



ВНИИНМ  
РОСАТОМ

Молодежная научно-практическая конференция



## Программа конференции и тезисы докладов

23-24 июня 2021 года  
Москва, АО «ВНИИНМ»

# ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

23 июня 2021 г. (среда)

Время (МСК)	Мероприятие/доклад
<b>09:00 – 09:30</b>	<b>СБОР УЧАСТНИКОВ КОНФЕРЕНЦИИ НА ПЛАТФОРМЕ IVA</b>
<b>09:30 – 09:50</b>	<b>ОТКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b> Вступительное слово генерального директора АО «ВНИИНМ» Леонида Александровича Карпука
<b>09:50 – 16:00</b>	<b>Секция №1 «Материалы и топливные композиции для тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах»</b>
09:50 – 10:10	<b>Боргулев Мирон Валерьевич (Госкорпорация «Росатом»)</b> Комплексная программа «Развитие техники, технологии и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 г» как новый эффективный инструмент управления научными исследованиями
10:10 – 10:30	<b>Фролова Марина Юрьевна (АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»)</b> Исследование свойств металлического топлива U-10%Zr
10:30 – 10:50	<b>Карпеева Анастасия Евгеньевна (ПАО «МСЗ»)</b> Влияние условий спекания на свойства уран-гадолиниевого топлива
10:50 – 11:10	<b>Шевяков Александр Юрьевич (АО «ВНИИНМ»)</b> Влияние содержания и распределения кремния на размер зерен и микроструктуру сплава Zircaloy-4 после быстрого $\beta \rightarrow \alpha$ фазового превращения
<b>11:10 – 11:20</b>	<b>Технический перерыв</b>
11:20 – 11:40	<b>Федотов Иван Вячеславович (НИЦ «Курчатовский институт»)</b> Пути повышения служебных характеристик сталей корпусов реакторов ВВЭР за счет легирования и совершенствования металлургии
11:40 – 12:00	<b>Комаров Николай Дмитриевич (НИЯУ МИФИ)</b> Моделирование структуры границы раздела между железом и магнетитом в условиях образования защитного оксидного слоя на ферритно-мартенситных сталях в кислородосодержащем теплоносителе
12:00 – 12:20	<b>Кураев Александр Юрьевич (ПАО «МСЗ»)</b> Изучение эволюции структуры сплава 42ХНМ при горячей прошивке на стане поперечно-винтовой прокатки
12:20 – 12:40	<b>Гильмутдинов Ильнур Фаилович (АО «ГНЦ НИИАР»)</b> Исследование методом электронно-зондового микроанализа изменений элементного состава оболочек твэлов с нитридным топливом после облучения в реакторе БН-600
<b>12:40 – 13:30</b>	<b>Перерыв на обед</b>
13:30 – 13:50	<b>Чурюмова Татьяна Анатольевна (АО «ВНИИНМ»)</b> Эволюция структурно-фазового состояния аустенитной стали с основой 16Cr-19Ni в течение длительных изотермических выдержек

13:50 – 14:10	<b>Персиянова Екатерина Игоревна (АО «ВНИИНМ»)</b> Программное средство КОРАТ. Расчет температур и НДС в стержневых цилиндрических твэлах
14:10 – 14:30	<b>Беляева Анна Викторовна (АО «ГНЦ НИИАР»)</b> Результаты послереакторных исследований экспериментальных твэлов со смешанным виброуплотнённым уран-плутониевым оксидным топливом – макетов твэлов реактора МБИР
<b>14:30 – 15:00</b>	<b>Подведение итогов работы секции №1 «Материалы и топливные композиции для тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах»</b>
<b>24 июня 2021 г. (четверг)</b>	
<b>Время (МСК)</b>	<b>Мероприятие/доклад</b>
<b>09:00 – 09:30</b>	<b>СБОР УЧАСТНИКОВ КОНФЕРЕНЦИИ НА ПЛАТФОРМЕ IVA</b>
<b>09:30 – 11:30</b>	<b>Секция №2 «Металлургия, аддитивные технологии, сверхпроводниковые материалы и материалы для термоядерных реакторов»</b>
09:30 – 09:50	<b>Владыкин Евгений Николаевич (АО ЧМЗ)</b> Разработка технологии получения слитков тантала высокой чистоты в АО ЧМЗ
09:50 – 10:10	<b>Тарабрина Татьяна Дмитриевна (МГТУ им. Н.Э. Баумана)</b> Технология изготовления композиционных материалов на основе волокнистых армирующих материалов и неорганического связующего
10:10 – 10:30	<b>Ворожко Марина Анатольевна (АО ЧМЗ)</b> Разработка технологии переработки смеси хлоридов циркония и гафния
10:30 – 10:50	<b>Силлюк Наталья Павловна (АО «ВНИИХТ»)</b> Исследования влияния параметров низкотемпературного получения порошков тугоплавких металлов (W, Mo, Re) и их свойства
10:50 – 11:10	<b>Суворова Анна Александровна (ЧУ «Наука и инновации»)</b> Изучение влияния температуры горячего изостатического прессования на структуру и свойства сплава Cu-Cr-Zr
11:10 – 11:30	<b>Подведение итогов работы секции №2 «Металлургия, аддитивные технологии, сверхпроводниковые материалы и материалы для термоядерных реакторов»</b>
<b>11:30 – 11:40</b>	<b>Технический перерыв</b>
<b>11:40 – 15:50</b>	<b>Секция №3 «Обращение с ОЯТ и РАО в ЗЯТЦ, вывод из эксплуатации ЯРОО и специальная химия»</b>
11:40 – 12:00	<b>Хорун Анастасия Александровна (ФГУП «ПО «Маяк»)</b> Определение количественных характеристик ядерных материалов в отходах химико-металлургического производства
12:00 – 12:20	<b>Богатырёв Никита Владимирович (АО ЧМЗ)</b> Комплексный подход к кондиционированию РАО в хвостохранилище № 2 и хвостохранилище № 1

