ИРМ
РОСАТОМ

# НАУЧНЫЙ ГОДОВОЙ ОТЧЕТ

## Об основных исследовательских работах, выполненных в 2024 году

г. Заречный, 2024

Адрес: а/я 29, г. Заречный, Свердловская обл., 624250
Тел.: +7 (34377) 3 50 01
Факс: +7 (34377) 7 33 46
E-mail: irm@irmatom.ru
www.irm-atom.ru

Госкорпорация «Росатом»
АО «Наука и инновации»
АО «ИРМ»

# НАУЧНЫЙ ГОДОВОЙ ОТЧЕТ АО «ИРМ»

# 2024

## РЕЗУЛЬТАТЫ
## ДОСТИЖЕНИЯ
## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Заречный, 2025 год

**УДК: 620.18**

**ГРНТИ: 58.33.09**

Научный годовой отчет акционерного общества «Институт реакторных материалов» (отчет об основных научно-исследовательских работах, выполненных обществом в 2024г.) — Заречный, АО «ИРМ», 2025. — с.

Отчет содержит информацию о выполненных в 2024 году исследованиях и результатах работы по основным направлениям научно-технической деятельности АО «ИРМ», включая:

- результаты реакторных испытаний топливных и конструкционных материалов;
- результаты материаловедческих исследований топливных, конструкционных и функциональных материалов, используемых в активных зонах реакторов на быстрых и тепловых нейтронах;
- результаты исследований элементов конструкций после длительной эксплуатации в действующих энергетических реакторах, а также опытных образцов конструкций активных зон инновационных реакторных установок после эксплуатации в испытательных стендах ИР ИВВ-2М в условиях, моделирующих реальные режимы эксплуатации.

В отчете также представлены итоги издательской деятельности, участия научных сотрудников в работе семинаров, конференциях, выставках, отражено взаимодействие с партнерами научных учреждений УрО РАН, ВУЗов.

Отчет предназначен для сотрудников научно-исследовательских организаций, конструкторских бюро, предприятий атомной промышленности и студентов соответствующих специальностей.

© Акционерное общество

«Институт реакторных материалов»

(АО «ИРМ»), 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

**ПРЕДИСЛОВИЕ ..... 5**

**ОБ ИНСТИТУТЕ ..... 7**

История АО «ИРМ» ..... 8

Основные направления научных исследований и роль института в научном сообществе АО «Росатом Наука» ..... 11

Перспективные направления исследований ..... 12

Обновление экспериментальной базы ..... 13

**РЕЗУЛЬТАТЫ ..... 16**

Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для создания головной атомной станции малой мощности на базе реакторной установки «ШЕЛЬФ-М» ..... 17

Влияние скорости охлаждения из в-области на фазовые превращения в сплаве Zr-2.5Nb ..... 20

Влияние содержания хлор ионов в воде и смешанного в,г-облучения на образование и развитие метастабильных питтингов на стали AISI 316L ..... 23

Исследование возможности образования расширенного графита при технологических операциях электрохимической дезинтеграции топливных компактов ВТГР в водных растворах азотной кислоты ..... 29

Коррозионные реакторные испытания образцов основного металла и сварных соединений аустенитной стали ЭП302-Ш в Pb, содержащем кислород ..... 35

Микроструктурные исследования оксидных пленок на образцах аустенитной стали ЭП302-Ш после испытаний в Pb, содержащем кислород ..... 38

Нейтронографические исследования фазового состава модельного ядерного топлива ..... 42

Исследования микроструктуры облученных и отожжённых после облучения аустенитных сталей марок 08Х18Н10Т и 10Х18Н9 методами электронной микроскопии ..... 44

Исследование эволюции микроструктуры стали типа Cr16-Ni19 при облучении в реакторе на быстрых нейтронах ..... 46

Работы по направлению «Послереакторные исследования конструкционных материалов и топлива реакторов БН при текущей эксплуатации, а также при поиске

путей повышения их ресурса. Исследования чехловых труб выемных контейнеров (ВК-1 и ВК-2) из стали ЭП450» ..... 50

Результаты послереакторных исследований участков каналов СУЗ энергоблоков Ленинградской АЭС, выполненных в 2024 году ..... 52

Результаты послереакторных исследований канала СУЗ Курской АЭС после 44 лет эксплуатации ..... 54

Послереакторные исследования технологического канала Смоленской АЭС, выгруженного в 2022 году с подозрением на дефект по результатам внутриреакторного УЗК ..... 55

Определение размера зерна аустенита ферритно-мартенситной нержавеющей стали методами ориентационной микроскопии ..... 57

Освоение технологии изготовления внутренней капсулы из ванадия для закрытых источников гамма-излучения на основе радионуклида селен-75 ..... 63

Расчетные и экспериментальные исследования кинетики образования оксидных пленок на сталях Ст3 и ЭП-823 в свинцовом теплоносителе в статическом режиме при 650 С° ..... 64

**ДОСТИЖЕНИЯ ..... 69**

Статистические показатели по науке ..... 70

Прочие научно-технические достижения ..... 83

Научно-технические мероприятия ..... 88

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ..... 89**

Сотрудничество с вузами и институтами РАН ..... 90

Мероприятия, реализуемые АО «ИРМ» в раках работы по развитию кадрового потенциала ..... 91

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 93**

# ПРЕДИСЛОВИЕ



В 2024 году, благодаря проведенным исследованиям получены ценные для отрасли результаты и сформированы важные заделы для дальнейшего долгосрочного развития «Института реакторных материалов» и научного дивизиона Госкорпорации «Росатом».

Институт активно вовлечён в решение отраслевых научно-технических задач. Проведены послереакторные исследования элементов активных зон уран-графитовых канальных реакторов (РБМК-1000) и быстрого натриевого реактора (БН-600), которые позволили Концерну «Росэнергоатом» обосновать и обеспечить безопасную эксплуатацию энергоблоков АЭС, а также увеличить ресурс элементов активных зон (твэлы, поглощающие элементы и др.) и, как следствие, повысить эффективность эксплуатации энергоблоков в целом.

Продолжаются работы по обоснованию проектных решений реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем РУ БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200. С использованием петлевой установки проводятся эксперименты по исследованию влияния реакторного облучения на коррозионное поведение конструкционных сталей в свинце, содержащем кислород.

В 2024 году расширено участие института в работах по созданию высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР). В дополнение к исследованиям топлива (микротвэлы и топливные компакты), ИРМ подключился к работам по испытаниям углеродных материалов, а также к исследованиям по отработке технологий обращения с ОЯТ реакторов ВТГР (в части дезинтеграции топливных компактов).

Значительным событием для института стало исследование новых конструкционных материалов для атомной станции малой мощности (АСММ) на базе РУ Шельф-М. В 2024 году проведены дореакторные, реакторные и послереакторные исследования образцов аддитивных металлических сплавов и композиционных материалов.

В рамках Единого Отраслевого Тематического Плана (ЕОТП) НИОКР Госкорпорации «Росатом», выполнены работы по проекту «Разработка технологии производства тросовых источников на основе изотопа Ir-192 для гамма-терапевтических аппаратов контактного облучения». Проект направлен на создание медицинского изделия, используемого для брахитерапии. На сегодня разработан и изготовлен тросовый источник для отечественного аппарата «Брахиум», в планах – импортозамещение подобных источников для аппаратов брахитерапии зарубежного дизайна.

Отдельно отмечу, что многими новыми направлениями в институте занимаются молодые ученые и инженеры, которые совсем недавно выпустились из вузов и уже показывают отличные результаты.

*Е.Н. Селезнев*

# ОБ ИНСТИТУТЕ

# История АО «ИРМ»

**История создания ИВВ-2**

Сооружение и ввод в эксплуатацию в апреле 1966 г. первого в регионе исследовательского ядерного реактора открыло новую страницу в научной истории Урала, поскольку уральская наука получила уникальный физический инструмент для фундаментальных исследований, а быстроразвивающаяся ядерная и транспортная энергетика – механизм научного сопровождения в части обоснования безопасности и надежности активных зон АЭС. На стадии завершения в СССР атомного проекта руководство страны, Госкомитета по науке и технике, Министерство среднего машиностроения СССР (МСМ СССР) и Академия наук СССР приняли стратегически важное решение о необходимости строительства в стране серии исследовательских атомных реакторов (ИЯР). В 1957 г. вышло постановление Совета министров СССР о сооружении серии ИЯР в ведущих центрах Союза (Ленинград, Минск, Рига, Тбилиси, Алма-Ата, Ташкент, Киев, Обнинск) и в ведущих вузах страны, отвечающих за кадровую подготовку ядерной отрасли, куда вошли физико-технические факультеты (ФТФ) УПИ, ТПИ и МИФИ, на базе атомных реакторов типа ИРТ и ВВР. В 1961 г. администрацией института, по согласованию с руководством области, было решено разместить ИРТ-1000. Но последующие принятые решения привели к изменению проекта ИРТ-1000 на ИВВ-2. Проектирование реактора ИВВ-2 было поручено Научно-исследовательскому и конструкторскому институту энерготехники (НИКИЭТ). 30 августа 1962 г. Государственным комитетом по использованию атомной энергии СССР был издан приказ № 0183с о строительстве реактора ИВВ-2.

К концу 1962 г. местом размещения реакторной установки был выбран поселок Заречный (вблизи промышленной площадки, строящейся Белоярской АЭС), благодаря имеющейся инженерной инфраструктуре и мощной специализированной строительной организации. По завершении строительства первой очереди комплекса ИВВ-2 объект был передан в Главное управление ядерно-энергетических установок (ГУ ЯЭУ) МСМ СССР. В 1963 г. был создан экспериментально-исследовательский атомный центр.

Директором филиала предприятия п/я 788 (Комплекса ИВВ-2) назначен **М.А.Борисов** и 04.03.1966 филиалу предприятия было присвоено открытое наименование **Свердловский физико-технический институт.**

В период пуско-наладочных работ были созданы службы электриков, СУЗ, КИП, дозиметрического контроля. В начале апреля 1966 г. подготовка к физическому пуску была завершена. Приказом директора предприятия №3с от 08.04.1966 г. был утвержден Акт готовности к проведению физического пуска. 18 апреля 1966 г. ГУ ЯЭУ МСМ СССР разрешило физический пуск реактора, который был успешно проведен эксплуатационным персоналом реактора ИВВ-2: **23 апреля 1966 г. В. К. Малышевым в оперативном журнале сделана запись в 12 ч 48 мин — «Критмасса!!!», что стало началом отсчёта истории института.**

Работы проводились в соответствии с утвержденной ГУ ЯЭУ МСМ СССР комплексной «Программой пуска реактора ИВВ-2» и «Методикой физического пуска и физических экспериментов на критсборке реактора ИВВ-2». Работы по программе физического пуска продолжались по 15 июля. После физического пуска реактора ИВВ-2 начались работы по освоению реактора, проверке режимов его работы, более рациональной компоновке активной зоны и созданию ловушек нейтронов, подготовка к выходу на проектную мощность 5 МВт к 1968 г.

В 1966 г. из комплекса зданий и лабораторных корпусов были введены в строй реакторный корпус и корпус механического цеха. А для работ с активными материалами в 1966-1967 гг. были подготовлены в реакторном корпусе временные лабораторные помещения с местной радиационной защитой.

**В сентябре 1966 г. был утвержден первый состав научно-технического совета** (НТС), куда вошли М.А. Борисов, В.И. Зеленов, В.В. Клюшин, Ю.А. Рычков, С.Г. Карпечко, В.К. Малышев, В.А. Кильдюшевский, Ю.П. Юмашев, В.Е. Моисеев, М.Г. Головачев и др. От НИКИЭТа в состав первого НТС вошел И.А. Стенбок. В составе НТС широко был представлен спектр уральской фундаментальной, прикладной и вузовской науки, в том числе: С.К. Сидоров, Б.Н. Гощицкий, А.К. Кикоин (ИФМ АН СССР); В.Г. Чухланцев (УПИ); Н.Д. Гутин (Уралгеология); В.Н. Микшевич (Горный институт); А.К. Матевосян (Институт химии УрО АН СССР); П.И. Поташев (Институт «Уралниипромедь»).

Проект исследовательского водо-водяного реактора бассейнового типа ИВВ-2, предназначенного для решения широкого спектра задач радиационного материаловедения, физики твердого тела, а также нейтронно-активационного анализа материалов, был разработан сотрудниками НИКИЭТ как оригинальная модернизированная конструкция типового исследовательского реактора ИРТ-2000 середины прошлого века. Большой вклад в эти разработки внес **В.И.Зеленов - первый главный инженер и директор института.**

Для ИВВ-2 была разработана концепция бассейнового реактора с многоловушечной активной зоной, набираемой из 6 секций в составе 6 ТВС и внутренней ловушкой нейтронов, окруженных по периферии бериллиевыми блоками и формирующих центральную ловушку. Экспериментальные устройства могли устанавливаться в центральную и боковые ловушки, а также замещать блоки отражателя. Впервые в мировой практике бассейнового реакторостроения была реализована идеология формирования секционированных активных зон. Эта многоловушечная система остается востребованной и в настоящее время.

В 70-е годы предприятие значительно увеличило производственные мощности и экспериментально-стендовую базу исследовательского реактора, позволяющие решать самые серьезные задачи атомной энергетики. Подход к созданию замкнутого цикла исследований «реакторные – послереакторные» предопределил стратегию и направление усилий коллектива к сооружению "горячего" корпуса, ввод которого был осуществлен в **декабре 1973 г.**

**В 1974-1976 гг.** под непосредственным руководством Зеленова В.И., с сокращением плановых сроков, проведена реконструкция реактора ИВВ-2, мощность которого была увеличена с 2 до 10 МВт, и реакторный комплекс получил аббревиатуру ИВВ-2М. Также проведена модернизация экспериментальных стендов и устройств для исследования материалов при облучении в реакторе. Решение задачи перевода бассейновых реакторов на принципиально новую разновидность топливной композиции для ТВС на металлокерамической основе позволило в 1980-е гг. перейти на 15 МВт режим работы с пробным выводом 20 МВт. Уникальная конструкция реактора ИВВ-2М позволила проводить исследования и испытания экспериментальных устройств различных направлений, что инициировало формирование научных направлений, многие из которых получили всесоюзное и международное признание.

С 2012 г. на реакторе ИВВ-2М проводится модернизация систем и оборудования. Были осуществлены реконструкция шахты-хранилища отработавших тепловыделяющих сборок, в соответствии с требованиями правил, и ремонтно-восстановительные работы на оборудовании и трубопроводах системы технического водоснабжения (второй контур реактора) с заменой основного оборудования и арматуры в соответствии с

действующими требованиями правил. Главным конструктором АО «НИКИЭТ» проведены расчеты на прочность элементов бака реактора и внутрибаковых устройств ИЯУ ИВВ-2М.

В 2018 г. введена в эксплуатацию модернизированная система управления и защиты (СУЗ) с полной заменой аппаратуры СУЗ, введен в эксплуатацию модернизированный резервный пункт управления реактором. В июле 2018 г. завершен второй этап реконструкции исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М и получено разрешение на пуск.

В июне 2024 было подписано решение о продление срока эксплуатации объекта использования атомной энергии - исследовательской ядерной установки ИВВ-2М АО "ИРМ" до 2040 года.

**Экспериментально-стендовая база исследовательского реактора ИВВ-2М**

К 1970 г. сформировалась тематика исследовательских работ, что повлекло создание новых экспериментальных стендов и установок реакторных и послереакторных испытаний конструкционных материалов и изделий из них, опытных сборок и топливных композиций в условиях, приближенных к условиям их эксплуатации.

Силами сотрудников отдела радиационного материаловедения совместно с конструкторским бюро и с изготовлением в экспериментально-механическом цехе в 1971-1980 гг. создан комплекс канально-петлевых установок и стендов, которые обеспечили исследование радиационной и коррозионной стойкости конструкционных материалов, испытания в условиях, близких к эксплуатационным, топливных композиций, ТВЭЛ и ТВС в газовых средах, механические испытания конструкционных материалов, сравнительные ресурсные испытания трубчатых образцов материалов, исследование нестационарной ползучести оболочек ТВЭЛ, измерения ультразвуковыми методами, коррозионные исследования конструкционных реакторных материалов, исследования процессов радиационного газовыделения материалов биологической защиты, исследования характеристик материалов биологической защиты.

В новом тысячелетии был дан более ускоренный темп развития данных технологий: высокотемпературные реакторы гражданского и специального назначения; быстрые реакторы; термоядерные технологии. С учетом необходимости обоснования работоспособности элементов активных зон инновационных атомно-энергетических установок и существующих в институте возможностей была существенно модернизирована и дополнена реакторно-стендовая база. В настоящее время испытания ведутся на следующих стендах:

Стенд «ПУРС» создан для проведения реакторных испытаний термоэмиссионных электрогенерирующих каналов (ЭГК) космических ядерно-энергетических установок (ЯЭУ). Оснащен современнейшим вакуумным и электронным оборудованием, уникальной системой специальных измерений и технологической инфраструктурой ИЯР ИВВ-2М.

Стенд «РИСК» предназначен для обеспечения реакторных испытаний твэлов, макетов твэлов и топливных композиций ядерных энергетических установок различного назначения в инертной газовой среде (гелий, неон, гелий-неоновая смесь). Большая часть работ направлена на испытания топлива для высокотемпературных газоозлаждаемых реакторов (ВТГР).

Стенд «Урал» предназначен для проведения облучения конструкционных материалов и элементов изделий; проведения внутриреакторных механических испытаний; проведения коррозионных испытаний в различных средах; исследования выхода радионуклидов из тяжелого жидкометаллического теплоносителя.

**Становление и развитие материаловедческого направления**

Строительство здания 102 (КГК – корпуса горячих камер) было завершено в ноябре 1971 г. После чего интенсивно проводятся работы по вводу Горячих камер (КГ), предназначенных для размещения исследовательского оборудования для работ с материалами с высокой наведенной радиоактивностью.

В 1972 г. принята в эксплуатацию первая очередь здания 102 – горячие камеры КГ1 – КГ7 (первая «цепочка» горячих камер). Вторая очередь здания 102 – горячие камеры КГ8 – КГ14 (вторая цепочка) была введена **25.12.1973г. – эта дата считается днем рождения исследовательского материаловедческого корпуса.**

В горячие камеры, предназначенные для работы с облученными материалами с высокой наведенной активностью, к 1975 г. было установлено оборудование для вырезки, шлифовки и полировки образцов, проведения гаммаспектрометрии, механических испытаний, металлографии, рентгеноструктурного анализа, взвешивания. Этот набор оборудования обеспечивал проведение полного комплекса материаловедческих исследований для выбора и обоснования длительной, безопасной работоспособности конструкционных материалов и топлива, используемых в атомной энергетике. Кроме того, в полугорячих помещениях, оборудованных для проведения работ по второму классу радиационной опасности, также размещалось оборудование для определения тех же видов физико-механических свойств материалов с малой наведенной активностью. Кроме того, в них размещался электронный просвечивающий микроскоп УМВ-100К и растровый электронный микроскоп РЭМ-200.

В последующие годы, по мере расширения тематик и номенклатуры исследований, модернизировались существующие установки и приобреталось новое исследовательское оборудование. В настоящее время Корпус защитных камер (КЗК) является крупной лабораторной установкой для проведения комплексных исследований материалов атомной энергетики с использованием современного оборудования.

## Основные направления научных исследований и роль института в научном сообществе АО «Росатом Наука»

В акционерном обществе «Институт реакторных материалов» научно-техническая деятельность сосредоточена, в основном, в следующих направлениях:

- проведение реакторных испытаний, моделирующих реальные режимы эксплуатации материалов атомной энергетики и разработке, и использовании высокотехнологичных реакторных технологий;
- выполнение материаловедческих исследований материалов атомной энергетики с использованием дистанционного и лабораторного оборудования, предназначенного для применения современных методов изучения влияния облучения на их служебные характеристики;
- разработке и освоению радиационных технологий, обеспечивающих производство радиоизотопной продукции медицинского, производственного и научного назначения, отвечающей современным требованиям потребителя;
- реализации проектов, направленные на модернизацию научной и экспериментальной базы в соответствии с требованиями научно-технического прогресса.
- Предприятие участвует в реализации совместно с другими научными центрами по актуальным проектам ГК: «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии» (РТТН), Единого отраслевого тематического плана Госкорпорации «Росатом», проекта «Прорыв» и других исследовательских программ, направленных на решение ключевых проблем развития атомной энергетики.

В 2024 году выполнены конкретные работы по направлениям:

- Коррозионные реакторные испытания и лабораторные исследования в статических режимах образцов основного металла и сварных соединений аустенитной стали ЭП302-Ш в свинцовом теплоносителе при различных содержаниях кислорода и температуры, соответствующих режимам эксплуатации БРЕСТ ОД 300.
- Микроструктурные исследования оксидных пленок на образцах аустенитной стали ЭП302-Ш после реакторных петлевых испытаний и испытаний в ТЖМТ при лабораторных статических режимах.
- Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ исследования новых материалов (металлических, композиционных) для использования в создании головной атомной станции малой мощности на базе реакторной установки «ШЕЛЬФ-М»;
- Разработка моделей коррозии сталей в ТЖМТ, расчетные и экспериментальные исследования кинетики образования оксидных пленок на стали ЭП-823 в свинцовом теплоносителе в статическом режиме при 650 0С.
- исследования технологического канала Смоленской АЭС и участков каналов СУЗ энергоблоков Ленинградской АЭС и Курской АЭС после длительной эксплуатации;
- ведутся реакторные испытания микротвэлов и топливных компактов, изготовленных по усовершенствованной технологии, а также реакторные испытания образцов углеродных материалов по ВТГР;
- Впервые в мировой практике разработана и и используется в производстве технология наработки источников на основе 75Se с использованием среднепоточного реактора, которые успешно используются в дефектоскопах как в России, так и за рубежом;
- выполнены плановые работы по проекту ЕОТП «Разработка технологии производства тросовых источников на основе изотопа $^{192}$Ir для гамма-терапевтических аппаратов контактного облучения», в том числе разработан технологический процесс изготовления тросовых источников на основе изотопа Ir-192, которая защищена объектами интеллектуальной собственности в виде секретов производства.

## Перспективные направления исследований

Определены совместно с заказчиками как перспективы дальнейшего развития существующих направлений работ, так и участие предприятия в НИОКР, обеспечивающих освоение новых актуальным направлений развития атомной энергетики.

Развитие работ по исследованиям элементов активных зон реакторов на быстрых нейтронов на основе жидких металлических теплоносителей – натрия и свинца - определяется большим объёмом существующих задач, требующих выполнения НИОКР по созданию двухкомпонентной атомной энергетики.

В АО «ИРМ» работы по материалам активной зоны реакторов БН с натриевым теплоносителем связаны с исследованием отработавших ТВС реакторов БН с различными видами топлива и конструкционных материалов оболочек, поглощающих элементов рабочих органов СУЗ, источников нейтронов после их длительной эксплуатации. Целью этих работ является подтверждение безопасного состояния элементов конструкций активной зоны реакторов на достигнутый период работы и оценки запаса ресурса их дальнейшей надежной эксплуатации.

Продолжение в АО «ИРМ» на период 2025 – 2028 годы реакторных стендовых и лабораторных испытаний конструкционных материалов по проектному направлению «Прорыв» с последующим проведением детальных материаловедческих исследований образцов нацелены на исследования коррозионного влияния свинцового теплоносителя в

условиях нейтронного облучения на материалы конструкций первого контура реактора БРЕСТ ОД 300. Конкретными целями НИОКР в этом направлении является оптимизация выбора режима эксплуатации и оценки ресурса безопасной эксплуатации материалов РУ в жидком свинце с обоснованными параметрами теплоносителя по содержаниям кислорода и температурами.

В последние годы на базе АО «ИРМ» активно ведутся работы в обоснование выбора топлива и материалов высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР). В настоящее время ведутся реакторные испытания микротвэлов и топливных компактов, изготовленных по усовершенствованной технологии, а также реакторные испытания образцов углеродных материалов ВТГР. Испытания и исследования по данным направлениям продолжаются в 2025 г. и в перспективе будут продлены до 2027-2028 гг. В план работ также включены исследования углеродных материалов ВТГР после облучения с использованием ИВВ-2М.

С 2025 года предусматривается переход к испытаниям элементов конструкций активной зоны реакторных установок для обоснования возможности их использования в атомных станциях малой мощности (АСММ) на базе РУ Шельф-М.

Сохраняется необходимость продолжения проведения исследований состояния и подтверждения сохранения работоспособности топливных каналов и каналов СУЗ реакторов РБМК на завершающем этапе эксплуатации, выполнение которых возложено на АО «ИРМ».

Ведется подготовка технического задания и документов на оформление договора на выплнение работ по обоснованию  применения режимов формироваания защитных и антиадгезинных покрытий на крепежных элементах конструкций бланкет ИТЕР, сооружение которого продолжается в Кадараше, а также обсуждение участия предприятия в работах по проведению НИОКР для исследования  перспективных для использования в токамаке с реакторными технологиями по Российской программе создания реакторов с для использования термоядерной энергии.

В рамках действующего проекта создается экспортоориентированное производство источников на основе радионуклида иридия-192 для промышленной гамма-дефектоскопии на дефектоскопах российского и зарубежного производства, что обеспечит возможность нарастить объемы производства радиоизотопной продукции, по которой наблюдается устойчивая тенденция по увеличению заказов.

## Обновление экспериментальной базы

В 2024 году в рамках реализации инвестиционных мероприятий ««Развитие экспериментальной базы АО «ИРМ» было поставлено и введено в эксплуатацию оборудование, обеспечивающее проведение пробоподготовки для проведения качественного и количественного элементного анализ с определением концентраций элементов от F до U в ходе материаловедческих исследований.

**Планетарная шаровая мельница**

Планетарная шаровая мельница PrepBM-01A (рисунок 1) предназначена для осуществления измельчения твердых, среднетвердых, мягких, хрупких, вязких и влажных материалов вплоть до коллоидной тонкости. Применяется для быстрого измельчения материалов для дальнейшего прессования, сплавления при подготовке проб для анализа на рентгенофлуоресцентном спектрометре Thermo ARL Perform’x. Помимо измельчения может быть использована для смешивания и гомогенизации эмульсий и паст, а также для механической активации и легирования.

Технические характеристики и комплектность

– Материал корпуса прибора: армированный полимерный материал, стойкий к ударным нагрузкам и действию кислот, щелочей и органических растворителей.

– Типы измельчаемых материалов: твердые, среднетвердые, мягкие, хрупкие, вязкие и влажные.

– Максимальная степень измельчения, не более 1 мкм.

– 2 режима помола (сухое измельчение и мокрое измельчение).

– Максимальное число оборотов главного диска, не менее 650 об/мин.

– Программирование параметров измельчения, включая время измельчения и время пауз между сегментами измельчения.

– Реверсный режим измельчения.

– Размольная гарнитура из нержавеющей стали 100 мл с крышкой и уплотнителем.

– Размольная гарнитура из карбида вольфрама 100 мл с крышкой и уплотнителем.

– Размольная гарнитура из агата 100 мл с крышкой и уплотнителем.



*Рисунок 1. Планетарная мельница PrepBM-01A*

Система для подготовки проб

Трехпозиционная электрическая печь Nieka серии E (рисунок 2), предназначена для приготовления сплавленных дисков для дальнейшего рентгенофлуоресцентного анализа или растворов для ICP. Применяется для быстрого приготовления проб для дальнейшего анализа на рентгенофлуоресцентнном спектрометре Thermo ARL Perform’x и масс-спектрометре. Метод сплавления в печи сокращает время работ и позволяет получать идеально сплавленные образцы воспроизводимого состава.

Технические характеристики и возможности

– Температурный интервал от 25 до 1275 °C;

– Наличие керамического стопорного кольца для обеспечения фиксированного положения тигля при высоких температурах;

– Наличие сенсорного экрана для управления оборудованием;

– Прозрачная дверь с автоматической блокировкой;

– Круговое перемешивание для быстрого растворения образца;

– Контроль температуры в каждой камере;

– Канал чистого воздуха для операций без загрязнений

Управление процессом

Nieka Connect предоставляет полную информацию о работе – полная отслеживаемость по ISO 17025. На сенсорном экране можно сохранить до 32 различных методик плавления. Метод сплавления можно описать, указывая различные параметры нагрева, перемешивания и охлаждения.



*Рисунок 2. Система для подготовки проб для XRF и ICP Nieka E1*

**Настольный пресс-гранулятор**

Настольный пресс-гранулятор (рисунок 3) PrepP-01BW представляет собой настольный лабораторный пресс для простой и эффективной подготовки прессованных гранул для рентегнофлуоресцентного анализа.

Технические характеристики и возможности

- Рабочая температура: 0-40 °C
- Возможность контролировать время настраивания, удержания и сброса усилия во время прессования;
- Возможность равномерного сброса напряжения за счет регулирования времени снижения давления;
- Максимальное давление – 40 тонн;
- Параметры прессования контролируются при помощи сенсорного ЖК-дисплея;
- Процесс прессования управляется программируемым контроллером (PLC).

Области применения

- Химия/пластмассы;
- Строительные материалы;
- Переработка/окружающая среда;
- Металлургия/геология;
- Керамика/стекло.




*Рисунок 3. Настольный пресс-гранулятор PrepP-01BW*

# РЕЗУЛЬТАТЫ

## Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для создания головной атомной станции малой мощности на базе реакторной установки «ШЕЛЬФ-М»

Обеспечение потребителей в Арктической зоне России надежными, качественными и экономически конкурентоспособными энергоисточниками, предназначенными для эксплуатации в экстремальных природно-климатических условиях – необходимый шаг для реализации основной задачи государственной политики Российской Федерации в Арктике: превращение Арктической зоны в ведущую стратегическую ресурсную базу Российской Федерации. Энергетическая инфраструктура является базисом для полноценной реализации и защиты национальных интересов Российской Федерации в Арктике и Арктическом регионе, успешного достижения целей и стратегических приоритетов государственной политики Российской Федерации в Арктике. Достижение этой цели возможно путём создания атомных станций малой мощности (АСММ), как энергетического, так и специального назначений. Успешная реализация этой задачи требует своевременного обеспечения реакторных установок (РУ) и АСММ всеми необходимыми комплектующими и оборудованием, соответствующим высоким требованиям к качеству.

В АО «ИРМ» в 2023-2024 гг проводились научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, которые включали комплексное экспериментальное исследование образцов, изготовленных по аддитивной технологии и новых композиционных материалов. Исследования проводились по договорам с АО «НИКИЭТ». Результаты, полученные в ходе проведения комплекса испытаний и исследований, направлены на обоснование применения материалов и изделий на их основе в составе АСММ с РУ ШЕЛЬФ-М.

***Исследование новых материалов, полученных по аддитивной технологии***

Комплексные дореакторные, реакторные и послереакторные испытания образцов необходимы для изучения влияния нейтронного облучения на свойства изделий, выполненных из материалов, изготовленных по аддитивной технологии: биметалл 15Х2МФА/12Х18Н10Т, стали 12Х18Н10Т, Св-06Х19Н9Т, 15Х2МФА и титановый сплав ПТ 3В. Объектом исследования были образцы из металлических плит: сталь Св-06Х19Н9Т изготавливали из сварочной проволоки диаметром 1 мм по аддитивной электродуговой технологии сварки, остальные материалы - по аддитивной технологии методом прямого лазерного выращивания.

В АО «ИРМ» в реакторе ИВВ-2М были проведены реакторные испытания образцов аддитивных материалов до флюенса нейтронов ($1\times10^{19}$) $см^{-2}$ (E>0,1 МэВ) и температуре (140±20) °С в газовой среде азота. Для изучения влияния нейтронного облучения были проведены сравнительные до- и послереакторные исследования, которые включали:

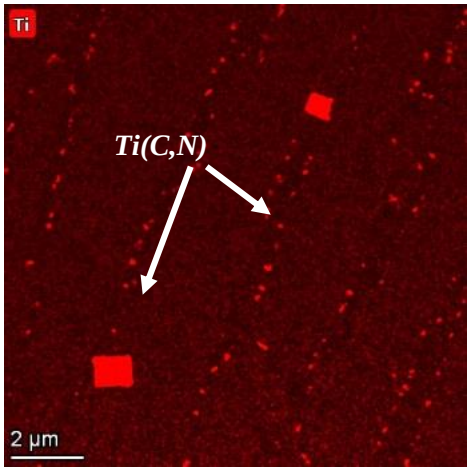
– определение распухания исследуемых материалов под воздействием нейтронного облучения, как изменение плотности методом гидростатического взвешивания до и после облучения;

– определение кратковременных механических свойств при статическом растяжении при комнатной температуре;

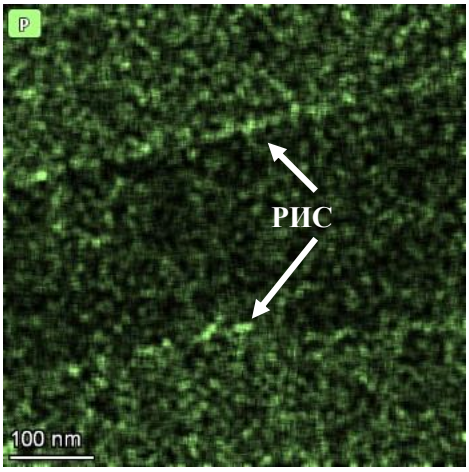
– определение характеристик статической трещиностойкости при комнатной температуре испытания;

– фрактографические исследования поверхности разрушения после механических испытаний;

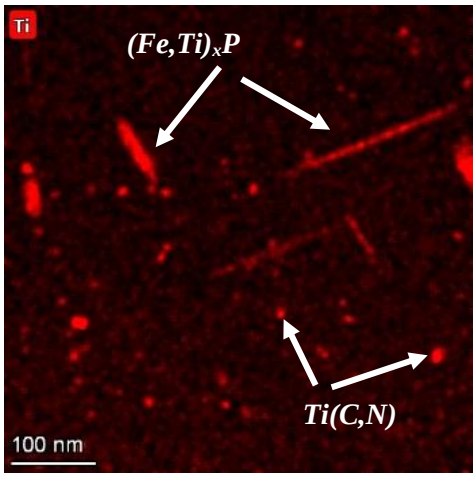
– исследование структурных изменений, элементный и фазовый анализ методами сканирующей (СЭМ) и просвечивающей (ПЭМ) электронной микроскопии.

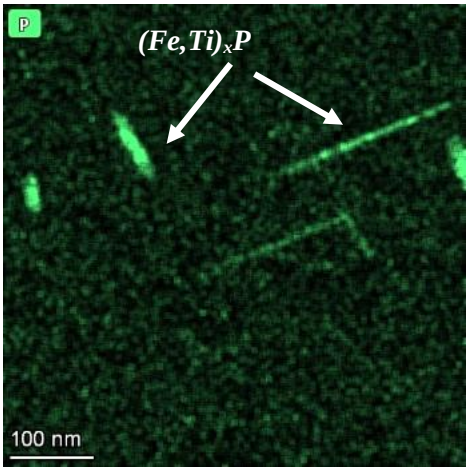



*а - карбонитриды титана в стали Св-06Х19Н9Т*




*б - радиационно-индуцированных сегрегаций (РИС) фосфора в стали Св-06Х19Н9Т;*




*в, г - радиационно-индуцированные выделения фосфидов $(Fe, Ti)_xP$ в стали 12Х18Н10Т*

*Рисунок 4 – Структурное состояние после облучения образцов сталей Св-06Х19Н9Т (а, б) и 12Х18Н10Т (в, г)*

На основании результатов выполненных работ показано, что при облучении до флюенса нейтронов ($1\times10^{19}$) $см^{-2}$ (E>0,1 МэВ) и температуре (140±20) °С для всех исследованных материалов, выполненных по аддитивной технологии, плотность не изменяется, что подтверждается отсутствием радиационных пор по данным СЭМ и ПЭМ исследований. Для всех исследованных материалов изменений структуры по данным СЭМ не наблюдается, а по данным ПЭМ на микроуровне происходит образование радиационных дефектов, которое приводит к радиационному упрочнению. При облучении в сталях Св-06Х19Н9Т, 12Х18Н10Т, 15Х2МФА и биметаллическое соединение 12Х18Н10Т/15Х2МФА по данным ПЭМ под воздействие облучения наблюдается выпадение вторых фаз в виде карбидов и фосфидов металлов (рисунок 4). В стали Св-06Х19Н9Т морфология карбонитридов титана после облучения (рисунок 4а) не претерпела заметных изменений по сравнению с необлученными образцами, при этом наблюдалось образование радиационно-индуцированных сегрегаций (РИС) фосфора на межфазных границах феррит-аустенит (рисунок 4б). В сплаве 12Х18Н10Т после облучения помимо карбонитридов титана обнаружены радиационно-индуцированные

выделения фосфидов $(Fe,Ti)_xP$ игольчатой формы (рисунок 4в, г). После облучения в сплаве 15Х2МФА произошло увеличение концентрации выделений на основе хрома на границах и в объеме пластинчатого мартенсита, а также небольшое увеличение размера выделений карбонитридов ванадия. Для титанового сплава ПТ-3В в исходном состоянии при кратковременных испытаниях проявляется анизотропия свойств, которая усугубляется при облучении. В поперечном направлении разрушение титанового сплава ПТ-3В происходит преимущественно срезом, это отражается на снижении способности материала к равномерному деформированию и приближении предела текучести к пределу прочности. На микроуровне за счет радиационных дефектов типа кластеров происходит локализация напряжений и деформаций это приводит к снижению пластичности и деградации характеристик вязкости разрушения.

