связанных с выбором или разработкой конструкционных материалов, совместимых с теплоносителями при высоких температурах и обладающих при этом необходимым уровнем механических и служебных характеристик. Повреждение материалов в контакте с жидкими металлами вследствие ползучести, усталости и коррозии, может являться причиной разрушения конструкций быстрых реакторов. Основным препятствием для обоснованного выбора конструкционных материалов при изготовлении РУ на быстрых нейтронах является отсутствие экспериментальных данных по влиянию жидкометаллических теплоносителей на их длительные механические свойства. Исключением является лишь влияние жидкого натрия на конструкционные материалы, которое достаточно хорошо изучено. Возможность длительной эксплуатации РУ с натриевым теплоносителем подтверждена действующими реакторами БН 350 и БН 600. Однако возможность использования в качестве теплоносителя жидкого свинца или сплавов на основе свинца только рассматривается в рамках концепции создания реактора с естественной безопасностью типа БРЕСТ ОД-300, реакторной установки малой мощности, заводского исполнения СВБР-100 или установки MYRRA (Бельгия).

Разработка требований к материалам для быстрых реакторов с тяжелыми теплоносителями, выбор конструкционных материалов, создание новых материалов для эксплуатации в специфических условиях реакторов с жидкометаллическими теплоносителями на основе свинца начались еще в 70-х годах прошлого века применительно к транспортным установкам многоцелевых подводных лодок пр. 705. Так, в ЦНИИ КМ «Прометей» такие исследования проводились под руководством начальника лаборатории В.Г. Маркова сотрудниками В.А. Яковлевым, В.С. Лаврухиным и др. Совместно с сотрудниками НПО «ЦНИИТМАШ» разработана аустенитная кремнистая стали марки 10X15H9C3B-Ш (ЭП302-Ш). В ГНЦ РФ ФЭИ под руководством П.Н. Мартынова А.Е. Русановым, Р.Ш. Асхадуллиным, К.Д. Ивановым заложены основы по кислородному ингибированию конструкционных материалов, отработке технологии теплоносителя, разработке требований к теплоносителю и оценке сопротивления окислению конструкционных материалов в зависимости от степени шероховатости поверхности и способа ее обработки.

Цель и задачи диссертационного исследования

Цель работы являются разработка и обоснование научно-технологических принципов повышения эффективности применения конструкционных материалов различных классов в составе оборудования реакторов на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) с учетом ограничений, обусловленных влиянием ТЖМТ, на основе экспериментально-теоретической оценки работоспособности материалов принятых для изготовления основных элементов реакторной установки и теплообменного оборудования и разработки технологии повышения их эксплуатационных свойств за счет модифицирования поверхности деталей.

Задачи работы:

1. Разработка уникальных герметичных неизотермических стендов с принудительной циркуляцией свинцового и свинцово-висмутового теплоносителя с системой технологии теплоносителя, обеспечивающей заданное содержание кислорода и контролирующее его концентрацию в теплоносителе в требуемых пределах, имитирующих условия эксплуатации теплообменного оборудования РУ БРЕСТ ОД-300 (для свинцового теплоносителя), СВБР-100 (для свинцово-висмутового теплоносителя).

2. Анализ структурных изменений и процессов коррозионно-механического повреждения при длительном контакте с жидким свинцом кремнистых сталей аустенитного класса марок 10X15H9C3B-Ш (ЭП302-Ш), 03X18H13AM2C-Ш (ЭП302М-Ш) и ферритно-мартенситного класса марок 10X9HСМФБ, 16X12MBCФБР-Ш (ЭП823-Ш), а также экономно легированной стали ферритно-перлитного класса марки 09Г2С плакированной аустенитной сталью марки 10X15H9C3B-Ш (ЭП302-Ш), принятых в техническом проекте в качестве конструкционных материалов для РУ типа БРЕСТ.

3. Анализ структурных изменений и процессов коррозионно-механического повреждения при длительном контакте с жидким свинцом-висмутом сталей аустенитного класса типа X18H10T, X16H11M3; кремнистых сталей аустенитного класса марок 10X15H9C3B-Ш (ЭП302-Ш), 03X18H13AM2C-Ш (ЭП302М-Ш) и

ферритно-мартенситного класса марок 10X9HСМФБ, 16X12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш), принятых в техническом проекте в качестве конструкционных материалов для РУ типа СВБР-100.

4. Разработка и обоснование практических рекомендаций по эффективному применению конструкционных сталей различных структурных классов для изготовления основных узлов РУ с ТЖМТ с учетом ограничений, обусловленных специфическим влиянием ТЖМТ.

5. Анализ структурных изменений и процессов коррозионно-механического повреждения при длительном контакте с жидким свинцом-висмутом, а также радиационной стойкости перспективной кремнистой стали аустенитного класса марки 04X15H11C3MT-ВИ, и обоснование возможности ее применения в создаваемых транспортных ядерных энергетических установках на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями.

6. Разработка технологии модифицирования поверхности конструкционных материалов с использованием обработки электронным пучком предварительно нанесенного металлического слоя для повышения работоспособности конструкционных сталей в потоке теплоносителя.

Материалы и методы исследования

В диссертационной работе выполнены коррозионно-механические испытания конструкционных сталей аустенитного класса – марок 10X15H9C3B-Ш (ЭП302-Ш), 03X18H13AM2C-Ш (ЭП302М-Ш), 04X15H11C3MT, ферритно-мартенситного класса – марок 10X9HСМФБ, 16X12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш) и экономно легированной стали 09Г2С-АА в условиях контакта с жидким свинцом с регламентированным содержанием кислорода в теплоносителе, контакта со свинцом-висмутом и в потоке жидкометаллического теплоносителя на основе свинца и свинца-висмута. Выполнены также кратковременные и длительные механические испытания на воздухе. Определена радиационная стойкость основных материалов принятых для изготовления узлов, несущих наибольшую радиационную нагрузку. Для испытаний в потоке жидкого свинца разработаны, изготовлены и использованы четыре оригинальных стенда с принудительной циркуляцией свинцового теплоносителя с регламентированным содержанием кислорода, имитирующих условия эксплуатации теплообменного оборудования РУ БРЕСТ ОД-300, СВБР-100, а также специальные герметичные модули, позволяющие обеспечивать нагружение стандартных образцов в потоке теплоносителя. Анализ микроструктуры сталей после испытаний проводили методами оптической и электронной микроскопии с использованием металлографического инвертированного микроскопа фирмы Carl Zeiss, а также растрового электронного микроскопа JEOL с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа производства фирмы OXFORDS INSTRUMENTS. Кратковременные механические испытания проводили на разрывной машине P5, Zwick Z50 и машине для циклических испытаний УМЭ-10Т. Длительные механические испытания при постоянной нагрузке на воздухе проводили на стандартных машинах АИМА-5-2; испытания при постоянной нагрузке в потоке жидкого свинца – на машинах АИМА-5-2, смонтированных в контуры экспериментальных жидкометаллических стендов. Для всех видов испытаний использовали поверенное и аттестованное оборудование.

Научная новизна работы

1. На основе анализа и обобщения результатов комплексных исследований изменения структуры, коррозионно-механических свойств и радиационной стойкости сталей разных структурных классов в условиях, имитирующих их эксплуатацию в реакторных установках на быстрых нейтронах, предложен новый подход и обоснованы базовые критерии выбора конструкционных материалов для изготовления основных узлов реакторных установок с учетом температуры, радиационной нагрузки и влияния тяжелых жидкометаллических теплоносителей в различных ее зонах.

2. Установлено влияние температуры, уровня прочности и жесткости нагружения на структуру, кратковременные механические свойства и циклическую долговечность конструкционных сталей в контакте с жидким свинцом. Показано, что скорость роста трещин в конструкционных сталях в условиях контакта с жидким свинцом значительно изменяется с температурой; и выявлен механизм и факторы, определяющие этот процесс. Обнаружена возможность самопроизвольного хрупкого разрушения сталей с объемно-центрированной кристаллической решеткой при циклическом нагружении.

3. Изучено влияние жидкометаллического теплоносителя на скорость ползучести конструкционных сталей и выявлен его механизм. Установлено, что контакт с тяжелым теплоносителем вызывает ускорение ползучести и снижение длительной прочности по сравнению с поведением на воздухе сталей как мартенситно-ферритного, так и аустенитного классов. Ускорение ползучести обусловлено разрушением защитной оксидной пленки и проникновением жидкого металла в сталь, что приводит к окислению границ зерен и жидкометаллической коррозии.

4. Установлено, что мартенситно-ферритная сталь марки 16X12ВМСФБР-Ш (ЭП823-Ш) подвержена адсорбционному воздействию жидкометаллического теплоносителя, причем характер воздействия и механизм разрушения материала зависят от температуры теплоносителя, существенно различаясь в интервалах: 360-420 °С, 420-450 °С, >450 °С.

5. Показано, что адсорбционное воздействие жидкометаллического теплоносителя, вызывающее увеличение скорости ползучести, меньше для аустенитных сталей по сравнению с мартенситно-ферритными. Так, для аустенитной стали марки 10X15Н9СЗБ-Ш (ЭП302-Ш) при температуре 550 °С скорость ползучести в потоке жидкого свинца возрастает в 2-3 раза, а для мартенситно-ферритной стали марки 16X12ВМСФБР-Ш (ЭП823-Ш) – в 6-8 раз по сравнению с их поведением на воздухе.

6. Изучено влияние содержания кислорода в теплоносителе в ускоряющем воздействии потока ТЖМТ на скорость ползучести сталей. Показано, что увеличение концентрации кислорода в теплоносителе способствует подавлению отрицательного влияния жидкого металла на характеристики ползучести и длительной прочности сталей. Установлено, что при содержании кислорода в жидком металле выше $(3-4) \times 10^{-6} \%$, масс. характеристики ползучести при испытаниях в потоке теплоносителя и на воздухе сближаются.

7. Научно обоснован новый метод повышения эксплуатационной стойкости конструкционных сталей в потоке жидкометаллического теплоносителя с использованием перемешивания электронным пучком поверхностного слоя стали с предварительно нанесенным на нее защитным металлическим слоем и

разработана технология, обеспечивающая насыщение поверхности стали алюминием с формированием барьерного слоя из Al_2O_3 .

8. Экспериментально изучены структура и эксплуатационные свойства новой кремнистой стали марки 04X15H11C3MT-ВИ и ее сварочных материалов и обоснована перспективность ее применения для изготовления реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Показано, что исследованные материалы обладают комплексом свойств, обеспечивающим длительную безаварийную эксплуатацию реакторов на быстрых нейтронах.

Практическая значимость работы

1. Сформулированы и обоснованы практические рекомендации для выбора конструкционных материалов при проектировании и изготовлении оборудования реакторов на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями, обеспечивающие их требуемый ресурс.

2. Изучена и рекомендована для применения при изготовлении реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями новая радиационно-стойкая кремнистая сталь аустенитного класса марки 04X15H11C3MT-ВИ и ее сварочные материалы. Показаны ее эксплуатационные преимущества и перспективность по сравнению с традиционными конструкционными сталями атомного энергомашиностроения.

3. Получена уникальная база экспериментальных данных по результатам длительных испытаний конструкционных сталей разных классов в потоке жидкого свинца, необходимых при проектировании и оценке ресурса перспективных ядерных энергетических установок на быстрых нейтронах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем стационарного и транспортного типа.

4. Разработана и обоснована технология модифицирования поверхности конструкционных материалов с использованием обработки электронным пучком предварительно нанесенного металлического слоя, обеспечивающая повышение работоспособности конструкционных материалов в потоке теплоносителя и, соответственно, увеличение эксплуатационной надежности реакторных установок.

5. Созданы уникальные циркуляционные неизотермические экспериментальные стенды и специальные герметичные модули для испытаний материалов в потоке жидкого свинца с принудительной циркуляцией свинцового теплоносителя с системой технологии теплоносителя, обеспечивающей заданное содержание кислорода и контролирующее его концентрацию в теплоносителе в требуемых пределах, имитирующих условия эксплуатации теплообменного оборудования РУ БРЕСТ ОД-300, СВБР-100, перспективных транспортных реакторных установок.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанные принципы выбора материалов для проектирования, оценки ресурса и изготовления оборудования реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями на быстрых нейтронах. Закономерности изменения структуры и физико-механических свойств конструкционных сталей разных структурных классов при эксплуатации в составе реакторных установок в условиях повышенных температур, статических и динамических нагрузок, радиационного воздействия.

2. Механизм влияния жидкометаллического теплоносителя на скорость ползучести и длительную прочность аустенитных и феррито-мартенситных сталей.

Роль и влияние концентрации кислорода в теплоносителе на длительные механические свойства конструкционных сталей.

3. Механизм длительного адсорбционного воздействия жидкометаллического теплоносителя на структуру эксплуатационные свойства аустенитных и ферритно-мартенситных сталей. Физические закономерности влияния температуры и напряжений на характер адсорбционного воздействия теплоносителя.

4. База экспериментальных данных о структуре и эксплуатационных свойствах новой марки стали 04X15H11C3MT и ее сварочных материалов. Практические рекомендации по их использованию для изготовления узлов реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями на быстрых нейтронах.

5. Разработанная технология модифицирования поверхности конструкционных сталей с использованием обработки электронным пучком предварительно нанесенного на нее металлического слоя. Результаты экспериментально-промышленного опробования работоспособности конструкционных сталей разных структурных классов с модифицированным поверхностным слоем различного состава в условиях, имитирующих работу реакторных установок с тяжелыми теплоносителями на быстрых нейтронах.

6. Спроектированные, изготовленные и опробованные уникальные экспериментальные стенды и герметичные модули, а также разработанные методики для испытаний материалов в потоке жидкого свинца с принудительной циркуляцией жидкометаллического теплоносителя и системой непрерывного обеспечения и контроля заданного содержания кислорода в нем, имитирующие условия эксплуатации теплообменного оборудования реакторных установок на быстрых нейтронах.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается высокой воспроизводимостью результатов исследований, а также большим объемом данных, полученных в лабораторных условиях с использованием комплекса современного сертифицированного высокоточного оборудования; применением взаимодополняющих апробированных методик исследования структуры; корректностью постановки задач исследования, комплексным подходом к их решению с использованием современных методов и методик, привлечением статистических методов обработки результатов и критическим сопоставлением установленных в работе закономерностей; согласованностью полученных результатов существующим литературным данным и преемственностью с ранее установленными тенденциями.