12:20 – 12:40	<b>Крапивина Маргарита Кирилловна (АО «ВНИИНМ»)</b> Шлакощелочные цементы как перспективные матрицы для иммобилизации высокоактивных отходов
12:40 – 13:00	<b>Войтенко Максим Юрьевич (ПАО «МСЗ»)</b> Сорбционная доочистка экстракционных рафинатов от переработки регенерированного топлива
13:00 – 13:20	<b>Мурасова Ольга Владимировна (АО «ГНЦ НИИАР»)</b> Изучение влияния разрушающих факторов на свойства модельных топливосодержащих материалов АЭС «Фукусима-Дайичи»
<b>13:20 – 14:00</b>	<b><i>Перерыв на обед</i></b>
14:00 – 14:20	<b>Коробейников Артем Игоревич (ФГУП «ГХК»)</b> Сорбционно-осадительная технология выделения урана и плутония из отходов наследия радиохимического производства
14:20 – 14:40	<b>Таюрский Дмитрий Русланович (АО «АЭХК»)</b> Электрохимическая конверсия водных растворов LiCl в LiOH методом мембранного электролиза
14:40 – 15:00	<b>Чеснокова Анастасия Юрьевна (ФГУП «ПО «Маяк»)</b> Исследование свойств марганецсодержащих фосфатных и борофосфатных стекол
15:00 – 15:20	<b>Подведение итогов работы секции №3 «Обращение с ОЯТ и РАО в ЗЯТЦ, вывод из эксплуатации ЯРОО и специальная химия»</b>
<b>15:20 – 15:40</b>	<b>ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ</b>

<b>СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ</b>	
<b>Секция №1 «Материалы и топливные композиции для тепловых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах»</b>	
1.1	<b>Доброхотов Петр Леонидович (АО «ВНИИНМ»)</b> Сопоставление различных методов определения степени рекристаллизации в изделиях из сплавов на основе циркония
1.2	<b>Чертопьятов Евгений Владимирович (АО «ГНЦ НИИАР»)</b> Влияние длительного отжига на механические свойства облученных оболочек твэлов из сплава Э110 в продольном направлении
1.3	<b>Рожкова Юлия Николаевна (ФГУП «ВНИИА»)</b> Исследование анизотропии механических свойств изделий из сплава AlSi10Mg, полученных методом селективного лазерного сплавления
1.4	<b>Власов Алексей Юрьевич (ПАО «МСЗ»)</b> Исследование режимов обработки порошка диоксида урана на молотковой мельнице, с последующей оценкой фракционного состава
1.5	<b>Уваров Александр Александрович (ПАО «МСЗ»)</b> Влияние помола на характеристики порошка диоксида урана
1.6	<b>Пономаренко Александр Павлович (АО «ВНИИНМ»)</b> Разработка технологии изготовления труб-оболочек твэлов нового поколения на основе карбида кремния

1.7	<b>Коноплёва Алина Николаевна (ДИТИ НИЯУ МИФИ)</b> Математическая модель зарождения и роста дислокационных петель под облучением
1.8	<b>Сутягин Иван Алексеевич (АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»)</b> Моделирование процессов тепломассопереноса в объеме холодной ловушки
1.9	<b>Карагерги Родион Петрович (АО «ИРМ»)</b> Экспериментальный способ определения коэффициента деформации для вычисления начальной расчётной длины рабочей части кольцевого образца из оболочки твэла
1.10	<b>Багдатов Александр Дмитриевич (АО «ВНИИНМ»)</b> Формирование теоретической и практической базы для создания «Центра цифрового материаловедения»
1.11	<b>Сахипгареев Азамат Радикович (АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»)</b> Влияние корректирующей щелочной добавки на теплофизические свойства растворов борной кислоты применительно к аварийному охлаждению активной зоны ВВЭР
1.12	<b>Макаров Евгений Игоревич (АО «ГНЦ НИИАР»)</b> Исследования радиационной ползучести и набухания стали 08X18H10T после облучения в реакторе БОР-60 при температурах 350–420°С
1.13	<b>Николаева Наталья Сергеевна (АО «ВНИИНМ»)</b> Влияние термического старения длительностью до 22000 часов на структурно-фазовое состояние ферритно-мартенситных сталей ЭК181 и ЧС139
1.14	<b>Соколовский Дмитрий Анатольевич (АО «ГНЦ НИИАР»)</b> Сравнение различных методов испытания образцов из оболочек твэлов, изготовленных из стали ЭК164-ИД Х.Д., для определения характеристик механических свойств
1.15	<b>Маркелов Дмитрий Евгеньевич (АО «ГНЦ НИИАР»)</b> Влияние пострадиационного отжига на изменения структурно-фазового состояния и микротвёрдости оболочек твэлов из стали ЭП823-Ш
1.16	<b>Глушкова Александра Константиновна (АО «ГНЦ НИИАР»)</b> Исследование свойств ультрамелкозернистой стали 08X18H10T, полученной методом интенсивной пластической деформации
1.17	<b>Савельев Максим Дмитриевич (АО «ВНИИНМ»)</b> Разработка ферритной стали на основе системы Fe-Cr-Al-Si для оболочек твэлов ядерных реакторов
1.18	<b>Курганов Сергей Вячеславович (ПАО «МСЗ»)</b> Перспективы совершенствования технологии изготовления тонкостенных труб для оболочек твэлов реактора СМ
1.19	<b>Сайфутдинова Марина Сергеевна (АО «ВНИИНМ»)</b> Статические изотермические коррозионные испытания в жидком свинце
1.20	<b>Зыкова Руслана Олеговна (АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»)</b> Расчеты в обоснование очистки натрия от кислорода растворимыми геттерами