На основании полученных данных сделан вывод, что после облучения при температуре до 140±20 ºС и до флюенса нейтронов $1\times10^{19}$ $см^{-2}$ механические свойства материалов, изготовленных по аддитивным технологиям, Св-06Х19Н9Т, 12Х18Н10Т, 15Х2МФА, ПТ-3В и 12Х18Н10Т/15Х2МФА лучше по сравнению с традиционными материалами.

***Исследование новых композиционных материалов***

Комплексные дореакторные, реакторные и послереакторные испытания образцов необходимы для изучения влияния нейтронного облучения на механические свойства изделий из композиционных материалов в двух комплектах.

Объектами исследований являлись образцы из композиционных материалов (КМ), в двух комплектах (А и Б), изготовленных АО «ЦНИИСМ» – комплекта А и АО «НИИграфит» – комплекта Б. Образцы из композиционных материалов изготовлены методом механической обработки из массива материала с учетом направления формирования структуры. Комплект А состоял из образцов стеклопластиков в продольном и поперечном направлениях: Т-13 / ЭП 5122, Т-10-14/ЭДН-1У, Т-13/ЭХД-У и однонаправленных углепластиков: UMT 49S-12K-EP/ЭХД-МД, UMT 49S 12K EP/ЦЭФ-М. В Комплект Б входили образцы в продольном и поперечном направлениях углепластиков: UWB 3K/T20-60, UWB 3K / Карбон М и базальтопластиков: Б-11/Т20 60, Б-11/Карбон М.

В АО «ИРМ» в реакторе ИВВ-2М были проведены реакторные испытания образцов композиционных материалов до флюенса нейтронов $(1\cdot10^{13})$ $см^{-2}$ (E>0,1 МэВ) в газовой среде азота. Под облучением образцы сначала выдерживались при температуре (80±20) °С, а затем – при (140±20) °С. Для изучения влияния нейтронного облучения были проведены сравнительные до- и послереакторные исследования, которые включали:

– определение распухания исследуемых материалов под воздействием нейтронного облучения как изменение плотности методом гидростатического взвешивания до и после облучения;

– определение прочности, относительного удлинения, модуля упругости, коэффициента Пуассона образцов однонаправленного углепластика UMT 49S-12K-EP/ЭХД-МД при статическом растяжении при комнатной температуре по ГОСТ 25.601-80;

– определение прочности, модуля упругости стеклопластиков из комплекта А, угле- и базальтопластиков из комплекта Б при статическом растяжении при комнатной температуре по ГОСТ 34370-2017;

– определение напряжения и относительной деформации при разрушении, модуля упругости при изгибе при комнатной температуре по ГОСТ 4648-2014 для стеклопластиков комплекта А и по ГОСТ Р 57866-2023 для всех материалов комплекта Б;

– определение межслойного сдвига однонаправленного углепластика UMT 49S-12K-EP/ЭХД-МД при комнатной температуре по ГОСТ Р 57745-2017;

– качественный анализ выделяющихся газов при облучении.

На основании результатов выполненных работ показано, что при облучении до флюенса нейтронов ($1 \cdot 10^{13}$) $см^{-2}$ (E>0,1 МэВ) при температуре (140±20) °С и/или (80±20) °С в среде азота для материалов А.2, А.3, А.5 и Комплекта Б изменение плотности при облучении материалов не наблюдается. Для пластика А.1 получено изменение плотности на ~0,5 % на образцах одной партии. После нагрева до 130-140 ºС и при облучении при (80±20) ºС материалов Комплекта А и Комплекта Б отсутствуют углеводороды (С1-С10) в газовой среде ампулы больше 0,01 % об.

После облучения стеклопластиков наиболее стабильные механические свойства при растяжении и изгибе показал материал Т-10-14 / ЭДН-1У. Для материала Т-13 / ЭХД-У механические свойства изменялись сильнее, чем для других стеклопластиков.

Механические свойства при растяжении, при изгибе и при межслойном сдвиге углепластика UMT 49S-12K-EP / ЭХД-МД и UMT 49S 12K EP / ЦЭФ-М после облучения практически не изменились.

Для материалов Комплекта Б характерны более высокие механические свойства при растяжении и при изгибе полимеров с углетканью UWB 3K (Б.1 и Б.2) как до так и после облучения. При растяжении после облучения наиболее сильно уменьшаются свойства материала Б.1 (UWB 3K / Т20-60). Также отмечено снижение анизотропии механических свойств при растяжении после облучения полимеров Б.1 (UWB 3K / Т20-60) и Б.2 (UWB 3K / Карбон М). При изгибе после облучения происходит увеличение свойств полимеров из Комплекта Б со связующим Карбон М и, наоборот, уменьшение свойств со связующим Т20-60. После облучения усиливается анизотропия свойств полимеров из Комплекта Б со связующим Карбон М. Наиболее низкие механические свойства при изгибе для полимеров из комплекта Б получены для материала Б.4 (БТ-11 / Карбон М).

*Барсанова С.В., Нежданов А.Г., Карагерги Р.П.,*
*Лютикова М.С., Хвостов С.С., Ладейщиков К.М.,*
*Евсеев М.В., Кинёв Е.А., Пастухов В.И., Панченко В.Л.,*
*Ярков В.Ю., Устинов А.Е., Чегодаева Л.Н.*
*Шабельников Е.В., Ожгихин Д.А., Зырянова А.А., Литовченко В.Ю.*

## Влияние скорости охлаждения из β-области на фазовые превращения в сплаве Zr-2.5Nb

Цирконий и сплавы на его основе широко применяются во многих отраслях промышленности. Уникальные физические (низкое сечение захвата тепловых нейтронов), механические и коррозионные свойства, а также удовлетворительная технологичность позволяют использовать циркониевые сплавы в качестве основного материала для реакторов на тепловых нейтронах.

Изучение закономерностей получения и изменения микроструктуры сплавов циркония в зависимости от внешних факторов (температура, внешние механические напряжения, среда эксплуатации и повреждающая доза облучения) позволит снизить влияние или полностью избежать проблем, связанных с применением циркониевых сплавов в условиях активной зоны тепловых ядерных реакторов. Получение оптимального структурно-фазового состояния изделий из сплавов на основе циркония повысит срок и надежность эксплуатации конструкционных элементов в атомной отрасли.

В качестве материала исследования выбраны образцы сплава Zr-2.5Nb, вырезанные из трубных промышленных заготовок, произведенных по штатным технологиям изготовления каналов СУЗ и ТК для РБМК-1000. Термическая обработка образцов Zr-2.5Nb проводилась согласно следующей схеме: размещение образцов в заранее нагретой до температуры 930 °С печи с воздушной атмосферой и дальнейшей выдержкой в течение 15 минут. Охлаждение образцов проводилось в различных средах: в воде, на воздухе и в печи.

По результатам структурных исследований показано, что вне зависимости от скорости охлаждения проявляются хорошо различимые границы зерен бывшей высокотемпературной β-фазы (рисунок 5 а, д, к). Практически полная реконструкция высокотемпературной структуры ОЦК-фазы с использованием ОС Бюргерса, подтверждает наличие доминирующей сдвиговой составляющей в механизмах фазовых превращений при всех скоростях охлаждения. Структура высокотемпературной β-фазы характеризуется близким размером кристаллитов для всех термических обработок, что обусловлено схожими режимами выдержки в однофазной β-области. Наблюдаются различия в морфологии границ зерен после разных видов охлаждения образцов (рисунок 5).

В микроструктуре образцов, охлажденных в воде и на воздухе, зафиксированы отдельные крупные пластины с длиной, достигающей половины размера зерна бывшей высокотемпературной β-фазы, а также наборы дисперсных ламелей α'(α)-фазы, иногда характеризующихся заостренным основанием (рисунок 5 в, ж). В структуре образцов, охлажденных в воде, наличие других фаз не зафиксировано (таблица 1).

Для образцов, охлаждение которых проходило на воздухе, на границах пластин α'(α)-фазы наблюдаются тонкие прослойки, соответствующих $\beta_{Zr}$-фазе (рисунок 5 г-е). Отмечено наличие крупных пакетов близкой ориентации $\alpha'_{Zr}$-фазы по границам бывшего высокотемпературного зерна β-фазы. Содержание Nb в $\beta_{Zr}$-фазе в среднем составляет– 18,8 ат. % (таблица 1).

Локальный кристаллографический анализ для указанных видов охлаждения выявил, что в крупных ламелях $\alpha'_{Zr}$-фазы наблюдаются дополнительные высокоугловые границы, формирующие колонии $\alpha'_{Zr}$-фазы одинаковой ориентации, напоминающие по морфологии двойники (рисунок 6 в, ж). Часть пластин из таких колоний характеризуется углами разориентации близкими к 60° вокруг оси $a_\alpha$ и могут быть классифицированы как двойники типа $\{10\bar{1}1\}$. Остальные пластины той же колонии характеризуются наличием углов разориентаций ~85° вокруг оси $a_\alpha$ и могут относиться к двойникам типа $\{10\bar{1}2\}$. Исходя из анализа полученной микроструктуры после охлаждения в воде и на воздухе, можно сделать предположение, что между температурой начала β→α-превращения (Тпп) и Тм (температурой монотектоидного превращения) образовывались α'-колонии, состоящие из относительно крупных чередующихся α'-ламелей с двойниковой разориентацией и более дисперсных пластин $\alpha'_{Zr}$-фазы.

Структурное состояние образца, охлажденного в печи, характеризовалось крупными пластинами α-фазы близких размеров и более гладкими границами в основании, а также хорошо видимыми прослойками второй фазы – $\beta_{Zr}$-фазы (рисунок 6 н). Содержание Nb в $\beta_{Zr}$-фазе составляет: по результатам рентгеноструктурного фазового анализа 26,5 ат. % (таблица 1). Размеры всех пластин $\alpha_{Zr}$-фазы значительно меньше размера высокотемпературного родительского зерна β-фазы. Это свидетельствует о том, что местами зарождения α-пластин во внутренних объемах высокотемпературного зерна β-фазы являются уже раннее сформированные ламели $\alpha_{Zr}$-фазы, зарождение которых в свою очередь происходит на границах высокотемпературной фазы.

Для всех скоростей охлаждения в спектрах разориентаций межкристаллитных границ α'(α)-фазы наблюдаются интенсивные максимумы на углах близких к 60º и 90° (рисунок 6). Наличие максимумов на углах 60º и 90° свидетельствует о значительной роли сдвигового механизма при ОЦК→ГПУ превращении в сплаве Zr-2.5Nb

*Таблица 1 – Результаты РСФА*

| Среда охлаждения | Параметр решетки, нм δ±0,0001 нм | | | Содержание фаз, объемные % | | Содержание Nb в $\beta_{Zr}$-фазе, ат. % |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $\alpha_{Zr}$-фазы | | $\beta_{Zr}$-фазы | | | |
| | a | c | a | $\alpha_{Zr}$-фаза | $\beta_{Zr}$-фаза | |
| Вода | 0,3223 | 0,5146 | - | 100 | - | - |
| Воздух | 0,3232 | 0,5149 | 0,3536 | 95,2±0,2 | 4,6±0,2 | 18,8±0,4 |
| Печь | 0,3233 | 0,5150 | 0,3514 | 89,1±0,6 | 10,9±0,6 | 26,5±0,4 |

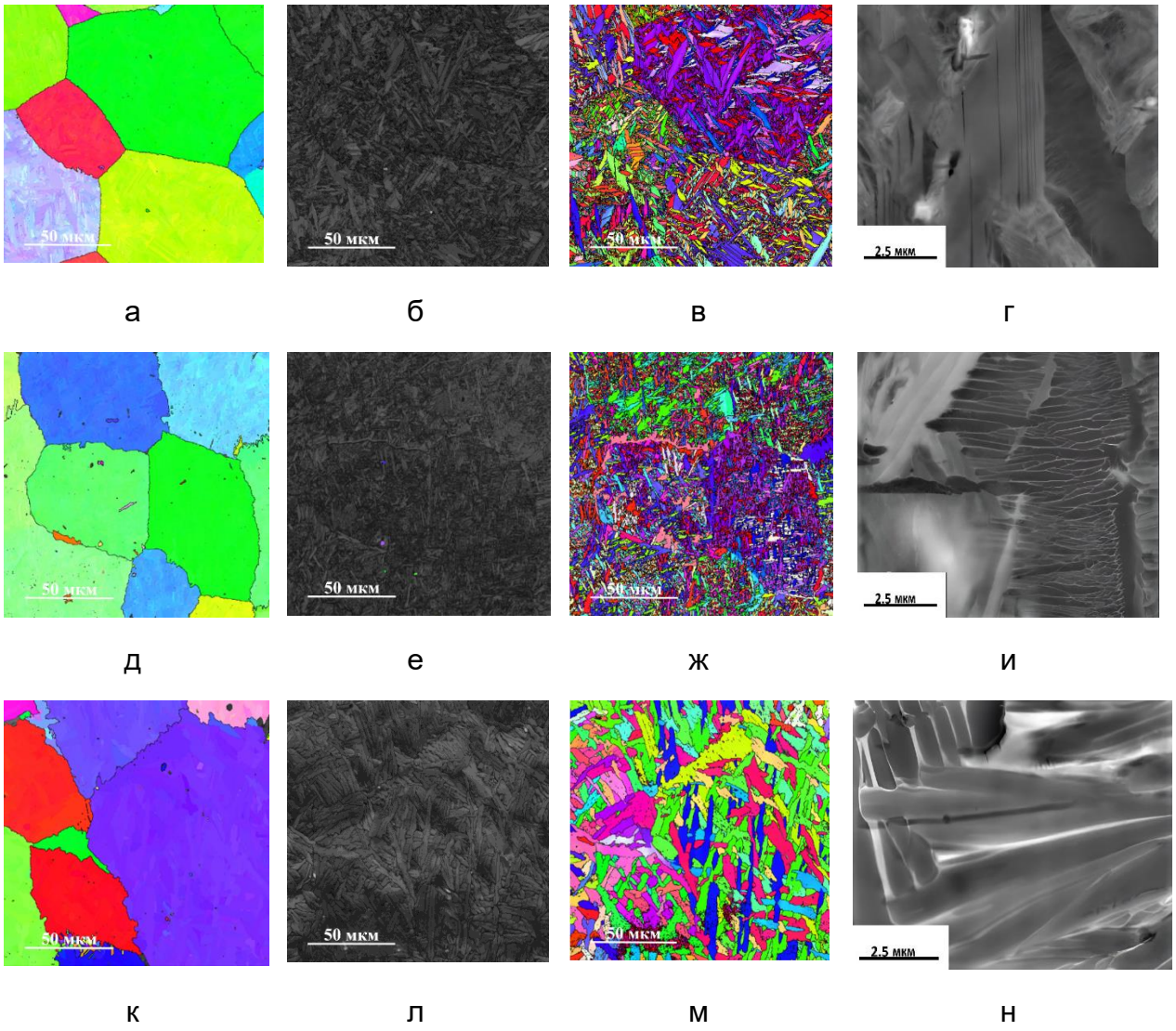
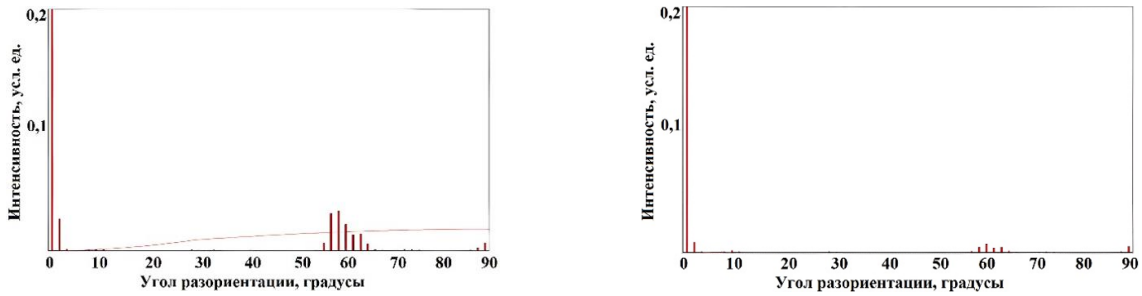



*Рисунок 5 Особенности микроструктуры сплава Zr-2.5Nb после охлаждения из высокотемпературной β-области в воде (а, б, в, г), на воздухе (д, е, ж, и) и в печи (к, л, м, н): а, д, к – карты основных ориентаций зерен восстановленной высокотемпературной β-фазы в поперечном направлении относительно оси трубы; б, е, л – карты интенсивности дифракции обратно рассеянных электронов; в, ж, м – карты основных ориентаций кристаллитов α-фазы в поперечном направлении относительно оси трубы; г, и, н – микроструктура в отраженных электронах*




*а* *б*

*Рисунок 6 Спектры углов разориентаций межкристаллитных границ α-фазы: а – после охлаждения в воде и на возхдухе, б – после охлаждения в печи*

Результаты проведенных исследований позволяют предложить следующий механизм формирования структуры в сплаве Zr-2.5Nb вне зависимости от скорости охлаждения. При охлаждении в момент достижения системой Тпп в β-твердом растворе начинается выделение первых отдельных (наиболее крупных) пластин α'(α)-фазы по механизму сдвиговой перестройки ОЦК→ГПУ-решетки, дополненной направленными перескоками атомов. Очевидно, что трансформация кристаллической решетки сопровождается выделением энергии, то есть локальная область вокруг пластины разогревается, приблизительно до температуры полиморфного превращения (Тпп). Если время пребывания при повышенной температуре данной локальной области материала оказывается достаточным для развития диффузионных процессов, то происходит некоторое перераспределение Nb между $\alpha'_{Zr}(\alpha_{Zr})$- и исходной β фазами.

*Ярков В.Ю., Пастухов В.И., Соловьева С.В.,*
*УрФУ им. Б.Н. Ельцина: Редикульцев А.А., Лобанов М.Л.*

## Влияние содержания хлор ионов в воде и смешанного β,γ-облучения на образование и развитие метастабильных питтингов на стали AISI 316L

Испытаниями, проведенными в АО «ИРМ» за счет средств субсидии исследовательского института Mitsubishi Research Institute (Япония) № NSU 52-76 от 18.11.2020 по реализации проекта «Вывод из эксплуатации и обращение с загрязненной водой (НИОКР в области переработки и захоронения твердых РАО (исследования технологии оценки целостности контейнеров во время хранения высокоактивных твердых РАО)», было выявлено, что в сравнимых условиях, имитирующих условия эксплуатации на площадке АЭС «Фукусима-Дайити» адсорбционных колонн KURION и SARRY, аустенитная сталь AISI 316L в большей степени подвержена щелевой коррозии, чем питтинговой. Однако, согласно литературным данным, общепризнано, что метастабильные питтинги (МП) могут являться очагами зарождения и развития щелевой коррозии, поэтому исследования, направленные на изучение влияния условий образования МП на аустенитной стали AISI 316L являются весьма актуальными.

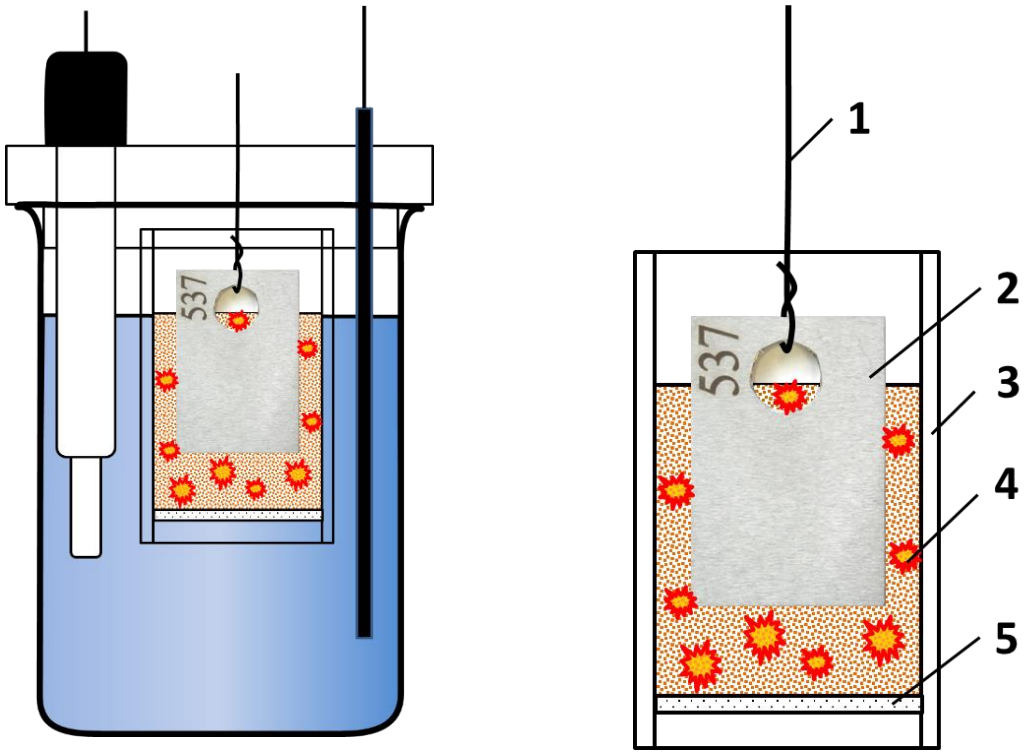
В настоящей работе проведены исследования влияния содержания хлор ионов в воде и смешанного β,γ-облучения на образование и развитие метастабильных питтингов на образцах основного металла (ОМ) на стали AISI 316L при комнатной температуре.

В качестве объекта исследований использовались образцы ОМ стали AISI 316L размером 50×20×3 мм, приготовленные в соответствии с ГОСТ 9.905-2007.

В качестве коррозионных сред использованы растворы разбавленной и насыщенной искусственной морской воды с содержанием $Cl^-$ ~100, ~10000 и ~29000 ppm.

Исследования образования и развития МП, а также определение их характеристик проводили электрохимическими методами с использованием электрохимической станции ZIVE MP2. Электрохимические исследования проводили в соответствии с ГОСТ 9.912-89 в трехэлектродной ячейке объемом 250 см³ с платиновым вспомогательным электродом и насыщенным хлорсеребряным электродом сравнения (рисунок 7а).

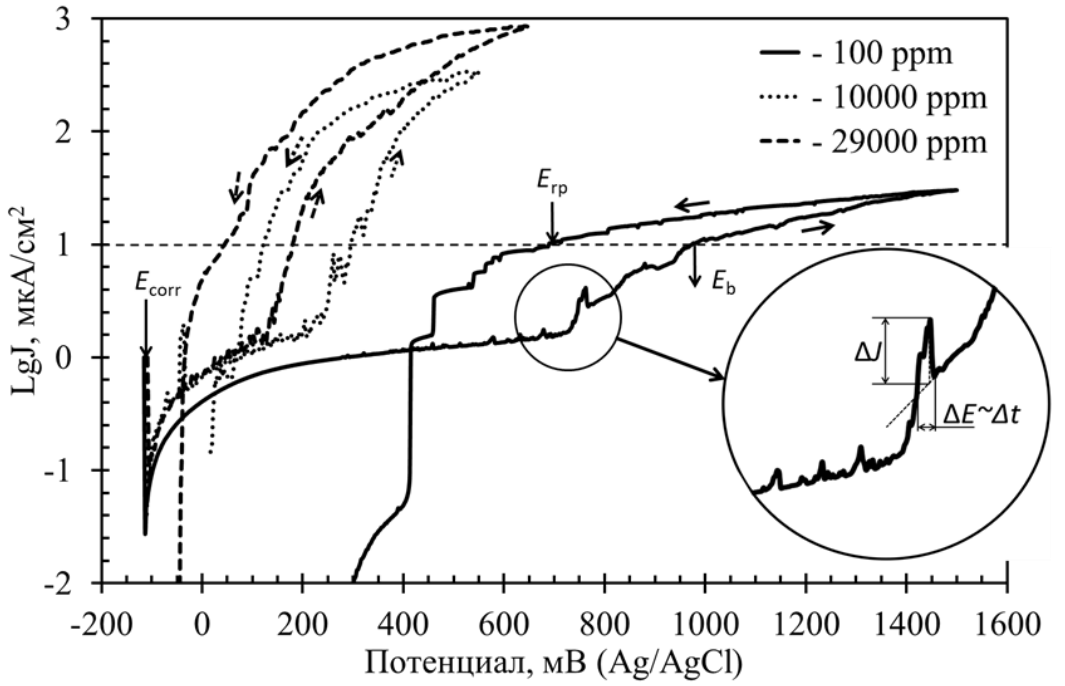
В процессе измерений образцы стали находились в тигле с пористым дном, заполненным природным клиноптилолитом с фракцией гранул 1,0-3,0 мм, не содержащим и содержащим радионуклиды $^{137}Cs$ и $^{90}Sr/^{90}Y$, поэтому исследования проводились как без облучения, так и под воздействием смешанного β,γ-излучения радионуклидов $^{137}Cs$ и $^{90}Sr/^{90}Y$ с мощностью дозы ~4,9×10⁻² Гр/с (рисунок 7б).



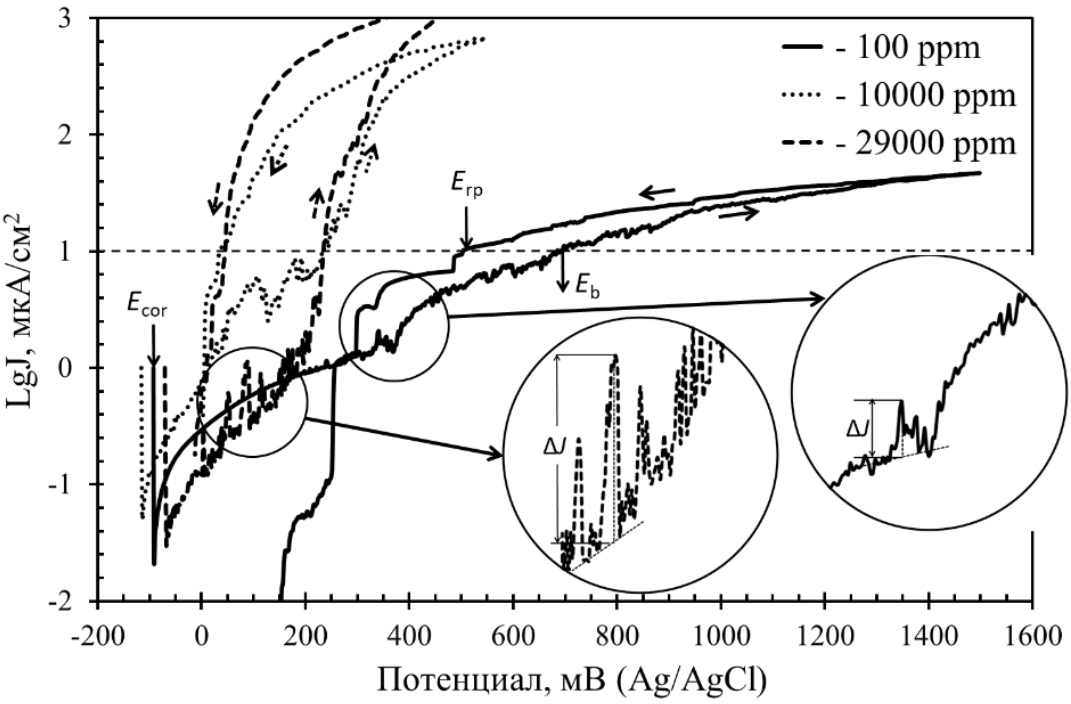

*а* *б*

*Рисунок 7 – Электрохимическая ячейка (а) и тигель с образцом и клиноптилолитом (б): 1 – электрод, 2 - образец, 3 - стеклянный тигель, 4 - клиноптилолит без и с радионуклидами $^{137}Cs$ и $^{90}Sr/^{90}Y$, 5 - пористое дно с размером пор ~150 мкм*

Результаты электрохимических исследований в виде потенциодинамических зависимостей «плотность тока - потенциал» для образцов в исходном состоянии в условиях без облучения и под облучением приведены на рисунке 8. Согласно этим данным, с увеличением содержания $Cl^-$ в воде в условиях без облучения наблюдается смещение обеих ветвей потенциодинамических кривых (ПДК) в сторону меньших значений потенциала. Аналогичное явление имеет место и в условиях облучения, однако в этих условиях наблюдается практически полное наложение друг на друга обеих ветвей ПДК при содержании $Cl^-$ в воде 10 000 и 29 000 ppm (рисунок 8б).



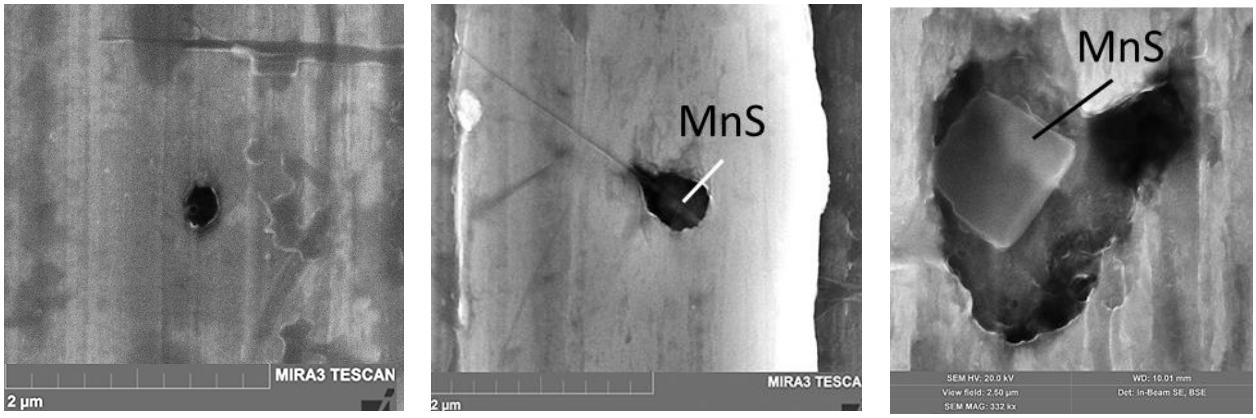

*а*




*б*

*Рисунок 8 – Потенциодинамические зависимости «потенциал-плотность тока» образцов ОМ стали AISI 316L при 25°С в воде с различным содержанием $Cl^-$ в условиях без облучения (а) и под действием β,γ-облучения (б) при скорости развертки dE/dt=1,5 В/ч*

Общей закономерностью всех зависимостей ПДК является наличие флуктуаций плотности тока *J* на ветвях ПДК, полученных в анодном направлении (Рисунок 8), наличие которых в литературе связывают с образованием и репассивацией МП. Проведенные СЭМ исследования образца ОМ после проведения электрохимических исследований выявили на его поверхности наличие мелких репассивированных питтингов (Рисунок 9).




*а* *б* *в*

*Рисунок 9 - СЭМ-изображения метастабильных питтингов, образовавшихся на поверхности образца ОМ стали 361L после электрохимических испытаний по определению потенциала репассивации при 25 °С в воде с [$Cl^-$]=~10 000 ppm*

Общих закономерностей изменения в количестве и величине амплитуды флуктуаций плотности тока не выявлено ни от содержания $Cl^-$ в воде (Рисунок 9а), ни от отсутствия или наличия облучения (Рисунок 9б). Однако общим является сокращение ширины областей потенциалов $\Delta E_{МП}$, в которых выявлены флуктуации плотности тока $J$, и их смещение в сторону меньших значений потенциалов с увеличением содержания $Cl^-$ в воде для обоих условий без облучения и под облучением (таблица 2).

*Таблица 2 – Границы областей образования и репассивации метастабильных питтингов*

| Отсутствие/наличие облучения | Без облучения | | | Под облучением | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Содержание $Cl^-$ в воде, ppm | 100 | 10 000 | 29 000 | 100 | 10 000 | 29 000 |
| Границы области МП, мВ (Ag/AgCl) | 280÷970 | -100÷300 | -100÷180 | 100÷680 | -50÷250 | -20÷220 |
| Амплитуда флуктуаций плотности тока $J$, мкА/см$^2$ | 0,009-1,70 | 0,001-3,32 | 0,107-2,22 | 0,002-1,40 | 0,003-3,76 | 0,004-0,76 |
| Количество флуктуаций, шт. | 76 | 39 | 43 | 50 | 42 | 31 |

Так в условиях без облучения при [$Cl^-$]=100 ppm $\Delta E_{МП}$≈280-970 мВ (Ag/AgCl). С повышением содержания $Cl^-$ в воде до 10 000 ppm положение области $\Delta E_{МП}$ смещается до уровня -100÷300 мВ (Ag/AgCl), а при [$Cl^-$]=29000 ppm $\Delta E_{МП}$≈-100÷180 мВ (Ag/AgCl).

Под облучением смещение положения области $\Delta E_{МП}$ при [$Cl^-$]=100 ppm происходит до значений с границами от ~100 до ~680 мВ (Ag/AgCl), т.е. почти на ~300 мВ меньших значений, чем без облучения (Таблица 2). Расположение областей $\Delta E_{МП}$ при обоих уровнях содержания $Cl^-$ 10 000 и 29 000 ppm в условиях облучения практически совпадают и находятся в границах от ~-50 до ~250 мВ (Ag/AgCl), которые на ~50 мВ больше, чем без облучения (Таблица 2).

Согласно данным литературных источников каждая флуктуация плотности тока на анодной ветви ПДК является переходным процессом тока, который состоит из

относительно медленного нарастания тока, и заканчивающегося его последующим падением практически до исходного уровня. Восходящая часть отражает рост питтинга, а репассивация МП ответственна за окончательное быстрое уменьшение тока (Рисунок 8).

Объем метастабильных питтингов рассчитывался с использованием выражения (1), полученного на основе законов Фарадея с использованием величин зарядов тока $Q$, которые были определены путем интегрирования по времени кривых изменения плотности тока $J$ на стадиях роста и репассивации МП, полученных при проведении электрохимических измерений (Рисунок 8):

$$V = m/\rho = Q \cdot M/(F \cdot z \cdot \rho) = k \cdot Q, \quad (1)$$

где $V$ и $m$ - соответственно объем и масса гомогенно растворенного металла в МП, см$^3$, г; $\rho$ - плотность стали, г/см$^3$; $Q$ - заряд, Кл; $M$ - суммарная атомная масса элементов стали, содержащихся в объеме МП, г/моль; $F$ - постоянная Фарадея, 96485 Кл/моль; $z$ - средняя валентность катионов основных элементов стали, $k$ - коэффициент пропорциональности, связывающий объем растворенного металла с зарядом анодного растворения, равен $1{,}61 \cdot 10^{-5}$ см$^3 \cdot$Кл$^{-1}$.