Личный вклад

Личный вклад автора в получении научных и практических результатов работы, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- выборе и теоретическом обосновании направления исследований, постановке научных и технологических задач, разработке методического плана работ, основанных на всестороннем анализе большого объема известных теоретических и экспериментальных данных в области обеспечения работоспособности конструкционных материалов в потоке жидкометаллического теплоносителя реакторных установок на быстрых нейтронах;

- создании герметичных циркуляционных экспериментальных стендов и разработке методик для испытаний материалов под напряжением в потоке жидкометаллического теплоносителя с регламентированным содержанием кислорода, имитирующих условия эксплуатации основных узлов реакторных установок на быстрых нейтронах.

- участии в обработке и анализе результатов исследований конструкционных материалов после испытаний, имитирующих эксплуатационные нагрузки в составе различных узлов ядерных энергетических установок;

- обработке и анализе результатов исследований по влиянию эксплуатационного воздействия на конструкционные материалы различных зон реакторных установок на быстрых нейтронах;

- разработке технологических принципов управления формированием структуры модифицированного слоя в процессе модификации поверхности конструкционных материалов для стабильного получения требуемых характеристик коррозионной стойкости в потоке жидкометаллического теплоносителя, на основе установленных закономерностей комплексного влияния технологических параметров на процессы структурообразования при модифицировании;

- анализе и интерпретации результатов взаимосвязанного комплексного исследования структуры модифицированного слоя на всех этапах технологических операций;

- подготовке научных публикаций и докладов на научных конференциях.

Публикации и апробация работы

Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на российских и международных конференциях: The European Corrosion Congress (EUROCORR 2005), Lisbon, Portugal, 4-8 September 2005; Конференция, посвященная памяти В.А.Игнатова. ФГУП ЦНИИ КМ "Прометей", Санкт-Петербург, август 2006; «Развитие атомной энергетики на основе замкнутого топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах: инновационные технологии и материалы», Москва, ноябрь 2009г; «The eleventh international conference on material issues in design, manufacturing and operation of nuclear power plants equipment», Saint-Petersburg, 2010; American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division PVP «ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference, PVP 2013» 2013; Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов, Москва, 2013; 13-я Международная конференция «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС», Санкт-Петербург, 2014; Международная научно-техническая конференция «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», Москва, 2012; 17th European Conference on Fracture 2008: Multilevel Approach to Fracture of Materials, Components and Structures, Brno, Czech Republic, 2008.

Содержание и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 7 глав, содержащих оригинальные результаты исследований, выводов, списка цитируемой литературы, содержащего 89 источников, приложений. Общий объем диссертации составляет 411 страниц, включая 258 рисунков и 62 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследований, приведены методы исследования, показаны научная новизна, практическая значимость и личный вклад автора, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы преимущества реакторов на быстрых нейтронах по сравнению с тепловыми реакторами, а также перспективы использования жидкометаллических теплоносителей на основе свинца при создании безопасных реакторов на быстрых нейтронах.

Приведены примеры успешного опыта создания и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах в России. Рассмотрены технологические проблемы, возникающие при создании реакторов такого типа, а именно: повышенная температура в активной зоне, более высокий уровень энергонапряженности и требования по глубине выгорания топлива.

Показаны предпосылки для создания замкнутого топливного цикла с дожиганием (трансмутацией) в быстрых реакторах наиболее долгоживущих радионуклидов из отработанного ядерного топлива и его глубокой очисткой. Это обеспечит достижение радиационного баланса между захораниваемыми радиоактивными отходами и извлекаемым из недр земли ураном, что сделает реакторы на быстрых нейтронах мощным инструментом для переработки радиоактивных отходов. Переход к замкнутому ядерному топливному циклу с быстрыми реакторами позволяет решить основные задачи атомной энергетики:

- переход на использование урана-238 и плутония-239 с необходимым коэффициентом воспроизводства без накопления отработанного ядерного топлива;
- прекращение накопления и возможное использование отработанного ядерного топлива легководных реакторов;
- снижение токсичности радиоактивных отходов за счет трансмутации младших актинидов.

Проанализированы особенности использования жидких металлов в качестве теплоносителей для реакторов на быстрых нейтронах (табл. 1). При этом основное внимание уделено тяжелым жидкометаллическим теплоносителям на основе свинца, имеющим значительные преимущества по сравнению с натрием: высокая «прозрачность» для нейтронов (малое замедление и поглощение), высокая температура кипения, инертность к воздуху и воде, низкая собственная радиоактивность, высокая степень естественной циркуляции. Кроме того, на поверхности свинца возможна реализация, так называемой, γ - n реакции, что открывает возможности для создания принципиально безопасного реактора.

Основным преимуществом быстрых реакторов являются практически неограниченные запасы топлива, причем оно уже добыто, и лежит на складах и в отвалах. Возможной также становится утилизация уже накопленного отработанного ядерного топлива в тех же самых быстрых реакторах на этапе стартовой загрузки. По оценкам ученых, совместная работа "тепловых" и "быстрых" реакторов в пропорции примерно 80:20% обеспечит атомной энергетике наиболее эффективное использование урановых ресурсов.

Следует признать, что для развития энергетики с использованием реакторов на быстрых нейтронах в настоящее время существует ряд технических проблем. Значительная часть из них связана с необходимостью обоснования принципов

выбора и создания материалов для изготовления реакторов. Однако эти задачи являются решаемыми, а не эпическими как в случае термоядерных реакторов.

Таблица 1. Преимущества тяжелых жидкометаллических теплоносителей

№ п/п	Характеристика
1	Высокая температура кипения теплоносителя $T_{\text{кип}} = 2600 \text{ К}$, исключая возможность парового взрыва
2	Отсутствие давления в корпусе реактора
3	Инертность теплоносителя к контактирующим средам (вода и воздух)
4	Высокая прозрачность теплоносителя для нейтронов, позволяющая увеличить межТВЭЛЬный промежуток, снизив скорость и увеличив количество теплоносителя в активной зоне
5	Возможность использования в качестве топлива отвалного обедненного урана -238
6	Низкая собственная радиоактивность
7	Отсутствие запаса реактивности достаточного для реализации тяжелой реактивной аварии
8	Высокий уровень естественной циркуляции
9	Возможность управления ядерной реакцией на основе реализации γ -n эффекта на поверхности теплоносителя
10	Высокая плотность теплоносителя (выше чем у конструкционных материалов)

Рассмотрены также недостатки жидкометаллических теплоносителей на основе свинца: высокий удельный вес, снижающий скорость прокачки; низкая теплопроводность и высокая температура плавления (для чистого свинца), а также высокая коррозионная активность, являющаяся существенной проблемой для использования многих конструкционных сталей для изготовления оборудования реакторов. При этом показано, что жидкие металлы являются единственным теплоносителем, удовлетворяющим всем требованиям в отношении теплоотвода и ядерных свойств, предъявляемым к энергетическим реакторам на промежуточных и быстрых нейтронах, а также к реакторам-размножителям (Бридерам).

Приведены основные характеристики современных проектов реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями: БРЕСТ-ОД-300 и СВБР-100. Обсуждены их конструктивные и технологические особенности:

- интегральная конструкция;
- заводское исполнение корпуса;
- 7-летний цикл работы;
- заводская перезагрузка зоны и, как следствие, обеспечение требований нераспространения;
- полностью автоматизированное управление;
- опробованные технические решения;
- реновация энергоблоков, частно-государственное партнерство.

На основе отработанных технологий и материалов, принятых в проекте БРЕСТ-ОД-300, разрабатывается проект БРЕСТ-1200. Реакторная установка БРЕСТ-1200 электрической мощностью 1200 МВт рассматривается как базовая реакторная установка следующего этапа развития в структуре крупномасштабной ядерной России. Для БРЕСТ-1200 принята чисто бассейновая конструкция реактора, которая упрощает изготовление и монтаж реактора.

Приведены основные механизмы повреждения при взаимодействии сталей с жидкометаллическими теплоносителями на основе свинца. Рассмотрены механизмы коррозионного повреждения сталей: растворение и окисление, влияние легирующих элементов и содержания кислорода в жидком металле. Показаны две области взаимодействия конструкционных материалов с жидким свинцом (в зависимости от концентрации растворенного кислорода в теплоносителе): область, где превалирует растворение, и область, где реализуется преимущественно окисление. Показан способ защиты конструкционных сталей от агрессивного воздействия жидкого металла – способ кислородного ингибирования.

Рассмотрен механизм адсорбционного воздействия, вызывающий снижение поверхностной энергии конструкционного материала. В отличие от коррозии адсорбционное воздействие возможно лишь при совместном воздействии определенного уровня механических напряжений, так как адсорбционно-активная среда, сама по себе, не вызывает разрушения, а лишь помогает ему. Температурная зависимость адсорбционных эффектов прямо противоположна коррозионному воздействию: с повышением температуры характерно ослабление или даже полное исчезновение эффекта. В данном случае имеет место жидкометаллическое охрупчивание. Оно проявляется в снижении разрушающего напряжения или предельной разрушающей деформации и наиболее сильно реализуется при температуре, близкой к точке затвердевания жидкометаллической среды, так называемый, эффект Ребиндера.

Проанализированы условия эксплуатации теплообменного оборудования ядерных энергетических установок на быстрых нейтронах со свинцовыми теплоносителями. Рассмотрены конструкционные материалы, применяемые в перспективных реакторных установках БРЕСТ-ОД-300 и СВБР-100. Показаны особенности воздействия на конструкционные материалы эксплуатационных факторов в различных зонах реакторных установок:

- для парогенератора – одновременное воздействие теплоносителя и пароводяной среды;
- для корпуса – одновременное воздействие флюенса и потока теплоносителя;
- для элементов ВКУ – высокая температура (495 °С), воздействие теплоносителя, высокий флюенс.

Сформулированы и обоснованы задачи исследования и методы их решения. Показана возможность разработки нового способа модифицирования поверхности конструкционных сталей разных классов для защиты оборудования реакторов от агрессивного воздействия жидкометаллического теплоносителя на основе свинца.

Вторая глава посвящена экспериментальному анализу совместимости конструкционных сталей разных классов с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Выявлены предельные состояния основных элементов реакторной установки и свойства, определяющие работоспособность конструкционных материалов в контакте с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями:

- сопротивление коррозии в потоке жидкого металла,

- длительная прочность и ползучесть,
- сопротивление жидкометаллическому охрупчиванию,
- снижение циклической прочности,
- скорость распространения трещин в контакте с жидким металлом.

Установлена роль легирующих элементов в повышении коррозионной стойкости конструкционных сталей в жидкометаллических теплоносителях. Показано, что стали с повышенным содержанием кремния способны к переходу в пассивное состояние в процессе эксплуатации путем образования оксидной пленки состава $(\text{FeCrSi})_3\text{O}_4$ без каких-либо дополнительных мер, причем в отличие от материалов без кремния, эта оксидная пленка медленно нарастает и имеет более высокую прочность. Построена зависимость толщины оксидной пленки от уровня приложенных растягивающих напряжений (рис. 1).

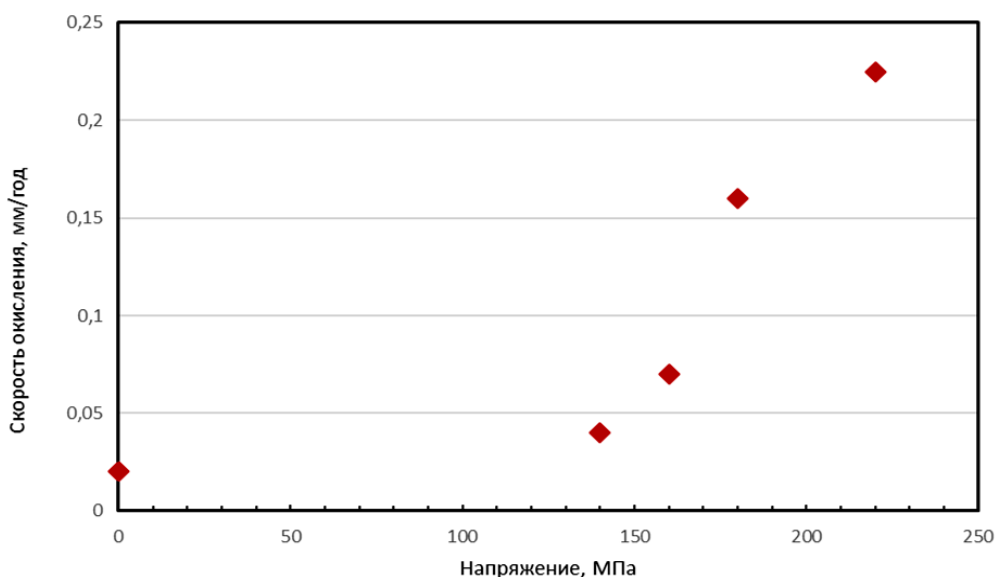


Рис. 1. Изменение толщины оксидной пленки на стали 10X15H9C3Б-Ш при 550 °C в зависимости от уровня приложенных растягивающих напряжений

Исследовано влияние воздействия жидкометаллического теплоносителя на механические свойства конструкционных сталей. Установлено дифференцированное поведение сталей разных классов. Наиболее сильно проявляется адсорбционное влияние жидких металлов (выражающееся в снижении пластических характеристик) на углеродистых сталях, в меньшей степени на легированных сталях и совершенно не чувствительны к этому эффекту стали аустенитного класса. Показано, что следствием этого эффекта является снижение циклической прочности сталей мартенситно-ферритного класса в контакте с жидкометаллическими теплоносителями.

Характерно, что влияние жидкометаллических теплоносителей на сопротивление малоциклового усталости конструкционных сталей в нормальном состоянии (т.е. без провоцирующей термической обработки, острых надрезов и т.д.) не выявлено.