1.21	<b>Мишунин Дмитрий Юрьевич (ПАО «МСЗ»)</b> Изготовление вкладышей из карбида вольфрама для реактора типа БРЕСТ методом горячего прессования
1.22	<b>Копанева Кристина Олеговна (АО «ГНЦ НИИАР»)</b> Изменение физико-химических свойств диоксида урана в зависимости от условий его получения в лабораторной СВЧ-установке
1.23	<b>Литвинова Марина Андреевна (ФГУП «ПО «Маяк»)</b> Исследование канальных труб реакторной установки Л-2
<b>Секция №2 «Металлургия, аддитивные технологии, сверхпроводниковые материалы и материалы для термоядерных реакторов»</b>	
2.1	<b>Шарапов Илья Сергеевич (ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ»)</b> Разработка двухосевой сканирующей головки для аддитивной технологии селективного лазерного плавления
2.2	<b>Обмуч Кирилл Васильевич (ФГУП «ПО «Маяк»)</b> Разработка защитного покрытия для литейной оснастки на основе оксида иттрия
2.3	<b>Демина Анна Юрьевна (АО «Гиредмет»)</b> Разработка твердотельных полупроводниковых детекторов ионизирующего излучения на основе кристаллов TlBr
2.4	<b>Собко Сергей Аркадьевич (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»)</b> Возможные дефекты в сварных швах легких сплавов и технологические меры по их предотвращению
2.5	<b>Харьковский Дмитрий Николаевич (АО ЧМЗ)</b> Изделия из сплава ВТЗ-1 для газоразделительных центрифуг нового поколения
<b>Секция №3 «Обращение с ОЯТ и РАО в ЗЯТЦ, вывод из эксплуатации ЯРОО и специальная химия»</b>	
3.1	<b>Касимова Резида Альбертовна (АО ЧМЗ)</b> Некоторые вопросы обращения с РАО при выводе из эксплуатации объектов уранового производства АО ЧМЗ
3.2	<b>Быкова Екатерина Андреевна (ПАО «МСЗ»)</b> Запуск установки восстановительного пирогидролитического процесса гексафторида урана, оценка стабильности технологического процесса
3.3	<b>Величкина Наталья Сергеевна (АО «ВНИИХТ»)</b> Извлечение ценных компонентов из монацитсодержащих отходов
3.4	<b>Рыков Никита Сергеевич (АО «ГНЦ РФ - ФЭИ»)</b> Оценка возможности применения импульсного нейтронного метода при измерениях массы делящихся нуклидов в отработавшем ядерном топливе
3.5	<b>Казиева Сабина Темергалиевна (ИБРАЭ РАН)</b> Оценка радионуклидных составов и радиационных характеристик облученных материалов с применением расчетного кода TRACT

3.6	<b>Савельев Александр Александрович (АО «ВНИИХТ»)</b> Исследование стадий кинетики сорбции америция-241 для определения оптимальных характеристик экстракционного аппарата с использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА
3.7	<b>Щербаков Константин Александрович (АО «ВНИИНМ»)</b> Создание и отработка методики приготовления металлических образцов-имитаторов загрязнения U, Pu и Am с применением стабильных Ce и Eu для проведения исследований метода лазерной дезактивации
3.8	<b>Сосков Олег Всеволодович (АО «Гиредмет»)</b> Разработка технологии восстановления таллия из его галогенидов металлотермическим методом
3.9	<b>Франкив Сергей Олегович (РХТУ им. Д.И. Менделеева)</b> Экстракционная очистка урана от имитаторов продуктов деления из карбонатных сред карбонатом метилтриоктиламмония
3.10	<b>Поляков Артем Андреевич (АО «ВНИИНМ»)</b> Разработка полимерного дезактивирующего состава на основе гидрогеля, обладающего свойствами переменной вязкости
3.11	<b>Вергун Вадим Вячеславович (АО «Гиредмет»)</b> Оптимизация синтеза металл-органической каркасной структуры UIO-66
3.12	<b>Червяков Никита Михайлович (РХТУ им. Д.И. Менделеева)</b> Окислительное растворение $U_3O_8$ в карбонатных средах
3.13	<b>Старовойтов Николай Петрович (ФГУП «ПО «Маяк»)</b> Моделирование технологии переработки обтирочного материала, содержащего технические масла методом температурного воздействия для оценки взрывопожаробезопасности на ФГУП «ПО «Маяк» в лабораторных условиях
3.14	<b>Бутенков Дмитрий Андреевич (АО «Гиредмет», РХТУ им. Д.И. Менделеева)</b> Синтез стёкол в системах PbO-SiO <sub>2</sub> , PbO-B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> и перспективы их применения в качестве прозрачных радиационно-стойких материалов
3.15	<b>Воронин Игорь Алексеевич (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»)</b> Комбинированная система очистки газов от радиоактивных аэрозолей в установке термической переработки МРО
3.16	<b>Курский Руслан Александрович (НИЦ «Курчатовский институт»)</b> Влияние термомеханических испытаний, имитирующих условия сухого хранения оят реакторов ВВЭР-1000, на переориентацию гидридов в оболочках сплава Э110
3.17	<b>Шайдуллин Сергей Минуллович (ФГУП «ПО «Маяк»)</b> Разработка легкоплавких составов боросиликатных стекол для малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк»
3.18	<b>Скворцов Игорь Сергеевич (АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»)</b> Высокотемпературные материалы для теплоизоляции печи непрерывной плавки радиоактивного стального лома