Обработка данных каждой флуктуации плотности тока на анодных ветвях ПДК была проведена с использованием следующих предположений:

- каждый метастабильный питтинг представляет собой ямку в форме полусферы (Рисунок 9а);
- подъем плотности тока в каждой флуктуации обязан растворенным в объеме образующегося МП основным элементам стали в виде катионов $Fe^{2+}$, $Cr^{3+}$, $Ni^{2+}$, $Mo^{2+}$, $Mn^{2+}$ со средней валентностью 2,18 (рис 9б);
- коэффициент пропорциональности, связывающий объем растворенного металла с зарядом анодного растворения, равен $1{,}61 \cdot 10^{-5}$ см$^3 \cdot$Кл$^{-1}$ (рассчитан с использованием плотности 7,88 г/см$^3$ для стали 316L).
-

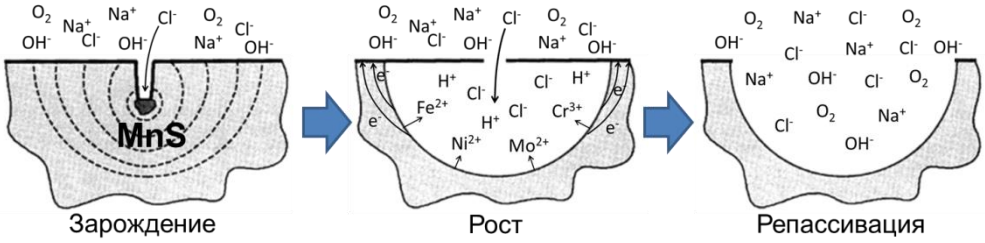
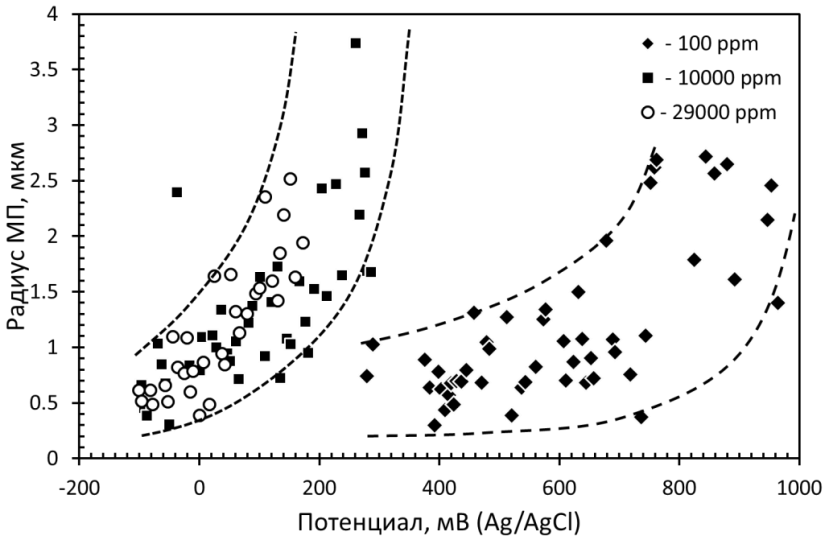



*Рисунок 10 - Принципиальная схема жизненных стадий метастабильных питтингов*

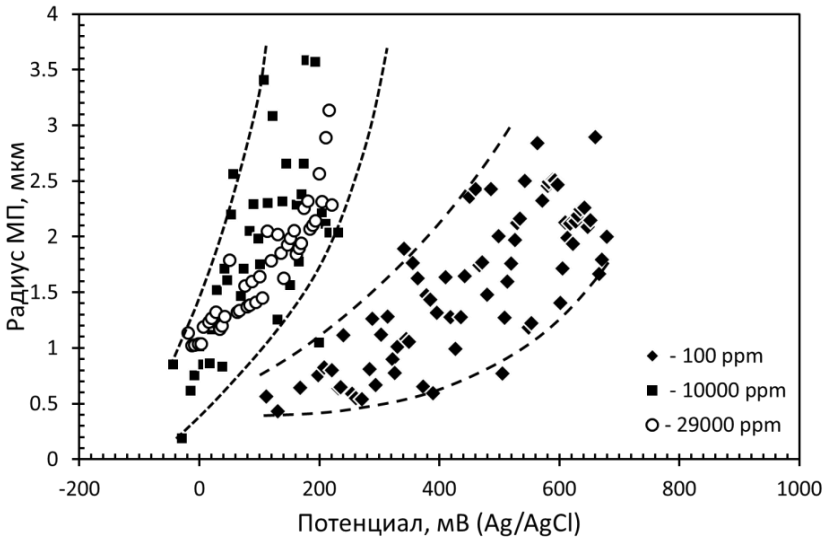
Результаты обработки в виде графических зависимостей изменения радиуса МП от потенциала развертки и содержания хлор ионов в воде для условий без облучения и под облучением приведены на Рисунок 10.

Согласно этим данным не выявлено существенного различия в размерах МП в условиях без облучения в водных средах с различным содержанием хлор ионов. Однако прослеживается четкая зависимость увеличения радиуса МП с увеличением величины приложенного потенциала для всех уровней содержания хлор ионов в воде (Рисунок 11а). При этом для инициации образования МП при [$Cl^-$]=100 ppm требуется сдвиг потенциала в анодном направлении почти на 375 мВ по сравнению с потенциалом свободной коррозии (Таблица 2). При содержании хлор ионов в воде на уровне 10 000 и 29 000 ppm для инициации образования МП достаточна величина сдвига потенциала на уровне всего 5-10 мВ. Это свидетельствует о высокой агрессивности среды с такими уровнями содержания хлор ионов в воде и означает, что ионы хлора в этих условиях легко адсорбируются пассивными пленками на поверхности стали в области включений MnS,

делая пассивную пленку проницаемой для ионов хлора. С другой стороны, при малых потенциалах более вероятным является инициация МП на небольшого размера включениях MnS, расположенных либо непосредственно на поверхности или под очень тонкими слоями пассивной пленки. Следует отметить, что изменение содержания хлор ионов в воде с 100 до 29 000 ppm практически не оказывает влияния размеры МП (Рисунок 11а). Так при [$Cl^-$]=100 ppm радиус МП изменяется в пределах от десятых долей микрометра до ~2,7 мкм, а при [$Cl^-$], равном 10 000 и 29 000 ppm, он находится практически в тех же пределах от ~0,2 до 2,6 мкм, за исключением двух питтингов с размерами ~2,8 и ~3,7 мкм (Рисунок 11а).




*а*




*б*

*Рисунок 11 - Влияние содержания хлор ионов в воде и облучения на радиусы метастабильных питтингов: а - в условиях без облучения; б - в условиях под облучением*

Аналогичные закономерности прослеживаются и в условиях облучения (Рисунок 11б). Однако в данном случае, как отмечалось выше, область инициации и репассивации МП при [$Cl^-$]=100 ppm смещена на ~300 мВ в область меньших значений потенциала по сравнению с условиями без облучения (Рисунок 11б). Правые границы областей МП при [$Cl^-$], равных 10 000 и 29 000 ppm, практически не смещаются, оставаясь на тех же положениях, что и в условиях без облучения, а левые границы этих областей МП,

наоборот, немного смещены (в среднем ~50 мВ) в область больших значений потенциала (Рисунок 11б). Если в условиях без облучения перекрытия областей МП при малых (100 ppm) и больших (10 000 и 29 000 ppm) уровнях содержания $Cl^-$ не наблюдалось, то в условиях облучения такое явление имеет место, перекрытие областей МП при [$Cl^-$]=100 ppm и [$Cl^-$]=10 000-29 000 ppm достигает ~150 мВ.

Таким образом, основываясь на том, что метастабильные питтинги являются очагами развития щелевой коррозии, то проведенные исследования однозначно показывают, что в условиях смешанного β,γ-облучения зарождение и развитие очагов щелевой коррозии на образцах стали 316L, контактирующих с природным клиноптилолитом, даже при малых содержаниях хлор ионов в воде [$Cl^-$]=100 ppm будет иметь место при значениях перенапряжения почти на 300 мВ меньших, чем в условиях без облучения.

*О.А. Голосов, Ю.В. Лапин, С.С. Хвостов, В.Ю. Ярков,*
*Н.В. Глушкова, Ю.С. Романченко*

## Исследование возможности образования расширенного графита при технологических операциях электрохимической дезинтеграции топливных компактов ВТГР в водных растворах азотной кислоты

Одними из перспективных реакторов четвертого поколения являются высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР), которые, как предполагается, имеют большое будущее при производстве водорода и относятся к приоритетным направлениям научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом». Отличительной особенностью данного типа атомных реакторов является использование микротвэлов, диспергированных в графитовую матрицу. В активной зоне ВТГР дизайна РФ предполагается использование топливных компактов ($UO_2$-C) диаметром 12,5 мм и высотой 50 мм, содержащие 4884 TRISO-$UO_2$-микротвэлов с топливными кернами из $UO_2$ диаметром 830 мкм, покрытых несколькими слоями, включая внутренний буферный слой с менее плотным пироуглеродом (bPyC), внутренний слой плотного пироуглерода (iPyC), слой SiC и внешний слой плотного пироуглерода (oPyC), которые могут предотвратить утечку продуктов деления.

Переработка отработавшего топлива является одной из важных технологий, необходимых для обеспечения устойчивого развития ВТГР. Особое внимание следует обратить на завершающие этапы обращения с ОЯТ ВТГР. Так как облученный графит содержит в себе опасные долгоживущие радиоизотопы углерод-14 и хлор-36, требуется либо изолирование облученного замедлителя от окружающей среды, либо создание промышленных технологий утилизации.

При переработке отработавших тепловыделяющих элементов первым шагом является отделение графитовой матрицы от частиц топлива с защитными покрытиями. Если использовать надлежащую технику для предотвращения повреждения слоя SiC, можно контролировать радиоактивное загрязнение графитовой матрицы и, в конечном итоге, утилизировать графитовую матрицу как средне- или низкоактивные отходы.

В настоящее время основными методами являются механическая сепарация (измельчение) и химическая сепарация (сжигание). Механическое измельчение привело бы к образованию большого количества радиоактивной пыли и газов из-за разрушения частиц топлива с защитными покрытиями.

Операции сжигания графитовой массы может быть применена на целых топливных компактах или их фрагментах. Однако сжигание графитовой массы может

привести к выбросу большого количества отходящих газов, таких как углекислый газ, благородные газы и другие продукты деления. $CO_2$ должен быть зафиксирован в стабильном карбонате, чтобы контролировать выделение $^{14}C$. Это, в свою очередь, приведет к значительному увеличению объема твердых отходов.

Наиболее приемлемым в настоящее время считается электрохимическая дезинтеграция топливных компактов с отделением микротвэлов. Однако есть опасения, что в процессе проведения операций по электрохимической дезинтеграции топливных компактов с последующими операциями сушки отделенных фрагментов графитовой матрицы, возможно образование терморасширенного графита (ТРГ), представляющего собой мелкодисперсные пылевидной формы частицы радиоактивного графита. Поэтому проверка возможности образования такого вида графита является актуальной задачей.

В работе представлены результаты исследований по определению граничных условий образования ТРГ при проведении технологических операций электрохимической дезинтеграции топливных компактов с микротвэлами TRISO-$UO_2$.

Объектами исследований являлись топливные компакты ($UO_2$-C - компакты) лабораторного производства АО «НИИ НПО» «ЛУЧ» партий 5/23 и 6/23 содержащие TRISO-$UO_2$-микротвэлы.

Электрохимическую дезинтеграцию ТК выполняли с использованием специальной установки.

Дезинтеграцию ТК проводили в водных растворах с содержанием азотной кислоты с 3, 5 и 9 моль/дм$^3$ и плотностях тока 0,8, 1,2, 1,5 и 1,8 А/см$^2$ с контролем температуры раствора.

После процесса дезинтеграции ТК производилось отделение образовавшихся фрагментов графита и МТ от электролита с использованием сита и бумажного фильтра сорта «Синяя лента».

Фрагменты дезинтегрированного графита (ДГ) и МТ, отделенные с помощью сита и не промытые в воде, подвергались сушке на воздухе при 110 °С. После этого производилось отделение МТ от фрагментов ДГ, так были получены пробы не промытого дезинтегрированного графита (НПДГ) от остатков азотной кислоты.

Фрагменты ДГ, осажденные на бумажном фильтре, промывались в воде, так получали пробы промытого в воде дезинтегрированного графита (ПДГ).

Контроль наличия интеркалированных соединений азотной кислоты с графитом и возможных соединений графита с кислородом проводился с использованием ИК-спектрометрии на ИК-Фурье спектрометре Frontier FT-IR. Исследуемые пробы графита массой ~1 мг перетирались в ступке с KBr и последующим прессованием в таблетку.

О наличии в пробах НПДГ и ПДГ соединений с группой связей О-Н судили по наличию и величине пика с волновыми числами в диапазоне 3550-3450 см$^{-1}$, которые соответствуют валентным колебаниям димеров группы О-Н, связанной водородной связью, представляющие собой широкие полосы переменной интенсивности и обозначаемые как $\nu$(О-Н).

Характерным для всех типов карбонильных соединений является наличие на спектрах полосы с интенсивным поглощением в области волновых чисел 1900—1580 см$^{-1}$, обусловленных характеристическими колебаниями с участием группы С=0 ($\nu$(С=О)).

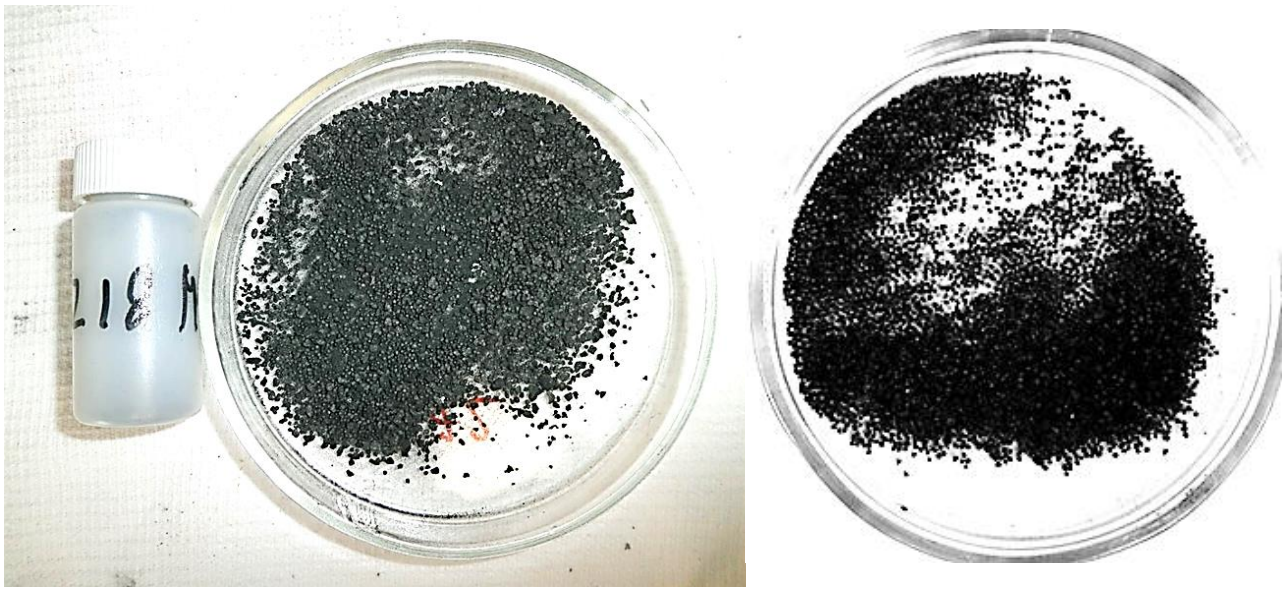
О наличии или отсутствии в пробах НДПГ и ПГ нитросоединений в виде нитрогруппы $NO_2$ судили по величине пика с волновыми числами в диапазоне 1385-1360 см$^{-1}$, которые соответствуют симметричным валентным колебаниям группы $NO_2$ и на спектре представляют собой полосу высокой интенсивности и обозначаются как $\nu_S(NO_2)$.

Работы по дезинтеграции ТК проводились поэтапно. На первом этапе отрабатывались различные варианты технологических процессов дезинтеграции ТК с целью получения оптимальных параметров проведения дезинтеграции ТК. На втором этапе проверялись возможные комбинации параметров процесса дезинтеграции ТК, при которых возможно образование терморасширенного графита. На заключительном этапе проводились исследования серии ТК при выбранных оптимальных параметрах процесса дезинтеграции и окончательной сушки дезинтегрированных фрагментов МГ, при которых не происходит образование ТРГ.

На Рисунок 12 приведены фотографии характерных видов дезинтегрированных фрагментов МГ и микротвэлов. Фрагменты ДГ представляют собой частицы графита темно-серого цвета произвольной формы (Рисунок 12а) и разных размеров. Наибольшую массовую долю (~80±0,5 %) занимают частицы ДГ с размерами фракции менее 0,355 мм. Массовая доля частиц ДГ с фракциями (0,5-0,355) мм и (0,71-0,5) мм соответственно равны ~11,6 и 6,5 %, а доля каждой фракции крупных частиц ДГ с фракциями >1,4, (1,4-1,0) и (1,0-0,71) мм не превышает десятых долей процента.

Микротвэлы сферической формы примерно одинакового размера имеют черный цвет (Рисунок 12б).

В таблице 1 приведены номера ТК, режимы дезинтеграции ТК на первом этапе испытаний, и краткая характеристика состояния образующихся частиц ДГ. Согласно этим данным, независимо от режимов дезинтеграции (содержание $HNO_3$ в диапазоне 3-9 моль/дм$^3$, плотность тока в диапазоне 0,8-1,8 А/см$^3$, объем раствора 50 или 100 см$^3$), а также независимо от того, подвергались ли частицы ДГ промывке в воде или не промывались, в состоянии до термического нагрева содержат в своих спектрах все три характерных пика ν(O-H), *ν*(C=O) и $\nu_S(NO_2)$ (Рисунок 13а). После проведения термических нагревов на воздухе при температуре ~450 ºС в пробах ДГ ТК с №№ 242, 214, 274 и 304 происходило образование ТРГ, в спектрах которых наблюдалось исчезновение пиков с волновыми числами в диапазоне 1385-1360 см$^{-1}$, соответствующих нитрогруппе $NO_2$ (Рисунок 13б-г).



*а* *б*

*Рисунок 12 - Характерные внешние виды фрагментов ДГ (а) и МТ (б)*

*Таблица 3 - Результаты дезинтеграции ТК при различных режимах испытаний*

| Номер ТК | [$HNO_3$], моль/дм$^3$ | Плотность тока, А/см$^2$ | Объем раствора, см$^3$ | Пик с диапазоном 3550-3450 см$^{-1}$ | | Пик с диапазоном 1900-1580 см$^{-1}$ | | Пик с диапазоном 1385-1360 см$^{-1}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Группа О-Н | | Группа С=О | | Группа С-$NO_2$ | |
| | | | | До ТН[1)] | После ТН | До ТН | После ТН | До ТН | По ТН |
| 217 | 3 | 1,2 | 100 | + | н. и.[2)] | + | н. и. | + | н. и. |
| 242 | 3 | 1,5 | 100 | н. и. | + | н. и. | + | н. и. | -[3)] |
| 218 | 3 | 1,8 | 50 | + | н. и. | + | н. и. | + | н. и. |
| 213 | 5 | 0,8 | 100 | + | н. и. | + | н. и. | + | н. и. |
| 214 | 5 | 0,8 | 100 | + | + | + | + | + | -[3)] |
| 215 | 5 | 1,2 | 100 | + | н. и. | + | н. и. | + | н. и. |
| 219 | 5 | 1,2 | 100 | + | н. и. | + | н. и. | + | н. и. |
| 220 | 5 | 1,8 | 50 | + | н. и. | + | н. и. | + | н. и. |
| 274 | 5 | 1,8 | 100 | н. и. | + | н. и. | + | н. и. | -[3)] |
| 216 | 9 | 1,2 | 100 | + | н. и. | + | н. и. | + | н. и. |
| 304 | 9 | 1,5 | 100 | + | + | + | + | + | -[3)] |
| 273 | 9 | 1,8 | 50 | + | н. и. | + | н. и. | + | н. и. |
| 280 | 9 | 1,8 | 100 | + | н. и. | + | н. и. | + | н. и. |

*Примечания*

*1) - ТН - термический нагрев;*

*2) - н. и. - нет измерений;*

3) *- образование ТРГ при термическом нагреве на воздухе при 450 °С.*

По результатам первого этапа дезинтеграции ТК были скорректированы режимы второго этапа исследований: содержание $HNO_3$ 2, 5 и 9 моль/дм$^3$ при плотности тока 0,8 А/см$^2$.

При этих параметрах были дезинтегрированы три ТК с №№ 350, 351 и 357. Фрагменты дезинтегрированного графита этих ТК в промытом в воде состоянии и без промывки от остатков дезинтегрирующего раствора были подвергнуты двум режимам термического воздействия.

В первом случае фрагменты ДГ в предварительно высушенном состоянии при 110 °С подвергались ступенчатому нагреву в муфельной печи в диапазоне 150-700 ˚С с шагом 50 ˚С и выдержкой в течение 5 минут при достижении целевой температуры начала образования ТРГ. По второму режиму пробы промытого и непромытого ДГ подвергались резкому нагреву (термическому «удару»). Для этого пробы ДГ, имеющего комнатную температуру, помещались в разогретую печь. Температура печи устанавливалась в экспериментах: 250, 300, 350, 400 и 500 °С.

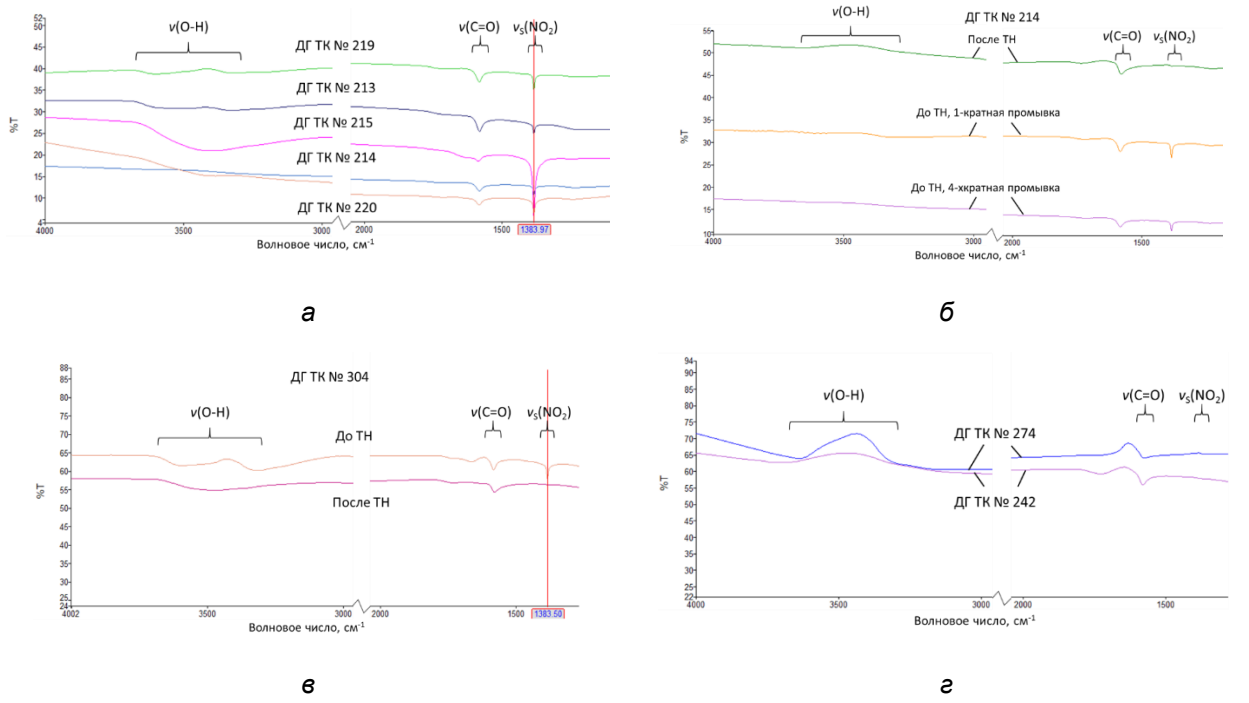



*Рисунок 13 - ИК-спектры проб ДГ в состоянии до (а-в) и после (в-г) термических нагревов: а - ТК № 213, 214, 215, 219, 220 до ТН; б - ТК № 214 (верхний график после ТН, средний - однократная промывка, до ТН, нижний - 4-хкратная промывка, до ТН); в - ТК № 304 (верхний - до ТН, нижний после ТН); г - ТК № 242 после ТН (верхний график), ТК № 274 после ТН (нижний график )*

Результаты экспериментов по обоим режимам по термическому расширению графита при данных условиях приведены в таблице 4.

Согласно данным таблицы 4 термически расширенный графит (ТРГ) при ступенчатом способе нагрева был получен только в одной из шести проб – промытый ДГ после дезинтеграции в электролите с концентрацией 2 моль/дм$^3$ перешел в расширенное состояние при 300 °С. При «термоударе» промытые и непромытые пробы ДГ, полученные в растворах с концентрацией $HNO_3$ 5 и 9 моль/дм$^3$, переходили в ТРГ при температуре ~370 °С (Рисунок 14). Непромытые пробы ДГ, полученные в растворах с концентрацией $HNO_3$

2 моль/дм$^3$ не удалось перевести в ТРГ при термоударе вплоть до температуры 500 °С.

*Таблица 4 - Результаты определения температуры образования ТРГ при ТН*

| Номер ТК | Содержание $HNO_3$, моль/дм$^3$ | Плотность тока, А/см$^2$ | При ступенчатом нагреве в диапазоне 150-700 °С | | При «термоударе», °С | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ПДГ | НПДГ | ПДГ | НПДГ |
| 357 | 2 | 0,8 | 300 | >700 | - | >500 |
| 350 | 5 | 0,8 | >700 | >700 | ~370 | ~370 |
| 351 | 9 | 0,8 | >700 | >700 | ~370 | ~370 |

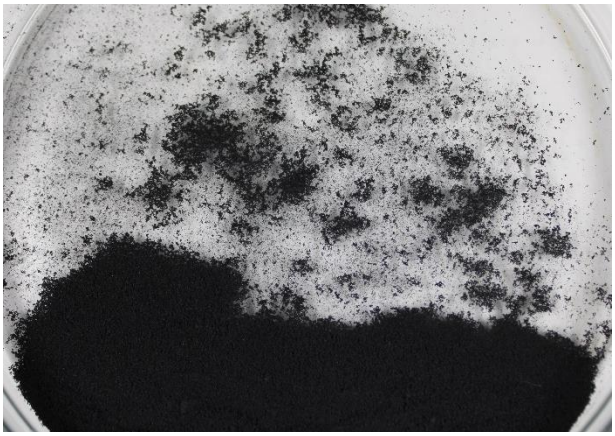


*Рисунок 14 – Вид ТРГ, полученного при термическом ударе дезинтегрированных фрагментов ТК*

Основываясь на полученных результатах, был выбран оптимальный режим дезинтеграции ТК: содержание $HNO_3$ 5 моль/дм$^3$ при плотности тока 0,8 А/см$^2$. По этим режимам были дезинтегрированы 4 ТК с №№ 351, 352, 355 и 356, длительность дезинтеграции находилась в пределах от 122 до 130 мин, температура раствора в течение процесса дезинтеграции изменялась в пределах от ~40 до ~70 °С. Во всех случаях происходило интенсивное выделение газа вблизи катода и анода. Газа, красно – коричневого цвета с характерным запахом $NO_2$ не наблюдалось. В начале процесса дезинтеграции ТК наблюдалась хлопьевидная фракция графита, а в течение 5-ти минут – мелкодисперсная.

Отделенные фракции ДГ от МТ и промытые в воде подвергались сушке при 250 °С в сушильном шкафу. По окончании сушки ТРГ не был получен ни на одном из ТК.

В ходе выбора режима дезинтеграции, в качестве эффективного режима выбраны параметры дезинтеграции: начальная плотность тока - 0,8 А/см$^2$, концентрация $HNO_3$ - 5 моль/дм$^3$, температура сушки графита после промывки - 250 °С.

Головным заказчиком работ и обладателем исключительных прав на результаты НИОКР «Отработка процесса электрохимической дезинтеграции топливных компактов с получением расширенного графита в качестве продукта» является АО «ТВЭЛ».

*Ю.В. Лапин, М.С. Китик, Н.А. Васютин, О.А. Голосов,*
*С.С. Хвостов, Е.В. Дегтярева, Н.В. Глушкова*

## Коррозионные реакторные испытания образцов основного металла и сварных соединений аустенитной стали ЭП302-Ш в Pb, содержащем кислород

В рамках программы «Прорыв» в АО ИРМ в период с 04.04.2024 по 27.01.2025 г. были проведены длительные реакторные коррозионные испытания образцов аустенитной хромоникелевой стали ЭП302-Ш в свинцовом теплоносителе, содержащем кислород. Испытывались образцы в виде пластин размером 10х5х1,2, 30х10х1,2 и 40х10х1,2 мм, вырезанных электроискровым способом из участков основного металла, зон термического влияния и сварного шва в поперечном сечении сварных соединений, изготовленных из листов стали ЭП302-Ш (10Х15Н9С3Б1-Ш) толщиной 32 мм с использованием присадочного материала в виде сварочной проволоки марки

Св-03Х14Н8С3БУ (ЭП305-У). Образцы испытывались в механически шлифованном состоянии до шероховатости Ra=1,25 мкм.

Испытания проводились в течение 12 реакторных циклов работы ИЯУ ИВВ-2М до набора общей экспозиции ~5175 ч. Кинетика изменения параметров коррозионных испытаний приведена в графическом виде на рисунке 1, а также в таблице 1 в цифровом формате для каждого цикла испытаний. Достигнуты следующие средние значения параметров испытаний:

- температура образцов вне облучения была равна 534±3 оС;
- температура образцов под облучением была равна 536±3 оС;
- концентрация кислорода - (2,2±0,3)•10-6 масс.%;
- флюенс нейтронов, н/см2: 1,82*1021 - среднее, 2,29*1021 - максимальное.

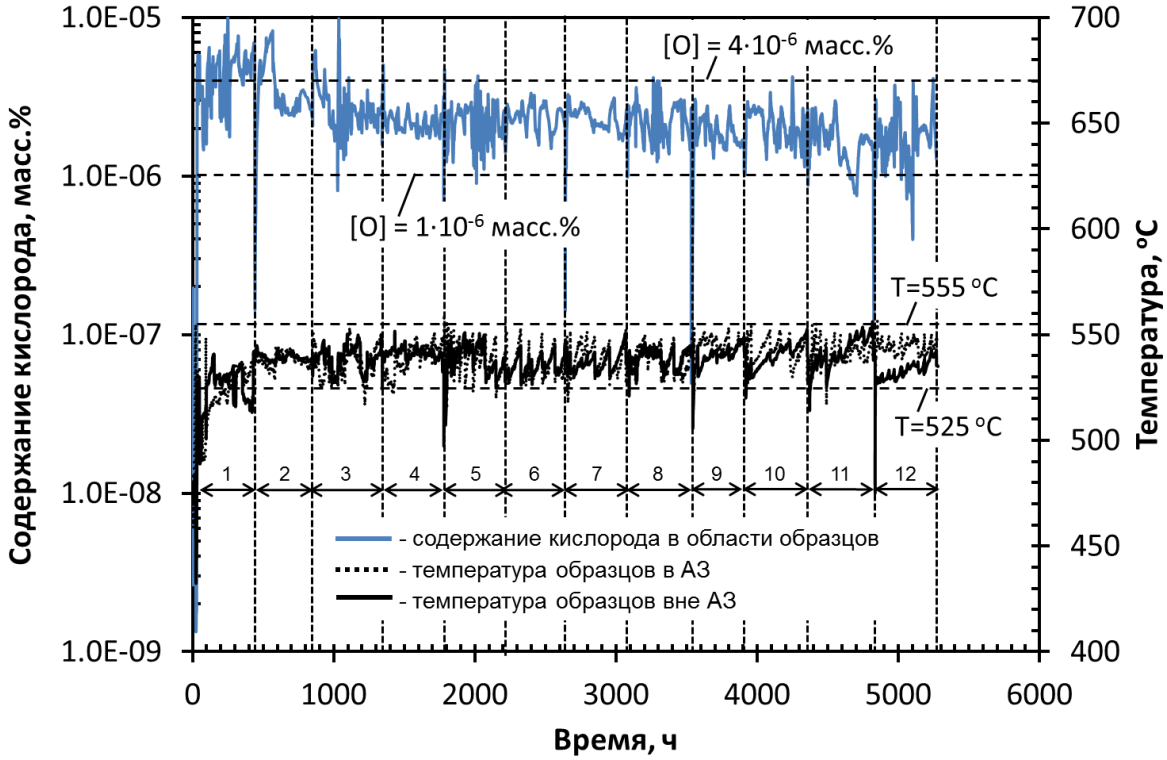



*Рисунок 15 - Кинетические зависимости изменения содержания кислорода в свинце и температуры на участках вне и под облучением*

В связи с конструктивными особенностями облучательного устройства (ОУ), представляющего собой цельносварную конструкцию, и невозможности проведения по

этой причине предварительной пассивации больших по площади оголенных поверхностей ОУ, коррозионные испытания образцов проводились одновременно с расходом кислорода, как на коррозию исследуемых образцов, так и на пассивацию поверхностей контура ОУ. По этой причине в первом цикле испытаний содержание на входе в ОУ поддерживалось на уровне (6-10) $\cdot 10^{-6}$ масс. %. Однако даже в этих условиях содержание кислорода на выходе из ОУ на протяжении почти 100 ч испытаний первого этапа находилось ниже требуемого $1 \cdot 10^{-6}$ масс. %. При этом значения поглощенного кислорода в ОУ в каждом цикле циркуляции свинца приближались к 100 %. Следует отметить, что с учетом конструкции реакторной петли датчики измерения активности кислорода (ДАК) в свинце располагались на расстоянии ~12 м от участков расположения образцов в ОУ. Поэтому показания ДАК на входе (ДАК4) и выходе (ДАК3) из ОУ не в полной мере отражают содержание кислорода в области расположения образцов: показания ДАК4 дают завышенные, а ДАК3 заниженные значения кислорода в свинце.

*Таблица 5 - Характеристики параметров коррозионных испытаний образцов стали*

| Номер цикла | Температура, °С | | Длительность испытаний, ч | | Содержание кислорода, х$10^{-6}$ масс. % | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Вне АЗ | В АЗ | Вне АЗ | В АЗ | На входе в ОУ | На выходе из ОУ | В области образцов* |
| 1н | 459÷554<br>500,0±2,5 | 433÷529<br>497,7±3,0 | 104 | 104 | 0,0025÷0,38<br>0,024±0,011 | 0,0025÷0,018<br>0,0008±0,0001 | 0,0013÷0,19**<br>0,012±0,006 |
| 1к | 513÷542<br>527,6±0,4 | 504÷543<br>525,9±0,4 | 341 | 341 | 3,5÷16,9<br>8,4±0,1 | 0,003÷3,4<br>1,1±0,03 | 0,3÷10,0***<br>4,4±0,07 |
| 2 | 535÷544<br>529,2±0,1 | 529÷546<br>538,1±0,2 | 412 | 412 | 0,3÷12,0<br>2,0±0,03 | 0,0006÷5,7<br>2,0±0,06 | 0,15÷8,1<br>3,6±0,08 |
| 3 | 527÷554<br>538,5±0,2 | 525÷559<br>537,0±0,3 | 494 | 506 | 0,37÷17,5<br>4,1±0,03 | 0,19÷3,7<br>0,5±0,02 | 0,03÷9,8<br>2,3±0,04 |
| 4 | 525÷552<br>541,1±0,2 | 525÷551<br>539,0±0,3 | 436 | 437 | 2,4÷8,7<br>3,2±0,03 | 0,3÷1,8<br>1,2±0,02 | 0,32÷5,0<br>1,6±0,03 |
| 5 | 525÷551<br>539,3±0,3 | 525÷559<br>538,8±0,4 | 416 | 434 | 1,4÷5,7<br>2,9±0,03 | 0,005÷3,7<br>1,5±0,02 | 0,69÷47<br>2,2±0,02 |
| 6 | 526÷547<br>535,7±0,2 | 526÷553<br>535,3±0,3 | 440 | 440 | 2,0÷4,0<br>3,0±0,02 | 1,0÷2,6<br>1,8±0,02 | 1,5÷3,3<br>2,4±0,02 |
| 7 | 530÷550<br>536,7±0,3 | 526÷553<br>538,8±0,3 | 438 | 431 | 0,27÷4,1<br>2,9±0,02 | 0,02÷2,4<br>1,7±0,02 | 0,15÷3,3<br>2,3±0,02 |

*Продолжение таблицы 5 - Характеристики параметров коррозионных испытаний образцов стали*

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 525÷546<br>539,1±0,2 | 527÷550<br>538,2±0,3 | 451 | 452 | 1,4÷4,4<br>2,9±0,03 | 0,55÷4,2<br>1,7±0,03 | 0,99÷4,1<br>2,3±0,03 |
| 9 | 529÷547<br>540,2±0,2 | 524÷554<br>545,3±0,2 | 375 | 369 | 0,95÷4,0<br>2,5±0,03 | 0,0004÷2,2<br>1,2±0,02 | 0,05÷3,1<br>1,9±0,02 |
| 10 | 527÷553<br>539,7±0,3 | 527÷554<br>542,7±0,2 | 449 | 449 | 1,6÷5,0<br>2,8±0,03 | 0,4÷3,5<br>1,5±0,02 | 1,0÷4,2<br>2,1±0,02 |
| 11 | 525÷556<br>541,5±0,3 | 525÷555<br>541,8±0,2 | 464 | 459 | 1,4÷4,3<br>2,6±0,03 | 0,003÷1,7<br>0,7±0,02 | 0,75÷3,0<br>1,6±0,02 |
| 12 | 525÷543<br>533,1±0,2 | 527÷557<br>544,2±0,2 | 443 | 445 | 0,2÷6,4<br>2,6±0,04 | 0,04÷2,5<br>0,9±0,02 | 0,13÷4,1<br>1,8±0,03 |
| **Сред-нее** | **534 ± 3** | **536 ± 3** | **5159** | **5175** | **4,9 ± 1,8** | **1,2 ± 0,2** | **2,2 ± 0,3** |

*Примечания*

** - Рассчитано как среднее показаний на входе и выходе из ОУ*

*** - Рассчитано для интервала испытаний 0-32 ч*

**** - Рассчитано для интервала испытаний 33-445 ч*

Таким образом, за более реальные значения кислорода в свинце в области расположения образцов можно принять равными полусумме показаний ДАК4 и ДАК3.