При анализе кинетики роста трещин в сталях, контактирующих с жидкометаллическим теплоносителем, установлен эффект лавинообразного их роста, проявляющийся в сталях с объемно-центрированной кубической кристаллической решеткой. Установлено, что при использовании ферритных сталей с объемно-центрированной кристаллической решеткой допустимый

коэффициент интенсивности напряжений не должен превышать значение, вызывающее резкое увеличение скорости роста трещины. В сталях аустенитного класса с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой рост трещин имеет монотонный характер, а кинетика роста трещин в этих сталях в условиях контакта с жидкометаллическим теплоносителем практически не отличается от кинетики их роста на воздухе. Установлено, что в контакте с жидкометаллическим теплоносителем количество циклов до появления трещины в стали меньше, чем при нагружении на воздухе.

Исследования показали, что длительная прочность конструкционных сталей в потоке жидкометаллических теплоносителей ниже, чем на воздухе. Установлено, что причиной понижения прочности в зоне высоких напряжений является разрушение оксидных пленок и последующее коррозионное воздействие жидкого металла.

Исследовано влияние жидкого металла на параметры ползучести конструкционных материалов различных структурных классов. Скорость ползучести в потоке теплоносителя выше, чем на воздухе, причем для мартенситно-ферритных сталей этот эффект более выражен. Так, ускорение ползучести в аустенитных сталях составляет 2-2,5 раза, а в мартенситно-ферритных сталях – 6-8 раз. Обнаружено, что увеличение скорости ползучести зависит от содержания кислорода в жидкометаллическом теплоносителе: чем меньше в нем кислорода, тем выше скорость ползучести. Показано, что с целью снижения в конструкционных сталях скорости ползучести при температурах 500-550 °С необходимо повышать содержание кислорода в жидком свинце до уровня не ниже $(2-4) \times 10^{-6}$ % масс. (рис. 2).

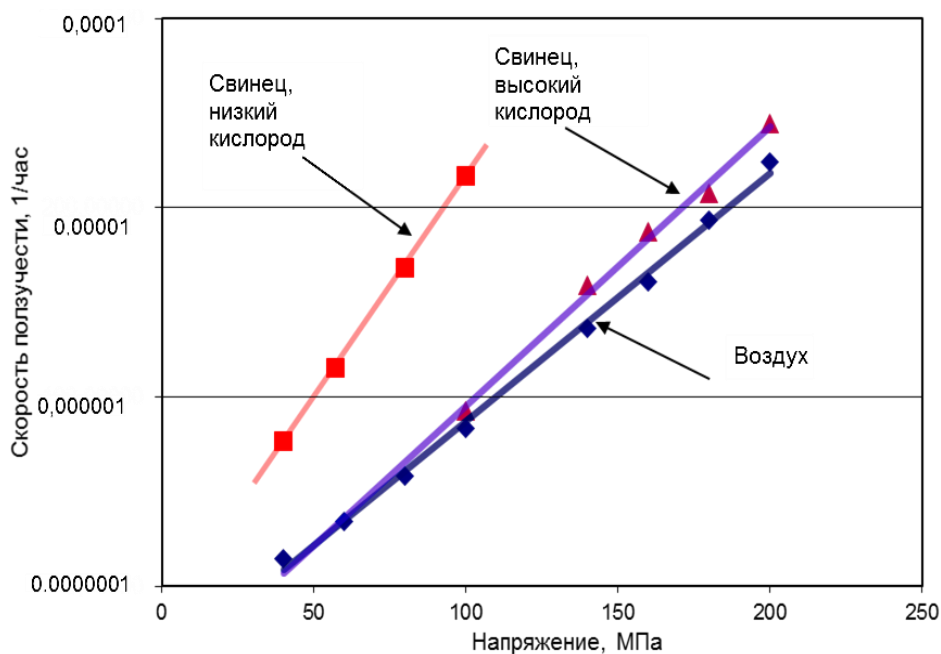


Рис. 2. Влияние содержания кислорода, уровня напряжений и окружающей среды на скорость ползучести стали 10X9H9СМФБ при температуре 550 °С

Для определения работоспособности аустенитной кремнистой стали марки 10X15H9СЗБ-Ш, принятой для изготовления основных узлов РУ с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями, в том числе и для внутриреакторных устройств, проведены испытания образцов облученных в реакторе БОР-60 до

повреждающих доз 6-27 сна. По результатам исследований построены дозные зависимости механических характеристик и величины распухания стали. Исследована ее структура и фрактография поверхности разрушения облученных образцов. Определена радиационная стойкость аустенитной кремнистой стали марки 10X15H9C3B1-I (ЭП302-Ш) применительно к условиям эксплуатации реакторных установок РУ СВБР-100 и БРЕСТ-ОД-300. Показано что, начиная с повреждающей дозы 10,5 сна, облучение нейтронами приводит к полной потере пластичности стали ЭП302-Ш, а ее характеристики трещиностойкости снижаются в 3-5 раз, в зависимости от повреждающей дозы и температуры испытания (рис. 3).

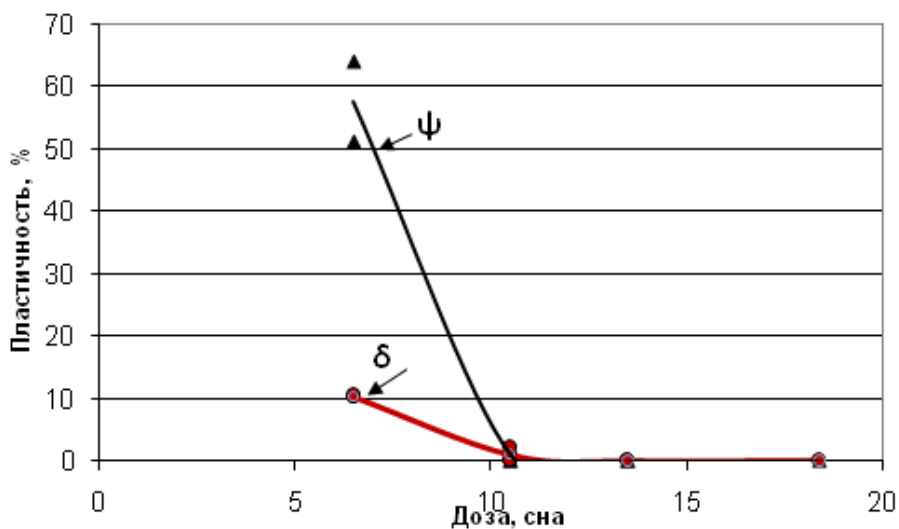


Рис. 3. Пластичность стали 10X15H9C3B-Ш в исходном и облученном состояниях с разным флюенсом в диапазоне 6-27 сна и температуре 350 °С

На основе анализа полученных экспериментальных результатов исследования сформулированы принципы выбора конструкционных сталей для изготовления корпуса реактора, внутрикорпусных устройств и теплообменного оборудования реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Показано, что выбор материалов для установок с тяжелыми теплоносителями обусловлен специфическим влиянием теплоносителя на структуру и свойства конструкционных сталей разных классов, а также жесткими условиями их эксплуатации: высокая температура, нагрузки, флюенс.

Адсорбционное влияние тяжелых жидкометаллических теплоносителей накладывает ограничения на применение сталей с объемно-центрированной кубической решеткой при температурах ниже 450 °С, а требование обеспечения радиационной стойкости существенно сужает область применения аустенитных сталей как более склонных к радиационному распуханию, особенно содержащих в своем составе кремний, снижающий радиационную стойкость. Таким образом, результаты исследования позволили установить ограничения по флюенсу и температуре на применение сталей разных классов в контакте с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями.

В третьей главе изучены особенности и механизм влияния жидкометаллических теплоносителей на основе свинца на механические свойства конструкционных материалов принятых для изготовления реакторных установок БРЕСТ-ОД-300 и СВБР-100. Обоснован оптимальный выбор конструктивного

исполнения и материалов для изготовления основных узлов установки БРЕСТ-ОД-300: парогенератора – сталь марки 03X18H13AM2C-Ш (ЭП302М-Ш), корпуса-лайнера – биметалл 09Г2С + 10X15H9C3Б-Ш (ЭП302-Ш) и внутрикорпусных устройств – сталь марки 10X15H9C3Б-Ш (ЭП302-Ш) для элементов с флюенсом ниже 9 сна и сталь марки 16X12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш) для элементов с флюенсом выше 9 сна. Для экспериментальной оценки влияния теплоносителя в ЦНИИ КМ "Прометей" разработаны и построены циркуляционные неизотермические жидкометаллические стенды и герметичные модули, позволяющие проводить испытания механических и коррозионных свойств сталей в условиях, имитирующих эксплуатацию реакторных установок на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Приведены характеристики стендов и разработанные методики испытаний материалов.

Стали марок 10X15H9C3Б-Ш (ЭП302-Ш), 03X18H13AM2C-Ш (ЭП302М-Ш), 16X12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш) и 09Г2СА-А не входят в перечень материалов, допускаемых для изготовления конструктивных элементов атомных энергетических установок, что вызывает необходимость экспериментального обоснования их применения при изготовлении элементов внутрикорпусных устройств и теплообменного оборудования РУ БРЕСТ-ОД-300.

В работе исследовали коррозионную стойкость сталей в потоке теплоносителя с регламентированным содержанием кислорода. Экспериментально получены зависимости скорости роста оксидных пленок от времени испытаний для всех применяемых конструкционных материалов.

Определены механические свойства конструкционных сталей и их сварных соединений в контакте с жидкометаллическим теплоносителем. Влияние теплоносителя выявлено только на сварных соединениях стали марки 16X12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш), для которых наблюдается снижение пластичности в контакте с жидким свинцом во всех испытаниях.

Экспериментально оценивали влияние теплоносителя на циклическую прочность конструкционных сталей разных классов. Установлено, что контакт со свинцовым теплоносителем практически не снижает значения характеристик циклической прочности, сталей марок ЭП302-Ш (10X15H9C3Б-Ш) и ЭП302М-Ш (03X18H13AM2C-Ш) с гранецентрированной кристаллической решеткой. Влияние теплоносителя выявлено только на сварных соединениях стали марки 16X12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш) с объемно-центрированной кристаллической решеткой.

Изучено влияние теплоносителя на кинетику роста трещин в сталях. Показано, что влияние теплоносителя на скорость роста трещин в аустенитных сталях не существенно и его можно не учитывать. Адсорбционное воздействие теплоносителя на стали марки 16X12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш) проявляется в существенном снижении пластичности. Фрактографический анализ поверхности образцов, испытанных в потоке жидкометаллического теплоносителя, показывает большое количество мелких трещин, образование и распространение которых происходит по типу хрупкого скола (рис. 4). Обнаружено, что такому влиянию подвержены только стали ферритно-мартенситного класса с объемно-центрированной решеткой – ЭП823-Ш (16X12МВСФБР-Ш). Аустенитные стали – ЭП302-Ш (10X15H9C3Б-Ш) и ЭП302М-Ш (03X18H13AM2C-Ш) – не склонны к проявлению жидкометаллического охрупчивания.

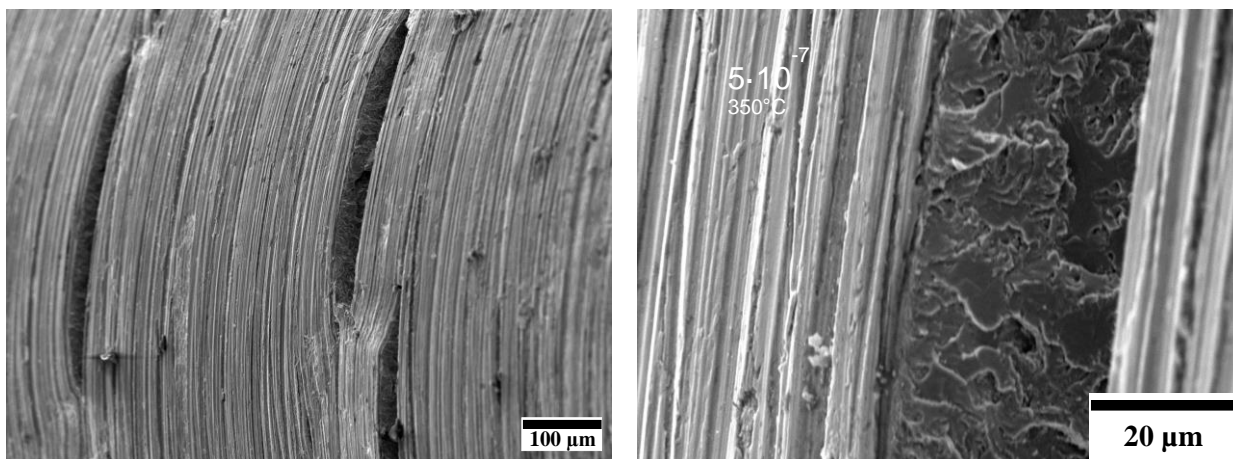


Рис. 4. Изображение поверхности образцов стали 16X12MBCФБР-Ш (ЭП823-Ш) (при разных увеличениях) после испытаний в потоке жидкометаллического теплоносителя вблизи зоны разрушения

При исследовании влияния потока теплоносителя на характеристики ползучести и длительной прочности сталей впервые показано, что скорость ползучести аустенитной хромоникелевой кремнистой стали марки 10X15H9C3Б-Ш (ЭП302-Ш) в потоке свинцового теплоносителя выше, чем на воздухе. При этом скорость ползучести стали существенно зависит от концентрации кислорода в теплоносителе (рис. 5).