3.19	<b>Андрюшенко Николай Алексеевич (ФГУП «ГХК»)</b> Перспективы применения технологий выделения металлического палладия из азотнокислых растворов на радиохимических производствах
3.20	<b>Антипьева Мария Владимировна (ФГУП «ПО «Маяк»)</b> Аналитическое сопровождение работ по выводу из эксплуатации зданий и сооружений ФГУП «ПО «Маяк»



**ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ**

**СЕКЦИЯ №1**

**«МАТЕРИАЛЫ И ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ  
ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ И РЕАКТОРОВ НА  
БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ»**

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТОПЛИВА U-10%Zr

Фролова М.Ю., Чесноков Е.А., Курина И.С.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»),  
Обнинск, Россия; e-mail: mfrolova@ipre.ru

В АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» способом индукционной плавки и литья в кварцевые формы изготовлены образцы топлива U-10мас.%Zr. Исследованы свойства литого топлива: плотность, фазовый состав, микроструктура, теплопроводность.

Усреднённые результаты гидростатической плотности для более 30 образцов исследуемого топливного сплава составили 16,0 г/см<sup>3</sup>, общая и открытая пористость соответственно 0,76 и 0,24 %. Рентгенофазовым анализом в сплаве обнаружена только орторомбическая фаза  $\alpha$ -U. С помощью сканирующего электронного микроскопа установлено, что основную часть объёма металлической матрицы литого сплава занимает  $\alpha$ -U. В матрице присутствуют также выделения  $\delta$ -фазы в виде тонких одинаково ориентированных пластинок значительной протяжённости.

Для измерения теплопроводности использовался метод осевого теплового потока (или метод пластины). На рис. 1 приведены результаты измерения теплопроводности ( $\lambda$ ) при температурах от 100 до 800 °С сплава U-10мас.%Zr, полученного способом литья, а также экструзией. Теплопроводность для экструдированного топлива U-10мас.%Zr при 600-750 °С значительно ниже, чем для литого, причём с увеличением температуры от начала измерений до 750 °С расхождение в значениях увеличивается. Проведено сравнение полученных данных с результатами опубликованных работ. Измеренная в настоящей работе теплопроводность литого сплава U-10мас.%Zr до температуры 750 °С не расходится с литературными данными [1].

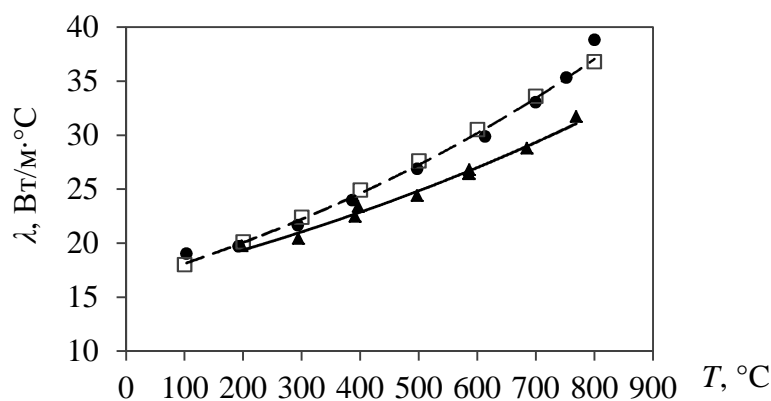


Рис. 1. Температурные зависимости измеренной методом осевого теплового потока теплопроводности сплава U-10мас.%Zr: литого (с плотностью 16,0 г/см<sup>3</sup>) – (---●---); экструдированного (с плотностью 15,8 г/см<sup>3</sup>) – (—▲—), а также из работы [1] – (□)

### Список литературы

1. Hofman G.L., Leibovitz L., Kramer J.M., Billone M.C., Koenig J.F. *Metallic Fuels Handbook. Report of Argonne National Laboratory (1985), ANL-IFR-29, Argonne, 184 p.*

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СПЕКАНИЯ НА СВОЙСТВА УРАН-ГАДОЛИНИЕВОГО ТОПЛИВА

Кузнецов А.И., Карпеева А.Е., Скомороха А.Е., Тимошин И.С.  
АО «Машиностроительный завод», г. Электросталь, Россия  
karpeeveenastasiya@gmail.com

Одним из параметров, влияющих на безопасность работы реактора, является стабильность геометрических размеров топливных таблеток при эксплуатации, которая при производстве ядерного топлива оценивается в ходе проведения тестирования на «доспекаемость». Данный параметр определяется по изменению среднего диаметра таблетки (или плотности) после дополнительного спекания уже спеченной таблетки в регламентированных условиях. В свою очередь, как размеры, так и плотность топливной таблетки зависят от многих технологических режимов.