Основываясь на этих данных уже после ~32 ч испытаний показания кислорода в области расположения образцов достигали ~$1{,}9\cdot10^{-6}$ масс.%, однако доля поглощаемого кислорода в ОУ оставалась довольно высокой на уровне 95-98 %. По оценкам средняя скорость поглощения кислорода поверхностями образцов в этот период времени находилась в пределах ~$(1{,}7\text{-}2{,}7)\cdot10^{-1}$ г/(м$^2$·ч). После ~100 ч испытаний доля поглощаемого кислорода в ОУ начала монотонно снижаться и к ~300 ч испытаний вышла практически на постоянное значение ~75 %, на котором оставалась до конца первого цикла испытаний. Средняя скорость поглощения кислорода поверхностями образцов в конце первого цикла испытаний снизилась почти в 20 раз до уровня ~$5{,}8\cdot10^{-2}$ г/(м$^2$·ч).

В начальные часы второго цикла испытаний длительностью до 50 ч также были отмечены пониженные значения содержания кислорода на выходе из ОУ, при этом значения кислорода на входе в ОУ находились на уровне $(3\text{-}10)\cdot10^{-6}$ масс.%. В это же время расчетные значения кислорода в области расположения образцов находились на уровне $(2\text{-}7)\cdot10^{-6}$ масс.%. Доля поглощенного кислорода в ОУ также в начальные часы второго этапа была высокой и находилась на уровне ~97-99 %, после 50 ч испытаний она начала постепенно снижаться и к ~115 ч испытаний достигла ~45 %, на котором и оставалась до конца второго цикла испытаний.

Начиная с третьего цикла испытаний, содержание кислорода на входе в ОУ было понижено до значений $(3\text{-}4)\cdot10^{-6}$ масс.%, что в связи постепенной пассивацией материалов контура петли привело к установлению содержания кислорода на выходе из ОУ на уровне $(0{,}9\text{-}1{,}7)\cdot10^{-6}$ масс.%, а в области расположения образцов в пределах

(1,6-2,3)·$10^{-6}$ масс.%. Доля поглощенного кислорода в ОУ в процессе испытаний с 3 по 12 цикл постепенно снижалась с ~60 до 45 %.

После испытаний облучательное устройство с навесками образцов передано в корпус защитных камер для проведения материаловедческих исследований.

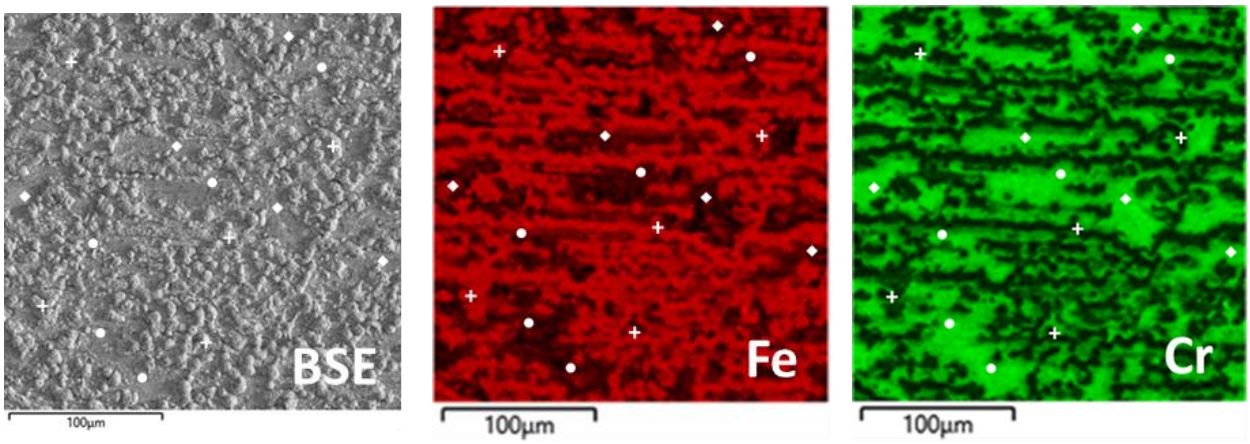
*О.А. Голосов, Е.В. Шабельников, С.С. Хвостов, Ю.С. Романченко*

## Микроструктурные исследования оксидных пленок на образцах аустенитной стали ЭП302-Ш после испытаний в Pb, содержащем кислород

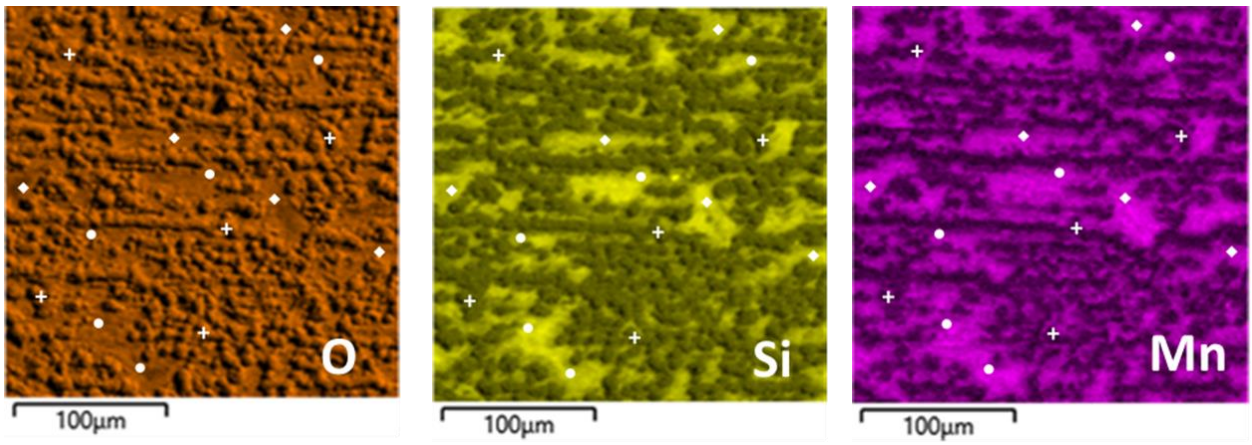
В отчете «Научный годовой отчет АО «ИРМ»-2023» сообщалось о проведении реакторных коррозионных испытаний длительностью 2558 ч при 540±15 ºС в потоке свинца, содержащего кислород на уровне (0,8-1,8)·$10^{-6}$ масс. %, образцов основного металла, зон термического влияния и металла сварного шва сварных соединений аустенитной стали ЭП302-Ш, выбранной в качестве материала корпуса реактора и контура циркуляции. Предполагается ее использование и в качестве отдельных элементов внутрикорпусных устройств.

В данной работе приводятся результаты микроструктурных исследований оксидных пленок, образовавшихся на поверхности материала основного металла (ОМ) и сварного шва (СШ) сварных соединений (СС) стали ЭП302-Ш в условиях вне облучения.

Согласно данным визуального осмотра состояние поверхности образцов ОМ и СШ практически не отличается, на поверхности образцов СС стали образовались оксидные пленки с цветом от темно-серого до черного, имеющие неоднородный характер распределения по поверхности образцов. При проведении СЭМ исследований на поверхности образцов ОМ отчетливо видны участки относительно «плоского» строения продуктов коррозии (ПК) и их формирования в виде холмообразной формы, выступающих над поверхностью образцов и имеющие преимущественно строчный характер расположения (рис 1а). Согласно данным карт по элементам, плоские области обогащены Cr (рис. 1в), Si (рис. 1д) и Mn (рис.1е), а образования холмообразной формы содержат в основном Fe (рис. 1б) и O (рис. 1г), распределение которого по всей поверхности исследуемого участка стали является однородным.




а б в




г д е

*Рисунок 16 - СЭМ-изображение продуктов коррозии на поверхности СШ образца ОМ СС стали ЭП302-Ш после удаления Pb и картирование этого участка по элементам*

*Таблица 6 - Содержание элементов в оксидной пленке на различных участках образцов*

| Анализируемая область (точка) | Содержание элементов, масс.% | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | O | Si | Cr | Mn | Fe | Ni | Pb |
| А (крест) | 22,7±2,6 | 0,1±0,1 | 1,4±0,1 | 0,9±0,1 | 71,8±2,7 | 1,6±0,2 | 1,4±0,2 |
| Б (ромб) | 16,8±2,5 | 5,6±0,8 | 18,7±0,5 | 2,5±0,4 | 48,7±2,6 | 5,7±1,9 | 1,3±0,4 |
| В (круг) | 29,8±0,4 | 1,2±0,2 | 6,0±0,7 | 4,0±0,6 | 56,5±1,3 | 0,7±0,1 | 1,5±0,3 |

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) по данным в точках, обозначенных на рисунке 16 в виде крестов, показывают, что холмообразные образования представляют собой магнетит $Fe_3O_4$ и состоят в основном из Fe – (71,8±2,7) масс.% и O – (22,7±2,6) масс.% (табл. 6). В составе $Fe_3O_4$ выявлено также наличие небольшого количества Cr, Mn, Ni и Pb на уровне ~1-1,5 масс.% и практически полное отсутствие Si.

По данным МРСА областей оксидной пленки с плоской формой поверхности они представляют собой железо-хромистую шпинель переменного состава. Так в областях Б, обозначенных точкой в виде ромба, выявлены повышенные значения Cr, Si и Ni с пониженными почти на 10 масс.% содержанием Fe по сравнению с областями В, обозначенными точкой в виде круга (см. табл. 6). Так содержание Cr, Si и Ni в областях Б соответственно выше в ~3, ~5 и ~8 раз, чем в областях В.

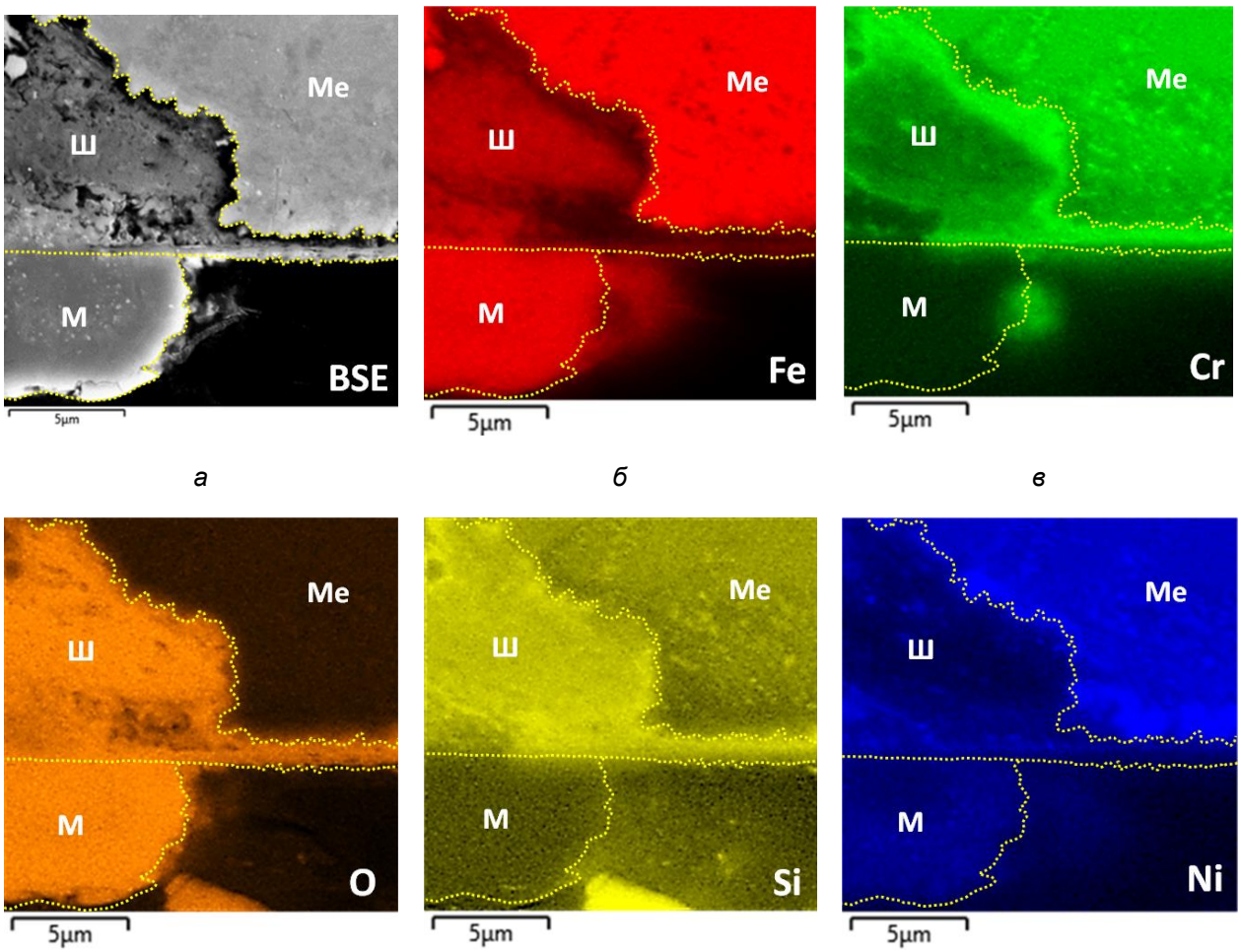



*Рисунок 17 - СЭМ-изображение оксидной пленки в поперечном сечении в области образования «плоских» и холмообразных ПК на поверхности ОМ образца стали ЭП302-Ш с картированием этого участка по элементам: Ш - шпинель, Ме - металл, М - магнетит*

На рисунке 17 приведено СЭМ-изображение оксидной пленки в поперечном сечении в области соприкосновения «плоских» и холмообразных продуктов коррозии (ПК), образовавшихся на поверхности образца ОМ стали ЭП302-Ш в процессе испытаний.

Внутренний слой оксидной пленки, растущий вглубь стали, представляет собой железо-хромистую шпинель типа $FeCr_2O_4$ с содержанием помимо Cr и Fe также таких элементов стали как Si, Ni и Mn (рис. 17). Следует отметить, что распределение содержания Cr, Fe и Ni по сечению этого слоя оксидной пленки имеет неоднородный характер (рис. 17 б,в,е). Отмечается повышенное содержание Cr в слоях шпинели, примыкающих к зоне контакта с основным металлом (рис. 17в).

На рисунке 3 приведены результаты исследования методом МРСА распределения содержания основных элементов стали (Fe, Cr, Mn, Ni, Si, Nb), O и Pb по линии сканирования по сечению оксидной пленки, образовавшейся на поверхности образца ОМ в процессе коррозионных испытаний.

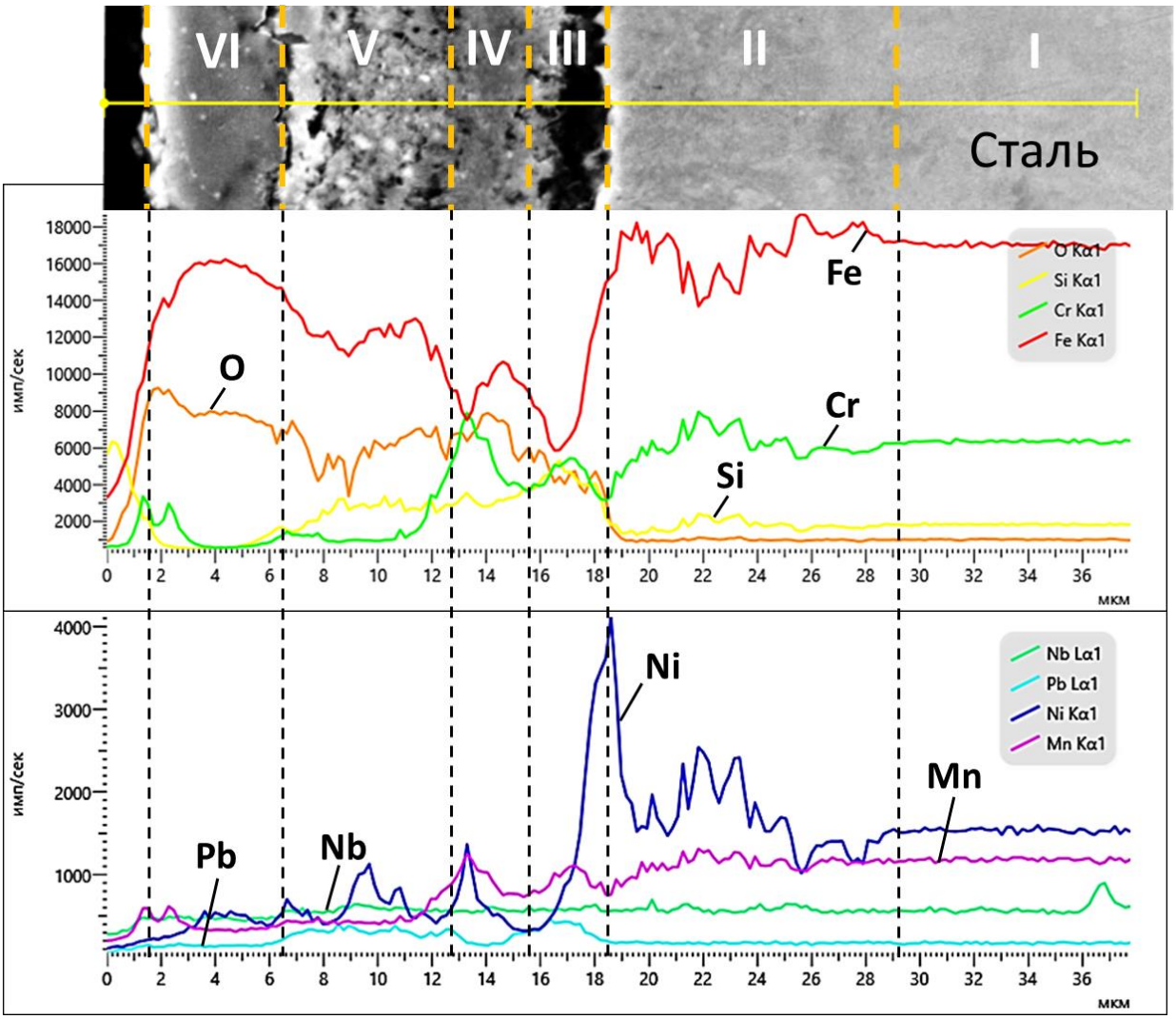



*Рисунок 18 - СЭМ-изображение участка оксидной пленки на образце ОМ стали ЭП302-Ш с графиками распределения Fe, Cr, Mn, Ni, Si, Nb, O и Pb по линии сканирования, проходящей поперек сечения оксидной пленки*

Согласно этим данным на поверхности шлифа можно выделить шесть областей:

- это область стали, не подверженной и не участвующей в коррозионных процессах, обозначенная римской цифрой I;

- область II, представляющая собой поверхностные слои стали шириной ~11 мкм, в которых протекают диффузионные процессы (в том числе по границам зерен) элементов стали, участвующих в реакциях коррозии. В литературе принято называть эту область диффузионной зоной (ДЗ);

- область III представляет собой слой внутреннего окисления с образованием оксидов на основе Cr, Si и Mn, формирующихся по границам зерен;

- области IV и V представляют собой внутренний слой оксидной пленки, состоящий из железо-хромистой шпинели, области IV и V отличаются друг от друга, прежде всего, содержанием хрома: в области IV содержание Cr выше, чем в области V;

- область VI представляет собой магнетит.

В диффузионной области II наблюдается пикообразный характер изменения содержания Fe, Cr, Ni, Si и Mn по линии сканирования (рис. 18). Характер изменения этих элементов существенно отличается от их поведения в аналогичном диффузионном слое феррито-мартенситной стали ЭП823-Ш, в котором (по причине малого содержания в стали Ni ~0,7 масс.%) отмечается практически плавное снижение содержания Cr, Si, Mn и, наоборот, возрастание содержания Fe, по мере приближения к границе с оксидом.

Наиболее сильные изменения в содержании элементов в ДЗ стали выявлены у никеля, изменяющие в пределах от ~0,7 до ~1,7-2,7 раз по отношению к его содержанию в стали. При этом пониженные значения в содержании Ni, по сравнению с его содержанием в объеме стали, наблюдаются во внутреннем слое ДЗ шириной ~2 мкм. В то время как по мере приближения к границе с оксидом содержание Ni возрастает, достигая максимального уровня на границе с оксидной пленкой (рис. 18).

Характер изменения содержания Cr в ДЗ практически совпадает с характером изменения содержания Ni на длине ~2/3 от ширины ДЗ, что подтверждается совпадением положений минимумов и максимумов Cr и Ni. Однако в слое ДЗ, примыкающем к оксидной пленке, имеется существенное отличие, которой заключается в том, что содержание Cr снижается по мере приближения к границе с оксидом, а Ni возрастает (рис. 3).

Аналогичный хрому имеет и характер в изменении содержания Mn с той лишь разницей, что максимумы и минимумы в содержания Mn менее выражены по причине его более низкого содержания в стали по сравнению с содержанием Cr (рис. 18).

Характер изменения содержания Fe в ДЗ имеет зеркальное отражение от характера изменения содержания Ni, положениям максимумов [Fe] соответствуют положения минимумов в содержании Ni и наоборот (рис. 3).

Такое различие в характере изменения содержания Fe, Cr, Ni, Si и Mn по линии сканирования в ДЗ, вероятно, связаны с различной диффузионной подвижностью этих элементов, как в объеме стали, так и по границам зерен.

В области III выявлены пониженные значения в содержании Fe (почти в 5 раз ниже, чем в стали) и повышенные значения в содержании Cr, Si и Mn, а также высокое содержание кислорода. Предполагается, как отмечалось выше, что данный слой представляет собой слой внутреннего окисления, состоящего их оксидов этих элементов. Согласно данным рисунка 18, в этом слое отмечается наличие повышенного содержания Pb, что свидетельствует о дефектности слоя оксидной пленки и проникновении Pb вплоть до металла стали. Этот слой не имеет прочного сцепления с металлической подложкой, о чем свидетельствует узкая трещина, образовавшаяся (вероятно, при приготовлении металлографического шлифа) между оксидной пленкой и сталью.

Область IV, вероятно, представляет собой железо-хромистую шпинель, так как в этой области выявлено высокое содержание Fe, Cr и O. Помимо этих элементов в слое выявлено наличие Mn и V на уровне их содержания в стали, более высокое, чем в стали содержание Si, а также малые количества Ni (рис. 18).

По наличию в области V всех элементов, выявленных в области IV, ее можно было бы также отнести к железо-хромистой шпинели. Однако в этой области выявлено очень низкое содержание хрома с переменным и постепенно снижающимся его содержанием, по мере приближения к следующему слою VI, состоящему преимущественно из Fe, O и представляющему собой магнетит ($Fe_3O_4$). По всей видимости, область V можно считать переходной между шпинелью и магнетитом, так как последние, представляя собой шпинельные структуры $Fe^{2+}(Fe_{1-x}^{3+},Cr_x^{3+})_2O_4$ и $Fe^{2+}(Fe_{1-x}^{3+},Fe_x^{3+})_2O_4$, имеют неограниченную растворимость.

Работы выполнены при финансовой поддержке Госкорпорации «Росатом» в рамках государственного контракта №Н.40.241.19.22.1064 от 25.04.2022 г.

*О.А. Голосов, Ю.С. Романченко, В.Ю. Ярков, С.С. Хвостов, Е.В. Шабельников*

## Нейтронографические исследования фазового состава модельного ядерного топлива

В настоящее время в рамках проектного направления «Прорыв» разрабатывается реактор на быстрых нейтронах с пристанционным модулем переработки облученного

ядерного топлива (ОЯТ). Переработка ОЯТ с коротким временем выдержки предполагается безводными пироэлектрохимическими методами в расплавах хлоридов щёлочных металлов. В ходе отработки технологии важно иметь надежные сведения о структурном и фазовом составе продуктов на каждой стадии технологии переработки ОЯТ, в связи с чем целью настоящей работы является нейтронографическое исследование структурного и фазового состояния модельного ядерного топлива (МЯТ) до и после процесса электролитического восстановления волоксидированного ОЯТ.

Использование нейтронографических методов для изучения структурного и фазового состояния продуктов переработки ОЯТ имеет ряд важных преимуществ: тепловые нейтроны, имея дебройлевскую длину волны порядка единиц ангстрема, подобно рентгеновским лучам испытывают дифракцию на кристаллических решётках материалов, но при этом обладают высокой проникающей способностью, позволяя изучать объёмные образцы, узлы или даже целые конструкции. Это позволяет исследовать фазовый состав по всему объёму образца, а также упаковывать образцы в герметичные ванадиевые контейнеры, исключающие контакт ОЯТ с атмосферой в процессе эксперимента, а также использовать сложные системы окружения образца в виде печек, криостатов, камер высокого давления и т. п. Нерегулярный характер зависимости сечений рассеяния нейтронов от атомного номера элементов создает на дифракционном эксперименте соответствующий контраст и позволяет детектировать лёгкие элементы на фоне тяжёлых, что весьма затруднительно для рентгеновских лучей. Это делает возможным нейтронографическую идентификацию фаз и аттестацию параметров кристаллических структур композиционных материалов, состоящих из тяжёлых атомов урана и лёгких атомов кислорода и азота, неразличимых для рентгеновского излучения на фоне многоэлектронных атомов урана.

Нейтронографические измерения проводились с помощью метода упругого когерентного рассеяния нейтронов, в котором определяется угловое распределение монохроматических тепловых нейтронов, рассеянных на исследуемом образце. Для изучения исследуемых образцов МЯТ применялся нейтронный дифрактометр высокого разрешения Д-7а Нейтронного материаловедческого комплекса ИФМ УрО РАН, функционирующий на ГЭК-7 ИЯУ ИВВ-2М на экспериментальной площадке АО «ИРМ».

В работе получены экспериментальные нейтронограммы модельного ядерного топлива, выполнена их детальная обработка полнопрофильным методом Ритвельда, представлены модельные расчеты ожидаемых фаз в процессе металлизации урана, проведена аттестация фазового состава и структурных параметров пяти образцов МЯТ:

– образец № 1: механическая смесь диоксида урана и диоксида циркония в соотношении 95 мас.% к 5 мас.%;

– образец № 2: смесь диоксида урана 95 мас.% и диоксида циркония 5 мас.% после прессования, спекания и размола;

– образец № 3: смесь диоксида урана 90 мас.% и диоксида циркония 10 мас.% после прессования, спекания и размола;

– образец № 4: смесь диоксида урана 95 мас.% и диоксида циркония 5 мас.% после электролитического восстановления и отгонки электролита;

– образец № 5: смесь диоксида урана 90 мас.% и диоксида циркония 10 мас.% после электролитического восстановления и отгонки электролита.

В результате отжига исходных смесей диоксидов урана и циркония могут формироваться смешанные твёрдые растворы $(U,Zr)O_2$ с меньшим, чем у чистого $UO_2$, параметром кубической решётки, который линейно и обратно пропорционально зависит от доли циркония. Методика нейтронного рассеяния чувствительна к фазовому

распределению в образцах продуктов реакций в процессах обращения с МЯТ с точностью до 1 вес.%.

В процессе электролитического восстановления в металлическую фазу переходят оба компонента твердого раствора: уран и цирконий, образуя индивидуальные металлические фазы, несмотря на то, что в чистом виде $ZrO_2$ термодинамически устойчив и не восстанавливается в условиях, при которых было проведено электролитическое восстановление МЯТ.

Полученные в результате исследований характеристики (фазовый состав, кристаллографические параметры элементарной ячейки каждой фазы, коэффициенты заполнения и координаты атомов) будут использованы для уточнения параметров процессов на отдельных стадиях пироэлектрохимической переработки ОЯТ.Работы выполнены в рамках Проектного направления «Прорыв».

*АО «ИРМ»: О.А. Голосов, С.С. Хвостов, Ю.С. Романченко, , Н.В. Глушкова*
*ИФМ УрО РАН: А.Ф. Губкин М.А. Сёмкин,ИФТЭ УрО РАН: П.Н. Мушников,*

## Исследования микроструктуры облученных и отожжённых после облучения аустенитных сталей марок 08Х18Н10Т и 10Х18Н9 методами электронной микроскопии

Настоящая работа выполнена по договору с НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей». Исследовали образцы внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР-440, изготовленных из аустенитной стали 08Х18Н10Т, облученных при температуре (270-285) °С до повреждающей дозы ~ (40-46) сна, и образцы аустенитной стали 10Х18Н9, облученные в реакторе БОР-60 при температуре (390-400) °С до повреждающей дозы ~ 30 сна. Целью работы было определение при помощи просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) особенностей микроструктуры аустенитных сталей после облучения и последующих автоклавных испытаний на коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) в среде, имитирующей теплоноситель первого контура реакторов типа ВВЭР, а также оценка влияния режимов восстановительного отжига облученных образцов на структурные характеристики образцов, испытанных на КРН.

По результатам электронно-микроскопических исследований получены количественные характеристики структурного состояния сталей 08Х18Н10Т и 10Х18Н9:

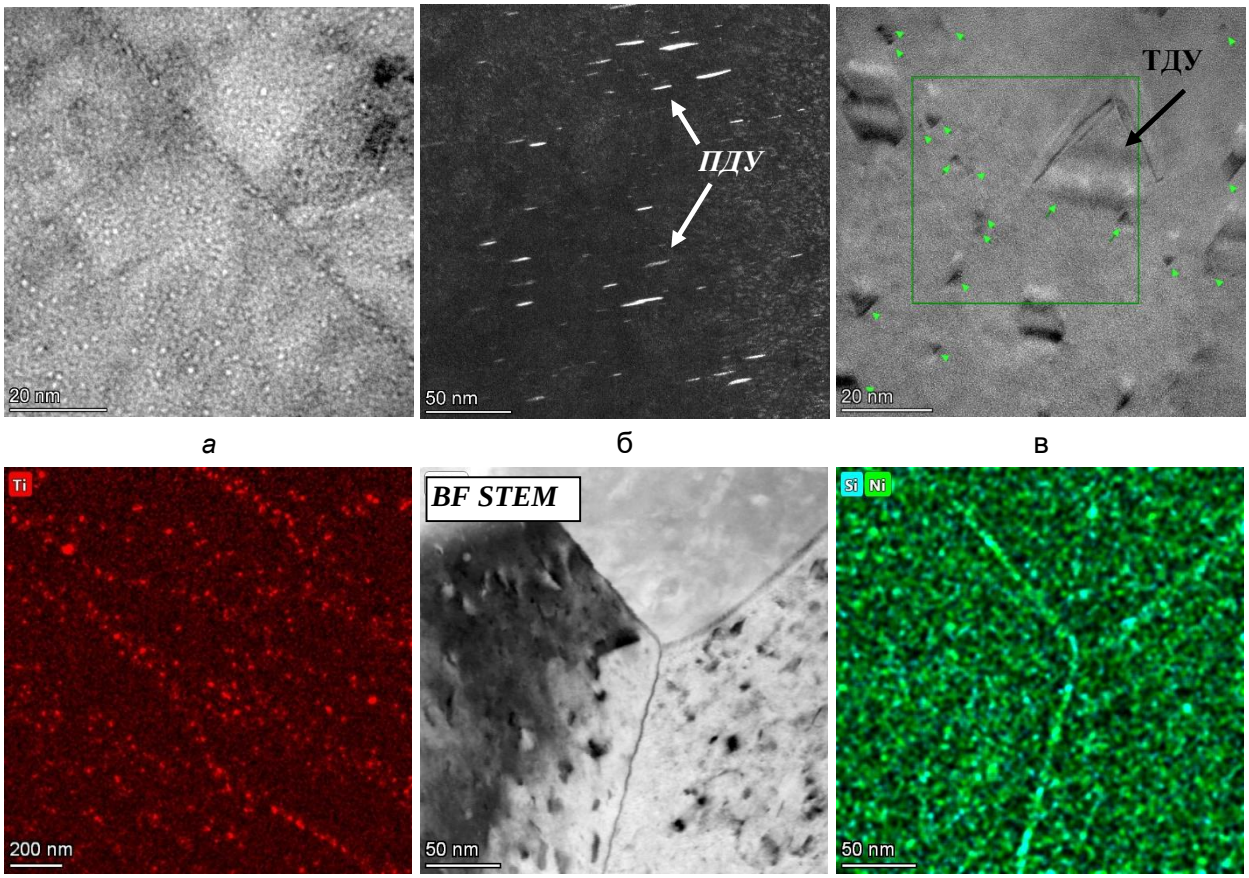
- определены параметры вакансионной пористости: размерные характеристики, концентрация, распухание;
- определены концентрация и размерные характеристики радиационно-индуцированных междоузельных дислокационных петель Франка (ПДУ) и тетраэдров дефектов упаковки (ТДУ) вакансионного типа;
- определены концентрация и размерные характеристики упрочняющих мелкодисперсных выделений вторых фаз, получены профили распределения легирующих элементов в окрестности границ зерен.

Показано существенное отличие структурного состояния образцов аустенитных сталей, стабилизированных и нестабилизированных титаном, облучавшихся при различных температурах эксплуатации. В стали 08Х18Н10Т, стабилизированной титаном, после облучения при температуре (270-285) °С из вторых фаз обнаружены только мелкодисперсные карбонитриды титана, радиационно-индуцированная пористость не превышала десятой доли процента, наблюдали только мелкие (1-3) нм поры (газовакансионные пузырьки), отмечено появление РИС никеля и кремния на границах зерен, рисунок 19.

В стали 10Х18Н9, нестабилизированной титаном, после облучения в реакторе при более высокой температуре даже при меньшей дозе, сформировалась заметная

радиационно-индуцированная пористость, объемное распухание на образцах составило порядка 2,5 % при среднем размере пор ~25 нм. Произошли фазовые превращения с образованием мелкодисперсных карбидов типа $M_{23}C_6$ на основе хрома и интерметаллидной $\gamma'$ - фазы на основе никеля и кремния. На границах зерен сформировались массивные и протяженные выделения $M_{23}C_6$, на межфазных границах и границах зерен наблюдали РИС никеля и кремния, рисунок 20.

ПЭМ исследования образцов стали 08Х18Н10Т после отжига при температуре 500-600 °С показали наиболее заметные изменения концентрации ПДУ, ТДУ, мелких газовакансионных пузырьков, при этом увеличился средний размер дефектов. Отмечено снижение уровня РИС на границах зерен, не обнаружено заметного влияния отжига на выделения карбонитридов.