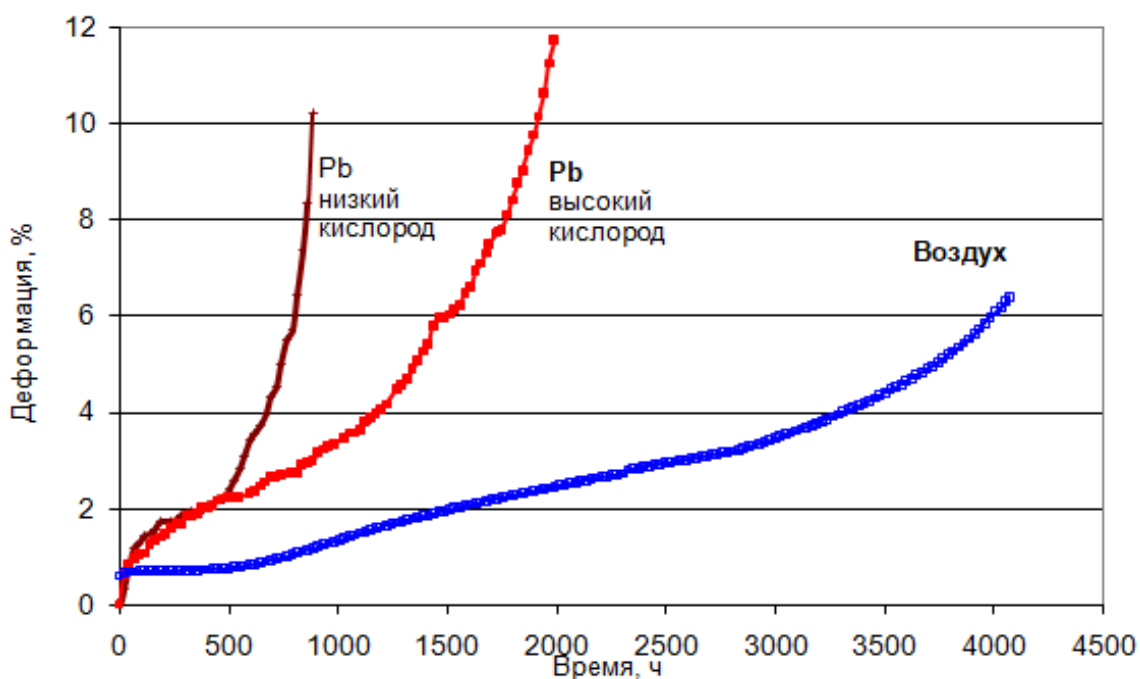


Рис. 5. Кривые ползучести стали 10X15H9C3Б-Ш при испытаниях с нагрузкой 220 МПа при температуре 550 °С в свинцовом теплоносителе с разным содержанием кислорода и на воздухе

Установлено, что скорость ползучести стали 16X12MBCФБР-Ш (ЭП823-Ш) в потоке жидкого свинца выше, чем на воздухе (рис. 6), причем различие в скорости ползучести возрастает с повышением температуры и уровня напряжений.

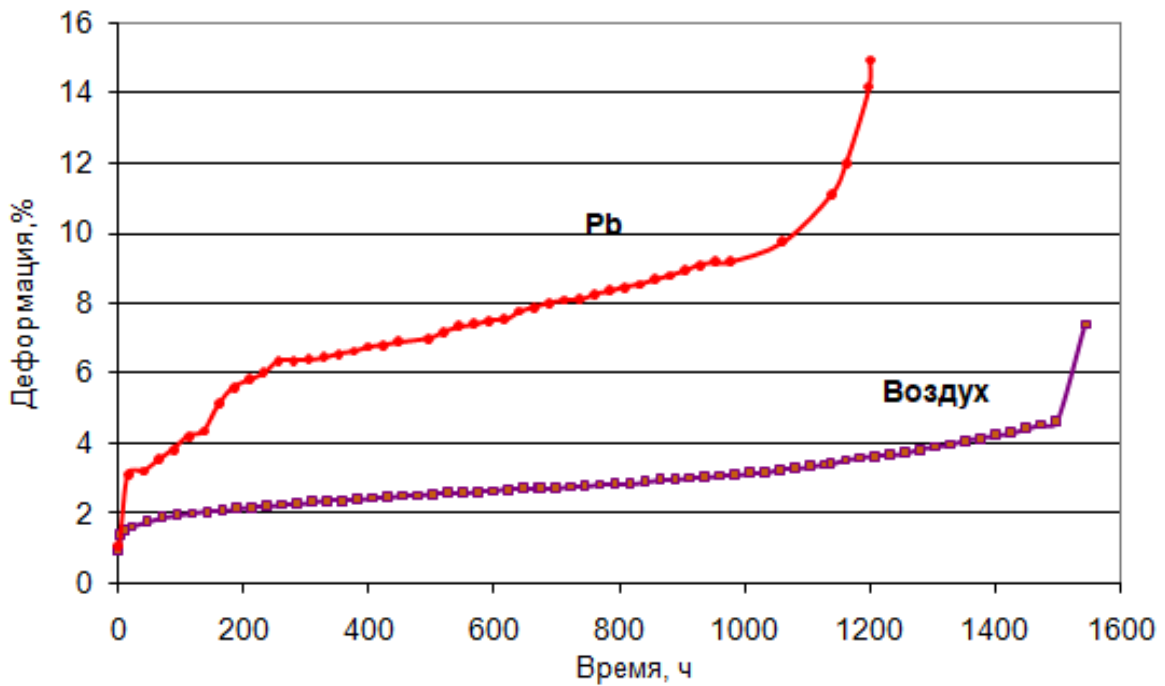


Рис. 6. Кривые ползучести стали 16X12MBCФБР-Ш (ЭП823-Ш) при испытаниях с нагрузкой 160 МПа при температуре 590 °С в свинцовом теплоносителе и на воздухе

Установлено, что длительная прочность стали марки 16X12MBCФБР-Ш (ЭП823-Ш) в потоке жидкого свинца ниже, чем на воздухе во всем исследованном интервале напряжений 100-160 МПа. Полосы разброса данных, полученные при испытаниях этой стали в свинце и на воздухе, располагаются параллельно. В отличие от нее, полосы разброса значений длительной прочности аустенитной стали марки 10X15Н9СЗБ-Ш (ЭП302-Ш) сужаются с уменьшением напряжений (рис. 7).

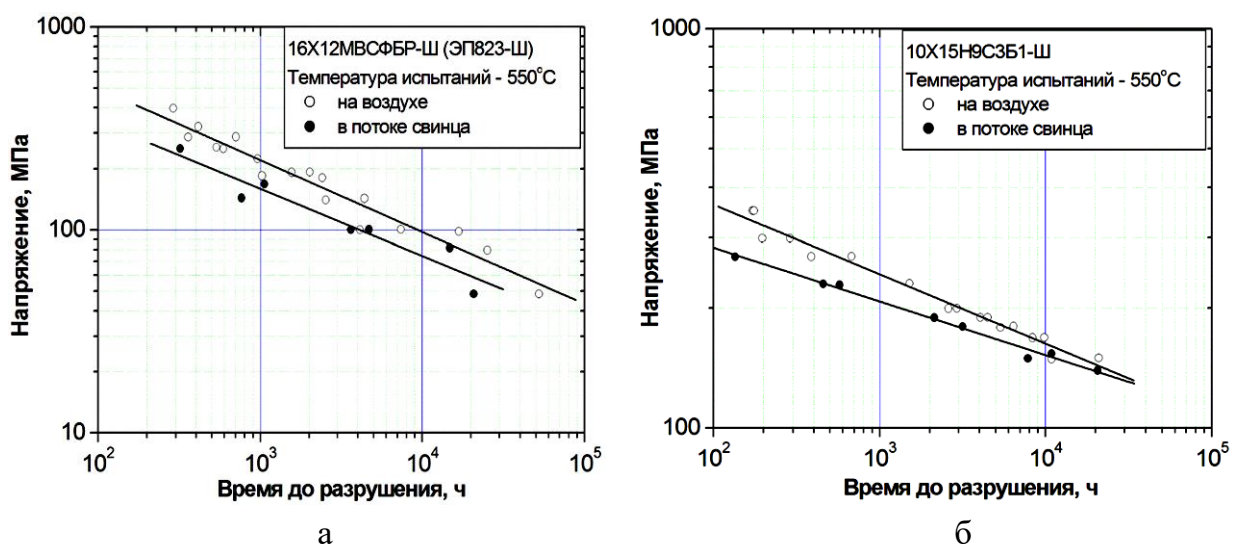


Рис. 7. Длительная прочность сталей 16X12MBCФБР-Ш (ЭП823-Ш) феррито-мартенситного класса и 10X15Н9СЗБ-Ш (ЭП302-Ш) аустенитного класса в потоке теплоносителя (свинец) и на воздухе при температурах 550 °С

Полученные результаты позволили рекомендовать для изготовления элементов конструкций реакторных установок использование стали ЭП302М-Ш в условиях нагружения не выше 160 МПа (рис. 8), а стали ЭП302-Ш – не выше 120 МПа при скорости ползучести в свинцовом теплоносителе равной скорости ползучести на воздухе.

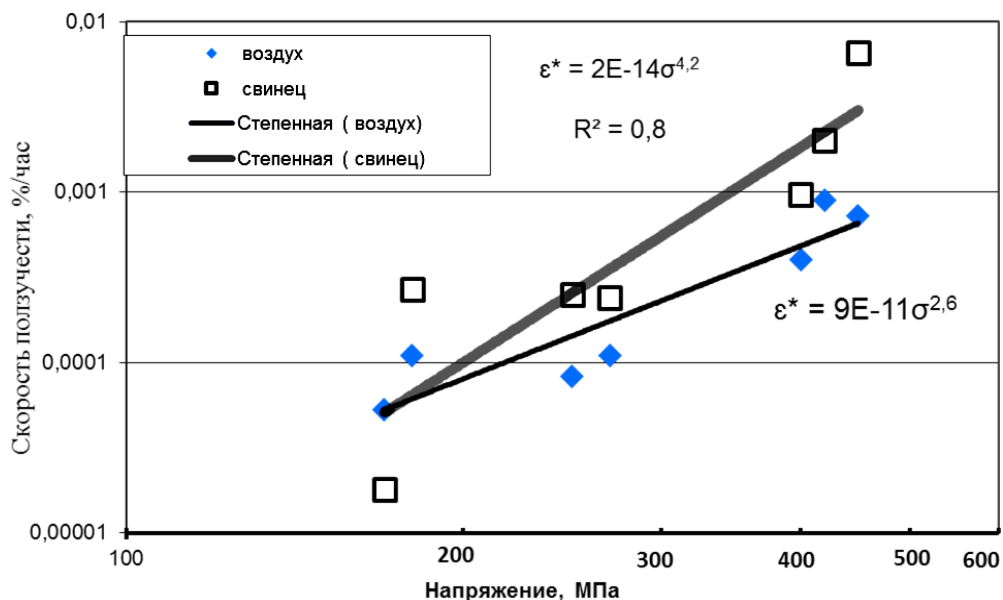


Рис. 8. Скорость ползучести стали ЭП302М-Ш при температуре 550 °С в потоке жидкого свинца и на воздухе

При исследованиях также установлено влияние уровня напряжений на процессы формирования и устойчивость оксидной пленки на поверхности сталей при эксплуатации в потоке теплоносителя. Показано, что скорость роста толщины оксидной пленки на сталях увеличивается с ростом напряжений, а при высоком их уровне возможность стабильного существования оксидной пленки на поверхности сталей отсутствует.

Четвертая глава посвящена разработке технологии создания модифицированной поверхности сталей, применяемых для изготовления оборудования реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями. Модифицирование поверхности осуществляется в два этапа: первый этап – нанесение первичного или исходного покрытия на основной конструкционный материал, второй этап – обработка полученного исходного покрытия пучком электронов заданной энергии, обеспечивающей переплавление и перемешивание первичного покрытия с поверхностным слоем основного металла с образованием интерметаллидов в модифицированном слое. Такая технология обеспечивает отсутствие резкого градиента структуры и свойств при переходе от покрытия к основному металлу и высокую адгезию покрытия к стали.

При отработке технологии модифицирования поверхности сталей оценивали влияние различных параметров на эффективность процесса:

- влияние методов нанесения первичного покрытия (холодное газодинамическое напыление, метод магнетронного напыления, шликерное алитирование, метод ионно-плазменного напыления),
- влияние количества импульсов электронного пучка,
- влияние толщины исходного покрытия,

- влияние подогрева образца перед облучением,
- влияние равномерности легирования алюминием,
- влияние параметров диафрагмы,
- влияние характеристик подложки.

Выполненные исследования позволили оптимизировать технологию модифицирования поверхности сталей и обеспечить эффективное повышение эксплуатационной стойкости конструкционных сталей и сплавов к окислению в жидкометаллических теплоносителях при повышенных температурах.

На рис. 9 показан процесс получения исходных покрытий на установке магнетронного напыления «Булат» с одновременным индивидуальным вращением образцов и предметного столика – для цилиндрических образцов и с напылением на неподвижные образцы на вращающемся предметном столике – для плоских образцов.

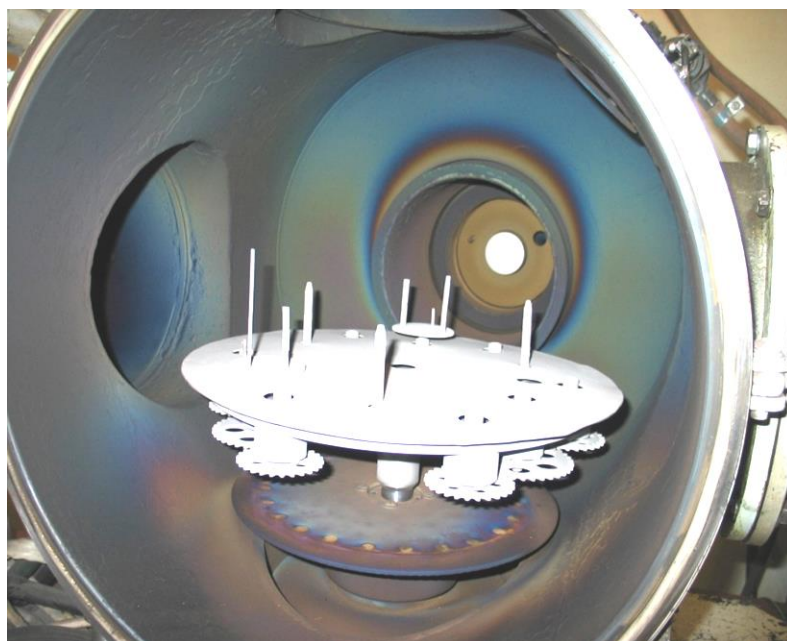


Рис. 9. Общий вид камеры установки «Булат», оснащенной планетарным механизмом для нанесения исходного покрытия на стальную подложку

В результате экспериментов отработаны параметры процесса: толщина исходного покрытия ~10 мкм и 2-3 импульса при обработке электронным пучком. Эти параметры обеспечивают высокое сопротивление стали с покрытием коррозионному растрескиванию в жидкометаллическом теплоносителе.