В настоящей работе представлены результаты исследования свойств уран-гадолиниевых таблеток с содержанием 8,0% мас.  $Gd_2O_3$ , полученных при спекании в среде с различным уровнем увлажнения. Показано, что критически важные характеристики таблеток  $(U,Gd)O_2$ , такие как плотность, доспекаемость, микроструктура в значительной степени определяются оксидной формой твердого раствора спеченных таблеток, которая в свою очередь зависит от содержания кислорода в атмосфере спекания в форме влаги или в составе  $CO_2$ . Повышение уровня влажности способствует получению стабильных положительных результатов по «доспекаемости». При спекании в газовой среде с недостатком кислорода образуется нестехиометрическая оксидная структура таблетки. Впоследствии под воздействием атмосферной влаги происходит окисление таблетки до стехиометрической формы, при этом происходит растрескивание таблеток и повышение содержания водорода.

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КРЕМНИЯ НА РАЗМЕР ЗЕРЕН И МИКРОСТРУКТУРУ СПЛАВА ZIRCALOY-4 ПОСЛЕ БЫСТРОГО $\beta \rightarrow \alpha$ ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Шевяков А.Ю., Еремин И.С., Мальгин А.Г., Шелепов И.А., Буланцова Е.Г.,  
Маркелов В.А., Новиков В.В.  
АО «ВНИИНМ», Москва, AYShevyakov@bochvar.ru

Во время квалификации компанией KEPCO NF оболочечных труб производства АО ЧМЗ  $\varnothing$  13,07×12,25 мм из сплава Zircaloy-4 для твэлов реактора CANDU были выявлены несоответствия требованиям по пайке дистанционирующих накладок в установке индукционного нагрева. Во время высокотемпературного нагрева происходило формирование единичного  $\beta$ -Zr зерна по стенке трубы, в то время как необходимо иметь минимум два зерна на стенку. Для аналогичных оболочек твэлов зарубежного производства такой проблемы не наблюдается.

Одной из основных причин, влияющих на формирование мелкозернистой структуры при быстром  $\beta \rightarrow \alpha$  фазовом превращении, является содержание примесей кремния и углерода в сплаве Zircaloy-4. Проведенные исследования наглядно показали эффект влияния повышенного содержания примесей в сплаве на измельчение  $\beta$  зерна, по сравнению со сплавом, в котором суммарное содержание кремния и углерода было на 60 ppm меньше. Тем не менее, в образце трубы готового размера после имитационного нагрева под пайку до 1100 °С наблюдалась заметная неоднородность в размерах зёрен с образованием единичных крупных  $\beta$  зёрен по величине, сопоставимых с толщиной стенки трубы. В образце трубы зарубежной фирмы с аналогичным содержанием в сплаве примесей кремния и углерода после имитационного нагрева до 1100 °С единичных крупных  $\beta$  зёрен во всю стенку трубы не образуется.

Для выявления причин такого различия были проведены электронно-микроскопические исследований материалов из сплава Zircaloy-4, в том числе, изучение равномерности распределения кремния в объёме металла на всех этапах технологического передела слитка в готовую трубу. По результатам исследований было отмечено наличие кремниевых включений в слитке, полуфабрикатах и готовых трубах. Присутствие таких включений в материале слитка свидетельствует, что их появление связано с неоднородностью распределения кремния в микрообъемах литого металла. Последующие режимы технологических операций не обеспечивают выравнивание распределения кремния в микрообъемах материала. Этот факт приводит в итоге к неоднородности роста  $\beta$  зерен при нагреве оболочки под пайку.

Для получения равномерного распределения кремния в материале полуфабрикатов, был оптимизирован режима гомогенизирующей  $\beta$ -закалки кованой заготовки. Проведенные исследования показали, что применяемый режим  $\beta$ -закалки кованой заготовки 1050 °С, 60 мин не обеспечивает растворение в объеме металла крупных, кремниевых включений. Увеличение температуры  $\beta$ -закалки до 1150 °С приводит к растворению кремниевых включений и, соответственно, выравниванию распределения кремния в микрообъемах материала, что способствует измельчению и равномерности роста  $\beta$  зерен при нагреве оболочки под пайку.

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ СЛУЖЕБНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР ЗА СЧЕТ ЛЕГИРОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИИ

Кулешова Е.А.<sup>1,2</sup>, Федотов И.В.<sup>1</sup>, Толстых Д.С.<sup>3</sup>, Кузнецов С.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва

<sup>3</sup>АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

e-mail: ivanxfedotov@gmail.com

Для решения задач, связанных с развитием ядерной энергетики, в мире разрабатываются реакторы нового поколения, среди которых есть перспективные корпусные водо-водяные энергетические реакторы. В последнее время в России разрабатываются проекты перспективных корпусных реакторов со спектральным регулированием ВВЭР-С и со сверхкритическими параметрами теплоносителя ВВЭР-СКД. Более высокие эксплуатационные характеристики данных реакторов по сравнению с традиционными реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 предъявляют повышенные требования к служебным характеристикам сталей корпусов реакторов (КР).

При выборе материалов корпусов перспективных реакторов необходимо учесть ряд требований. Во-первых, необходимо обеспечить более высокий уровень прочностных и вязко-пластических характеристик в исходном состоянии по сравнению с традиционными корпусными сталями, что следует из повышенных эксплуатационных параметров реакторов и габаритов КР. Во-вторых, необходимо обеспечить высокий уровень прокаливаемости и металлургических характеристик для возможности изготовления качественных крупных обечаек КР. В-третьих, необходимо обеспечить повышенную термическую и радиационную стойкость стали, что вызвано необходимостью безопасной эксплуатации КР в течение более длительного срок службы (как элемента, определяющего ресурс реакторной установки в целом).