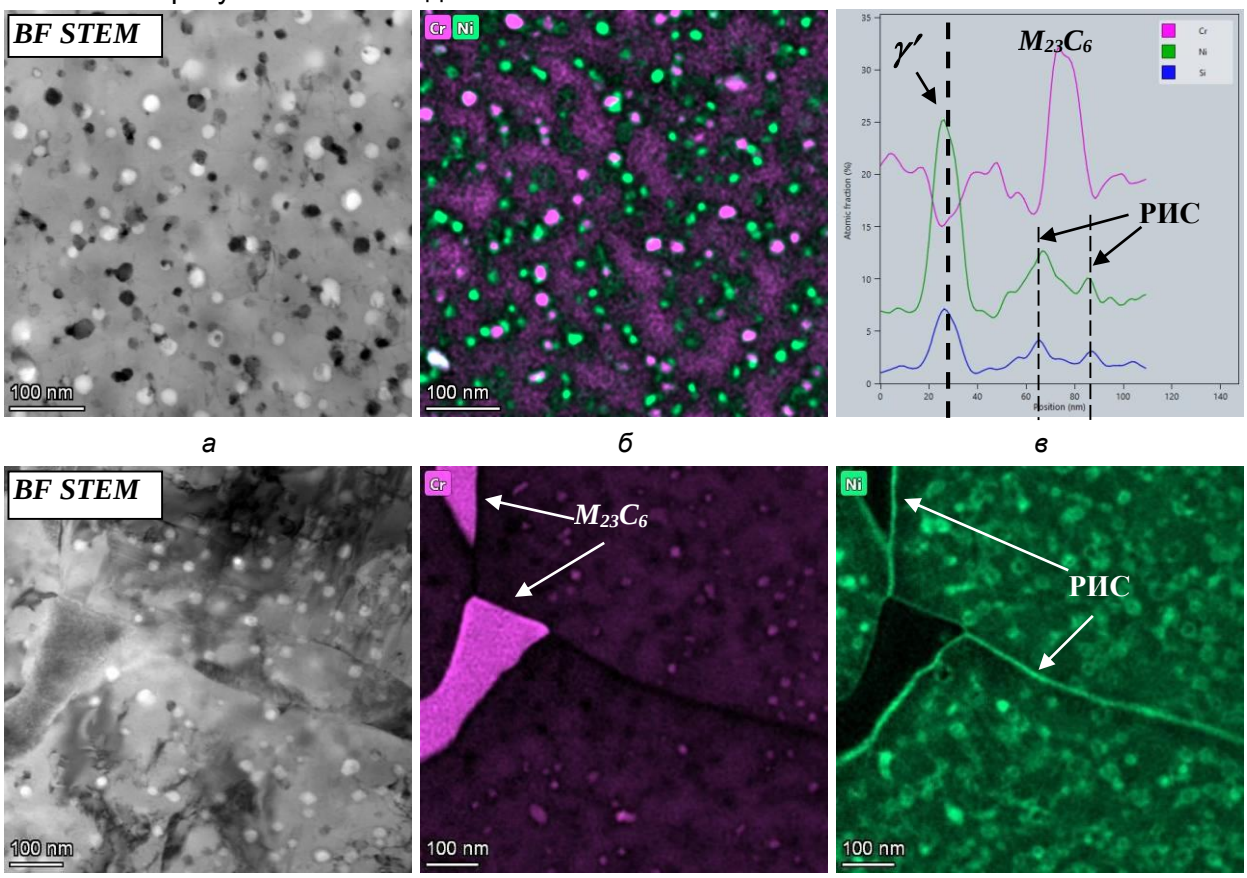



*а,б,в – радиационно-индуцированные дефекты: мелкие поры или газо-вакансионные пузырьки (а), петли с дефектом упаковки (б) и тетраэдры дефектов упаковки (в);*
*г – мелкодисперсные карбонитриды титана в строчках по границам внутризеренной субструктуры;*
*д,е – РИС никеля и кремния по границам тройного стыка зерен*

*Рисунок 19 – Структурное состояние сплава 08Х18Н10Т*

В образцах из стали 10Х18Н9 после отжига при температуре 600 °С наблюдалось существенное изменение концентрации выделений вторых фаз, при этом практически не изменился средний размер частиц выделений, уменьшился уровень РИС по границам зерен. Отжиг также привел к снижению концентрации вакансионных пор, при этом средний размер их увеличился, а в результате распухание осталось на прежнем уровне.

Полученные результаты используются Заказчиком для установления связи между микроструктурой, радиационно-индуцированными сегрегациями и механизмами коррозионного разрушения под напряжением, а также для уточнения и корректировки прогнозных зависимостей для оценки долговечности компонентов ВКУ ВВЭР по критерию коррозионного растрескивания под напряжением и определения оптимальных режимов отжига ВКУ для восстановления сопротивления КРН. Получена положительная оценка Заказчиком результатов исследований АО «ИРМ».




*а-в – светлопольное STEM изображение, смешанная карта распределения Cr + Ni и профиль распределения Cr, Ni и Si в сечении частиц γ′- фазы и $M_{23}C_6$;*
*г-е – светлопольное STEM изображение и карты распределения Cr, Ni на участке тройного стыка зерен с массивными карбидами и РИС никеля на межзеренных границах*
*Рисунок 20 – Выделения вторых фаз в образцах облученной в реакторе БОР-60 стали 10Х18Н9 до отжига (а-в) и после отжига 600 °С х 1 ч (г-е)*

*АО «ИРМ»: Панченко В.Л., Портных И.А., Устинов А.Е., Ярков В.Ю., Пастухов В.И.*
*НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»: Марголин Б.З., Пирогова Н.Е.*

## Исследование эволюции микроструктуры стали типа Cr16-Ni19 при облучении в реакторе на быстрых нейтронах

При эксплуатации в реакторах на быстрых нейтронах материал активной зоны подвергается экстремальным воздействиям температур и высокопоточного нейтронного облучения. Максимальные воздействия испытывает материал оболочек тепловыделяющих элементов (твэлов), от срока службы которого, напрямую зависит экономическая эффективность реактора. Основным фактором, ограничивающим длительность работы твэлов, является радиационное распухание оболочек из

аустенитной стали. Улучшения стойкости стали типа Cr16-Ni19 в холоднодеформированном состоянии (х.д.), используемой в качестве материала оболочек твэлов, к порообразованию добиваются за счет усовершенствования технологии изготовления оболочек. Для определения предельных ресурсных возможностей твэлов с оболочками из стали типа Cr16-Ni19 необходимо знание закономерностей протекания в ней процесса распухания при облучении в диапазоне температур и доз, характерных для реакторов на быстрых нейтронах.

Помимо генерации вакансий, из которых формируются поры, происходит перераспределение легирующих элементов стали, приводящее к эволюции структурно-фазового состояния, которое определяет физико-механические и коррозионные свойства стали. Поэтому для понимания процессов, приводящих к изменениям свойств конструкционных материалов, для прогноза ресурса эксплуатации изделий из них следует уделять усиленное внимание изучению эволюции микроструктуры, формирующейся при различных условиях облучения стали (температура, скорость генерации атомных смещений, время).

В работах приведены систематизированные экспериментальные данные о структурно-фазовом состоянии аустенитной стали типа Cr16-Ni19 х.д. в оболочках, изготовленных по современной технологии, после облучения в зоне малого обогащения реактора БН-600 в диапазоне температур от 370 до 630°С. Исследованные образцы условно разбивали на группы в соответствии с температурой облучения: низкотемпературные участки – (420-455)°С, среднетемпературные участки – (485-550)°С и высокотемпературные участки – (570-630)°С. В каждом температурном диапазоне присутствовали образцы, несколько различающиеся по скорости генерации атомных смещений. Это позволило проводить их сравнение с целью выявления зависимости характеристик пористости от скорости генерации атомных смещений. Было прослежено изменение структурно-фазового состояния в зависимости от температуры облучения.

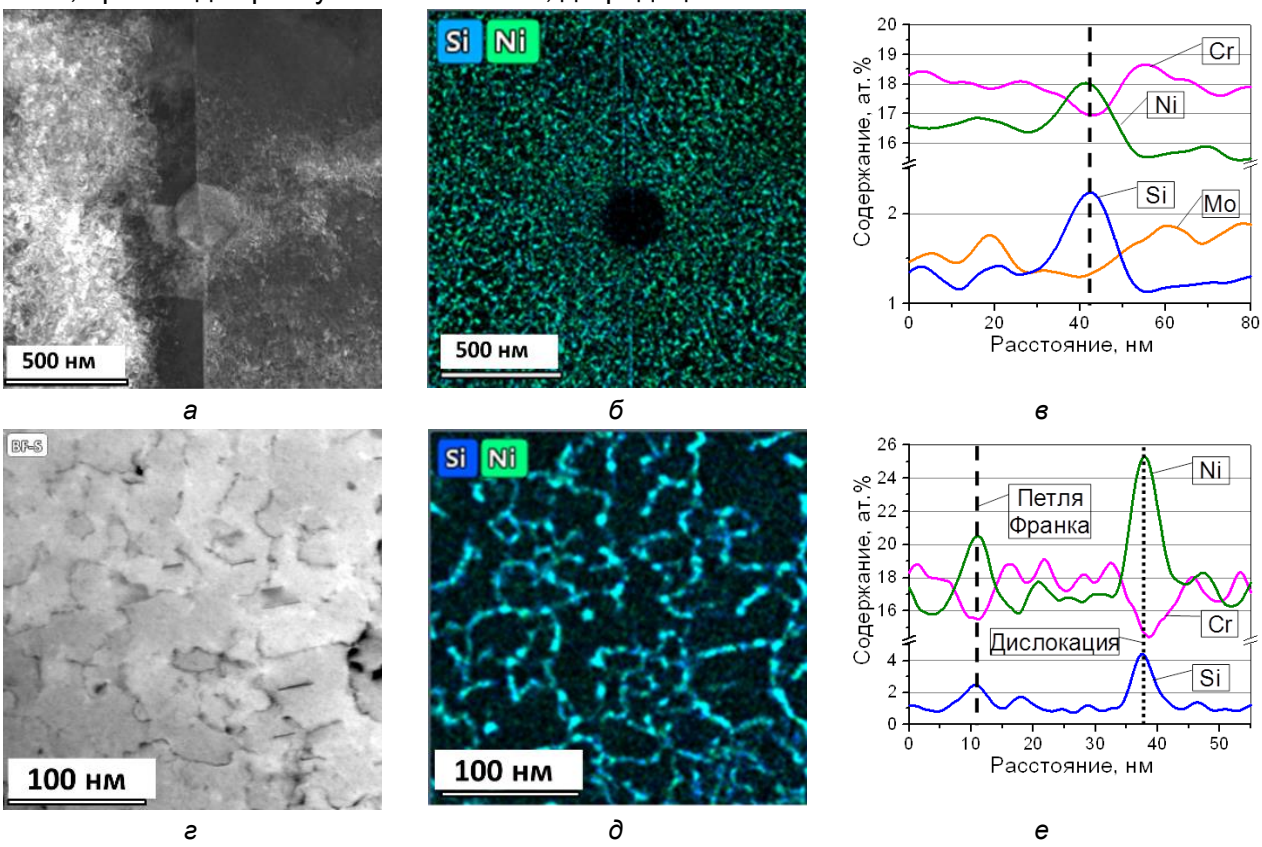
Материал оболочек твэл из стали типа Cr16-Ni19 х.д. в процессе эксплуатации претерпевает существенные структурно-фазовые изменения, обусловленные ускоренными за счет облучения диффузионными процессами. Установлено, что даже при относительно низких температурах эксплуатации оболочки твэла на участке газовой полости (~370°С) и минимальных повреждающих дозах (≤ (0.1-0.3) сна) происходит эволюция исходной дислокационной структуры, и наблюдается процесс расслоения твердого раствора аустенитной матрицы – наиболее подвижные элементы Ni и Si сегрегируют на дислокациях, межзеренных границах, на межфазных границах аустенит – M(C, N), рисунок 21.

При более высоких температурах и повреждающих дозах за время эксплуатации происходят более существенные фазовые превращения, в результате которых появляются выделения сложных ГЦК карбидов ($M_{23}C_6$, $M_6C$) и интерметаллидов (фазы – G, Лавеса), мелкодисперсные выделения γ´, $Ni_3Ti$, $M_2P$, MC.

При всех температурах облучения образуются мелкие (до 5 нм) – гелий-вакансионные зародыши пор, расположенных по границам зерен, на дислокациях, в полосах деформации, на межфазных границах выделений вторых фаз различного типа. При температурах выше 420°С распределения пор по размерам становятся мультимодальными и появляются классы пор среднего размера и крупные, растущие за счет поступления вакансий. С ростом температуры облучения распределение пор по объему материала становится менее однородным, наблюдаются локальные области, где крупные поры практически отсутствуют, рисунок 22.

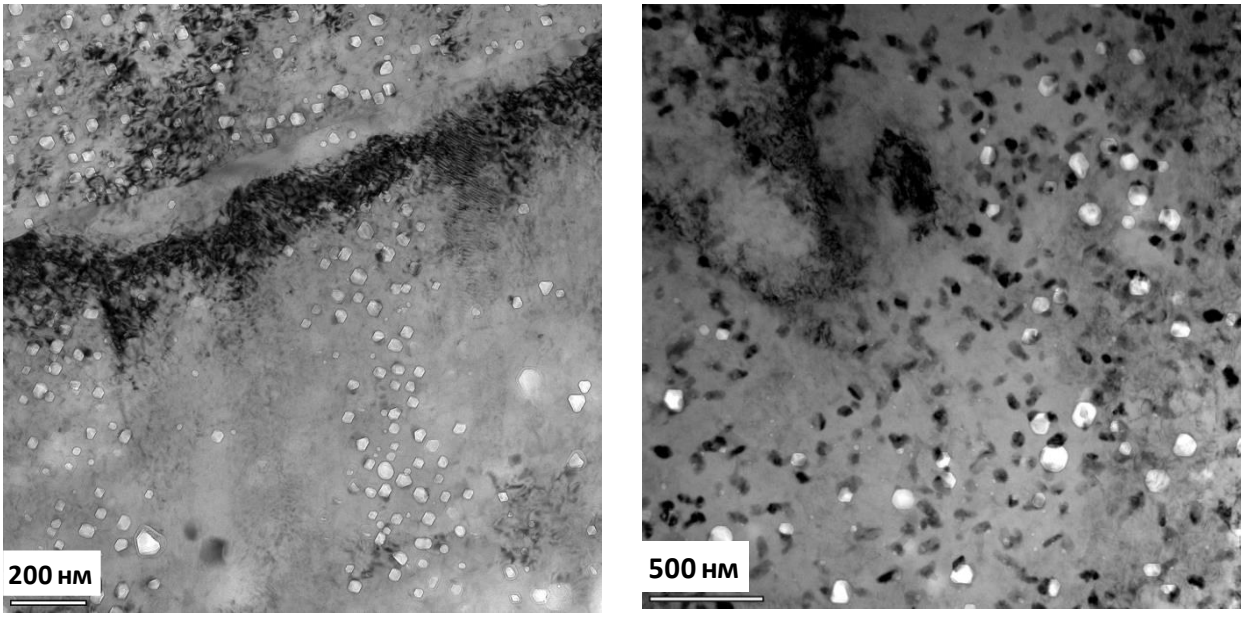
В образцах, облученных в близких условиях, наблюдаются большие разбросы характеристик пористости. Однозначных зависимостей среднего размера и концентрации

мелких, среднего размера и крупных пор от скорости генерации атомных смещений в образцах оболочек твэлов из стали типа Cr16-Ni19 выявить не удалось. Площадь поверхности пор в стали типа Cr16-Ni19 во всех температурных диапазонах облучения увеличивается с ростом пористости, стремясь к насыщению. Вследствие процессов изменения структурно-фазового состояния и порообразования, наблюдающихся в условиях облучения, меняются и физико-химические свойства материала оболочки твэла, происходит распухание оболочки, деградация механических свойств.




*а, б, в – соответственно участок межзеренной границы (темнопольное STEM изображение), смешанная карта и профиль распределения Cr, Mo, Ni, Si через границу (положение границы отмечено пунктиром на диаграмме), скорость генерации атомных смещений ~1,1·10$^{-8}$ сна/с;г, д, е – соответственно лес дислокаций (светлопольное STEM изображение), смешанная карта и профиль распределения Si, Ni, Cr через петлю Франка и дислокацию (пунктирная и точечная линии на диаграмме) в объеме зерна, скорость генерации атомных смещений ~0,6·10$^{-8}$ сна/с*

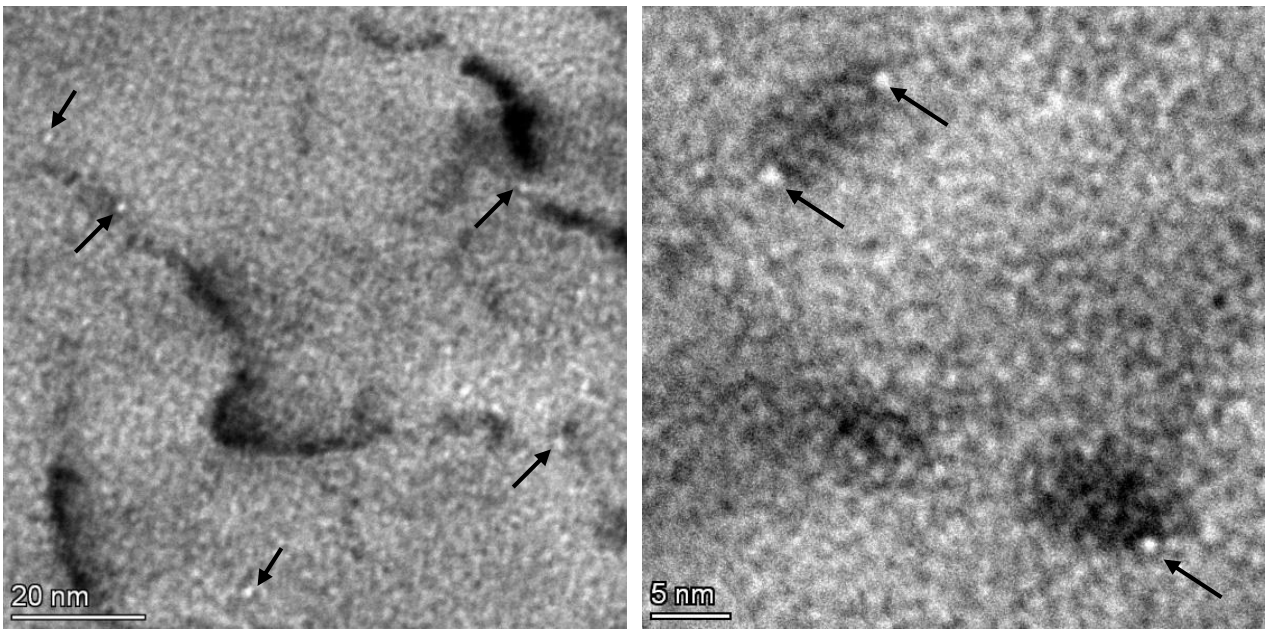
*Рисунок 21 – Радиационно-индуцированная сегрегация на границе зерен и дислокациях в стали Cr16-Ni19 х.д. после облучения при температуре ~370°С*




*а* *б*

*а – температурный диапазон (485-525)°С, скорость генерации атомных смещений $1,6 \cdot 10^{-6}$ сна/с;*
*б – температурный диапазон (560-570)°С, скорость генерации атомных смещений $1,5 \cdot 10^{-6}$ сна/с;*
*Рисунок 22 – Микроструктура стали типа Cr16-Ni19*

При поиске путей повышения ресурса эксплуатации твэлов основное внимание обычно уделяется участкам, облученным до наибольших доз при температурах достижения наибольшего воздействия облучения на оболочку. Исследования проводятся на оболочках различных плавок и партий, что приводит к некоторым различиям исходного структурного состояния и проявляется в отличиях поведения твэлов при эксплуатации и разбросу экспериментальных результатов послереакторных исследований. Для прогнозирования негативных процессов, ограничивающих ресурс, в частности, радиационного распухания, разрабатываются различные модели, однако корректных экспериментальных результатов для их валидации и выбора наиболее адекватного варианта, недостаточно. Особенно, это относится к результатам, характеризующим начальную стадию процесса. С целью получения таких результатов были проведены экспериментальные исследования образцов аустенитной стали типа Cr16-Ni19 из нижнего участка оболочки одного твэла реактора БН-600, что обеспечило максимально возможную идентичность исходного состояния. Полученные экспериментальные результаты представляют большой интерес для валидации моделей радиационного распухания, поскольку содержат данные о начальной стадии. Важным является, что величина дозы набрана за одно время, в результате этого скорость набора дозы варьировалась практически на два порядка. Такое значительное изменение в скорости набора дозы для многих моделей представляет сложность для успешной валидации. Но при успешном описании позволяет повысить достоверность модели и подтвердить переносимость на другие условия облучения (другие реакторы, ионное облучение).




*а* б

*а – после облучения со скоростью генерации атомных смещений $0{,}05 \cdot 10^{-7}$ сна/с при температуре 370°С; б – после облучения соскоростью генерации атомных смещений $7{,}48 \cdot 10^{-7}$ сна/с при температуре 410°С;*

*Рисунок 23 – Мелкие газо-вакансионные зародыши пор (отмечено стрелками) в образцах оболочки твэла из стали типа Cr16-Ni19, расположенные на дислокациях (а) и межфазных границах (б)*

В работе проведено экспериментальное и теоретическое исследования распухания современной стали типа Cr16-Ni19, используемой для оболочек твэлов в реакторе БН-600. Полученны новые экспериментальные данные о микроструктуре материала при дозах облучения 0,3-48,5 сна при температурах 370-410°С. Во всех образцах обнаружены мелкие газо-вакансионные зародыши пор средним размером около 1.5 нм и концентрацией $(1\text{-}3) \cdot 10^{22}$ м$^{-3}$, рисунок 23 Начиная с дозы 5 сна в образцах наблюдаются поры, размер которых составляет более 10 нм. Поры такого размера являются закритическими. Это говорит о том, что инкубационный период при данных условиях облучения составляет существенно меньше 5 сна.

В работе полученные экспериментальные данные вместе с высокодозными измерениями (доза >50 сна), опубликованными ранее, использовались для параметризации модели распухания. Получено хорошее согласие с результатами расчетов, несмотря на то, что экспериментальные результаты относятся к различным температурам, дозам и скоростям набора дозы. С помощью модели проведены расчеты распухания в широком диапазоне температур и доз, сравнительный анализ стали типа Cr16-Ni19 со сталью AISI 316.

*Портных И.А.*

## Работы по направлению «Послереакторные исследования конструкционных материалов и топлива реакторов БН при текущей эксплуатации, а также при поиске путей повышения их ресурса. Исследования чехловых труб выемных контейнеров (ВК-1 и ВК-2) из стали ЭП450»

Выполнены работы по договору с АО «ВНИИНМ» по теме «Исследование влияния нейтронного облучения на изменение механических и структурных характеристик стали ЭП450 после облучения в качестве чехловой трубы материаловедческих сборок ТВСМ-1 и ТВСМ-2 реактора БН-600. Исследование влияния облучения в реакторе БН-600 до максимальных повреждающих доз 106, 108 и 113 сна на теплофизические свойства материала оболочек твэлов из стали ЭК164» этап 1 «Послереакторные исследования чехловых труб выемных контейнеров (ВК-1 и ВК-2) из стали ЭП450, облученных до максимальных повреждающих доз ~87 и ~145 сна».

Работы проводятся в рамках «Программы НИОКР по увеличению длительности топливной кампании реакторов БН. Актуализация 2024 года», утверждённой первым заместителем генерального директора по атомной энергетике Госкорпорации «Росатом» Петровым А.Ю. от 05.07.2024 г.

Целью работ являлось получение дополнительных экспериментальных данных по структурно-фазовому состоянию чехловой трубы выемного контейнера ВК-2 и вырезка образцов из различных участков по высоте выемного контейнера ВК-1. Полученные дополнительные экспериментальные данные необходимы для обоснования применения стали ЭП450 в качестве материала чехловых труб ТВС, МС для облучения в активной зоне реактора БН-600 до повреждающих доз свыше 145 сна.

В 2024 г. в условиях защитных камер и лабораторий АО «ИРМ» выполнен комплекс работ, включающий следующие виды исследований. При выполнении исследований чехловой трубы ВК-1:

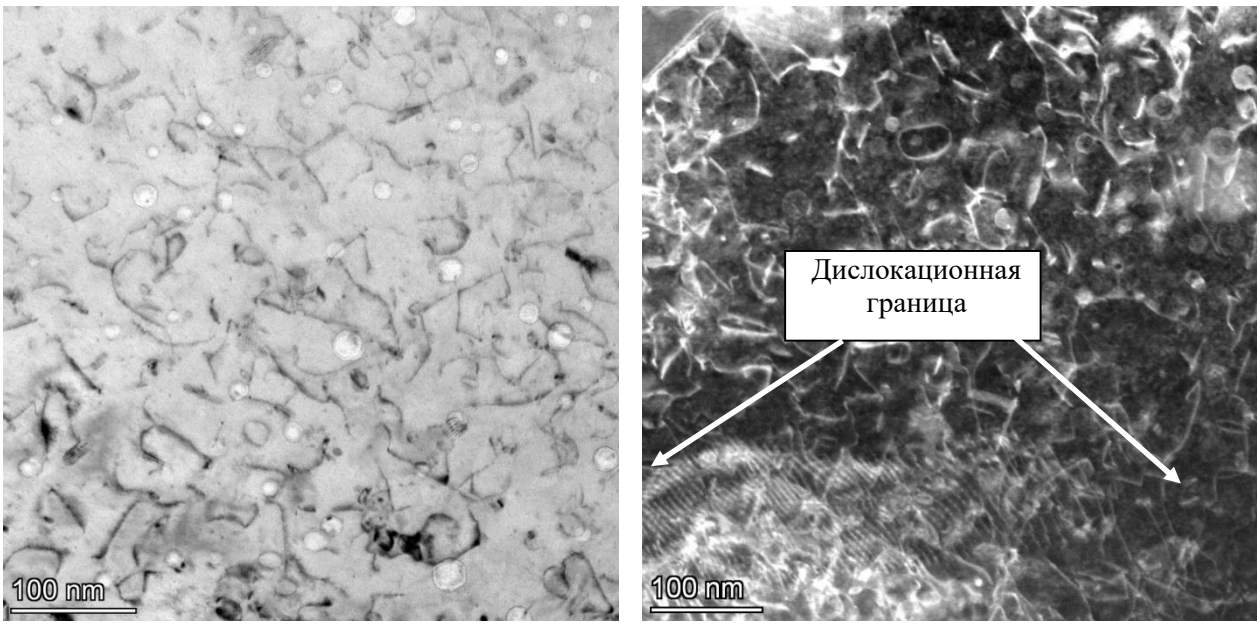
–анализ результатов неразрушающих исследований чехловой трубы ВК-1;

–подготовка схемы вырезки образцов для исследований чехловой трубы из участков с теми же температурами облучения, что и в ВК-2;

–вырезка образцов из различных участков по высоте выемного контейнера ВК-1 для определения механических, физических и структурных характеристик чехловой трубы из стали ЭП450, включающие минимум три зоны – низ активной зоны (АкЗ), область максимума дозы, область верха АкЗ.

При выполнении исследований чехловой трубы ВК-2:

–проведено исследование структурно-фазового состояния методами просвечивающей (рисунок 24) и сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской дифракции (рисунок 25). В работе впервые получены данные о структурных изменениях стали ЭП450 после облучения в качестве чехловой трубы материаловедческой сборки МС-2 в реакторе БН-600 до ~137,5 сна в диапазоне температур от 410 до 670°С.




*а* *б*

*а – высокая плотность однородно распределенных дислокаций в ферритном зерне, ПЭМ, светлое поле; б – высокая плотность дислокаций в мартенситном зерне с наклонной малоугловой дислокационной границей, STEM, темное поле;*

*Рисунок 24 – Дислокационная структура в образце из стали ЭП450 чехловой трубы ВК-2 с накопленной повреждающей дозой 104,9 сна при $T_{обл.}$=422°С*

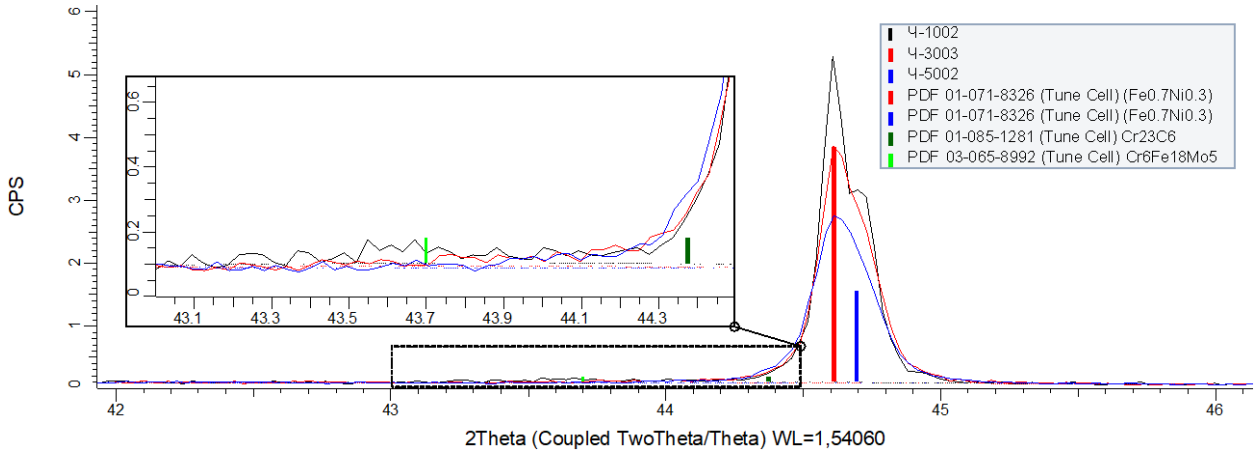



*Рисунок 25 – Дифрактограммы образцов из стали ЭП450 чехловой трубы ВК-2*

*Портных И.А., Ладейщиков К.М., Пастухов В.И., Панченко В.Л., Цыгвинцев В.А., Ярков В.Ю., Соловьева С.В.*

## Результаты послереакторных исследований участков каналов СУЗ энергоблоков Ленинградской АЭС, выполненных в 2024 году

В соответствии с «Программой регламентного послереакторного контроля в защитных камерах технологических каналов и каналов СУЗ, извлекаемых из реакторов РБМК-1000 на завершающем этапе эксплуатации энергоблоков» (№ ПРГ 1.2.2.15.015.222-2023) в защитных камерах АО «ИРМ» в 2024 году проведены послереакторные исследования трех каналов СУЗ энергоблоков Ленинградской АЭС.

Для исследований из реактора четвертого энергоблока были извлечены один канал СУЗ со сроком эксплуатации 41 год и из реактора третьего энергоблока два канала со сроком эксплуатации 42,5 года. Из каждого канала СУЗ был вырезан участок с нижним

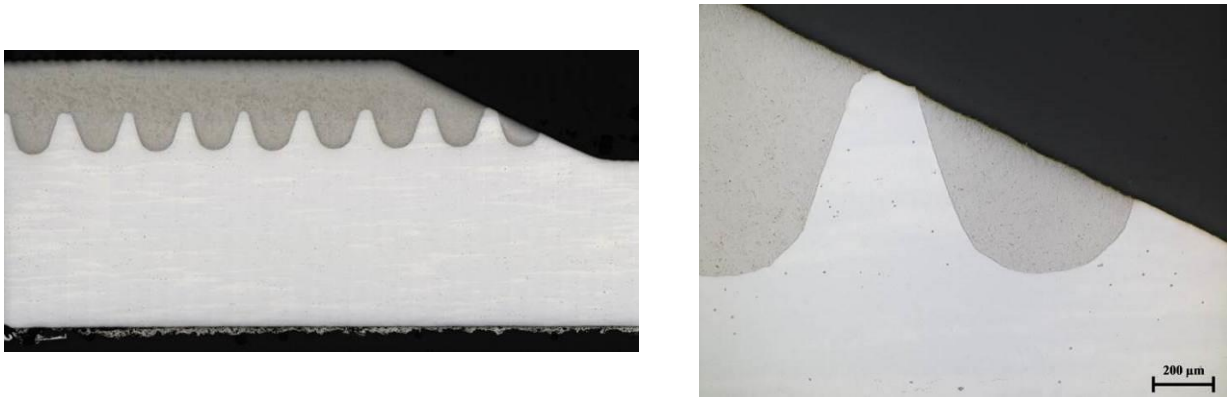
переходником «сталь-цирконий» и электронно-лучевым сварным соединением с примыкающей к нему циркониевой трубой.

Цель работы – получение информации по техническому состоянию и свойствам материала каналов СУЗ после эксплуатации в реакторах энергоблоков Ленинградской АЭС в условиях выявленного наводороживания циркониевых частей каналов.

Визуальный осмотр участков каналов СУЗ не выявил дефектов, препятствующих эксплуатации каналов.

Геометрические размеры каналов находятся в пределах допусков на изготовление.

Переходники «сталь-цирконий» сохранили целостность внутренних стыков и работоспособность, рисунок 26.




*а* *б*

*а – общий*

*б – выход диффузионного сварного соединения «сталь-цирконий» на внутреннюю поверхность канала (внутренний стык)*

*Рисунок 26 – Металлографический шлиф образца с внутренним стыком нижнего переходника канала СУЗ:*

В участке канала СУЗ четвертого энергоблока в зоне термического влияния электронно-лучевой сварки со стороны ниппеля выявлен кольцевой «блистер» (область с повышенным содержанием гидридов), рисунок 27, что привело к уменьшению остаточной толщины стенки, не поврежденной гидридами, до 1,74 мм.

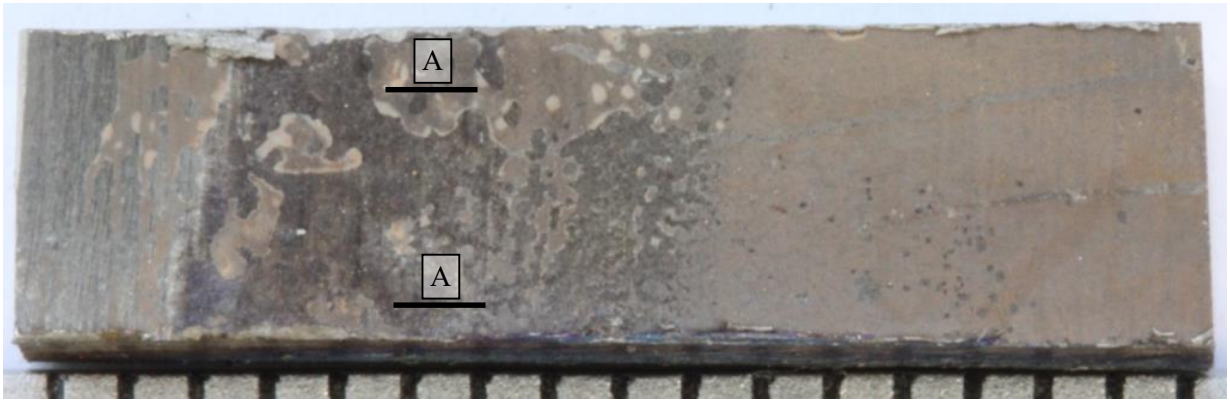
В участке одного канала СУЗ третьего энергоблока выявлено повышенное содержание водорода в отдельных пробах, а в зоне термического влияния электронно-лучевой сварки со стороны ниппеля обнаружены гидридные повреждения. Средняя остаточная толщина стенки, не поврежденной гидридами, составила 2,44 мм.

В участке другого канала СУЗ третьего энергоблока содержание водорода в отдельных пробах колеблется от 3 до 76 ppm. По результатам металлографических исследований блистеров не обнаружено. В зоне термического влияния электронно-лучевой сварки со стороны ниппеля выявлены гидридные повреждения. Средняя остаточная толщина стенки, не поврежденной гидридами, составила 2,80 мм.

Степень наводороживания и гидридного повреждения на исследованных каналах существенно варьируются.

Кратковременные механические свойства материала всех трех каналов, находятся на уровне ранее исследованных.

Полученные результаты показывают, что, несмотря на гидридные повреждения, исследованные каналы сохранили свою работоспособность.




а – внутренняя поверхность канала, темная вертикальная полоса – «блистер»




б – металлографический шлиф в сечении А-А, светлая горизонтальная область – «блистер»

Рисунок 27 – Образец из зоны электронно-лучевой сварки переходника «сталь-цирконий» с трубой канала СУЗ реактора четвертого энергоблока

*АО «ИРМ»: Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Вельмогин Д.Н., Нежданов А.Г., Ярков В.Ю., Самедов В.К., Старицын С.В., Исинбаев А.Р., Соловьева С.В.*
*АО «НИКИЭТ»: Балдин Д.В., Слободчиков А.В., Яцковец С.Г. Бакулин Д.В.*
*Филиал АО «Концерн РЭА» «Ленинградская атомная станция» (Ленинградская АЭС): Моченов Д.М., Рыков В.С.*

## Результаты послереакторных исследований канала СУЗ Курской АЭС после 44 лет эксплуатации

Ряд энергоблоков с реакторами РБМК после 45 лет остановлены (переведены в режим работы без генерации) для последующего вывода из эксплуатации. Большая часть каналов СУЗ реактора отработала весь срок эксплуатации без замены, им предстоит работать и дальше, как минимум до окончания выгрузки топлива из реактора и внутриканальных устройств из каналов. Поэтому возникает задача по обоснованию работоспособности каналов в период эксплуатации без генерации, для решения которой потребовалось проведение послереакторных исследований.

Для этого был извлечен канал СУЗ, который эксплуатировался в первом энергоблоке Курской АЭС в течение 44 лет, и проведены послереакторные исследования его участков.

Для исследований вырезаны:

- участок канала, включающий нижний переходник «сталь-цирконий» с примыкающей к нему стальной трубой и ЭЛСС с примыкающей к нему циркониевой трубой (№1);
- участок циркониевой трубы канала из зоны с максимальным флюенсом, соответствующий центру верхней ТВС (№2);
- участок канала, включающий верхний переходник «сталь-цирконий» с примыкающей к нему стальной трубой и ЭЛСС с примыкающей к нему циркониевой трубой (№3).