Установлено, что при обработке электронным пучком поверхности стали с нанесенным слоем Al происходит перемешивание Al (внедрение) с основой и образование новых интерметаллических фаз типа Al_xFe_y (рис. 10). Процесс перемешивания имеет вихревой характер. Размер отдельного вихревого образования составляет 30-50 мкм. В интервале плотности энергии пучка 45-60 Дж/см² глубина модифицированного слоя находится в пределах 20-30 мкм (рис. 11).

Концентрация внедренного алюминия зависит от плотности энергии пучка и метода нанесения покрытия. Максимальное значение концентрации Al в модифицированном слое достигается при обработке напыленного исходного покрытия пучком с плотностью энергии 45 Дж/см².

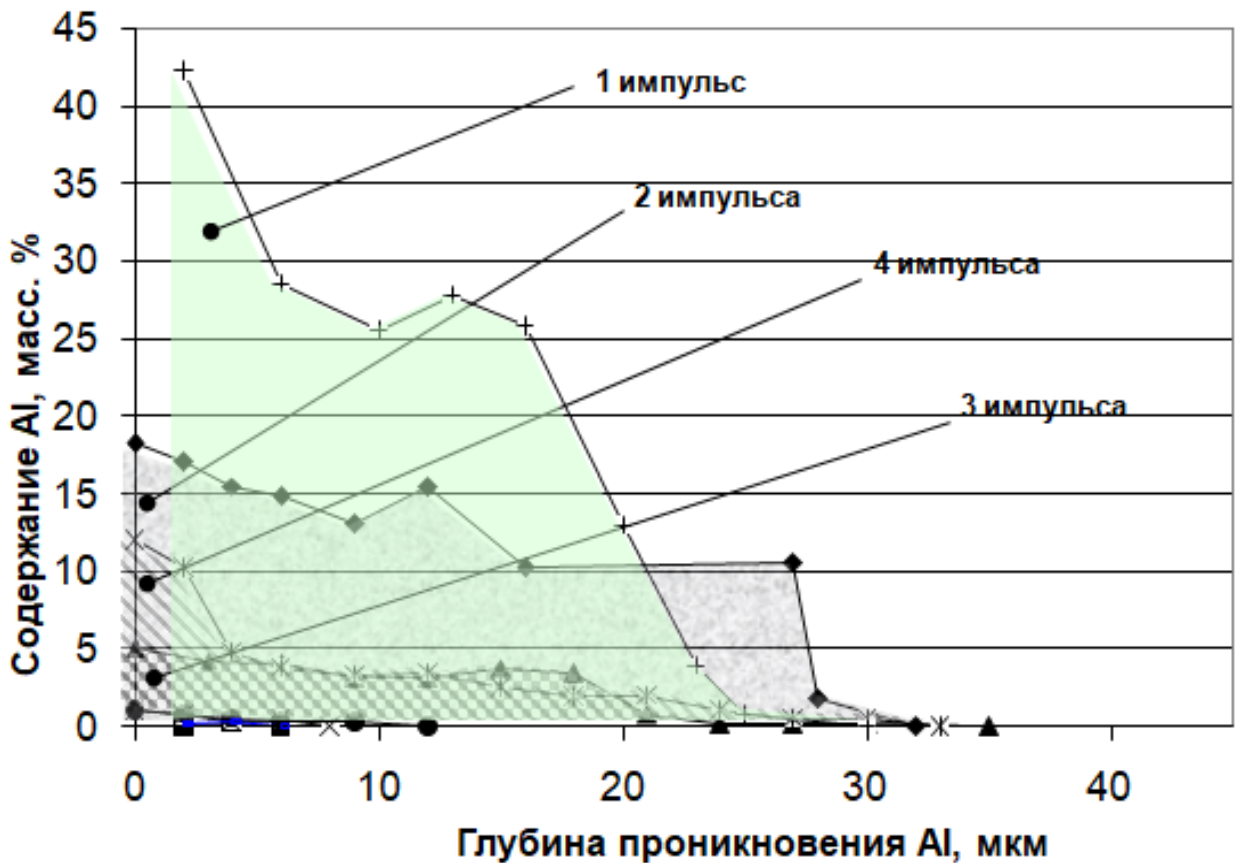


Рис. 10. Содержание алюминия в поверхностном модифицированном слое стали 10Х9НСМФБ-Ш, определенное методом микрорентгеноспектрального анализа, после обработки первичного Al покрытия толщиной 10 мкм различным количеством импульсов электронного пучка

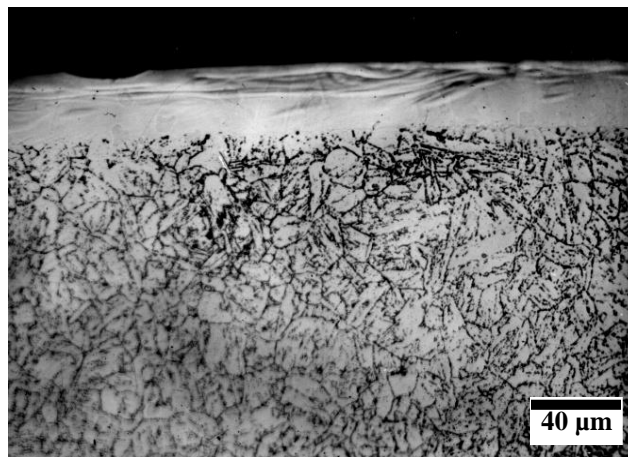


Рис. 11. Структура стали 10Х9НСМФБ-Ш с поверхностным модифицированным слоем алюминия (толщина первичного Al покрытия 10 мкм)

Исследования показали, что разработанная технология модифицирования поверхности сталей обеспечивает отсутствие трещин после испытаний в жидкометаллическом теплоносителе на поверхности мартенситно-ферритных сталей (10Х9НМФБ) и аустенитных сталей (Х16Н11М3), причем на деталях как плоской, так и цилиндрической формы (рис. 12).



Рис. 12. Планарный снимок модифицированного алюминием поверхностного слоя стали 10X9HСМФБ-III после 3-х кратной обработки электронным пучком (толщина первичного Al покрытия 10 мкм). x100

В пятой главе приведены результаты исследований влияния модифицированной поверхности на коррозионно-механические свойства стали различных классов. Выполнены сравнительные испытания коррозионной стойкости в потоке тяжелых жидкометаллических теплоносителей сталей различных классов с модифицированной поверхностью и без модифицирования. Показано, что аустенитные и мартенситно-ферритные стали без модифицирующей обработки при испытаниях в потоке сплава Pb-Vi при 650 °С подвергаются интенсивному окислению (рис. 13,б). Модифицирование поверхности стали различных классов с использованием алюминиевого покрытия кардинально снижает скорость окисления в потоке теплоносителя. На поверхности модифицированного слоя образуется чрезвычайно плотная ультратонкая оксидная пленка Al_2O_3 , сохраняющаяся в процессе всего времени испытаний. Таким образом, модифицирование алюминием поверхностных слоёв стали различных классов формирует эффективный защитный барьер и является перспективным способом защиты сталей от коррозии в потоке расплавов Pb и Pb-Vi (рис. 14).

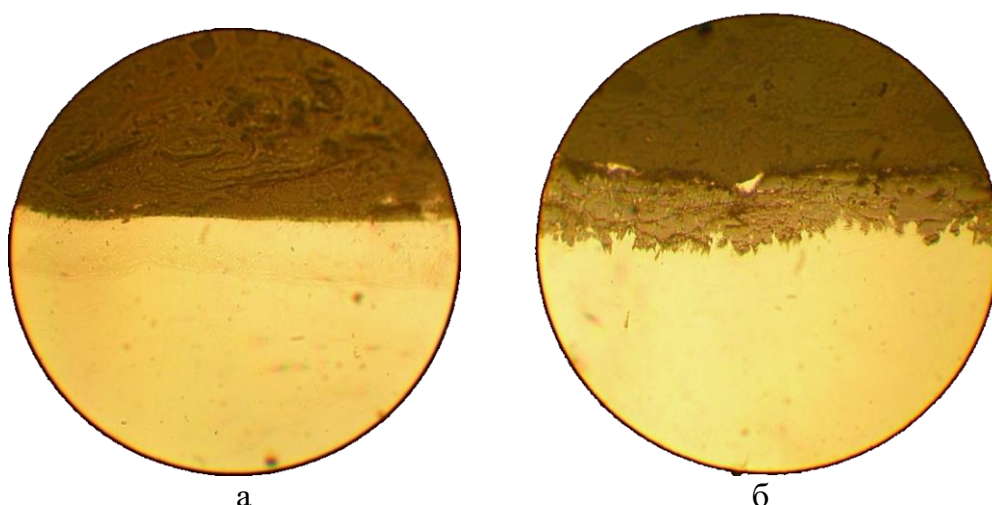


Рис. 13. Сталь 08X16N11M3 с модифицированным поверхностным слоем (а) и без модифицирования (б) после испытаний длительностью 1500 ч при 650 °С в потоке Pb-Vi теплоносителя. x100

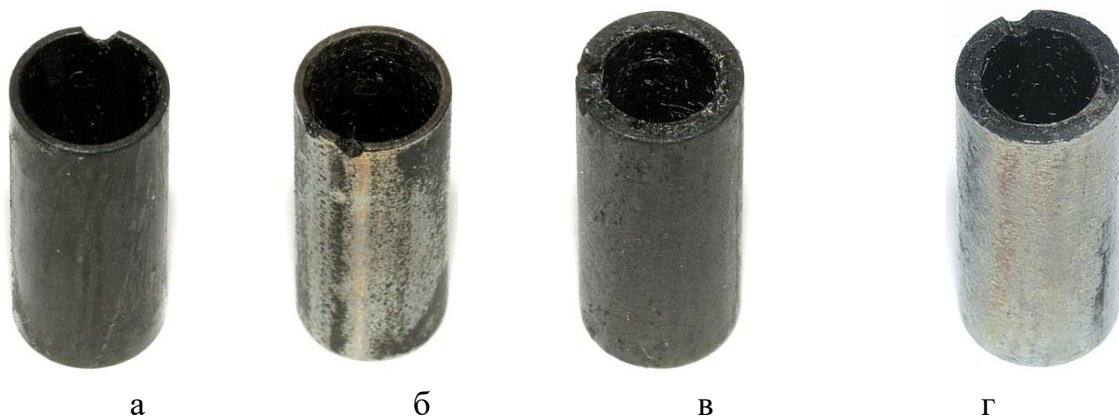


Рис. 14. Внешний вид образцов сталей после испытаний длительностью 1500 ч в потоке Pb с содержанием кислорода $C_{[O]} = 5 \cdot 10^{-5}$ масс % при $T = 650$ °C: а – 08X16H11M3, исходный; б – 08X16H11M3, алитирование, ГЕЗА; в – 10X9HMФБ, исходный; г – 10X9HMФБ, алитирование, ГЕЗА

Результаты испытаний показали, что применение технологии модифицирования стали потоком электронов с использованием алюминиевого покрытия позволила полностью заблокировать развитие жидкометаллической коррозии в Pb-Vi при максимальной температуре 650 °C и сверхнизком содержании кислорода: $C_{[O]} = 10^{-7}-10^{-8}$ масс.% и полностью предотвратить окисление при сверхвысоком содержании кислорода: $C_{[O]} = 10^{-5}$ масс.%. Это позволяет кардинально расширить кислородный диапазон нормальной эксплуатации установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями.

В связи с тем, что модифицированный поверхностный слой стали может иметь меньшее сопротивление циклической усталости по сравнению с основным металлом, было изучено влияние модифицирования поверхности на циклическую прочность образцов как на воздухе, так и в потоке жидкометаллического теплоносителя. Следует отметить, что для этого в работе предложена методика термоциклических испытаний в жидкометаллических теплоносителях при варьировании внешних температурно-силовых параметров. Разработанная методика позволяет проводить сравнительную оценку эксплуатационной стойкости модифицированного слоя, полученного различными способами на сталях разных классов.

При оценке стойкости сталей с модифицированной поверхностью при термоциклировании установлено, что в зависимости от технологии нанесения, а также толщины первичного защитного слоя характер разрушения модифицированного слоя меняется. При этом модифицированный поверхностный слой на мартенситной стали более стоек к термоциклическому воздействию по сравнению с аустенитной сталью. Однако в целом полученные результаты показали отсутствие существенного отрицательного влияния модифицирования поверхности на сопротивление малоциклового усталости стали как при испытаниях на воздухе, так и в жидкометаллическом расплаве Pb-Vi с регламентированным содержанием кислорода.

Результаты экспериментального определения характеристик ползучести и длительной прочности сталей с модифицированной поверхностью показали, что до величины деформации, приводящей к разрушению модифицированного слоя, скорость ползучести стали с модифицированным слоем в свинце и на воздухе

практически одинаковая. Следовательно, назначая уровень рабочих напряжений в деталях и узлах реакторных установок при эксплуатации ниже того, который приводит к разрушению модифицированного слоя на поверхности сталей, применяемых для их изготовления, можно полностью подавить негативное воздействие жидкометаллического теплоносителя на материал (рис. 15).