Возможность выполнения данных требований напрямую связана с характеристиками структуры и содержанием конкретных легирующих элементов сталей КР, что позволяет сформулировать возможные пути повышения их служебных характеристик.

В данной работе рассмотрены возможные пути повышения служебных характеристик корпусных сталей реакторов ВВЭР за счет легирования и совершенствования металлургии. В рамках поиска путей повышения служебных характеристик корпусных сталей выявлены оптимальные характеристики структуры, а также приведен анализ результатов микроструктурных исследований и механических испытаний, соответствующих перспективных корпусных сталей, рассматриваемых в качестве кандидатных материалов реакторов ВВЭР-С и ВВЭР-СКД.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА МЕЖДУ ЖЕЛЕЗОМ И МАГНЕТИТОМ В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАНИЯ ЗАЩИТНОГО ОКСИДНОГО СЛОЯ НА ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЯХ В КИСЛОРОДОСОДЕРЖАЩЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Комаров Н.Д., Бородин В.А.

НИЯУ МИФИ, Москва / НИЦ «Курчатовский институт», Москва, komarovnd@mail.ru

Эксплуатация сталей в реакторах на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем связана с риском быстрого коррозионного разрушения металла. Для предотвращения прямого взаимодействия стали с жидкометаллическим теплоносителем предполагается использовать естественные слои окалины на поверхности стали, толщина которых процессе эксплуатации стальных изделий регулируется подбором оптимальной концентрации растворенного кислорода в теплоносителе. Предсказание изменений толщины и внутренней структуры оксидной пленки в широком диапазоне эксплуатационных параметров (температуры, содержания кислорода в теплоносителе, интенсивности и длительности облучения) является сложной задачей, решению которой может значительно помочь аналитическое и численное моделирование, позволяющее прояснить физические механизмы роста оксидного слоя и оценить параметры предлагаемых моделей роста.

Одним из важнейших аспектов построения предсказательной модели роста оксидного слоя на поверхности стали является корректное описание процессов, происходящих на границе раздела между слоем окисла и основным металлом, включая особенности захвата атомов кислорода и вакансий металла у границы раздела, а также особенности повреждения границы в процессе облучения. Атомистическое моделирование указанных процессов невозможно без физически обоснованных представлений о структуре границы раздела «сталь-оксид».

В данной работе был детально изучен ряд возможных атомистических моделей границы раздела между окк железом и оксидом  $Fe_3O_4$  (магнетит), учитывающих существующие литературные данные о свойствах границы раздела «сталь-оксид», в частности - ее высокую когерентность. Для всех предложенных моделей границ были оценены их энергии с использованием нескольких полуэмпирических потенциалов атомного взаимодействия, что позволило определить наиболее энергетически выгодный вариант сопряжения решетки оксида с матрицей металла. В дальнейшем эта оптимизированная модель может быть использована для детального атомистического моделирования как движения границы раздела вглубь металла за счет захвата кислорода, так и особенностей разрушения и восстановления границы под действием каскадов атомных столкновений.

## ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ СПЛАВА 42ХНМ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОШИВКЕ НА СТАНЕ ПОПЕРЕЧНО-ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ

Кураев А.Ю., Колосовский В.Г., Тимошин С.Н.  
АО «Машиностроительный завод», г. Электросталь

Стоящие перед атомной энергетикой задачи предполагают постоянно заботиться о повышении технологичности и об улучшении свойств материалов оболочечных холодно-деформированных труб из хромоникелевых сплавов и коррозионно-стойких хромоникелевых сталей аустенитного класса, ввиду неумолимой тенденции к ужесточению условий службы тепловыделяющих сборок (ТВС) активных зон атомных реакторов. Одним из хорошо зарекомендовавших и широко востребованных конструкционных оболочечных материалов активных зон энергетических реакторов является сплав 42ХНМ.

В настоящее время в соответствии с технологическим процессом полые гильзы для изготовления оболочечных труб из сплава 42ХНМ получают методом глубокого сверления прутка и последующей расточки и обточки до требуемого размера. Однако данный метод, несмотря на свое широкое применение, имеет существенный недостаток в виде высокого расходного коэффициента металла.

Перспективным направлением повышения технологичности труб из сплава 42ХНМ, направленным на повышение производительности, является использование трубной заготовки (гильз) из сплава 42ХНМ, полученных методом горячей прошивки на стане поперечно-винтовой прокатки. В связи с этим актуальным является исследование эволюции структуры сплава 42ХНМ после горячей прошивки.

В данной работе представлены обобщенные результаты сравнительных материаловедческих исследований прутков и гильз из сплава 42ХНМ.

После горячей прошивки микроструктура сплава 42ХНМ более разнородная по сравнению с микроструктурой до прошивки. Достаточно высокая разнородность материала гильз по сравнению с исходным прутком является дополнительным фактором увеличения разнородности в материале изготавливаемых труб.

Горячая прошивка на стане поперечно-винтовой прокатки позволила рассредоточить строчечные неметаллические включения (ОС, НС) в материале прошитых гильз и распределить их более равномерно (ОТ, НТ), что должно способствовать повышению технологичности труб, изготавливаемых из прошитой заготовки.