В результате исследований установлено:

- Визуальный осмотр не выявил дефектов, препятствующих эксплуатации канала.
- Геометрические размеры канала находятся в пределе допусков на изготовление.
- Внутренняя поверхность канала покрыта отложениями на основе гидрооксидов алюминия, толщина которых не превышает 20 мкм.
- Нижний переходник имеет целый внутренний стык. Наружный стык раскрыт, трещин в ниппеле нет. Верхний переходник имеет целый внутренний стык и частично раскрытый наружный стык без трещин в ниппеле. Раскрытие наружных стыков переходников не влияет на их работоспособность.
- По результатам металлографических исследований трубы канала СУЗ гидридных скоплений в виде «блистеров» не обнаружено. Зарегистрирован блистер глубиной 0,01 мм и протяженностью 0,06 мм только в зоне верхнего ЭЛСС по ЗТВ ниппеля.
- Содержание водорода в стенке канала в отдельных пробах колеблется на участках: №1 – от 4 до 42 ppm; №2 – от 6 до 17 ppm; №3 – от 5 до 72 ppm.
- Предел прочности трубы канала не менее 430 МПа, пластичность не менее 3,9 %, относительное поперечное сужение не менее 47 %.
- Предел прочности ниппелей переходника не менее 435 МПа, пластичность не менее 4,9 %, относительное поперечное сужение не мене 18 %.
- При испытаниях на трещиностойкость зарождение и распространение трещины в материале трубы канала СУЗ происходит по механизму вязкого разрушения. В радиальном направлении критический коэффициент интенсивности напряжений трубы канала не ниже 22 МПа·м$^{1/2}$, а критическое раскрытие трещины не менее 0,022 мм. В осевом направлении критический коэффициент интенсивности не ниже 40 МПа·м$^{1/2}$, а критическое раскрытие трещины не менее 0,052 мм.
- Остаточные окружные напряжения в канале находятся на уровне (32-67) МПа.
- По данным измерения микротвёрдости материал канала в зонах нижнего и верхнего ЭЛСС и переходников имеет достаточно высокие прочностные свойства, которые находятся на уровне прочности ниппелей и трубы, примыкающих к ЭЛСС.

Таким образом, установлено, что в циркониевой части канала наблюдается незначительное наводороживание с образованием отдельных мелких блистеров. Эти повреждения не повлияли на основные свойства канала, которые находятся на уровне ранее исследованных каналов.

По результатам послереакторных исследований канал СУЗ первого энергоблока Курской АЭС после эксплуатации в течение 44 лет полностью сохранил свою работоспособность.

*АО «ИРМ»: Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Вельмогин Д.Н., Нежданов А.Г., Ярков В.Ю., Исинбаев А.Р., Самедов В.К., Старицын С.В., Соловьева С.В.*
*АО «НИКИЭТ»: Балдин Д.В., Слободчиков А.В., Яцковец С.Г. Бакулин Д.В.*
*Филиал АО «Концерн РЭА» «Курская атомная станция (Курская АЭС): Строганов А.А., Гавриш Г.А., Галимов А.Х., Лихачев Е.А.*

## Послереакторные исследования технологического канала Смоленской АЭС, выгруженного в 2022 году с подозрением на дефект по результатам внутриреакторного УЗК

Для своевременной оценки и прогнозирования состояния технологических каналов (ТК) реакторов РБМК в соответствии с требованиями РГ 1.1.3.21.1670-2019 «Регламент.

Эксплуатационный контроль технологических каналов, каналов СУЗ и графитовой кладки реакторов РБМК-1000 в период дополнительного срока эксплуатации энергоблоков» проводится их периодический внутриреакторный контроль.

В 2022 году по результатам ультразвукового контроля (УЗК) на внутренней поверхности одного ТК в зоне дистанционирующей решетки (ДР) ТВС были получены индикации, которые соответствуют поперечному дефекту глубиной 0,5 – 1 мм и длиной 12 мм. Канал эксплуатировался в реакторе 15 календарных лет, замечаний в процессе эксплуатации не было.

Для определения характера (вида) дефекта, его размеров и вероятной причины его появления, а также получения информации по техническому состоянию и свойствам материала ТК в защитных камерах АО «ИРМ» были проведены послереакторные исследования участка с предполагаемым дефектом.

На внутренней поверхности трубы канала места контакта с ДР проявляются в виде светлых кольцевых полос за счет повышенной фреттинг коррозии. Для исследований из участка с предполагаемым дефектом было вырезано кольцо со следом от ДР, а также кольца для проведения материаловедческих исследований. В кольце со следом от ДР выявлен участок с предполагаемым дефектом, который отличался по виду от остальной поверхности (рисунок 28). Из этого участка был вырезан образец для детальных структурных исследований.

В образце с предполагаемым дефектом на внутренней поверхности трубы канала в центре наблюдается плотный выступающий (толстый) оксид желтоватого оттенка с трещинами (рисунок 29*а*). На остальной поверхности оксид отслоился частично или полностью. От степени отслоения оксида цвет поверхности меняется от светлого до темного. Сравнивая исходное состояние поверхности (см. рисунок 28) и поверхность на образце, можно утверждать, что по краям образца при вырезке произошло отслоение толстого оксида и его растрескивание. В центре образца наблюдается слегка размытая рыжеватая полоса в окружном направлении с трещиной на всю толщину (0,67 мм) оксида (рисунок 29*б, в*). Наличие такой полосы рядом с краем, где произошло отслоение оксида, свидетельствует о том, что трещина в оксиде образовалась при эксплуатации. Суммарная протяженность этой полосы около 12 мм. Микрозондовый рентгеноспектральный анализ показал, что в зонах отслоившегося оксида регистрируются только кислород, цирконий и ниобий, а в зоне рыжеватой полосы дополнительно регистрируются железо, что подтверждает «эксплуатационное» происхождение трещины.

Размеры эксплуатационной трещины в оксиде совпадают с результатами внутриреакторного УЗК.

Трещина в толстом оксиде могла образоваться в процессе эксплуатации под действием напряжений, возникающих из-за разности удельных объемов металла и оксида циркония, а также под воздействием ДР.

Дефектов в металле трубы канала в зоне ДР не обнаружено, а дефект, выявленный при УЗК, находится в оксиде и не влияет на работоспособность канала.

Топливный канал энергоблока Смоленской АЭС после эксплуатации в течение 15 лет с точки зрения окружного формоизменения, толщины стенки, коррозионного состояния, содержания водорода и механических свойств материала циркониевой трубы полностью сохранил свою работоспособность.

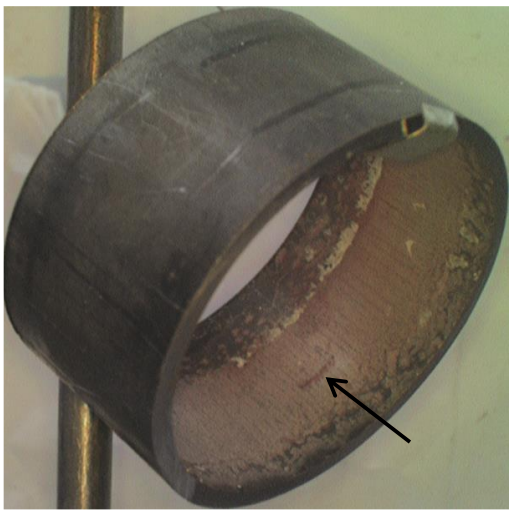
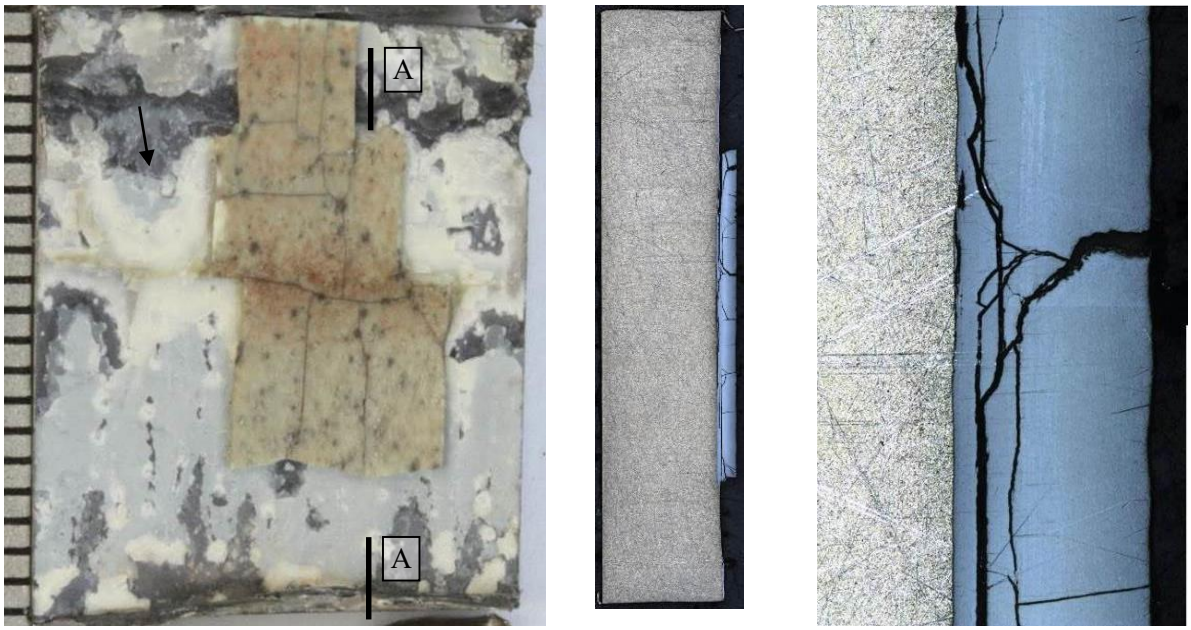


*Рисунок 28 – Вид кольца трубы ТК со следом от ДР, стрелкой указано место с предполагаемым дефектом*




*а* *б* *в*

*а – внутренняя поверхность образца со следом от предполагаемого дефекта, рыжеватая полоса в центре толстого оксида и след от этой полосы в зоне отслоения оксида, указан стрелкой, б – макрошлиф образца в сечении А-А, в – шлиф с эксплуатационной трещиной в оксиде*

*Рисунок 29 – Внутренняя поверхность и шлиф образца из участка с предполагаемым дефектом*

*АО «ИРМ»: Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Вельмогин Д.Н., Нежданов А.Г., Ярков В.Ю.,Исинбаев А.Р., Самедов В.К., Старицын С.В.*
*АО «НИКИЭТ»: Балдин Д.В., Слободчиков А .В., Яцковец С.Г., Бакулин Д.В.*
*Филиал АО «Концерн РЭА» «Смоленская атомная станция» (Смоленская АЭС): Карпинский А.В., Морозов А.Ю., Леонов А.И.*

## Определение размера зерна аустенита ферритно-мартенситной нержавеющей стали методами ориентационной микроскопии

Нержавеющие стали являются одним из основных конструкционных материалов, используемых в промышленности, за счёт оптимального сочетания физико-механических

и химических свойств. Нержавеющие стали ферритного класса с 9-12 мас. % Cr обладают оптимальными свойствами по жаропрочности и пластичности в том случае, когда количество феррита, формирующегося в высокотемпературной области (δ-феррит), в структуре не превышает 10-15%. Ферритно-мартенситные стали обладают высоким сопротивлением коррозии, как в атмосферных условиях, так и в агрессивных средах за счёт определенного количества сравнительно однородных по своему строению зерен феррита.

Основной целью термической обработки высокохромистых ферритно-мартенситных сталей является получение структуры, обеспечивающей максимально достижимую для данной стали жаропрочность с сохранением характеристик пластичности на приемлемом уровне. Упрочнение материала происходит в результате последовательных операций термической обработки: закалки из высокотемпературной области, для получения мартенситной структуры, с последующим высокотемпературным отпуском, приводящему дисперсионному упрочнению. В связи с этим, важным параметром микроструктуры сталей является размер зерен аустенита, возникающего при нагреве перед закалкой. Максимальный размер мартенситных пластин в микроструктуре стали ограничен размером аустенитных зерен. Рост зерна аустенита резко снижает ударную вязкость и повышает порог хладноломкости. Крупнозернистая сталь более склонна к трещинам в результате проведения закалки, деформации и короблению. Разнозернистость стали снижает конструкционную прочность и вызывает охрупчивание. Отсюда вытекает важность контроля размера аустенитного зерна в высокотемпературной области во время изготовления стали.

Очевидно, что при анализе структуры материала после термической обработки, зерна аустенита не наблюдаются. Однако они могут быть восстановлены по продуктам распада аустенита при помощи ориентационной микроскопии, основанной на дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD – electron backscatter diffraction). Метод EBSD дает достаточно точные данные об размерах, границах и кристаллографической ориентации зерен, а также о текстуре и фазовом составе материала. Возможность восстановления обусловлена кооперативной перестройкой конфигурацией атомов при сдвиговых превращениях, где связь между исходной структурой и продуктами превращения прослеживается через ориентационные соотношения (ОС). При охлаждении из аустенитной области в сталях ферритно-мартенситного класса сдвиговое превращение может происходить по различным ОС, например ОС Курдюмого-Закса, ОС Нишиямы-Вассермана, ОС Грегори-Трояна или других. С точки зрения кристаллографии фазовых превращений, важно отметить, что все перечисленные ОС являются близкими – дающими при сдвиговом превращении практически одни и те же кристаллографические ориентировки, отличающиеся на несколько градусов по плоскостям и направлениям. Выполнение ОС приводит к появлению в новой структуре специальных строго определенных разориентаций, по наличию и количеству которых может быть проведено восстановление ориентации зерен родительской фазы.

В качестве материала для исследований использовались образцы низкоуглеродистой высоколегированной нержавеющей стали феррито-мартенситного класса с ~ 12 мас. % Cr, дополнительно легированной Ni, Mo, W, Nb, V. Образцы отбирались от промышленного трубного изделия. Образцы исследовались после двух различных термических обработок. Образцы нагревали до температуры 1000 °C, выдерживали около 5 минут и охлаждали со скоростью ~500 °C/c (закалка в воду) и 0,005 °C/c (охлаждение в печи). При охлаждении в печи произошло существенное обезуглероживание стали.

Электронно-микроскопическое исследование структуры проводились на растровом микроскопе Tescan Mira3 с автоэмиссионным катодом при ускоряющем напряжении 20 кВ. Состояние поверхности исследовалось с использованием детектора отраженных (BSE) электронов. Контраст на изображениях, полученных в режиме отраженных электронов, несет информацию об элементном составе, поскольку является чувствительным к среднему атомному номеру – более светлые области соответствуют более высокому среднему атомному номеру. Дополнительно, на изображениях проявляется кристаллографический контраст, возникающий вследствие существования зависимости отражающей способности от ориентации кристаллической решетки.

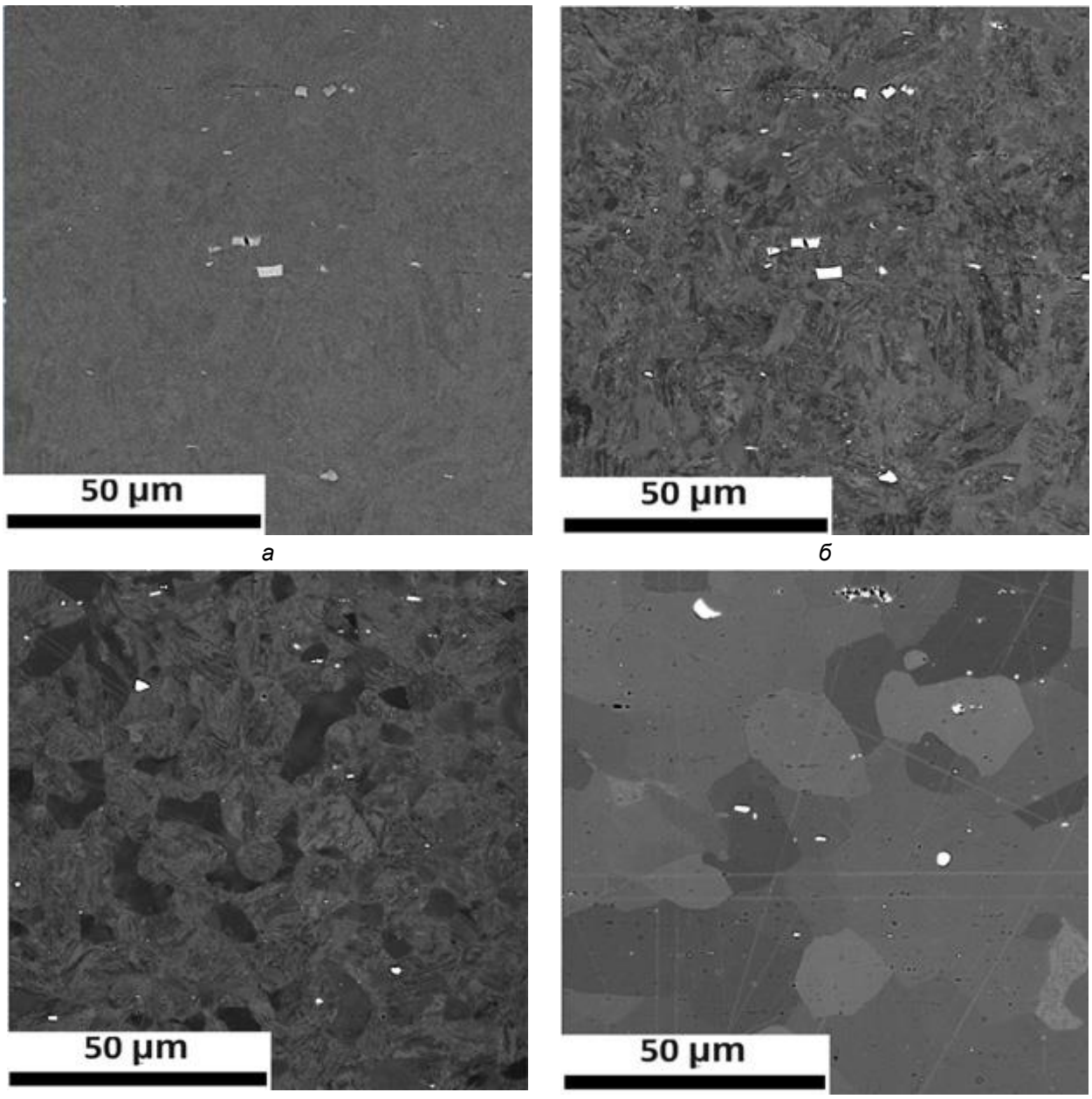
Для определения ориентировки отдельных зерен (кристаллитов) и анализа локальной текстуры использовалась приставка EBSD HKL Inca с системой анализа Oxford Instruments. Исследуемые области имели размеры ~ 1000 × 1000 мкм. Шаг сканирования – 0,1 мкм. Погрешность определения ориентации кристаллической решетки – не более плюс-минус 1° (в среднем плюс-минус 0,6°).

Для восстановления исходного аустенитного зерна использовалась программное обеспечение AztecCrystals. Восстановление проводилось с использованием ОС К-З: (111)γ|| (011)α, [1-10]γ|| [1-11]α; ОС Н-В: (111)γ||(011)α, [2,-1,-1]γ||[0,-1,1]α; ОС Г-Т: (111)γ||(011)α, [-12,-5,17]γ||[-7,-17,17]α; а также ОС Крапошина (ОСК): (112)γ|| (113)α; [11-1]γ|| [1-10]α; с учетом выполнения ОС с двумя соседними зернами (правило отбора). Для того чтобы двойное ОС могло выполняться на большинстве обычных границ, соотношение на одной стороне границы зерна могло отклоняться до 10° от точного соотношения ОС.

Методом ориентационной микроскопии определялись средний размер кристаллита ($D_{ср}$) – диаметр окружности, эквивалентной средней площади кристаллитов, максимальный размер кристаллита ($D_{max}$). В качестве кристаллита принимался объект, ограниченный со всех сторон границами с углами разориентации не менее 8°; анализ проводился по всем кристаллитам, за исключением кристаллитов с размером меньше 1 мкм.

Металлографически выявленная с использованием сканирующей электронной микроскопии микроструктура образцов представляла собой в исходном состоянии мартенсит с небольшим количеством δ-феррита и крупных карбидов Nb (рисунок 30 а, б). После охлаждения в воде структура представляла совокупность полей δ-феррита и мартенсита (рисунок 30 в). При охлаждении в печи за счет развития процессов обезуглероживания микроструктура состояла из разноразмерных сравнительно равноосных ферритных (бейнитных) зерен (рисунок 30 г). Следует отметить, что термическая обработка практически не затронула карбидную фазу.

Восстановление аустенитной структуры на основе кристаллографических особенностей разориентации кристаллитов мартенсита (рисунок 31, таблица 7) с учетом различных ОС показало достаточно близкие результаты, как по морфологии, так и по размерам зерен. Следует отметить, что наилучший результат восстановления, достигнут при использовании ОС К-З и ОСК ($V_{αн}$=0,2%).

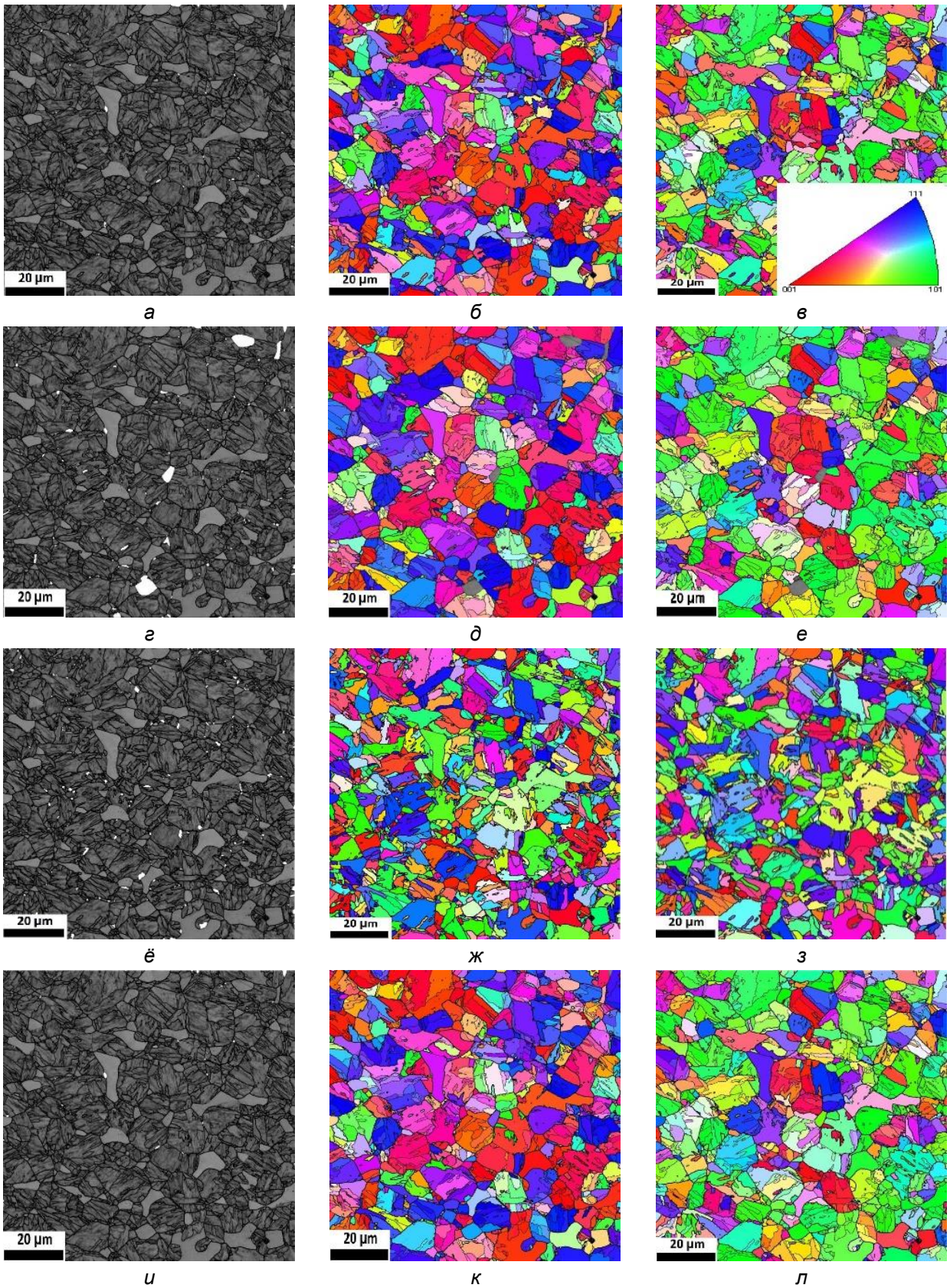



*а* *б*

*в* *г*

*Рисунок 30 – Микроструктура ферритно-мартенситной стали после различных скоростей охлаждения: а – во вторичных электронах; б, в, г – в обратно-рассеянных электронах; а, б – исходное состояние; в – 500 °С/с; г – 0,005 °С/с*

Результаты восстановления аустенитной структуры на основе кристаллографических особенностей разориентации кристаллитов феррита (бейнита) (рисунок 32, таблица 7) с учетом различных ОС практически совпадает с результатами обработки мартенситной структуры. При этом средние характеристики зеренной структуры аустенита для различных ОС показывают лучшую сходимость между собой, и в пределах ошибок соответствуют характеристикам γ-фазы, восстановленной по α′-фазе. Наихудший результат восстановления аустенитного зерна, также, как и в предыдущем случае, зафиксирован при использовании ОС Н-В: ~ 7% феррита (бейнита) оказывается не восстановленным.




*а* *б* *в*

*г* *д* *е*

*ё* *ж* *з*

*и* *к* *л*

*Рисунок 31 – Исходная и восстановленная микроструктура после охлаждения из аустенитной области со скоростью 500 °С/с в виде ориентационных карт (EBSD): а, г, ё, и – в обратно рассеянных электронах; б, д, ж, к – ориентационный контраст с X; в, е, з, л – ориентационный контраст с Y; а, б, в – по ОС К-З; г, д, е –по ОС Н-В; ё, ж, з – по ОС Г-Т; и, к, л – по ОСК*

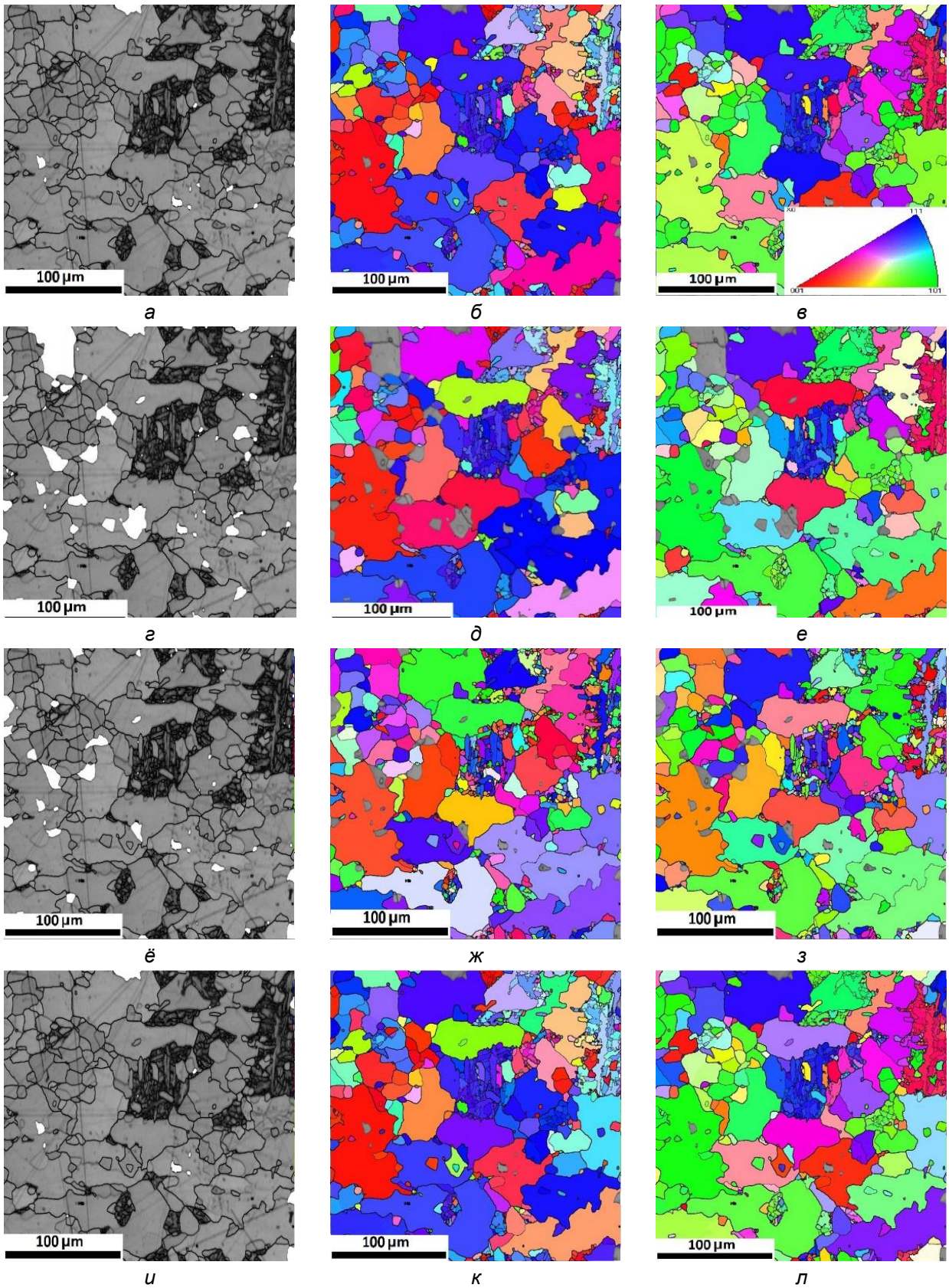



*Рисунок 32 – Исходная и восстановленная микроструктура после охлаждения из аустенитной области со скоростью 0,005о/с в виде ориентационных карт (EBSD): а, г, ё, и – в обратно рассеянных электронах; б, д, ж, к – ориентационный контраст с X; в, е, з, л – ориентационный контраст с Y; а, б, в – по ОС К-З; г, д, е –по ОС Н-В; ё, ж, з – по ОС Г-Т; и, к, л – по ОСК*

*Таблица 7 – Характеристики структуры α'(α)-фазы и γ-фазы (восстановленной) после ТО с различными скоростями охлаждения*

| Структура | ОС | *Vα$_н$, % | Характеристики зерен | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | $D_{ср}$, мкм | $D_{max}$, мкм | **N |
| α′ (мартенсит) | – | – | 1,9±1,0 | 14,8 | 1853 |
| | К-З | 0,2 | 2,6±1,2 | 20,1 | 807 |
| | Н-В | 1,5 | 3,3±1,1 | 22,9 | 496 |
| | Г-Т | 0,9 | 1,6±1,3 | 20,4 | 1840 |
| | ОСК | 0,2 | 3,0±1,1 | 22,8 | 611 |
| α (бейнит) | – | – | 8,2±0,9 | 72,6 | 471 |
| | К-З | 0,8 | 8,9±1,4 | 102,4 | 322 |
| | Н-В | 6,6 | 9,5±1,4 | 74,1 | 276 |
| | Г-Т | 2,5 | 6,2±1,5 | 95,3 | 627 |
| | ОСК | 0,7 | 9,6±1,4 | 86,4 | 295 |

** – объемная доля невосстановленного аустенита;*

*** – количество зерен, по которым проводился анализ*

Показана применимость методики восстановления аустенитного зерна низкоуглеродистой высоколегированной нержавеющей стали феррито-мартенситного класса, формирующегося в процессе нагрева перед закалкой, с использованием ориентационной микроскопии на основе кристаллографических особенностей как феррито-мартенситной, так и феррито-бейнитной структуры.

*Соловьева С.В., Устинов А.Е., Ярков В.Ю.*
*УрФУ им. Б.Н. Ельцина: Сацкий Д.Д., Лобанов М.Л.*

## Освоение технологии изготовления внутренней капсулы из ванадия для закрытых источников гамма-излучения на основе радионуклида селен-75

Одним из основных направлений деятельности АО «ИРМ» является разработка новых и совершенствование существующих технологий производства радиоизотопной продукции для дефектоскопии в виде закрытых промышленных источников на основе селена-75 и иридия-192, а также продукции медицинского назначения в виде препаратов углерода-14, цезия-131, лютеция-177.

Селен-75, один из наиболее востребованных радиоизотопов, используется в качестве источника гамма-излучения для дефектоскопии и в медицине. В сравнении с иридием-192, селен-75 имеет больший период полураспада и более мягкий спектр гамма-излучения (энергия основных испускаемых линий 260, 280, 400 кэВ, со средней энергией в районе 215 кэВ), благодаря чему повышается чувствительность радиографического контроля . Однако, селен-75 имеет низкую температуру плавления - 217 °С и реагирует со многими металлами, что усложняет методы его получения.

Источник ионизирующего излучения на основе селена-75 представляет собой герметичную конструкцию, предусматривающую двойное капсулирование радиоактивного материала. Внутренняя капсула из малоактивируемого материала содержит радионуклид селен-75, полученный путем облучения в ядерном реакторе сердечника из селена-74 в элементарном состоянии. Внешняя капсула изготавливается из коррозионностойкой стали.

Для оптимизации конструкции радиоизотопного источника проведено теплогидравлическое моделирование условий облучения внутренних капсул для

наработки селена-75 в активной зоне реактора ИВВ-2М. В качестве материала корпуса внутренней капсулы источника гамма-излучения выбран ванадиевый сплав, который обладает благоприятными физико-химическими характеристиками: малая активация при нейтронном облучении в реакторе, высокая прочность и коррозионная стойкость. Основным конструкционным материалом корпуса облучательного устройства был выбран алюминий. Он является коррозионно-устойчивым по отношению к воде, обладает высокой теплопроводностью, низким сечением захвата тепловых нейтронов, а продукты распада, образующиеся в материале под воздействием нейтронного облучения являются короткоживущими. Результаты теплофизического расчета свидетельствуют, что при удельном тепловыделении в ванадиевой капсуле 5,25 Вт/г максимальная температура ячейки селена может достигать не боле 74 °С, что при выбранной конструкции облучательного устройства гарантирует отсутствие возможности перегрева и достижения температуры плавления селена при облучении в активной зоне реактора ИВВ-2М.

В 2024 г. в отделе радиоизотопных технологий АО «ИРМ» была разработана технология изготовления внутренней капсулы для источников гамма-излучения на основе селена-75. Сердечник изготавливается путем прессования из порошка селена, обогащенного по стабильному изотопу селен-74 не менее чем до 96 %. Плотность сердечника из селена после прессования достигает значений 4,5 г/см$^3$ . Герметизация внутренней капсулы проводится с помощью метода лазерной сварки в инертной среде аргона. Проверка герметичности осуществляется в соответствие с ГОСТ Р 51919-2002 пузырьковым методом в жидком азоте и гелиевым методом на гелиевом течеискателе.

Для наработки селена-75 внутренняя капсула в составе облучательного устройства из алюминия помещается в активную зону среднепоточного реактора на тепловых нейтронах ИВВ-2М. Конструкция облучательного устройства, компоновка реактора и условия облучения (объёмный расход теплоносителя в размере 12 м$^3$/ч, плотность потока тепловых нейтронов не менее $10^{14}$ Н/см$^2$·с) обеспечивают наработку селена-75 и достижение удельной активности более 1000 Ки/г.

*Д. Н. Литвинов, В. С. Костарев, О. Л. Ташлыков,*
*В. А. Климова, Н. М. Аристов, С. Б. Злоказов.*

## Расчетные и экспериментальные исследования кинетики образования оксидных пленок на сталях Ст3 и ЭП-823 в свинцовом теплоносителе в статическом режиме при 650 С°.

Исходя из разработанной физико-химической и математической моделей взаимодействия сталей с ТЖМТ, проведенных предварительных расчетных исследований кинетики взаимодействия стали ЭП823 с жидким свинцом для различных условий эксплуатации в рамках одномерной модели диффузии кислорода от источника кислорода для проведения сравнительных испытаний разработана чертежная документация цилиндрической коррозионной ячейки. Для испытаний была выбрана максимальная температура оболочки твэла, равная 650 °С, свинец марки С0, а в качестве материала образцов сталь 3 и сталь ЭП823, имеющие существенно отличающие константы скорости параболического окисления в воздушной среде. Конструкция ячейки позволяет проводить статические испытания образцов различного вида одновременно в расплаве свинца на различной (фиксированной глубине) и на воздухе. Образцы для планируемых испытаний в расплаве свинца при 650 °С выполнялись в виде плоского диска диаметром на 2-4 мм меньше внутреннего диаметра коррозионной ячейки с центральным отверстием для фиксации образца на заданной глубине, разрезанного по хорде на расстоянии 10 мм от центра диска. Из отрезанной части изготавливали образцы

для испытания в воздушной среде. Образцы накладывались друг на друга, образуя единый образец круговой формы, и фиксировались на центральном стержне на заданной глубине.