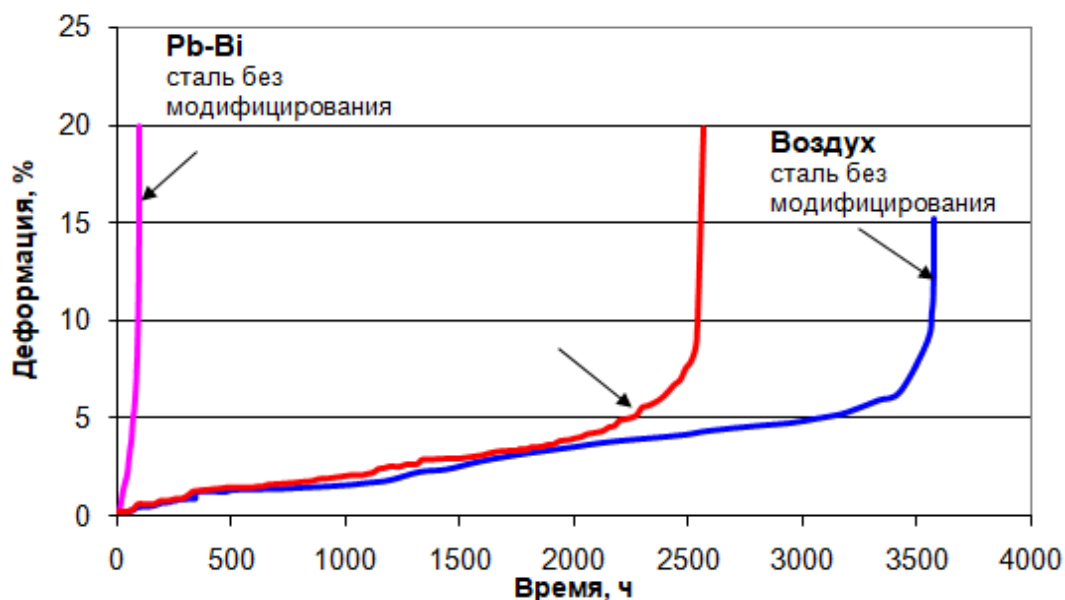


Рис. 15. Кривые ползучести стали 10Х9НМФБ в исходном состоянии и с модифицированным слоем в контакте с жидким свинцом-висмутом и на воздухе при температуре 550 °С и нагрузке 200 МПа

Количественная оценка квазипластичности модифицированного поверхностного слоя исследованных сталей при разных температурах испытания (на установке ИМАШ-6С) показала, что при скорости деформирования $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ величина квазипластичности модифицированного слоя аустенитной стали составляет 1,4-1,6 %, а мартенситно-ферритной – 1,9-2,2 %. На основании построенной температурной зависимости величины квазипластичности модифицированного слоя установлено, что его температура перехода в хрупкое состояние составляет $\sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом при температуре $700 \text{ }^\circ\text{C}$ пластичность модифицированного слоя возрастает до 9 %.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют, что модифицирование алюминием поверхностных слоёв стали различных классов с использованием разработанной технологии является эффективным способом защиты конструкционных материалов от коррозии в потоке расплавов Рb и Рb-Вi.

Шестая глава посвящена разработке перспективной конструкционной стали для изготовления элементов оборудования реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями на основе свинца.

В ЦНИИ КМ «Прометей» были проведены работы по модернизации состава аустенитной кремнистой стали марки 10Х15Н9СЗБ-Ш (ЭП302-Ш). По результатам анализа литературных данных и собственных экспериментальных исследований для повышения стабильности аустенита в структуре стали было регламентировано увеличить в ее составе содержание никеля до 10,5-12,0 масс.% и уменьшить содержание углерода $< 0,05 \text{ масс.}\%$, а для улучшения технологичности заменить легирование ниобием на введение небольшого количества титана – до 0,15 масс.%.

Кроме того, для повышения жаропрочности в состав стали введен молибден в количестве ~ 1 масс.%.
 Результаты последующих испытаний показали перспективность предложенной марки стали. Сталь марки 04X15H11C3MT обладает структурной стабильностью, не склонна к локальным разрушениям околошовной зоны и обладает высокой технологичностью. Она имеет более высокую длительную прочность и пластичность при температурах 500-550 °С по сравнению со стандартной сталью 10X15H9C3B1-Ш (ЭП302-Ш). В табл. 2 приведены сравнительные характеристики новой стали марки 04X15H11C3MT-ВИ и стали марки ЭП302-Ш.

Таблица 2. Сравнительные характеристики склонности стандартной стали 10X15H9C3B1-Ш (ЭП302-Ш) и новой стали 04X15H11C3MT-ВИ к деградации свойств при эксплуатации энергетического оборудования

№ п/п	Свойства стали	Марка стали	
		10X15H9C3B1-Ш (ЭП302-Ш)	04X15H11C3MT-ВИ
1	Склонность к локальным разрушениям в ОШЗ при тепловых выдержках	Разрушение тавровых сварных образцов через 100 ч при 650 °С	Не выявлено разрушения при 550 °С за 100000 ч
2	Охрупчивание при длительных тепловых выдержках	Ударная вязкость снижается до KCV = 42-44 Дж/см ² после старения 10000 ч при 500 °С и 550 °С	Ударная вязкость выше KCV = 100 Дж/см ² после старения 10000 ч при 500 °С и 550 °С
3	Склонность к охрупчиванию вследствие мартенситного превращения при холодной пластической деформации	Полностью охрупчивается ($\delta = 0\%$, $\psi = 0\%$) после холодной пластической деформации $\epsilon = 24\%$ и последующей тепловой выдержки при 340-450 °С в течение 500-3000 ч	При холодной деформации до $\epsilon = 17\%$ образуется незначительное количество мартенсита (~ 1 объемн.%), что не влияет на пластичность стали при тепловых выдержках
5	Склонность к образованию горячих трещин при сварке	Повышенная: $\Delta T = 150\text{ °С}$	Низкая: $\Delta T = 60\text{ °С}$
6	Длительная прочность	Величина длительной прочности за время 100000 ч при температуре 500 °С составляет 113 МПа	Величина длительной прочности за время 100000 ч при температуре 500 °С составляет 248 МПа
7	Длительная пластичность	Относительное сужение при разрыве уменьшается при увеличении длительности испытаний. Минимальное значение $\psi_p = 12,6\%$ после испытаний 6361 ч	Величина относительного сужения в течение испытаний до 40000 ч не снижается ниже 20 %

Учитывая, что сталь марки ЭП302-Ш обладает низкой радиационной стойкостью и уже при 10 сна имеет нулевые значения пластичности, целесообразно было экспериментально сравнить влияние нейтронного облучения на механические свойства стандартной стали и новой стали марки 04X15H11C3MT-ВИ. Результаты испытаний показали, что начиная с повреждающей дозы 10,5 сна, облучение нейтронами приводит к полной потере пластичности стали ЭП302-Ш, тогда как сталь 04X15H11C3MT-ВИ сохраняет ненулевые значения пластичности до 18,4 сна, причем ни одного случая полного охрупчивания облученных образцов этой стали не наблюдалось (рис. 16).

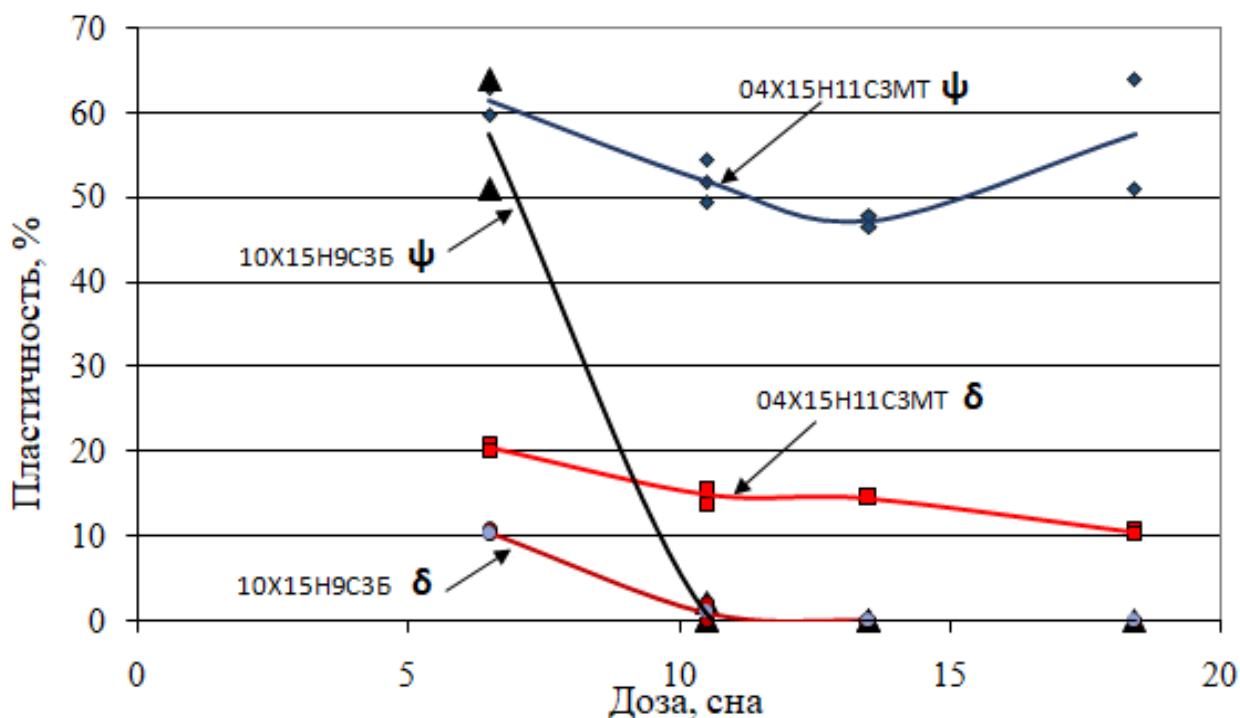


Рис. 16. Пластичность стандартной стали 10X15H9C3Б-Ш и новой стали 04X15H11C3MT-ВИ в исходном и облученном с разным флюенсом (6-27 сна) при температуре 350 °С состояниях

Таким образом, экспериментально показано, что разработанная сталь марки 04X15H11C3MT обладает совокупностью преимуществ, обеспечивающих технологичное изготовление из нее и длительную безаварийную эксплуатацию деталей и оборудования в составе реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими свинцовыми и свинцово-висмутовыми теплоносителями.

В седьмой главе на основе полученных в диссертационной работе экспериментальных результатов и их обобщения сформулированы принципы выбора конструкционных сталей для изготовления оборудования реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Показано, что конструкционные материалы, принятые для изготовления реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями на основе свинца, необходимо выбирать с учетом специфического воздействия жидкометаллического теплоносителя на структуру и свойства сталей. При этом характер и степень воздействия теплоносителя на сталь значительно зависят от концентрации кислорода, растворенного в жидком металле.

Для изготовления реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями рекомендованы несколько марок стали разных классов. Экспериментально обосновано, что рекомендуемые материалы обладают высокими механическими свойствами и коррозионной стойкостью в жидкометаллическом теплоносителе и на воздухе.

Показано, что стали аустенитного класса имеют преимущество для работы в контакте с жидкометаллическими теплоносителями по сравнению с мартенситно-ферритными сталями. Эти стали не чувствительны к жидкометаллическому охрупчиванию и имеют низкую скорость окисления, а их характеристики длительной прочности и ползучести несущественно изменяются в среде жидкого металла по сравнению с воздухом.

Однако для сталей обоих классов существуют ограничения по флюенсу и температуре на применение в условиях такого контакта (рис. 17). Адсорбционное влияние жидкометаллического теплоносителя накладывает ограничения на применение мартенситно-ферритных сталей при температурах ниже 450 °С, а требование обеспечения радиационной стойкости существенно сужает область применения аустенитных сталей как более склонных к радиационному распуханию и обладающих пониженной радиационной стойкостью.

Альтернативой применения в реакторных установках с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями стандартных мартенситно-ферритных и аустенитных сталей может стать новая разработанная аустенитная сталь марки 04X15H11C3MT (рис. 17). Экспериментально обосновано, что это материал имеет более стабильную структуру, высокие радиационную стойкость, механические свойства и технологичность.

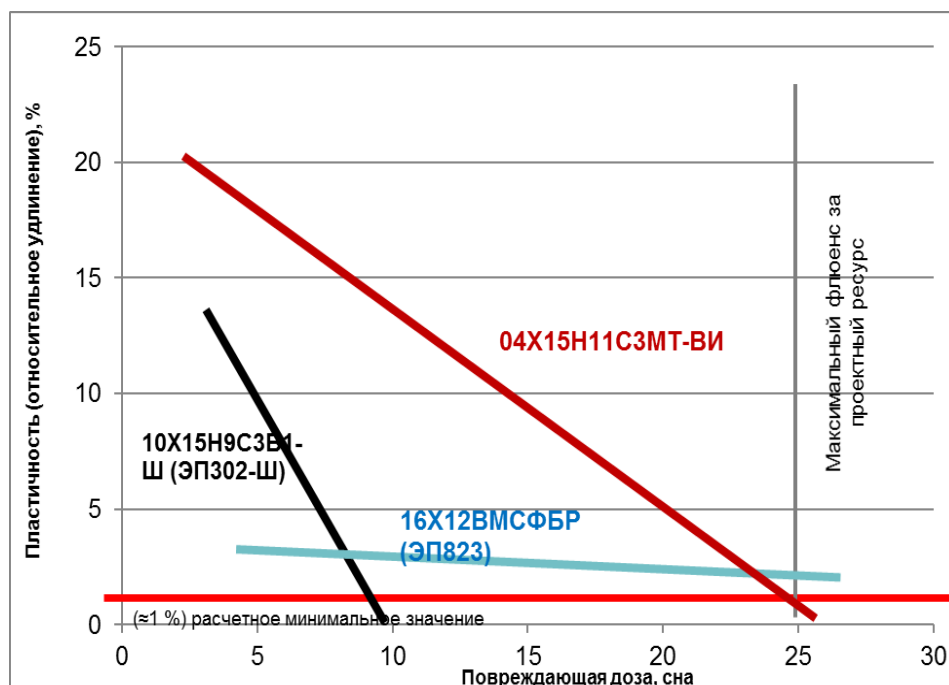


Рис. 17. Радиационная стойкость конструкционных сталей: ферритно-мартенситного класса – 16X12BMCФБР (ЭП823-Ш), аустенитного класса – 10X15H9C3B1-Ш (ЭП302-Ш) и новой аустенитной стали 04X15H11C3MT-ВИ

При выборе конструкционных материалов для изготовления реакторных установок необходимо учитывать условия работы конкретных узлов оборудования.