В процессе металлографических исследований на шлифах были выявлены множественные дефекты прокатного происхождения, в большей степени на внутренней поверхности гильз со стороны захода оправки. Однако дефекты присутствовали и на наружной поверхности гильз со стороны выхода оправки. Это говорит о невозможности в настоящее время полного исключения операций механической обработки, т.е. расточки и обточки, при изготовлении гильз из сплава 42ХНМ методом горячей прошивки.

Механические свойства материала гильз из сплава 42ХНМ, определяемые при комнатной температуре, сопоставимы с механическими свойствами материала исходных прутков до прошивки. Значения микротвердости материала гильз сопоставимы с микротвердостью материала исходных прутков до прошивки.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВОГО МИКРОАНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ С НИТРИДНЫМ ТОПЛИВОМ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БН-600

Гильмутдинов Ильнур Ф., Беляева А.В.  
АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, gil.iln@yandex.ru

В настоящее время в качестве материала для оболочек твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300 со смешанным уран-плутониевым нитридным топливом рассматривается сталь 16X12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш) феррито-мартенситного класса. Проводятся испытания подобных твэлов в реакторах БОР-60 и БН-600 с целью обоснования работоспособности твэлов в условиях повышения выгорания топлива и повреждающей дозы.

Наличие углерода в нитридном топливе связано с технологическими особенностями изготовления таблеток. Согласно паспортным данным на топливные таблетки остаточное содержание углерода в них не превышает 0,15 масс.%.

По результатам послереакторных исследований установлено, что под действием реакторного облучения в твэлах со смешанным уран-плутониевым нитридным топливом происходит локальное науглероживание внутренней поверхности оболочек из стали ЭП823-Ш, которое коррелирует с распределением микротвёрдости по толщине оболочек (повышение значений микротвёрдости вблизи внутренней поверхности при повышении массовой доли углерода). Для получения данных о локальном содержании углерода в стали и построения концентрационных кривых, отражающих изменения элементного состава по толщине оболочек твэлов, необходимо было отработать методику их получения на сканирующем электронном микроскопе, размещенном в радиационно-защитной камере, с использованием спектрометра волновой дисперсии. Основные возникающие сложности – это подбор оптимальных параметров измерения для одновременного выделения  $K\alpha$ -линии углерода и основных компонентов стали (железо и хром), а также выбор эталона сравнения (ввиду отсутствия такого в заводском исполнении), максимально близкого по составу к исследуемым облученным образцам.

В рамках данной работы были выполнены следующие задачи: 1) подобраны оптимальные параметры анализа и регистрации  $K\alpha$ -излучения углерода, железа и хрома в стали; 2) подобраны и подготовлены стандартные образцы сравнения; 3) определены значения пределов обнаружения углерода в стали методом электронно-зондового микроанализа; 4) проведена апробация данного метода определения углерода в стали на образце с известным составом; 5) получены экспериментальные данные о локальном содержании углерода в оболочках твэлов из стали ЭП823-Ш с уран-плутониевым нитридным топливом после облучения в реакторе БН-600 до значений максимального выгорания 4 % т.а. и максимальной повреждающей дозы 47 с.н.а.



# ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ АУСТЕНИНОЙ СТАЛИ С ОСНОВОЙ 16CR-19NI В ТЕЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ВЫДЕРЖЕК

Чурюмова Т.А., Митрофанова Н.М., Голубничий А.А., Васильева М.В.  
АО «ВНИИНМ», tachuryumova@bochvar.ru, nimit164@yandex.ru

Проведены исследования структурно-фазового состояния оболочечных труб в холоднодеформированном на 20% состоянии из стали ЭК164, с оптимизированными параметрами термообработки, при продолжительности старения при 700 °С 32000 ч, сопоставимой со временем работы твэла реакторов БН увеличенного срока эксплуатации.

В микроструктуре оболочечных труб с увеличением времени старения увеличивается количество и размер избыточных фаз следующих типов:

- частицы фазы Лавеса ( $Fe_2Mo$ ), имеющие различную морфологию. Увеличение частиц фазы Лавеса происходит не только гомогенно, но и гетерогенно – на подложках из ранее выделившихся других типов фаз. Впервые для стали ЭК164 обнаружено, что более мелкие (200 – 500 нм) частицы фазы Лавеса - равноосные и продолговатые - выделяются по границам субзерен и двойников. Содержание Mo и Si в частицах фазы Лавеса возросло с увеличением времени старения;

- включения карбидов типа MC, где M – титан и ниобий, сферической формы (диаметром около 100 – 500 нм) располагаются преимущественно в теле зерен и двойников. При увеличении времени старения до 32000 часов частицы, не изменившиеся в размерах относительно меньших времен выдержки, приобретают огранку, служат подложками для зарождения и роста частиц фазы Лавеса;

- карбиды  $M_{23}C_6$  на границах зерен и субзерен, с увеличением времени выдержки в этих частицах увеличивается содержание Si и Mo;

- карбиды типа  $M_6C$  сложного состава появляются по границам зерен путем превращения из карбидов  $M_{23}C_6$  за счет диффузии из матрицы атомов Mo, Ni и Fe. Карбиды  $M_6C$  растут и сливаются с соседними частицами  $M_6C$ , образуя сплошные вытянутые включения вдоль всей границы зерна;

- вторичные мелкодисперсные карбиды MC в теле зерна, на дислокациях и на границах микродвойников и субзерен. В результате коагуляции образуются две размерные фракции частиц MC: увеличившиеся до  $d_{cp} \sim 30$  нм и уменьшившиеся до  $d_{cp} \sim 7$  нм. Изменение размеров частиц MC (рост одних и уменьшение других), закреплявших дислокации, приводит к миграции дислокаций и частичной перестройке дислокационной и субзеренной структуры.