Целью этого этапа работы являлось сравнение результатов расчетных и экспериментальных исследований кинетики взаимодействия стали и железа (сталь 3), погруженных в расплав свинца марки С0 на глубину 5 см от поверхности и на 1.5 см от дна ячейки, а также исследование кинетики окисления стали ЭП823 и железа в атмосферном воздухе. Начальное содержание кислорода в свинце марки С0 равнялось $1*10^{-4}$ масс. % кислорода (протокол Пк 1394/02 от 18.09.2023г.), расчетная равновесная концентрация кислорода на границе оксид свинца - расплав свинца - $6,3*10^{-3}$ масс. %. Испытания двух одновременно загружаемых коррозионных ячеек проводились в стандартной шахтной печи. По окончании 150 часов испытаний первая ячейка с образцами была отгружена (без остывания печи) для разделки на образцы и проведения металлофизических исследований, испытания второй ячейки продолжались до 500 часов.

Результаты расчетов изменения концентрации кислорода на поверхности образцов, размещенных на глубине 5 см. представлены на рисунке 33. В соответствии с методологией расчетов скорости взаимодействия КМ с теплоносителем, изложенной в разделе 6 были рассчитаны кинетические параметры образования оксидной пленки на образцах в процессе испытаний: $К_{нач}$ = $0,45*10^{-2}$ мкм/ $ч^{1/2}$, $\tau_0 = 15$ часов, $К_л$ = 0,18 мкм/ч.

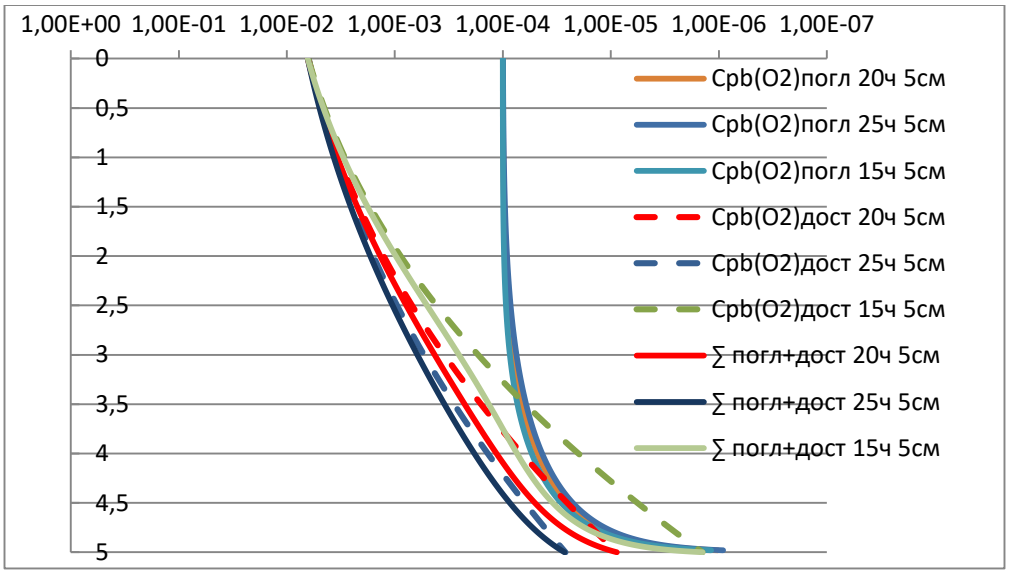



*Рисунок 33 – результаты расчетов изменения концентрации кислорода на границе расплав – образец для определения периода времени* $\tau_0$

По результатам измерений толщин оксидных пленок образцов стали 3 и стали ЭП823 после окисления в среде атмосферного воздуха определены константы скорости параболического окисления: $К_р$ (Ст3) = 7,8 мкм/$ч^{1/2}$ , $К_р$ (ЭП823) = 1,44 мкм/$ч^{1/2}$ , а затем принимая, что константы скорости параболического окисления обеих сталей в воздушной среде и жидком свинце марки С0, содержащем растворенный кислород, одинаковы, периоды времени $\tau_А$ : $\tau_А\ (Ст3) = 1870$ часов и $\tau_А\ (ЭП823) = 64$ часа.

На основании проведенных расчетов обобщенные уравнения образования оксидной пленки на образцах стали3 и стали ЭП823 в расплаве свинца записываются в следующем виде:

$$X_{пл}(Ст3) = \begin{cases} К_{нач}\tau^{1/2} = 0{,}45 \cdot 10^{-2}\ мкм/ч^{1/2}\ , при\ \tau \le 15\ ч \\ Кл\ \tau\ = 0{,}18\ \tau,\ \ при\ 15 < \tau < 1870\ ч \\ К_р\tau^{1/2} = 7{,}8\ мкм/ч^{1/2}, при\ \ \tau \ge 1870\ ч \end{cases}$$

$$X_{пл}(ЭП823) = \begin{cases} К_{нач}\tau^{1/2} = 0{,}45 \cdot 10^{-2}\ мкм/ч^{1/2}\ , при\ \tau \le 15\ ч \\ Кл\ \tau\ = 0{,}18\ \tau,\ \ при\ 15 < \tau < 64\ ч \\ К_р\tau^{1/2} = 1{,}44\ мкм/ч^{1/2}, при\ \ \tau \ge 64\ ч \end{cases}$$

В таблице 8 приведены результаты измерений «живого» сечения образцов и толщины образующейся оксидной пленки после испытаний по результатам металлографических исследований.

*Таблица 8 – результаты измерений «живого» сечения образцов и толщины образующейся оксидной пленки после испытаний по результатам металлографических исследований.*

| Параметр | | Изменение «живого» сеч, мкм | | Толщина оксида, мкм | |
|---|---|---|---|---|---|
| Продолжительность испыт. часов, ($ч^{1/2}$) | | 150 (12,25) | 500 (22,36) | 150 (12,25) | 500 (22,36) |
| Сталь3 | Воздух | 165 | 360 | 90 | осыпание |
| | Свинец | 65 | 210 | 35-40 | 90 – 120 |
| ЭП823 | Воздух | 13-18 | 38-48 | 15–20 | 40-45 |
| | Свинец | 14-18 | 36-49 | 12-20 | 35-45 |

На рисунках 34 – 36 представлены графические изображения полученных результатов в различных координатах.

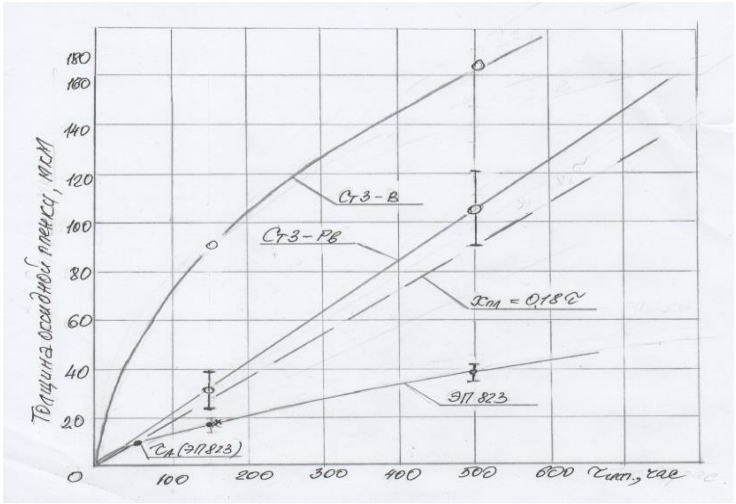



*Рисунок 34 – Расчетные и экспериментальные кинетические зависимости образования оксидных пленок на образцах стали 3 и стали ЭП 823 при 650 °С в расплаве свинца, в статическом режиме испытаний на глубине 5 см. Обозначения: Ст 3 – в (точка при 500 часах испытаний – расчет из константы параболического окисления после 150 часов) и Ст3 - Pb результаты для стали 3 на воздухе и в расплаве свинца, ЭП823 - результаты для стали ЭП823 на воздухе и в расплаве свинца, пунктирная линия расчет изменения толщины оксидной пленки на линейном этапе окисления.*

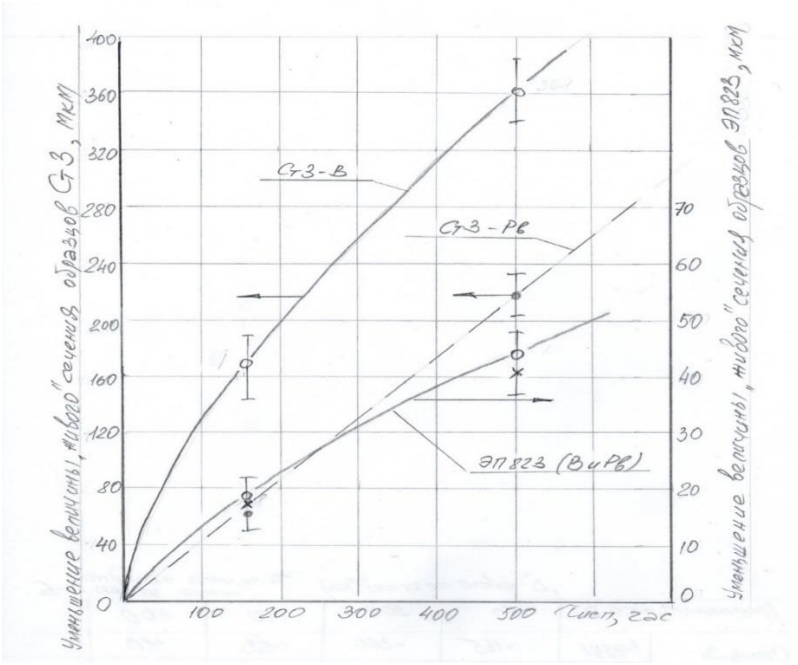



*Рисунок 35 – экспериментальные кинетические зависимости уменьшения «живого» сечения образцов стали 3 и стали ЭП 823 при 650 °С в расплаве свинца, в статическом режиме испытаний на глубине 5 см. Обозначения: Ст 3- в и Ст3 - Pb результаты для стали 3 на воздухе и в расплаве свинца, ЭП823 (в и Pb) - результаты для стали ЭП823 на воздухе и в расплаве свинца.*

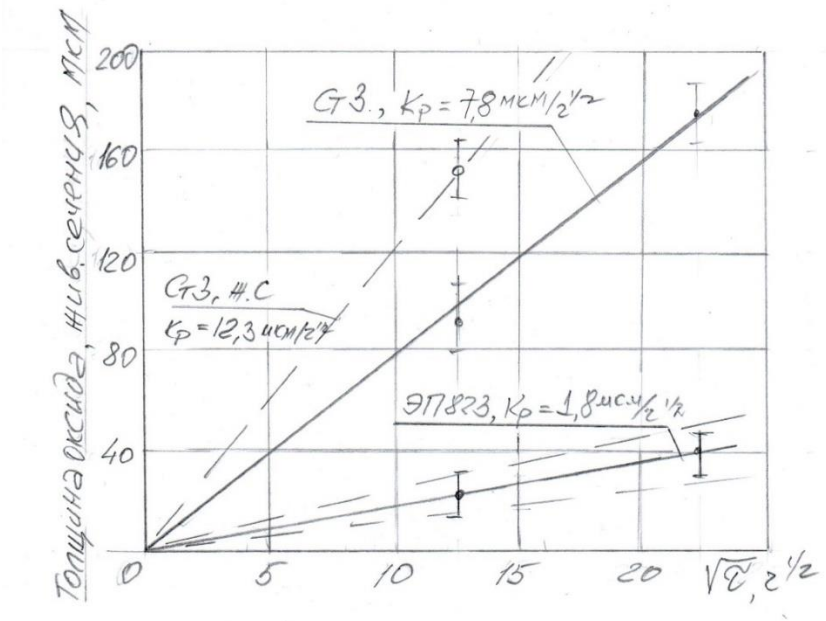



*Рисунок 36 - Кинетика изменения толщины оксидной пленки и изменения толщины «живого» сечения образцов в зависимости от продолжительности испытаний ($\tau^{1/2}$) : Ст3, ж.с. – изменение «живого» сечения образца стали 3, Ст3 – изменение толщины оксидной пленки, ЭП823 - изменение толщины оксида и «живого» сечения стали ЭП823 и пределы погрешности измерений.*

Расчетные и экспериментальные кинетические зависимости образования оксидных пленок на образцах стали 3 и стали ЭП 823 при 650 °С в расплаве свинца, статическом режиме испытаний на глубине 5 см показали, что в рассмотренном интервале времени:

- кинетика окисления образцов стали 3 в расплаве свинца (исключая начальный этап) линейна и близка к линейной зависимости, описываемой расчетным уравнением $X_{пл}$ = 0,18 $\tau$. Толщина оксидной пленки, образующейся на Ст. 3 в воздушной среде существенно больше, чем в расплаве свинца, что свидетельствует о дефиците количества кислорода, проступающего к поверхности образцов (рисунок 34);
- кинетика окисления образцов стали ЭП823 (исключая начальный этап) линейна и близка к линейной зависимости, описываемой расчетным уравнением $X_{пл}$ = 0,18 $\tau$, короткий период дефицита кислорода близкий к расчетному периоду $\tau_A = 64$ часам. Дальнейшее образование оксидной пленки в расплаве свинца описывается параболическим уравнением, практически совпадающим с уравнением образования оксидной пленки в воздушной среде, что свидетельствует об отсутствии дефицита количества кислорода, проступающего к поверхности образцов (рисунок 34, 36) после периода времени $\tau_A$;
- экспериментальные кинетические зависимости уменьшения «живого» сечения образцов стали 3 и стали ЭП 823 при 650 °С в расплаве свинца, в статическом режиме испытаний на глубине 5 см (рисунок 35) подтверждают результаты кинетических исследований образования оксидных пленок;
- результаты измерений толщины оксидной пленки и «живого» сечения стали 3 после испытаний на воздухе, а стали ЭП823 на воздухе и в свинце в координатах: параметр - $т^{1/2}$, свидетельствуют о кинетике взаимодействия, описываемой параболическими уравнениями. Кинетика образования оксидной пленки и изменения живого сечения стали 3 в расплаве свинца описывается линейными уравнениями (рисунки 34 и 36).

Поскольку содержание железа в свинце марки С0 и предельная растворимость железа при 650 °С составляют величину близкую к $1*10^{-3}$ масс. %, а величина равновесной растворимости железа при концентрации кислорода в расплаве равной $6,3*10^{-3}$ масс. % - $5*10^{-8}$ масс. %, то утонением металла образцов за 150 и 500 часов испытаний из-за растворения железа через оксидную пленку можно пренебречь.

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования взаимодействия образцов сталей Ст3 и ЭП823 при 650 °С в статическом режиме с расплавом свинца марки С0 и исходным содержанием кислорода и железа, равным $1*10^{-4}$ и $1*10^{-3}$ масс. % соответственно, контактирующего с воздушной средой показали хорошее совпадение полученных данных. Результаты расчетных и экспериментальных исследований позволили с высокой достоверностью получить кинетическое уравнение образования оксидной пленки, что свидетельствует об адекватности разработанной в АО «ИРМ» физико–химической и математической моделей взаимодействия железа и сталей с ТЖМТ в условиях эксплуатации.

На основании разработанной конструкции опытной коррозионной ячейки и примененной методики подготовки и проведения испытаний при 650 °С в АО «ИРМ» подготовлена заявка на изобретение: «Способ и устройства для определения процесса коррозии образцов из металлов и конструкционных сплавов в теплоносителях на основе свинца». Конструкция разработанной коррозионной ячейки позволяет проводить одновременные коррозионные испытаний в воздушной среде, статическом и динамическом режимах в расплаве свинцового теплоносителя.

Перехожев В.И., Лапин Ю.В., Романченко Ю.С.,
Хвостов С.С., Шабельников Е.В. Ларионов М.Д.

# ДОСТИЖЕНИЯ

## Статистические показатели по науке

*Наукометрические показатели за 2023 год*

| № | Показатель | Количество |
|---|---|---|
| 1. | Созданные РИД, шт. | 8 |
| 2. | Использованные РИД, шт. | 30 |
| 3. | Научные публикаций, шт. | 20 |
| | Из них: индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования, шт | 13 |
| 4. | Обучающиеся сотрудники (аспирантура/соискатели/магистратур) | 16 |
| 5. | Стажёры/практиканты | 35 |

*Перечень публикаций АО «ИРМ» в 2024 году:*

| № п/п | Характер документа | Название | Авторы | Источник публикации |
|---|---|---|---|---|
| 1 | статья | The effect of static stresse on the decomposition processes in the ferritic-martensitic steels in conditions of neutron irradiation to a dose of 85 dpa | Kozlov Kirill, Shabashov Valery, Kozlov Alexander, Sagaradze Victor, Panchenko Valery, Zamatovskii Andrey, Kataeva Natalya, Novikov Evgenii, Nikitina Anastasia | Journal of Nuclear Materials Volume 588, January 2024, 154820, https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154820 |
| 2 | статья | Определение размера зерна аустенита феррито-мартенситной нержавеющей стали методами ориентационной микроскопии | Сацкий Д.Д., Соловьева С.В., Устинов А.Е., Ярков В.Ю., Лобанов М.Л. | Diagnostics, resource and mechanics of materials and structures, № 1, 2024, С. - 28-44. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.1.028-044 |
| | | Determination of austenite grain size in ferritic-martensitic stainless steel by orientation microscopy methods | D.D. Satskii, S.V. Soloveva, A.E. Ustinov, V.Y. Yarkov, M.L. Lobanov | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 3 | статья | Распухание нитридного топлива при разных температурах экспериментального облучения на ранних стадиях выгорания | Кинев Е.А., Ярков В.Ю., Исинбаев А.Р., Бельтюков И.Л., Тарасов Б.А., Иванов А.Ю. | Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. № 1, 2024, С. - 87-95. DOI: 10.26583/npe.2024.1.07 https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2024/01/07.pdf |
| | | Swelling of Nitride Fuel under Different Experimental Irradiation Temperatures at the Early Burnout Stages | Kinev E.A., Yarkov V.Yu., Isinbaev A.R., Beltyukov I.L., Tarasov B.A., Ivanov A.Yu. | Journal cover Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika |
| 4 | статья | Многомасштабная модель ползучести в сталях с учетом микроструктуры | Козлов А.В., Панченко В.Л., Хромов К.Ю., Рябов В.А. | Актуальные вопросы прочности. Сборник тезисов LXVII Международной конференции. Екатеринбург, 2024, С. - 303. |
| 5 | статья | Кристаллографические особенности фазовых превращений в высокопрочной низкоуглеродистой трубной стали | Лобанов М.Л., Сацкий Д.Д., Урцев Н.В., Зорина М.А., Ярков В.Ю. | Металловедение и термическая обработка металлов. № 5 (827), 2024, С. - 3-14. DOI:10.30906/mitom.2024.5.3-13. http://mitom.folium.ru/index.php/mitom/article/view/1602 |
| 6 | статья | Microstructure of Fracture Surfaces after Radial Compression of Annular Specimens Made of Cladding Austenitic Steel Exposed to Damaging Dose above 100 dpa | Karagergi R.P., Kozlov A.V., Yarkov V.Yu., Pastukhov V. I., Barsanova S. V., Churyumova T. A., Mitrofanova N.M., Leont’eva-Smirnova M. V. | Physics of Metals and Metallography, 2024, Vol. 125, No. 6, pp. 665–672. https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X2460043X |
| 7 | статья | Микростуктура изломов после сжатия в радиальном направлении кольцевых образцов из оболочечной | Карагерги Р.П., Козлов А.В., Ярков В.Ю., Пастухов В.И., Барсанова С.В., Чурюмова Т.А., | Физика металлов и металловедение. Том: 125, № 6. 2024. С. - 755-764. DOI: 10.31857/S0015323024060122 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | аустенитной стали, облученной до повреждающей дозы более 100 СНА | Митрофанова Н.М., Леонтьева-Смирнова М.В. | https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75188315 |
| 8 | статья | Исследование взаимодействия сплава ВН-2АЭ с сурьмой до и после реакторного облучения | Кинев Е.А., Пастухов В.И., Ярков В.Ю., Плаксин О.А., Чесноков Е.А. | ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. № 2. 2024. С. - 205-211 |
| 9 | статья | Углеродные матрицы, допированные Sr, для использования в качестве электродов в радиоизотопных источниках электрической энергии | Аскарова А.А., Николкин В.Н., Бутаков Д.С., Синельников Л.П., Рычков В.Н. | Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Том 335 № 6, 2024, С. - 135 -142. DOI https://doi.org/10.18799/24131830/2024/6/4355 |
| | переводная статья | Sr-doped carbon matrices for use as electrodes in autonomous electrical energy sources | Askarova, A.A., Nikolkin, V.N., Butakov, D.S., Sinelnikov, L.P., Rychkov, V.N. | Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2024, 335(6), С.- 135–142 |
| 10 | статья | Разработка радиоизотопных автономных источников питания конденсаторного типа с жидким электролитом | Бутаков Д.С., Николкин В.Н., Келлер Н.В., Аскарова А.А., Плюхина В.Я., Рисованый В.Д. | Новое в Российской электроэнергетике. № 6, 2024, С. - 21-31 |
| 11 | статья | Демонстрационные исследования стекольных матриц для отвержденных радиоактивных отходов | Кинёв Е.А., Глушкова Н.В., Пастухов В.И., Цыгвинцев В.А., Евсеев М.В., Асипцов И.О., Карагерги Р.П., Ладейщиков К.М., Козлов П.В., Поляков Е.В., Ремизов М.Б., Беланова Е.А. | Радиоактивные отходы No 2 (27), 2024,С. - 38 — 49. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-2-38-49 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 12 | статья | Electrodeposition of Thin Silicon Films for Neutron Transmutation Doping | Isakov A.V., Khvostov S.S., Laptev M.V., Anastasia O.K., Grishenkova O.V., Zaikov Y.P. | Journal of the Electrochemical Society. 2024, 171(6), 062507 DOI:10.1149/1945-7111/ad57f8 https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1945-7111/ad57f8 |
| 13 | статья | Optimization of the Technology for Manufacturing the Electrodes for Self-Charging Supercapacitors from Carbon Nanotubes | Keller N.V., Nikolkin V.N., Butakov D. S., Zolotavin A. A., Askarova A. A., Kheynstein V. Y. | Russian Journal of Electrochemistry,Volume 60, pages 526–531, 2024. https://doi.org/10.1134/S1023193524700150 |
| 14 | статья | Отработка технологии изготовления электродов самозаряжающихся суперконденсаторов из углеродных нанотрубок | Келлер Н.В., Николкин В.Н., Бутаков Д.С., Золотавин А.А., Аскарова А.А., Хейнштейн В.Я. | Электрохимия. Том № 60, № 7, 2024. С. - 489-496. DOI: 10.31857/S0424857024070032 https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75206621 |
| 15 | статья в сборнике трудов конференции | Исследование коррозионного поведения кандидатных конструкционных материалов при параметрах переработки СНУП ОЯТ | Хвостов С.С., Голосов О.А., Никитина Е.В., Барыбин А.В. | Третья Всероссийская конференция Электрохимия в распределенной и атомной энергетике, Эльбрус, 25–30 июня 2024 года. Сборник Электрохимия в распределенной и атомной энергетике. Третья Всероссийская конференция . Екатеринбург, 2024, С. - 104-105. |
| 16 | статья в сборнике трудов конференции | Применение конфокальной лазерной микроскопии для определения параметров локальной коррозии стали AISI 316L | Лапин Ю.В., Голосов О.А., Хвостов С.С., Ребрин О.И. | Третья Всероссийская конференция Электрохимия в распределенной и атомной энергетике, Эльбрус, 25–30 июня 2024 года. Сборник Электрохимия в распределенной и атомной энергетике. Третья Всероссийская конференция . |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | Екатеринбург, 2024, С. - 37-39. |
| 17 | статья в сборнике трудов конференции | Термодинамические аспекты коррозионного поведения сталей в расплавах свинца, содержащих кислород | Романченко Ю.С., Голосов О.А., Хвостов С.С., Лапин Ю.В. | Третья Всероссийская конференция Электрохимия в распределенной и атомной энергетике, Эльбрус, 25–30 июня 2024 года. Сборник Электрохимия в распределенной и атомной энергетике. Третья Всероссийская конференция . Екатеринбург, 2024, С. - 78-82. |
| 18 | статья | Изучение влияния внешнего и внутреннего облучения на свойства остеклованных ВАО для обоснования безопасности их воздействия на окружающую среду | Старовойтов Н.П., Козлов П.В., Тананаев И.Г., Брайчун Е.С., Стаканова Н.А., Ремизов М.Б., Дудкин В.А., Казаков В.А., Коренев С.В., Поляков Е.В., Глушкова Н.В., Кинев Е.А., Зырянов С.С., Сарычев М.Н., Васильев А.В. | Вопросы радиационной безопасности, No. 2 (114), 2024, С. 11-28 |
| 19 | статья в сборнике трудов конференции | Изучение влияния внешнего и внутреннего облучения на свойства остеклованных ВАО для обоснования безопасности их воздействия на окружающую среду, подтверждения качества остеклованных | Старовойтов Н.П., Козлов П.В., Тананаев И.Г., Брайчун Е.С., Стаканова Н.А., Ремизов М.Б., Дудкин В.А., Казаков В.А., Коренев С.В., Поляков Е.В., | ДНИ НАУКИ – 2024. Озерск, 17–19 апреля 2024 года Материалы XXIV всероссийской научно-практической конференции. Посвящается 300-летию Российской академии наук. Озерск, 2024 114-117 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | продуктов | Глушкова Н.В., Кинев Е.А., Зырянов С.С., Сарычев М.Н., Васильев А.В. | |
| 20 | тезисы доклада на конференции | Исследование материалов активных зон реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем | Глушкова Н.В., Портных И.А., Кинев Е.А., Ярков В.Ю., Цыгвинцев В.А., Ладейщиков К.М., Карагерги Р.П., Лютикова М.С. | XII Международная конференция по реакторному материаловедению, посвященная 60-летию материаловедческого комплекса АО "ГНЦ НИИАР". Тезисы докладов. Димитровград, 2024, С. - 170-173 |
| 21 | тезисы доклада на конференции | Реакторные испытания лабораторных образцов микротвэлов реактора ВТГР | Ротман Д.Н., Кощеев К.Н., Бельтюков И.Л., Шабельников Е.В., Литовченко В.Ю., Васютин Н.А., Зырянова А.А., Аристов Н.М., Мокрушин А.А., Сериков В.С., Кузнецов В.В. | XII Международная конференция по реакторному материаловедению, посвященная 60-летию материаловедческого комплекса АО "ГНЦ НИИАР". Тезисы докладов. Димитровград, 2024, С. - 258-259 |
| 22 | тезисы доклада на конференции | Изучение свойств сплава ZR-2,5 % NB при длительном низкотемпературном нейтронном облучении | Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Евсеев М.В., Панченко В.Л., Нежданов А.Г., Устинов А.Е., Самедов В.К. | XII Международная конференция по реакторному материаловедению, посвященная 60-летию материаловедческого комплекса АО "ГНЦ НИИАР". Тезисы докладов. Димитровград, 2024, С. - 269-271 |
| 23 | тезисы доклада на конференции | Влияние смешанного бета-, гамма-облучения на щелевую коррозию стали марки AISI 316L в искусственной морской воде | Лапин Ю.В., Голосов О.А., Хвостов С.С., Ребрин О.И., Глушкова Н.В., Пономарева Ю.И. | XII Международная конференция по реакторному материаловедению, посвященная 60-летию материаловедческого комплекса АО "ГНЦ НИИАР". Тезисы докладов. Димитровград, 2024, С. - |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | 276-282 |
| 24 | тезисы доклада на конференции | Экспериментальные возможности АО «ИРМ» для проведения реакторных испытаний материалов и изделий ядерной техники | Варивцев А.В., Кощеев К.Н., Шабельников Е.В. | XII Международная конференция по реакторному материаловедению, посвященная 60-летию материаловедческого комплекса АО "ГНЦ НИИАР". Тезисы докладов. Димитровград, 2024, С. - 49-51 |
| 25 | тезисы доклада на конференции | Дореакторные и послереакторные исследования и реакторные испытания углерод-углеродных композиционных материалов для реакторной установки ВТГР с химико-технологической частью | Литовченко В.Ю., Шабельников Е.В., Ротман Д.Н., Полозов К.В., Барсанова С.В., Карагерги Р.П., Ладейщиков К.М., Нежданов А.Г., Лапин Ю.В., Хвостов С.С., Лютикова М.С., Кодочигов Г.Н., Мирончeнков С.Р., Бирин Д.С. | XII Международная конференция по реакторному материаловедению, посвященная 60-летию материаловедческого комплекса АО "ГНЦ НИИАР". Тезисы докладов. Димитровград, 2024, С. - 66-68 |
| 26 | тезисы доклада на конференции | Распухание нитридного топлива при разных температурах экспериментального облучения на ранних стадиях выгорания | Кинев Е.А., Ярков В.Ю., Исинбаев А.Р., Бельтюков И.Л., Тарасов Б.А., Иванов А.Ю. | XII Международная конференция по реакторному материаловедению, посвященная 60-летию материаловедческого комплекса АО "ГНЦ НИИАР". Тезисы докладов. Димитровград, 2024, С. - 328-332 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 27 | статья | Расчетная оценка остаточных тепловыделений ОТВС в бассейнах выдержек | Глухов С.М., Шумков Д.Е., Ташлыков О.Л. | Международный научно-исследовательский журнал. № S5 (143), 2024, Порядковый номер: 41 |
| 28 | статья | Conducting in-reactor studies of objects the length of which exceeds the height of the IVV-2M reactor core | Russkikh, I.M., Seleznev, E.N., Zyryanova, A.A., Kotelnikov, N.A., Tashlykov, O.L. | Nuclear Energy and Technology, 2024, 10(3), С. - 161–168 https://nucet.pensoft.net/article/128016/ |
| 29 | статья | Методика экспериментального исследования стенда-эмулятора пассивной системы охлаждения бассейна выдержки исследовательского ядерного реактора | Чалпанов С.В., Ташлыков О.Л., Глухов С.М., Шумков Д.Е., Попов А.И. | Международный научный журнал альтернативная энергетика и экология. № 6 (423), 2024, С. - 38-49 |
| 30 | статья | Morphology and Magnetic Properties of Ni Nanowires in Thin Film Anodic Alumina Templates | Dryagina A.E., Gorkovenko A.N., Kulesh N.A., Kurdyukov E.V., Viblaya A.V., Yushkov A A., Veryasova A.A., Pastukhov V.I., Kalashnikova A.S., Vas'kovsky V.O. | Physics of Metals and Metallography, Volume 125, Issue 4, pp. 371-376 https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X23603098 |
| 31 | статья | Особенности морфологии и магнитных свойств массивов магнитных нанопроволок NI в тонкопленочных матрицах оксида алюминия | Дрягина А.Е., Горьковенко А.Н., Кулеш Н.А., Кудюков Е.В., Вибля А.В., Юшков А.А., Верясова А.А., Пастухов В.И., Калашникова А.С., Васьковский В.О. | Физика металлов и металловедение. Том 125, № 4, 2024. С. - 413-419. DOI: 10.31857/S0015323024040057 https://journals.rcsi.science/0015-3230/article/view/267430 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 32 | статья | Evalution of the effect of external and internal irradiation on the properties of vitrified HLW to substantiate the safety of their environmental impact | Starovoitov N.P., Kozlov P.V., Tananaev I.G., Braichun E.S., Stakanova N.A., Remizov M.B., Dudkin V.A., Kazakov V.A., Korenev S.V., Polyakov E.V., Glushkova N.V., Kinev E.A., Zyryanov S.S., Sarychev M.N., Vasil'ev A.V. | Radiochemistry. Том 66, № 4, 2024. С. - 542-556 https://link.springer.com/article/10.1134/S1066362224040167 |
| 33 | статья | Верификация значений пластической деформации при овализации кольцевого образца из оболочки твэла реактора на быстрых нейтронах./ Verification of plastic strain values during ovalizftion of a ring specimen from a fuel element shell of a fast neutron reactor | Карагерги Р.П., Коновалов А.В., Козлов А.В. | Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures, Issue 5, 2024. С. - 117-129/ DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.117-129 |
| 34 | тезисы доклада на конференции | Исследование характеристик упругости оболочек твэлов ультразвуковым динамическим резонансным методом | Ладейщиков К.М., Карагерги Р.П., Козлов А.В. | Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Материалы XVIII международной конференции. Екатеринбург, 2024. С. - 156 |
| 35 | тезисы доклада на конференции | Оценка деформируемости материала облученной быстрыми нейтронами оболочки твэла по испытаниям кольцевых образцов | Карагерги Р.П., Козлов А.В., Коновалов А.В. | Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Материалы XVIII международной конференции. Екатеринбург, 2024. С. - 38 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 36 | тезисы доклада на конференции | Обоснование сооружения комплекса с новой перспективной исследовательской ядерной установкой «Урал» | Чалпанов С.В., Волчихина Ю.В., Зырянова А.А., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Ташлыков О.Л. | Будущее атомной энергетики - ATOMFUTURE 2024. Тезисы докладов XX Международной научно-практической конференции. Обнинск, 2024. С. - 46-48 |
| 37 | статья | On the Possibility of Experimental Comparison of the Isomeric Ratio for 186 Re Nuclei in Radiative Capture of Reactor Thermal and Epithermal Neutrons by Natural Rhenium | Volchikhina Yu. V., Gordeeva D. M., Zyryanova A. A., Koltsov V. V., Russkikh I.M., Yakovlev V. A. | Physics of Atomic Nuclei, 2024, Vol. 87, No. 10, pp. 1425–1429. DOI: 10.1134/S106377882409045X |
| 38 | статья | Свойства сплава Э125 при длительном низкотемпературном нейтронном облучении | Аверин С.А., Цыгвинцев В.А, Евсеев М.В., Панченко В.Л., Нежданов А.Г., Устинов А.Е., Самедов В.К., Соловьёва С.В. | Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР», 2025. Вып. 2. С. 58–68. |
| 39 | статья переводная | Influence of Cooling Rate from the β Region on Phase Transformations in the Zr–2.5Nb Alloy | Yarkov V.Y., Pastukhov V.I., Zorina M.A., Soloveva S.V. Redikultsev A.A., Lobanov M.L. | Physics of Metals and Metallography. Volume 125, pages 1136–1147, (2024) https://link.springer.com/article/10.1134/S0031918X24601045 |
| 40 | статья | Влияние скорости охлаждения из β-области на фазовые превращения в сплаве ZR-2.5NB | Ярков В.Ю., Пастухов В.И., Зорина М.А., Соловьева С.В., Редикульцев А.А., Лобанов М.Л. | Физика металлов и металловедение. Том 125, № 10, 2024. С. - 1291-1301. https://sciencedata.urfu.ru/portal/ru/publications/----------zr25nb(3f2956ba-46df-4ca8-96af-dadd8609e7b3).html |
| 41 | статья | Possibilities of confocal laser microscopy for determining the parameters of local corrosion | Lapin YU.V., Golosov O.A., Khvostov S.S., Rebrin O.I. | Russian metallurgy (Metally) Том: 2024, № 4, 2024. С. - 1028-1033 DOI: 10.1134/S0036029524701970 https://link.springer.com/article/10.1134/S0036029524701 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | | 970#citeas |
| 42 | тезисы доклада на конференции | Закономерности поведения аустенитных нержавеющих сталей под воздействием нагрузок, среды и облучения | Аверин С.А. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 7 |
| 43 | тезисы доклада на конференции | Обзор исследований коррозионного поведения сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях | Голосов О.А., Хвостов С.С., Глушкова Н.В., Романченко Ю.С. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 8 |
| 44 | тезисы доклада на конференции | Модернизация модели активной зоны реактора ИВВ-2М для расчетного кода MCNP | Васютин Н.А., Аристов Н.М., Зырянова А.А., Волчихина Ю.В. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 13-14 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 45 | тезисы доклада на конференции | Дореакторные, послереакторные исследования и реакторные испытания углерод-углеродных композиционных материалов для реакторных установок ВТГР с ХТЧ | Литовченко В.Ю., Шабельников Е.В., Ротман Д.Н., Полозов К.В., Барсанова С.В., Карагерги Р.П., Ладейщиков К.М., Нежданов А.Г., Лапин Ю.В., Хвостов С.С., Лютикова М.С., Кодочигов Г.Н., Мирончeнков С.Р., Бирин Д.С. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 40-41 |
| 46 | тезисы доклада на конференции | Роль АО «ИРМ» в развитии направления реакторов на быстрых нейтронах | Портных И.А., Козлов А.В. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 42-44 |
| 47 | тезисы доклада на конференции | Электрохимические методы испытаний и оценки стойкости стали AISI 316L к питтинговой коррозии | Лапин Ю.В., Голосов О.А., Хвостов С.С., Ребрин О.И., Пономарева Ю.И. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 45-46 |
| 48 | тезисы доклада на конференции | Дилатометрические исследования оболочек твэлов из стали типа Х16Н19 | Ладейщиков К.М., Карагерги Р.П., Соловьева С.В., Ярков В.Ю., Барсанова С.В. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 47-48 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 49 | тезисы доклада на конференции | Определение механических свойств в зоне термического влияния электронно-лучевого сварного соединения канала СУЗ РБМК-1000 | Нежданов А.Г., Аверин С.А. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 49 |
| 50 | тезисы доклада на конференции | Изменение микроструктуры и состава вторых фаз циркониевого сплава при длительном нейтронном облучении | Устинов А.Е., Аверин С.А., Панченко В.Л., Ярков В.Ю. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 50-52 |
| 51 | тезисы доклада на конференции | Анализ структурно-фазового состояния сплава ZR-2.5% NB после длительного низкотемпературного облучения в среде водного теплоносителя | Ярков В.Ю., Пастухов В.И., Аверин С.А., Соловьева С.В., Цыгвинцев В.А. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 53-54 |
| 52 | тезисы доклада на конференции | Исследование углерод-углеродных композиционных материалов методом рентгеновской дифракции | Соловьева С.В., Цыгвинцев В.А., Вельмогин Д.Н., Ладейщиков К.М. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 55-56 |
| 53 | тезисы доклада на конференции | Результаты коррозионных испытаний аустенитной хромоникелевой стали ЭП302-Ш в свинце, содержащем кислород | Романченко Ю.С., Голосов О.А., Ярков В.Ю., Хвостов С.С., Лапин Ю.В., Исинбаев А.Р., Соловьева С.В. | Научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученных, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпусу защитных камер.Тезисы докладов. Москва, 2024. С. - 57-58 |

*Сведения об участии работников АО «ИРМ» в научно-технических мероприятиях:*

| | |
|---|---|
| Участие в научно-технических мероприятиях (конференции, семинары и др.)<br>Из них: | |
| Российских | 23 |
| Международных | 9 |
| Число участников от АО «ИРМ» в научно-технических мероприятиях (конференции, семинары и др.) | 82 |
| Число докладов на научно-технических мероприятиях (конференции, семинары и др.) | 49 |

За 2024 года подготовлено, создано 7 объектов интеллектуальной собственности, 35 использовано в хозяйственной деятельности.