Так, теплообменные трубки парогенератора в ядерных энергетических установках с жидкометаллическим теплоносителем в процессе эксплуатации подвергаются воздействию воды второго контура изнутри и жидкометаллического теплоносителя снаружи. Таким образом, материал теплообменных трубок должен обладать высоким сопротивлением адсорбционному воздействию и окислению в жидкометаллическом теплоносителе, а также быть коррозионностойким в воде второго контура. Соответственно, в связи с высокими давлением и температурой во втором контуре, материал должен обладать высокой жаропрочностью. В настоящее время стандартным материалом для изготовления теплообменных труб парогенератора является аустенитная хромоникелевая сталь с кремнием марки 03X18H13AM2C-Ш (ЭП302М-Ш), разработанная специально для этих условий эксплуатации. Однако эта сталь, как и большинство сталей аустенитного класса, склонна к локальным видам коррозионного повреждения. Несмотря на то, что исследования коррозионной стойкости этой стали в условиях эксплуатации парогенератора показали ее более высокую стойкость к МКК по сравнению со сталью X18H10T, однако при определенном содержании кислорода коррозионное повреждение стали наблюдалось. Это обстоятельство накладывает жесткие требования по чистоте воды второго контура, причем как по содержанию хлоридов, так и по содержанию кислорода. Альтернативой стандартной стали 03X18H13AM2C-Ш (ЭП302М-Ш) может стать биметаллический материал 10X15H9C3Б-Ш (ЭП302-Ш) + 03X21H32M3Б-ВИ (ЧС33-ВИ) разработки ЦНИИ КМ «Прометей» (Трубы биметаллические бесшовные холоднодеформированные из стали марок 10X15H9C3Б-Ш и 03X21H32M3Б-ВИ, ТУ 5.961-11733-2000). Это является особенно актуальным, когда обеспечение требуемого низкого уровня хлоридов и кислорода и поддержание соответствующего качества воды второго контура в течение всего срока эксплуатации установки технически не представляется возможным. В таком случае, биметалла обеспечит применение со стороны каждой из контактирующих сред наиболее работоспособного материала.

Суммируя все практические рекомендации для выбора конструкционных материалов при изготовлении реакторных установок с жидкометаллическими теплоносителями, можно предложить следующее конструктивное исполнение реакторной установки интегрального типа.

Для установки СВБР-100:

- парогенератор: биметалл 10X15H9C3Б-Ш (ЭП302-Ш) + 03X21H32M3Б-ВИ (ЧС33-ВИ) для изготовления теплообменных трубок;
- корпус: сталь 08X18H10T в контакте с теплоносителем при низкой температуре < 400 °С;
- внутрикорпусные устройства: сталь 04X15H11C3MT.

Для установки БРЕСТ-ОД-300:

- парогенератор: сталь 03X18H13AM2C-Ш (ЭП302М-Ш) для изготовления теплообменных трубок при условии обеспечения очень низкого содержания хлоридов и кислорода и поддержания этого качества воды второго контура в течение всего периода эксплуатации;
- корпус: биметалл плакированная низколегированная сталь 09Г2С + 10X15H9C3Б-Ш в контакте с теплоносителем при относительно низкой температуре < 425 °С;
- внутрикорпусные устройства: сталь 10X15H9C3Б-Ш (ЭП302-Ш) для элементов с флюенсом < 6 сна и сталь 16X12ВМСФБР-Ш (ЭП823-Ш) для элементов с флюенсом > 4-6 сна.

Полученные в диссертационной работе результаты и заключения позволяют также предложить материалы для изготовления перспективной транспортной ядерной энергетической установки с жидкометаллическим теплоносителем свинец-висмут при температуре теплоносителя до 550 °С и повреждающих дозах радиационного излучения до 23 сна. В этом случае предполагается использование материалов нового поколения, сочетающих высокие коррозионную стойкость в свинцово-висмутовом теплоносителе и сопротивление адсорбционному, радиационному и тепловому охрупчиванию (рис. 18).

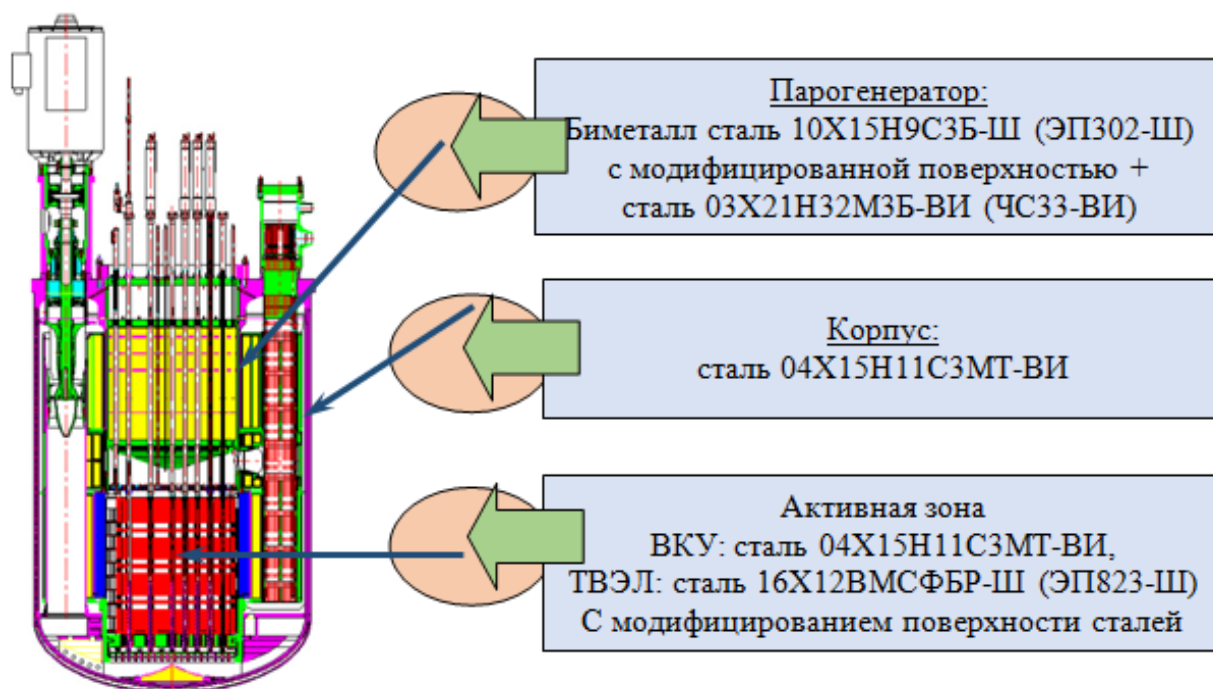


Рис. 18. Схема и рекомендуемые конструкционные материалы для изготовления основных узлов перспективной интегральной реакторной установки транспортного типа

Для материала корпуса реактора и крупногабаритного внутрикорпусного оборудования важнейшим критерием является технологичность на всех стадиях передела и, в особенности, при сварке в заводских и монтажных условиях, в которых последующая термическая обработка затруднена или невозможна. Материалы толстостенных деталей внутрикорпусных конструкций, работающих при температурах 500-550 °С, должны обладать стойкостью против локальных разрушений в околошовной зоне. Учитывая требования к технологичности, корпус реактора и другие крупногабаритные элементы целесообразно изготавливать из хромоникелевой аустенитной стали, не требующей проведения термической обработки после сварки. Таким материалом является перспективная аустенитная хромоникелевая кремнистая сталь марки 04X15H11C3MT-ВИ.

Одной из главных проблем при эксплуатации установки с жидкометаллическим теплоносителем на основе свинца является проблема поддержания содержания кислорода в теплоносителе в достаточно узких пределах $1-4 \times 10^{-6}$ масс.%. С целью создания условий, обеспечивающих возможность существенного расширения границ допустимой концентрации кислорода в жидкометаллическом теплоносителе, предлагается технология модифицирования поверхности конструкционных материалов, заключающаяся в нанесении на

поверхность стали первичного алюминиевого покрытия методом магнетронного напыления с последующей обработкой поверхности пучком электронов с определенной поверхностной энергией. В случае применения к оболочкам ТВЭЛ, такая технология позволит расширить диапазон концентрации кислорода в теплоносителе более чем на порядок.

Испытания материала оболочек ТВЭЛ при повышенном содержании кислорода в жидкометаллическом теплоносителе и при повышенной до 650 °С температуре (условия наиболее благоприятные для активного роста оксидных пленок) показали, что модифицирование поверхности с использованием разработанной технологии практически полностью блокирует окисление поверхности материала и рост оксидных пленок (рис. 19).

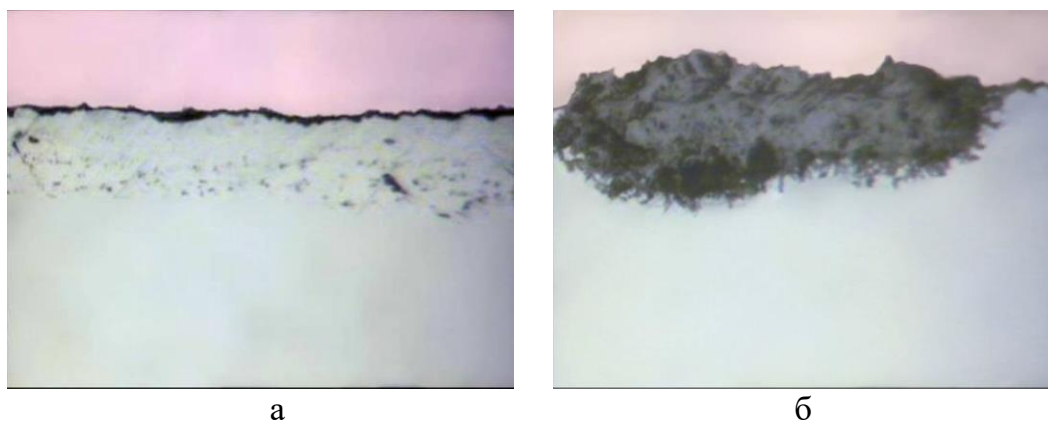


Рис. 19. Изображение поверхности стали ЭП823 после коррозионных испытаний в потоке свинца с концентрацией кислорода $C_{[O]} = (5-8) \times 10^{-5}$ масс.% при температуре 650 °С длительностью 5000 ч: а – с модифицированием поверхности (магнетронное напыление Al-10 мкм + ГЕЗА-1), б – в состоянии заводской поставки. $\times 100$

Результаты коррозионных испытаний, выполненные при варьировании параметров окружающей среды в широком диапазоне: концентрация кислорода 10^{-8} - 10^{-4} масс.%, длительность до 16000 ч, температура 450-650 °С, с приложением механической нагрузки и без нее, позволяют заключить, что применение Al + GE ZA для модифицирования поверхности стали ЭП823 существенно повышает ее коррозионную стойкость в Pb и Pb-Vi теплоносителях. При этом механические свойства стали практически не изменяются, микротвердость поверхности увеличивается. На рис. 20 показан внешний вид оболочек ТВЭЛ из стали ЭП823 после модифицирования поверхности с использованием установки с радиально сходящимся электронным пучком.

Таким образом, экспериментально доказано, что применение разработанной технологии модифицирования поверхности сталей электронным пучком с перемешиванием основного и поверхностного слоев позволяет расширить диапазон концентраций кислорода в жидкометаллическом теплоносителе в сторону повышения содержания кислорода больше чем на порядок. Соответственно, это позволяет расширить пределы нормальных условий эксплуатации по допустимой концентрации кислорода в жидкометаллическом теплоносителе, что значительно упрощает эксплуатацию реакторных установок за счет снижения нагрузки на систему технологии теплоносителя.

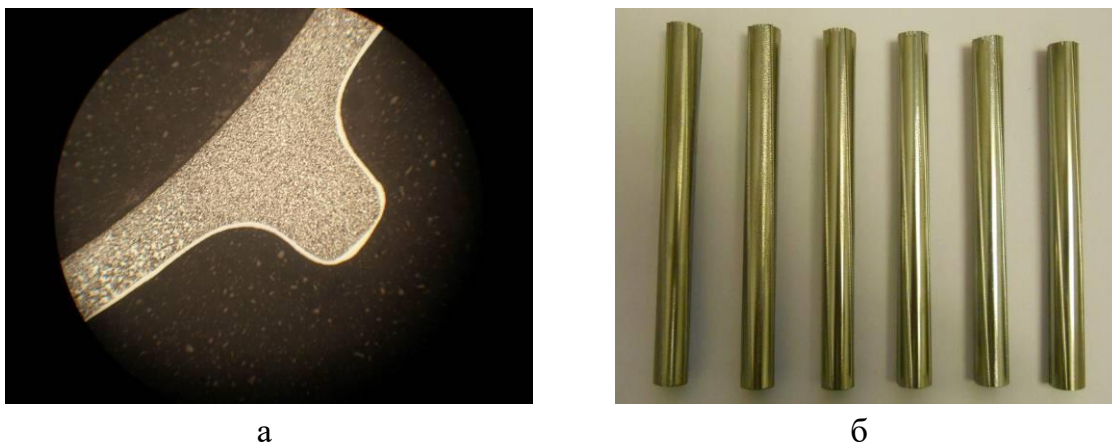


Рис. 20. Поперечный макрошлиф (x50) образца оребренной оболочки ТВЭЛ из стали ЭП823 после Al + GE 3A модифицирования поверхности электронным пучком с энергией электронов 120 кэВ и плотности мощности 45 Дж/см² (а) и внешний вид образцов оболочек ТВЭЛ с модифицированной поверхностью (б)

Модифицирование поверхности стальных деталей по предложенной технологии, кроме оболочек ТВЭЛ и теплообменных трубок парогенератора, может применяться также для повышения кавитационной стойкости лопаток главных циркуляционных насосов реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями.

Таким образом, можно считать, что разработанная технология модифицирования поверхности обоснована и достаточно отработана, что позволяет рекомендовать ее применение для промышленного использования после проведения необходимых исследований радиационной стойкости обработанных изделий реакторных установок.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе результатов экспериментально-теоретического анализа влияния условий эксплуатации реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями на структуру и свойства конструкционных сталей различных структурных классов сформулированы принципы выбора материалов для проектирования, оценки ресурса и изготовления энергетического оборудования. Исследованы и рекомендованы марки стали для изготовления разных узлов реакторной установки с учетом конкретных условий их эксплуатации: контакта с жидкометаллическим теплоносителем, температурного интервала, радиационной нагрузки.

2. Выявлены закономерности влияния температуры, уровня прочности и жесткости нагружения на структуру, кратковременные и длительные статические и циклические механические свойства конструкционных сталей разных классов в контакте с жидким свинцом.

3. Установлено, что контакт с жидким свинцом приводит к снижению циклической долговечности сталей аустенитного и ферритно-мартенситного классов. Показано, что скорость роста трещин в конструкционных сталях в условиях контакта с жидким свинцом зависит от температуры; изучен механизм и установлены факторы, определяющие этот процесс. Показана возможность

самопроизвольного хрупкого разрушения сталей с объемно-центрированной кристаллической решеткой при циклическом нагружении.

4. Изучен механизм влияния жидкометаллического теплоносителя на скорость ползучести конструкционных сталей. Установлено, что контакт с тяжелым теплоносителем вызывает ускорение ползучести и снижение длительной прочности мартенситно-ферритных и аустенитных сталей по сравнению с поведением этих материалов на воздухе. Показано, что ускорение ползучести обусловлено разрушением защитной оксидной пленки и проникновением жидкого металла в сталь, что приводит к окислению границ зерен и жидкометаллической коррозии.

5. Выявлена роль и установлено влияние концентрации кислорода в теплоносителе на характеристики ползучести и длительной прочности конструкционных сталей. Показано, что увеличение концентрации кислорода в теплоносителе способствует подавлению отрицательного влияния жидкого металла на длительные механические свойства сталей. При содержании кислорода в жидком металле $> (3-4) \times 10^{-6} \%$, масс. характеристики ползучести стали при испытаниях в потоке теплоносителя и на воздухе становятся сопоставимыми по величине.

6. Установлено, что мартенситно-ферритная сталь марки 16X12ВМСФБР-Ш (ЭП823-Ш) подвержена адсорбционному воздействию жидкометаллического теплоносителя, причем характер воздействия и, как следствие, механизм разрушения стали зависят от температуры теплоносителя. Показано, что при понижении температуры жидкого металла механизм разрушения стали изменяется с вязкого на хрупкий. При относительно низких температурах 360-420 °С образование и распространение трещин в стали происходит по типу хрупкого скола, что приводит к резкому снижению ее пластичности практически без снижения прочности. Это явление обусловлено эффектом Ребиндера. При температурах выше 450 °С этот эффект исчезает. Однако повышение температуры в этом случае приводит к появлению другого эффекта адсорбционного воздействия жидкометаллического теплоносителя: увеличения скорости ползучести, более раннем переходе в третью стадию ползучести и, как следствие, снижению длительной прочности по сравнению с испытаниями на воздухе. С повышением температуры и увеличением напряжений этот эффект усиливается.

7. Показано, что адсорбционное влияние жидкометаллического теплоносителя, вызывающее увеличение скорости ползучести, значительно слабее проявляется в аустенитных сталях по сравнению с ферритно-мартенситными. Так, при температуре 550 °С скорость ползучести аустенитной стали марки 10X15Н9СЗБ-Ш (ЭП302-Ш) в потоке жидкого свинца возрастает в 2-3 раза, а для ферритно-мартенситной стали марки 16X12ВМСФБР-Ш (ЭП823-Ш) – в 6-8 раз по сравнению с испытаниями на воздухе.

8. Впервые систематически изучены структура и эксплуатационные свойства новой марки стали 04X15Н11СЗМТ и ее сварочных материалов, являющихся результатом эволюционного развития стали марки 10X15Н9СЗБ1-Ш и ее сварочных материалов. Показано, что новые материалы обладают существенными эксплуатационными преимуществами по сравнению с традиционными конструкционными сталями и могут быть рекомендованы для изготовления узлов реакторных установок с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями на быстрых нейтронах.

9. Разработана и опробована технология модифицирования поверхности конструкционных сталей с использованием обработки электронным пучком

предварительно нанесенного на нее металлического слоя. Предложенная технология обеспечивает насыщение поверхности стали алюминием и формирование защитного барьерного слоя из Al_2O_3 , предотвращающего взаимодействие стали с жидкометаллическим теплоносителем. Толщина модифицированного слоя составляет 15-20 мкм, при этом стальная основа сохраняет исходные механические и технологические свойства. Технологический процесс включает две стадии: первая – нанесение на поверхность стали покрытия из Al или содержащей Al смеси; вторая – обработка поверхности стали мощным импульсным электронным пучком, обеспечивающая перемешивание материала покрытия с материалом основы и формирование поверхностного слоя определенного состава.

10. Установлено, что модифицированный поверхностный слой ($\text{Fe}+\text{Al}+\text{Cr}+\text{Y}$) с последующей обработкой пучком электронов значительно уменьшает влияние теплоносителя свинец-висмут, понижая скорость ползучести ферритно-мартенситной стали 10Х9НСМФБ в контакте с жидким металлом. При этом результаты коррозионных испытаний показали отсутствие окисления стали при температурах до 650 °С.

11. Установлено, что модифицированный слой на поверхности стали, легированный 3-12 % (масс.) Al, при рабочих температурах 300-600 °С находится в квазипластическом состоянии. Величина квазипластичности модифицированного слоя на стали составляет 0,6-2,2%. Построена температурная зависимость квазипластичности модифицированного слоя, температура перехода в хрупкое состояние материала покрытия составляет ~650 °С.

12. Установлено, что при температуре 500 °С циклическая прочность модифицированного слоя при испытаниях на малоцикловую усталость соответствует циклической прочности стали-основы. При понижении температуры до 360 °С наблюдается снижение циклической прочности ферритно-мартенситной стали без покрытия по сравнению со сталью с модифицированной поверхностью вследствие эффекта жидкометаллического охрупчивания.

13. Применение разработанной технологии для обработки поверхности труб парогенератора и оболочек ТВЭЛ значительно повышает работоспособность конструкционных сталей в потоке жидкометаллического теплоносителя. При этом может быть существенно повышена энергоэффективность реакторной установки за счет снижения термобарьеров вследствие обеспечения условий, исключающих рост оксидных пленок, и расширения диапазона допустимой концентрации кислорода в жидкометаллическом теплоносителе в сторону ее повышения. Это окажет положительное влияние на режимы работы установки, коррозионную стойкость внутриреакторного оборудования и частей парогенератора, контактирующих с теплоносителем.

Основное содержание диссертации представлено в следующих работах, опубликованных в научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Каштанов А.Д., Карзов Г.П., Марков В.Г. Коррозионно-механическая прочность сталей с γ - и α -решеткой в контакте с жидкометаллическим теплоносителем на основе свинца // Вопросы материаловедения. 2009. № 3 (59). С. 315-329.

2. Jianu A., Muller G., Weisenburger A., Heinzl A., Fazio C., Markov V.G., Kashtanov A.D. Creep-to-rupture tests T91 steel in flowing Pb-Bi eutectic melt at 550 °C // Journal of Nuclear Materials. 2009. Is. 394. P. 102-108.

3. Демидов А.С., Кашелкин В.В., Каштанов А.Д., Яковлев В.А. Прогнозирование механических свойств реакторной стали 08X16H11M3-ПД в условиях ползучести без учета и с учетом радиационного облучения // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 2. С. 18-26.
4. Петров С.Н., Каштанов А.Д., Кудрявцев А.С., Охапкин К.А., Груздев Д.А. Анализ причин образования трещин при горячей пластической деформации сплава марки ХН55МВЦ-ИД // Вопросы материаловедения. 2015. № 4 (84). С. 17-22.
5. Карзов Г.П., Каштанов А.Д., Кудрявцев А.С., Охапкин К.А., Груздев Д.А. Влияние химической неоднородности на «горячие» механические свойства сплава ХН55МВЦ-ИД и повышение технологичности при термомодеформационном воздействии // Вопросы материаловедения. 2015. № 4 (84). С. 23-28.
6. Bozin S.N., Rodchenkov B.S., Kashtanov A.D., Markov V.G., Yakovlev V.A., Schenkova I.A. Study of construction materials for a lead-cooled reactor // Atomic Energy. 2013. V.113. N 5. P.320-326.
7. Weisenburger A., Jianu A., An W., Fetzer R., Del Giacco M., Kashtanov A.D., Heinzl A., Muller G., Markov V.G. Creep, creep-rupture tests of Al-surface-alloyed T91 steel in liquid lead bismuth at 500 and 550 °C // Journal of Nuclear Materials. 2012. V. 431. Is. 1-3. P. 77-84.
8. Gulenko, A.G., Buchatsky A., Margolin B., Fedorova V.A., Kashtanov A.D. A study of crack propagation in austenitic steels under creep conditions including the influence of thermal pre-ageing // Strength of Materials. 2012. V. 44. N 6. P. 585-599.
9. Бозин С.Н., Родченков Б.С., Марков В.Г., Каштанов А.Д., Яковлев В.А., Щенкова И.А., Иванов Ю.А., Иолтуховский А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В. Исследования конструкционных материалов для реактора со свинцовым теплоносителем // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 5. С. 257-263.
10. Гуленко А.Г., Бучатский А.А., Марголин Б.З., Федорова В.А., Каштанов А.Д. Исследования скорости роста трещины в аустенитных сталях при длительном статическом нагружении в условиях ползучести // Вопросы материаловедения. 2012. № 2 (70). С. 120-137.
11. Бланк Е.Д., Герасимов В.А., Шарапов М.Г., Водовозов А.Н., Каштанов А.Д., Щуцкий С.Ю., Плакидин А.Н. Разработка технологии изготовления корпусных конструкций главного циркуляционного насоса РУ БРЕСТ // Вопросы материаловедения. 2019. № 4 (100). С. 179-184.
12. Александров Н.В., Бланк Е.Д., Степанов В.В., Каштанов А.Д., Лемехов В.В., Лемехов Ю.В., Мельников А.Н. Создание экспериментальной установки со свинцовым теплоносителем // Вопросы материаловедения. 2019. № 4 (100). С. 185-192.
13. Федорова В.А., Марголин Б.З., Поздняков М.Л., Каштанов А.Д. Исследование влияния теплового старения на скорость роста усталостной трещины в стали 10X18H9 и металле сварного соединения // Вопросы материаловедения. 2012. № 3 (71). С. 126-135.
14. Engelko V., Tkachenko K., Chikirjaka A., Rusanov A., Markov V.G., Mueller G., Weisenburger A., Jianu A., Kashtanov A.D. Surface modification/alloying using intense pulsed electron beam as a tool for improving the corrosion resistance of steels exposed to heavy liquid metals // Journal of Nuclear Materials. 2011. V. 415. Is. 3. P. 270-275.
15. Марголин Б.З., Гуленко А.Г., Бучатский А.А., Нестерова Е.В., Каштанов А.Д. Исследование влияния термического старения на длительную прочность и пластичность стали Х18Н9 // Вопросы материаловедения. 2010. № 4 (64). С. 118-127.
16. Рыжов С.Б., Зубченко А.С., Степанов В.С., Климов Н.Н., Русанов А.Е., Певчик Ю.М., Карзов Г.П., Яковлев В.А., Каштанов А.Д., Старченко Е.Г., Носов С.И. Конструкционные материалы элементов активной зоны и первого контура реакторной установки СВБР-100 // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Обеспечение безопасности АЭС. 2009. №24. С.123-131.
17. Engelko V., Tkachenko K., Chikiryaka A., Rusanov A., Markov V.G., Mueller G., Weisenburger A., Kashtanov A.D., Jianu A. Surface modification alloying using intense pulsed electron beam as a tool for improving the corrosion resistance of steels exposed to heavy liquid metals // Journal of Nuclear Materials. 2011. V. 415. N 3. P. 270-275.
18. Engelko V., Tkachenko K., Kashtanov A.D., Chikirjaka A., Rusanov A., Markov V.G., Mueller G., Weisenburger A. Improvement of constructional steels corrosion resistance in liquid

Pb and Pb-Bi alloys by means of pulsed electron beam modification of steel surface // Journal of Nuclear Materials. 2011. V. 415. Is. 3. P. 260-269.

19. Гуленко А.Г., Бучатский А.А., Марголин Б.З., Федорова В.А., Каштанов А.Д. Исследования скорости роста трещины в аустенитных сталях при длительном статическом нагружении в условиях ползучести // Вопросы материаловедения. 2012. № 2. С. 120-137.

20. Тимофеев М.Н., Галяткин С.Н., Каштанов А.Д. Разработка материалов и технологий сварки, обеспечивающих повышение характеристик сопротивляемости хрупким разрушениям металла сварных швов корпусов АЭУ // Тяжелое машиностроение. 2019. № 11-12. С. 8-12.

21. Степанов В.В., Щуцкий С.Ю., Каштанов А.Д., Агринский А.Н., Симонов Н.И. Исследование коррозионных свойств керамических материалов для пар трения насоса в среде свинец – висмут // Вопросы материаловедения. 2019. № 2 (98). С. 116-122.

Патенты:

1. Володин С.И., Баранов А.В., Чернаенко Т.А., Степанов В.В., Повышев И.А., Морозов О.О., Межонов В.А., Яковицкая М.В., Каштанов А.Д., Петкова А.П. Коррозионно-стойкая сталь с низкой водородопроницаемостью для внутрикорпусных систем термоядерного реактора / Патент RU 2293788 С2, 20.02.2007. Заявка № 2005114206/02 от 11.05.2005, Бюл. № 5.

2. Шарапов М.Г., Каштанов А.Д., Александров Н.В., Бланк Е.Д., Строганова Н.Н., Степанов В.В. Электрическая плавильная печь сопротивления / Патент на полезную модель № 188786 от 23.04.2019г. Бюл. № 12.

3. Каштанов А.Д., Бланк Е.Д., Александров Н.В., Степанов В.В. Труба с электроподогревом / Патент на полезную модель № 188739 от 23.04.2019г. Бюл. № 12.