*Наукометрические показатели за 2024 год*

| № | **Показатель** | **Количество** |
|---|---|---|
| 1 | Созданные РИД, шт. | 7 |
| 2 | Использованные РИД, шт. | 35 |
| 3 | Научные публикаций, шт. | 53 |
| | Из них: индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования, шт | 17 |

*Сведения об участии работников АО «ИРМ» в научно-технических мероприятиях:*

| | |
|---|---|
| Участие в научно-технических мероприятиях (конференции, семинары и др.)<br>Из них: | 24 |
| Российских | 19 |
| Международных | 5 |
| Число участников от АО «ИРМ» в научно-технических мероприятиях (конференции, семинары и др.) | 50 |
| Число докладов на научно-технических мероприятиях (конференции, семинары и др.) | 30 |

За 2023 года подготовлено 14 результатов интеллектуальной деятельности, создано 8 объектов интеллектуальной собственности, 30 использовано в хозяйственной деятельности.

## Прочие научно-технические достижения

Примеры внедрения созданных результатов научно-технической деятельности (РНТД)

Одним из важных показателей инновационной деятельности Общества является создание и внедрение объектов интеллектуальной собственности в хозяйственный оборот.

В отчетном году внедрено пять объектов интеллектуальной собственности. Новые подходы применены в производственной деятельности Института, а также по направлению радиационного материаловедения конструкционных материалов ТВЭЛ:

- новая конструкция и технология изготовления мишеней для производства радионуклидной продукции;
- методики для проведения исследований на коррозионную стойкость материалов и выполнения измерений характеристик упругости металла оболочек твэл в научно-исследовательских и опытно - конструкторских работ по определению физико - механических свойств конструкционных материалов применяется способ подготовки образцов оболочечных труб твэлов и устройство для его реализации.

Для расширения продуктовой линейки института и производства импортозамещающей продукции приобретены исключительные права на объекты интеллектуальной собственности по технологии и разработке линии изготовления тросовых источников на основе изотопа 192Ir для гамма — терапевтических аппаратов контактного облучения отечественного и импортного производства.

Постоянное усовершенствование методов и способов проведения научных исследований позволяет АО «ИРМ» оставаться одним из ведущих материаловедческих центров Урала. Разработки в области производства радиоизотопов приводят к увеличению выпускаемой продукции и наращиванию номенклатуры.

***Итоги издательской деятельности***

Выпущен сборник тезисов докладов, представленных на научно-технической конференции по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов, посвященной 50-летию корпуса защитных камер, которая проходила 16-20 сентября 2024 года в г. Екатеринбурге.

Содержание сборника:

**Пленарные доклады** ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Закономерности поведения аустенитных нержавеющих сталей под воздействием нагрузок, среды и облучения. *Аверин С.А.*..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Обзор исследований коррозионного поведения сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях. *Голосов О.А., Хвостов С.С., Глушкова Н.В., Романченко Ю.С.*..... **Ошибка! Закладка не определена.**

**Секция 1. Ядерные реакторы и технологии**. **Ошибка! Закладка не определена.**

Водно-химический режим реакторов бассейнового типа: многолетний опыт АО «ГНЦ НИИАР». *Ижутов А.Л., Петелин А.Л., Владимирова О.Н., Сазонтов С.А., Васильев В.И., Соловова Е.О., Дубинина С.А.*. **Ошибка! Закладка не определена.**

Обоснование принципов формирования загрузки активной зоны кипящего корпусного реактора ВК-50. *Сутягина Я.А., Синявина Е.В., Бреусова Е.Г., Малков А.П.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Модернизация модели активной зоны реактора ИВВ-2М для расчетного кода MCNP. *Васютин Н.А., Аристов Н.М., Зырянова А.А., Волчихина Ю.В.***Ошибка! Закладка н**

Разработка, изготовление и постановка оборудования исследовательской ядерной установки. *Маров И.В., Земляникин Е.В., Петрунина Д.А., Манин Д.А.***Ошибка! За**

Модель эксплуатации реакторной установки ВТГР для атомной энерготехнологической станции (АЭТС). *Маров И.В., Кодочигов Г.Н., Петрунина Д.А., Красников А.Е., Пугина А.Ю.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Современное состояние разработок АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» по измерительным каналам контроля кислорода в тяжелых жидкометаллических теплоносителях (свинец, свинец-висмут). *Лотов В.С., Садовничий Р.П., Асхадуллин Р.Ш., Дворецкий С.В., Харчук С.Е., Апальнов Е.А.* .... **Ошибка! Закладка не определена.**

Расчетные исследования эффектов реактивности в тяжелых авариях с учетом процессов кипения натрия, плавления оболочек твэл и топлива для быстрого натриевого реактора большой мощности. *Аверченкова Е.П., Перегудов А.А., Соломонова Н.В., Щекотова Л.А.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Современное состояние и проблемы отечественной технологии ядерного (нейтронно-трансмутационного) легирования кремния. *Бабаева Ю.А., Стук А.А., Кочнов О.Ю.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Обоснование радиационной безопасности стенда для измерения распределения выгорания ТВС реактора ВВР-Ц. *Никулин Е.В., Кузнецов Н.В., Пахолик Д.А., Кочнов О.Ю.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Влияние толщины вольфрама на поле температур энергонапряженных компонентов панели первой стенки модуля №7 тип А бланкета ИТЭР. *Козлов С.А., Томилов С.Н., Поддубный И.И., Свириденко М.Н., Путрик А.Б.***Ошибка! Закладка не опре**

Разработка и изготовление полномасштабного прототипа несущей конструкции первой стенки ИТЭР. *Томилов С.Н., Стребков Ю.С., Свириденко М.Н., Лешуков А.Ю., Поддубный И.И., Трифонова Е.В., Путрик А.Б.***Ошибка! Закладка не определена.**

Разработка программы ударных испытаний контактных электроизолирующих накладок реактора ИТЭР. *Никулин Б.И., Сулейманов Т.М., Поддубный И.И., Свириденко М.Н., Путрик А.Б.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Механические статические и циклические испытания сборки гибкой опоры бланкета ИТЭР. *Лебедева М.С., Козлов С.А., Поддубный И.И., Свириденко М.Н., Хомяков С.Э., Паршутин Е.В., Апальков А.А., Усов С.М., Тимофеев С.В., Путрик А.Б.*..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Квалификация методов нанесения покрытий различного функционального назначения на внутрикамерные компоненты бланкета ИТЭР. *Чебурова А.В., Козлов С.А., Хомяков С.Э., Поддубный И.И., Свириденко М.Н., Беликов А.И., Колесник Л.Л., Шер Е.С., Ульяницкий В.В., Путрик А.Б.***Ошибка! Закладка не определена**

Разработка компоновки активной зоны для исследовательского реактора с использованием НОУ топлива и гафния. *Побелянская М.А.***Ошибка! Закладка не определ**

Импульсный реактор периодического действия. *Домбровская З.С.***Ошибка! Закладка не о**

Дореакторные, послереакторные исследования и реакторные испытания углерод-углеродных композиционных материалов для реакторных установок ВТГР с ХТЧ. *Литовченко В.Ю., Шабельников Е.В., Ротман Д.Н., Полозов К.В., Барсанова С.В., Карагерги Р.П., Ладейщиков К.М., Нежданов А.Г., Лапин Ю.В., Хвостов С.С., Лютикова М.С., Кодочигов Г.Н., Мироненков С.Р., Бирин Д.С.***Ошибка! Закладка не опре**

**Секция 2. Радиационное материаловедение Ошибка! Закладка не определена.**

Роль АО «ИРМ» в развитии направления реакторов на быстрых нейтронах. *Портных И.А., Козлов А.В.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Электрохимические методы испытаний и оценки стойкости стали AISI 316L к питтинговой коррозии. *Лапин Ю.В., Голосов О.А., Хвостов С.С., Ребрин О.И., Пономарёва Ю.И.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Дилатометрические исследования оболочек твэлов из стали типа Х16Н19. *Ладейщиков К.М., Карагерги Р.П., Соловьева С.В., Ярков В.Ю., Барсанова С.В.***Ошибка! З**

Определение механических свойств в зоне термического влияния электронно-лучевого сварного соединения канала СУЗ РБМК-1000. *Нежданов А.Г., Аверин С.А.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Изменение микроструктуры и состава вторых фаз циркониевого сплава при длительном нейтронном облучении. *Устинов А.Е., Аверин С.А., Панченко В.Л., Ярков В.Ю.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Анализ структурно-фазового состояния сплава ZR-2.5% Nb после длительного низкотемпературного облучения в среде водного теплоносителя. *Ярков В.Ю., Пастухов В.И., Аверин С.А., Соловьева С.В., Цыгвинцев В.А.***Ошибка! Закладка не опред**

Исследование углерод-углеродных композиционных материалов методом рентгеновской дифракции. *Соловьева С.В., Цыгвинцев В.А., Вельмогин Д.Н., Ладейщиков К.М.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Результаты коррозионных испытаний аустенитной хромоникелевой стали ЭП302-Ш в свинце, содержащем кислород. *Романченко Ю.С., Голосов О.А., Ярков В.Ю., Хвостов С.С., Лапин Ю.В., Исинбаев А.Р., Соловьева С.В.***Ошибка! Закладка не определ**

Результаты дореакторных исследований кандидатных конструкционных материалов для изготовления элементов активной зоны ИЖСР. *Глушкова А.К., Буланова Т.М., Карсаков А.А., Гончаренко Ю.Д., Евсеев Л.А., Сосипаторов С.Н.***Ошибка! З**

Влияние технологии сварки на структурно-фазовое состояние металлов сварных швов реакторов типа ВВЭР в исходном и облученном состоянии. *Малиновский Е.Д., Кулешова Е.А., Мальцев Д.А., Федотов И.В., Потехин А.А., Скоробогатых В.Н., Погорелов Е.В.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Синтез и исследование водородоудерживающих покрытий на поверхности гидрида гафния. *Ковтун С.Ю., Полунин К.К., Брацук А.В., Киселев Д.С., Урусов А.А.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

**Секция 3. Радиоизотопные технологии для промышленности и медициныОшибка! За**

Исследование методики облучения в брахитерапии с использованием короткоживущих радионуклидов: определение периодов полураспада $^{125}$I, $^{169}$YB. *Дружинская О.И., Голубева К.В.*..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Исследование кинетики электрохимического осаждения никеля из сульфатного электролита. *Шаландин В.Е., Смирнов М.Н., Лобаненко В.В., Ротманов К.В.***Ошибка! Закл**

Значения выхода никеля по току в ячейке цилиндрического типа малого объема. *Смирнов М.Н., Шаландин В.Е., Лобаненко В.В., Ротманов К.В.***Ошибка! Закладка не опре**

Очистка берклия методом соосаждения иодата берклия с иодатом церия. *Перепелкин Д.А., Абдуллов Р.Г., Буткалюк П.С., Буткалюк И.Л., Аббязова В.Г., Борзова А.В.*..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Тестирование катионитов марки ТОКЕМ. *Аббязова В.Г., Лобаненко В.В., Гончарова Г.В., Ротманов К.В.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Экспериментальное облучение образцов анионитов для исследования их радиационной устойчивости. *Щербаков А.В., Денисов С.В.***Ошибка! Закладка не определ**

Исследования механизма адсорбционного выделения $^{99}$МО из топливного раствора реактора «АРГУС». *Терашкевич С.С.***Ошибка! Закладка не определена.**

Контроль качества сырья для производства радиофармпрепаратов методом капиллярного электрофореза. *Сотник Н.В., Демченко Е.А., Гурова М.Э.***Ошибка! Закладка**

Очистка плутония-238 от примесных урана-232 и тория-228. *Орлов П.А., Хасанов Р.Н., Ворошилов Ю.А.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Получение препарата свинца-210. *Хасанов Р.Н., Орлов П.А., Крылов А.И., Ворошилов Ю.А.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

**Секция 4. Обращение с ОЯТ и РАО**..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Низкотемпературное концентрирование ЖРО. *Шаталина Я.И., Погляд С.С., Дмитриева О.С.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Сравнение методов выделения ЯДМ из фильтрующих элементов на основе ткани Петрянова. *Елисеев К.В., Замалтдинова А.Р., Дмитриева О.С., Васюнина Е.В., Погляд С.С.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Получение МОКС осадков в молибдатном расплаве. *Горелов А.В., Осипенко А.Г., Погляд С.С.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Сорбционная очистка ЖРО, содержащих альфа-нуклиды, модифицированным природным сорбентом. *Легких К.Г., Грушичева Е.А., Трифанова Е.М., Раскач О.В., Фокина Д.А.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Испытание автоматизированной системы пробоотбора, разведения и передачи проб. *Тимонин Д.В.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Влияние α-облучения плутония и концентрации карбоната натрия в регенерирующем растворе на изменение эксплуатационных свойств 30 % ТБФ в н-парафине. *Зубов А.М., Кадочигов К.А., Ворошилов Ю.А., Конников А.В.***Ошибка! Заклади**

Применение термоаналитических методов для исследования теплофизических характеристик остеклованных форм радиоактивных отходов. *Зорин Е.С., Старовойтов Н.П., Коренев С.В., Козлов П.В., Поляков Е.В.***Ошибка! Закладка не опреде**

Исследование алюмофосфатных стекол с включением имитатора перлитсодержащих рао от переработки ОЯТ. *Власова Н.В., Поляков Е.В., Козлов П.В., Ремизов М.Б., Зорин Е.С., Брайчун Е.С., Мальцев А.А.***Ошибка! Закладка не определ**

Получение и характеризация отвержденной «короткоживущей» фракции ВАО от переработки ОЯТ энергетических реакторов. *Брайчун Е.В., Козлов П.В., Ремизов М.Б., Поляков Е.В., Никулина А.Ю.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Разработка метода обращения с отработанным дезактивирующим раствором серии «ВЫБОР». *Габбасова Н.Р., Кузнецова Н.А., Сахненко О.А.* **Ошибка! Закладка не оп**

Сравнение разбавителей БК-1 и БК-2 области безопасности экстракционных систем. *Монстаков Д.А., Старовойтов Н.П., Любимова Е.В., Коренев С.В.***Ошибка! Закла**

Исследование показателей качества боросиликатных стекол с различным содержанием «короткоживущей» цезий-стронциевой фракции. *Никулина А.Ю., Поляков Е.В., Ремизов М.Б., Козлов П.В., Брайчун Е.С., Джевелло К.А., Мальцев А.А.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Оценка эффективности коммерческих моющих средств для дезактивации изделий из углеродистой и нержавеющей сталей. *Пургина Т.А., Сахненко О.А., Кузнецова Н.А., Козина Ю.В.*..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Измерение состава «короткоживущей» фракции, возвращаемой зарубежному заказчику в рамках сбалансированного ядерного топливного цикла. *Татарникова Ю.М., Чухланцева Е.В., Степанова О.В., Диченко О.Ю., Зайцева Т.А., Джевелло К.А.*..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Испытание корпуса датчика системы контроля положения агрегата резки отработавшего ядерного топлива, изготовленного с применением аддитивных технологий. *Хусаинов М.Р., Халтурин Д.В., Колецкий В.О., Зайцев А.А.***Ошибка! Закладка**

Исследование режимов конверсии уранил трикарбоната аммония в оксид урана в лабораторной СВЧ-установке. *Дмитриева О.С., Дмитриев М.Г., Капралов Д.А., Елисеев К.В.*..... **Ошибка! Закладка не определена.**

Оптимизация технологической схемы очистки плутониевых растворов применительно к аффинажному отделению завода РТ-1. *Кадочигов К.А., Зубов А.М., Конников А.В., Ворошилов Ю.А., Лукин С.А.***Ошибка! Закладка не определена.**

Выбор режимов изготовления, термообработки и вскрытия имитаторов керна остеклованных ВАО для подготовки к проведению исследований накопленных остеклованных ВАО ФГУП «ПО «МАЯК». *Дубровин Е.Н., Никулина А.Ю., Поляков Е.В., Ремизов М.Б., Козлов П.В.* ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

## Научно-технические мероприятия

16-20 сентября 2024 года в г. Екатеринбурге АО «ИРМ» была проведена научно-техническая конференция по ядерным технологиям для молодых ученых, специалистов, студентов и аспирантов, посвященная 50-летию корпуса защитных камер.

Целью данной конференции является вовлечение молодых специалистов, студентов и аспирантов в решение актуальных научно-технических задач атомной отрасли и укрепление связи между предприятиями и ВУЗами.

В конференции приняли участие 57 представителей от 11 организаций Госкорпорации «Росатом», институтов Российской Академии Наук и ВУЗов, из них 44 участников являются молодыми учеными и специалистами до 35 лет.

Было представлено 52 доклада по основным тематическим направлениям конференции:

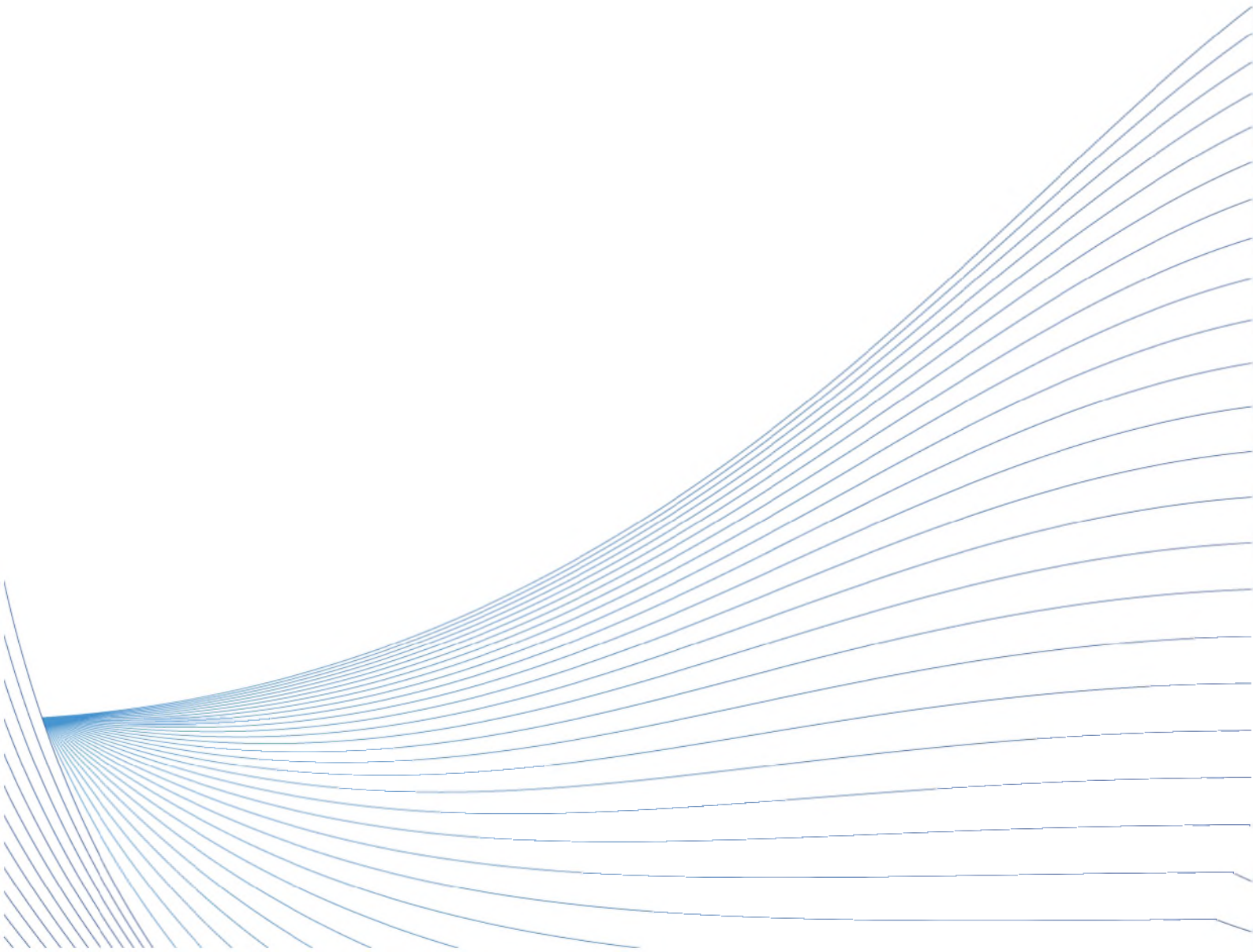
Основные тематисеские направления конференции:

- ядерные реакторы и технологии;
- радиационное материаловедение;
- радиоизотопные технологии для промышленности и медицины;
- обращение с ОЯТ и РАО.

На конференции проводился конкурс на лучший доклад. Дипломами за лучший доклад награждены 4 участника конференции:

- Малиновский Евгений Дмитриевич – НИЦ «Курчатовский институт» в секции «Радиационное материаловедение».
- Бабаева Юлия Андреевна – АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» в секции «Ядерные технологии».
- Перепелкин Дмитрий Андреевич – АО «ГНЦ НИИАР» в секции «Радиоизотопные технологии в промышленности и медицине».
- Брайчун Евгений Викторович – ФГУП «ПО «МАЯК» в секции «Обращение с ОЯТ и РАО».

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ



## Сотрудничество с вузами и институтами РАН

В АО «ИРМ» для студентов высших учебных заведений реализуется программа научных стажировок «Лаборатория роста Росатома», направленная на отбор и привлечение студентов к стажировкам с целью обеспечения молодыми кадрами в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Программа позволяет в ходе обучения получить практический опыт взаимодействия с предприятием отрасли, сформировать четкое объективное видение будущей специальности. Программа реализуется совместными усилиями с научными руководителями - наставниками. В 2024 году трудоустроено на срочный трудовой договор 3 студента из Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина".

С 2024 года программа расширена до уровня среднего профессионального образования, для участия в программе привлечены 13 студентов УрТК НИЯУ МИФИ, с целью закрытия вакансий по рабочим профессиям.

АО «ИРМ» развивает взаимовыгодное сотрудничество с университетами и колледжами в научно-исследовательской сфере, касающейся подготовки квалифицированных специалистов в области прикладных ядерных технологий, путем реализации партнерских практико-ориентированных образовательных программ и эффективного использования научного потенциала Университета и аппаратурно-технической базы АО «ИРМ» при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в том числе прохождения практической подготовки студентов с привлечением работников предприятия в качестве наставников (ФГАОУ ВО УрФУ, ФГАОУ ВО МГУ, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», ФГАОУ УГЛТУ, УГГУ, ФГАОУ ВО РГППУ и т.д.).

В АО «ИРМ» действует базовая кафедра «Радиационные и ядерные технологии» на базе ФГАОУ ВПО «УрФУ».

В отчетном году общее количество студентов, прошедших практическую подготовку – 24 человека по разным специализациям в т.ч. по ядерным направлениям.

На площадке АО «ИРМ» для модернизации существующей системы профессионального образования, повышения качества подготовки студентов была реализована очная программа стажировок преподавателей колледжей и университетов для получения ими практических навыков и компетенций по профилю соответствующей образовательной программы.

Два преподавателя УрФУ прошли стажировку по следующим программам:

- «Ядерные реакторы и материалы»;
- «Получение практических знаний о возможностях и особенностях эксплуатации исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М».

Результат стажировки преподавателей УрФУ зафиксирован протоколом научно-педагогических работников кафедры экспериментальной физики от 13.03.2025г. №2. Внести в рабочую программу по дисциплине «Источники ионизирующего излучения» темы:

- «Разделение помещений при производстве радионуклидов. Обеспечение норм ра-диационной безопасности».
- «Исследовательские ядерные установки ИЯУ ИВВ-2М».

Преподаватели УрТК НИЯУ МИФИ проходили стажировку по программе «Контроль и метрологическое обеспечение производства работ, проводимых на предприятии атомной отрасли».

Результатом стажировки станут обновленные программы подготовки с учетом специфики деятельности АО «ИРМ».

На ежегодной основе эксперты АО «ИРМ» участвуют в проведении государственной итоговой аттестации УрТК НИЯУ МИФИ по направлениям: «Автоматизация технических процессов и производств (по отраслям)», «Электрические станции, сети и системы», «Программирование в компьютерных системах», «Экономика и бухгалтерский учет».

Молодые специалисты АО «ИРМ» проводят профориентационные экскурсии для развития профессионального сотрудничества и партнерских отношений, популяризация прикладной науки и формирования кадрового потенцияла предприятия (Н-р, ИАТЭ НИЯУ МИФИ г. Обнинск, НГТУ им. Р.Е.Алексеева г. Нижний Новгород, ТПУ г. Томск, УрФУ, УГГУ г. Екатеринбург).

В рамках доходного договора между АО «ИРМ» и ИВТЭ УрО РАН были проведены нейтронографические исследования для верификации фазового состава продуктов электролитической переработки образцов модельного ядерного топлива на этапах металлизации. Для изучения исследуемых образцов применялся нейтронный дифрактометр высокого разрешения Д-7а Нейтронного материаловедческого комплекса ИФМ УрО РАН, функционирующий на ГЭК-7 ИЯУ ИВВ-2М на экспериментальной площадке АО «ИРМ».

## Мероприятия, реализуемые АО «ИРМ» в раках работы по развитию кадрового потенциала

***Кадровый потенциал***

В настоящее время в АО «ИРМ» работают 10 человек, имеющих ученую степень кандидатов наук.

В ФГАОУ ВО «УрФУ» учатся 12 аспирантов и 1 соискатель по разным направлениям подготовки научных специалистов.

***Ранняя профориентация***

Впервые АО «ИРМ» совместно с МАОУ МО Заречный, УрТК НИЯУ МИФИ подготовили и направили в образовательный центр «Сириус» (г. Сочи) уникальных, талантливых детей для демонстрации высокого мастерства и основательной подготовки своих проектов по четырем научным направлениям: новые материалы и технологии, технологии энергетики будущего, лазерные технологии, термоядерные и плазменные технологии по образовательной программе «Наука. Искусство. Атом» на федеральной территории.

Общими усилиями ребята создают проекты, которые станут в ближайщие годы основой развития международного детского- юношеского сообщества для развития молодежи. Участие в проекте позволяет сформировать у школьников привлекательный образ научной карьеры, выбрать и поступить в вуз, где реализуются профильные для научных организаций Росатома специальности.

Впервые реализована программа технических туров для школьников старших классов школ МО Заречный.

***Подготовка в колледжах и университетах***

На площадке АО «ИРМ» для модернизации существующей системы профессионального образования, повышения качества подготовки студентов была реализована очная программа стажировок преподавателей коллеждей и университетов для получения ими практических навыков и компетенций по профилю соответствующей образовательной программы.

Преподаватели УрФУ проходили стажировку по следующим программам:

- «Ядерные реакторы и материалы»;

– «Получение практических знаний о возможностях и особенностях эксплуатации исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М»;

– «Материаловедение».

Преподаватели УрТК НИЯУ МИФИ проходили стажировку по программе «Контроль и метрологическое обеспечение производства работ, проводимых на предприятии атомной отрасли».

Результатом стажировки станут обновленные программы подготовки с учетом специфики деятельности АО «ИРМ». Молодые ученые ИРМ в течение года провели 2 профориентационные встречи со студентами УрТК НИЯУ МИФИ по научным и инженерным направлениям деятельности.

***Развитие действующих сотрудников***

Создание условий для участия и победы молодых сотрудников в научных конференциях, форумах, конкурсах: Младший научный сотрудник лаборатории конструкционных материалов и нанотехнологий Ярков В.Ю. занял 2 место на конкурсе докладов XV международного уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов» с докладом «Применение метода ориентационной микроскопии для изучения структурно — фазового состояния облученного циркониевого сплава» на секции «Топливо для ядерной энергетики».

С целью развития научной карьерной траектории работников с высшей квалификацией в АО «ИРМ» созданы условия для успешной защиты кандидатских диссертаций, такие как своевременное закрепление наставника и получение рецензии научно-технического совета Общества.

***Работа с сотрудниками «серебряного» возраста***

Сотрудники «серебряного» возраста, обладая экспертным опытом и применяя на практике инструменты Производственной системы «Ростама», оптимизируют производственные процессы предприятий отрасли в рамках Чемпионата по ПСР среди первичных трудовых коллективов. Улучшая производственные процессы АО «ИРМ», за счет внедрения предложений по улучшению и устройств малой механизации «Каракури», вовлекают молодых работников в процесс непрерывных улучшений.

В АО «ИРМ» для студентов высших учебных заведений реализуется программа научных стажировок «Лаборатория роста Росатома», направленная на отбор и привлечение студентов к стажировкам с целью обеспечения молодыми кадрами в сфере научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Программа позволяет в ходе обучения получить практический опыт взаимодействия с предприятием отрасли, сформировать четкое объективное видение будущей специальности. Программа реализуется совместными усилиями с научными руководителями - наставниками. В 2024 году трудоустроено на срочный трудовой договор 4 студента из Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н.Ельцина". В отчетном году общее количество студентов, прошедших практику – 24 человека по разным специализациям в т.ч. по ядерным направлениям.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На базе АО «ИРМ» проводится полный комплекс исследований материалов и изделий ядерной техники, включая дореакторные исследования, реакторные испытания и послереакторные исследования. Основными объектами экспериментальной базы института являются исследовательская ядерная установка ИВВ-2М с размещёнными на ней стендами и материаловедческий комплекс защитных камер.

В части научного сопровождения эксплуатации действующих энергоблоков АЭС, ИРМ традиционно выполняет послереакторные исследования элементов активных зон быстрых реакторов (БН) и реакторов большой мощности канальных (РБМК).

Работы по направлению реакторов БН проводятся в рамках «Программы НИОКР по увеличению длительности топливной кампании реакторов БН. Актуализация 2024 года», утверждённой первым заместителем генерального директора по атомной энергетике Госкорпорации «Росатом» Петровым А.Ю. от 05.07.2024 г.

В 2024 г. выполнены исследования влияния нейтронного облучения на изменение механических и структурных характеристик стали ЭП450 после облучения в качестве чехловой трубы материаловедческих сборок (МС-1 и МС-2) реактора БН-600. Полученные дополнительные экспериментальные данные необходимы для обоснования применения стали ЭП450 в качестве материала чехловых труб ТВС и материаловедческих сборок для облучения в активной зоне реактора БН-600 до повреждающих доз свыше 145 сна.

В связи с решением Государственной корпорации «Росатом» о продлении срока службы семи энергоблоков РБМК до 50 лет, требуется обоснование остаточного ресурса топливных каналов и каналов СУЗ данных энергоблоков на основе результатов послереакторных исследований, которые традиционно проводятся в АО «ИРМ».

В рамках работ по «Программе регламентного послереакторного контроля в защитных камерах технологических каналов и каналов СУЗ, извлекаемых из реакторов РБМК-1000 на завершающем этапе эксплуатации энергоблоков» в защитных камерах АО «ИРМ» в 2024 году проведены послереакторные исследования трех каналов СУЗ энергоблоков Ленинградской АЭС: один из реактора четвертого энергоблока со сроком эксплуатации 41 год и два из реактора третьего энергоблока со сроком эксплуатации 42,5 года. Кроме того, исследован канал СУЗ, который находился в эксплуатации на первом энергоблоке Курской АЭС в течение 44 лет.

Исследования микроструктуры, механических и коррозионных характеристик показали, что наблюдаемое в циркониевой части канала незначительное наводороживание с образованием отдельных мелких блистеров не оказывает влияния на основные служебные характеристики циркониевой трубы, электроннолучевого и диффузионного сварного соединения, которые находятся на уровне экспериментальных значений, полученных ранее при исследованиях каналов с меньшим ресурсом эксплуатации. Результаты послереакторных исследований каналов СУЗ после длительной эксплуатации в энергоблоках Ленинградской и Курской АЭС свидетельствуют, что они сохранили свою работоспособность.

В рамках отраслевого проекта «Прорыв» продолжены реакторные эксперименты с использованием созданного в АО «ИРМ» стенда «Урал-коррозия» со свинцовым теплоносителем. Так, в течение 2024 г. велись и в начале 2025 г. завершены коррозионные испытания аустенитной хромоникелевой стали ЭП302-Ш в свинце, содержащем кислород. Испытания проводились в течение 12 реакторных циклов работы ИЯУ ИВВ-2М до набора общей экспозиции ~5200 ч. Комплексные материаловедческие исследования образцов запланированы на 2025 г.

По инициативе АО «ИРМ» проведены исследования взаимодействия образцов сталей Ст3 и ЭП823 при температуре 650 °С с расплавом свинца марки С0 с исходным содержанием кислорода и железа, равным $1\times10^{-4}$ и $1\times10^{-3}$ %масс. соответственно.

Расчетные данные и экспериментально измеренные значения толщины оксидной плёнки показали хорошее совпадение. Результаты данных исследований позволили уточнить параметры разработанной в АО «ИРМ» физико-химической и математической моделей взаимодействия железа и сталей с ТЖМТ, содержащем кислород.

В рамках комплексной программы НИОКР по разработке технологических решений для создания атомной энерготехнологической станции с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором и химико-технологической частью (АЭТС с ВТГР и ХТЧ), реализуемой в рамках Инвестиционной программы АО "Концерн Росэнергоатом", АО "ИРМ" продолжает реакторные испытания и послереакторные исследования топлива ВТГР и углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ, углеродные материалы).

В 2024 году АО "ИРМ" начат очередной этап реакторных испытаний лабораторных образцов топлива ВТГР (микротвэлы и топливные компакты) проектного обогащения, изготовленных по оптимизированной технологии с использованием российских графитовых материалов. Завершение программы реакторных испытаний, данных образцов планируется в 2025 году, проведение послереакторных исследований запланировано на 2026 год.

Одновременно на экспериментальной базе АО "ИРМ" продолжаются реакторные испытания и послереакторные исследования образцов углеродных материалов различных типов, которые рассматриваются в качестве перспективного конструкционного материала для отдельных элементов РУ ВТГР.

В 2024 году в АО «ИРМ» продолжено экспериментальное обоснование работоспособности материалов для атомной станции малой мощности на базе реакторной установки ШЕЛЬФ-М. Проведены реакторные испытания и послереакторные исследования широкого перечня материалов: металлических материалов различного состава и биметаллических соединений, изготовленных по аддитивной технологии методами прямого лазерного выращивания и электродуговой наплавки проволоки; неметаллических композиционных материалов (углепластики, стеклопластики, базальтопластики).

В дополнение к материаловедческим исследованиям в АО «ИРМ» осуществляется наукоёмкое производство изотопной продукции и её постоянное совершенствование. Например, разработана и оптимизирована технология изготовления внутренней капсулы для источников гамма-излучения на основе селена-75. Конструкция облучательного устройства, компоновка активной зоны реактора и условия облучения обеспечивают наработку селена-75 и достижение удельной активности более 1000 Ки/г.

В 2024 году институт реакторных материалов был активно вовлечен в решение актуальных задач по приоритетным направлениям деятельности атомной отрасли, направленных на развитие перспективных разработок и обеспечение безопасной эксплуатации действующих объектов использования атомной энергии.