В дислокационной структуре сохраняются ячейки и двойники деформации. Проявляется выраженная блочность. Доля блоков в дислокационной структуре достигает 40 %, размер блоков – (70 – 300) нм, что говорит о начальном этапе перестройки дислокационной структуры при сохранении ее общего исходного характера.

Отмечено сохранение высокого уровня микротвердости после старения 32000 ч ( $270 \pm 10$  кг/мм<sup>2</sup>), близкого по значениям к исходному состоянию ( $265 \pm 10$  кг/мм<sup>2</sup>), а

также пределов прочности и текучести в интервале температур испытания (20 – 700) °С после старения 22000 ч, равных или превышающих по значениям этих свойств в исходном состоянии. Что связано, с одной стороны, с увеличением количества и размеров избыточных фаз и сохранением дислокационной структуры, а с другой – с частичной ее перестройкой при 700 °С с проявлением блочности.

## **ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО КОРАТ. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР И НДС В СТЕРЖНЕВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТВЭЛАХ**

Персиянова Е.И., Кожевникова И.В., Голубев И.Е.  
АО «ВНИИНМ», г. Москва, EIPersyanova@bohvar.ru

В работе проведено подробное описание программного средства КОРАТ. Рассмотрены назначение кода, режимы работы реактора на быстрых нейтронах, описываемые программным средством, а также детали расчета температур и НДС в поперечном сечении твэла.

Приведены основные моделируемые кодом процессы и погрешности расчета. Описаны необходимые исходные данные для расчета. Рассмотрена архитектура и расчетные модули кода. Представлены выходные данные.

В работе рассмотрено программное средство КОРАТ-2, разработанное на основе кода КОРАТ. Описаны основные отличия двух кодов. Представлены входные и выходные параметры ПС КОРАТ-2.

Представлена графическая оболочка КОРАТ-Конструктор, позволяющая в удобном для пользователя виде задавать входные параметры кода и представлять результаты расчёта.

Также раскрыта возможность ПС КОРАТ-2 моделировать поведение твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом (СНУП топливом). Приведена информация о верификации ПС КОРАТ-2 и расширении матрицы верификации кода при моделировании поведения твэлов со СНУП топливом в проектируемых реакторах типа БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300.

Таким образом, показана возможность ПС КОРАТ-2 проводить количественную оценку температурного поля и (НДС) твэлов быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем с известным набором свойств материалов топлива и оболочки.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ПОСЛЕРЕАКТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ТВЭЛОВ СО СМЕШАННЫМ ВИБРОУПЛОТНЁННЫМ УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ ОКСИДНЫМ ТОПЛИВОМ – МАКЕТОВ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА МБИР**

Беляева А.В., Гильмутдинов Ильнур.Ф., Чертопьятов Е.В., Боев А.В.  
АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, belyaeva-niiar@yandex.ru

Для реакторной установки МБИР предусматривается концепция твэла с топливным сердечником из виброуплотнённого полидисперсного гранулята уран-плутониевого оксидного топлива и добавкой гранулированного металлического урана в качестве геттера кислорода для регулирования кислородного потенциала внутритвэльной среды. В АО «ГНЦ НИИАР» разработана технология получения гранулята, выбраны режимы его виброуплотнения и изготовлено несколько партий экспериментальных твэлов со смешанным виброуплотнённым топливом (СВУТ), содержащим до 40 % диоксида плутония в смеси диоксидов урана и плутония, с различным содержанием геттера в составе топливной смеси. Реакторные испытания экспериментальных твэлов – макетов твэлов РУ МБИР проведены в составе трёх ЭТВС реактора БОР-60. За время эксплуатации в условиях активной зоны реактора БОР-60 твэлы сохранили герметичность, каких либо дефектов, образовавшихся в процессе облучения, не выявлено.

Полученные результаты показывают, что в твэлах с более высоким содержанием геттера механическое взаимодействие топлива с оболочками более существенно и даёт более значимый вклад в увеличение диаметра твэлов. Макро- и микроструктура топливных сердечников типична для твэлов с виброуплотнённым уран-плутониевым оксидным топливом: в процессе облучения происходило переформирование исходной структуры механической смеси различных по составу гранул, что привело к образованию центрального отверстия, спечённой зоны во внутренней части сердечника и, как правило, частично спечённой, но негомогенизированной зоны в его внешней части. Подтверждено отсутствие миграции плутония к центру сердечника, что характерно для топлива с низким кислородным потенциалом и способствует уменьшению вероятности перегрева топлива при отклонениях от нормальных условий эксплуатации. Исследование границы топливо – оболочка во всех сечениях твэлов, в том числе в сечениях с максимальным выгоранием и максимальной температурой оболочки, подтвердили целостность оболочек твэлов: трещин, повреждений, коррозионного взаимодействия с топливом или продуктами деления не обнаружено.

**ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ**

**СЕКЦИЯ №2  
«МЕТАЛЛУРГИЯ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И  
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ  
РЕАКТОРОВ»**

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СЛИТКОВ ТАНТАЛА ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ В АО ЧМЗ

Сырцов С.Ю., Худяков Д.А., Ряховская Е.Н., Котов С.В., Владыкин Е.Н.  
Будин Н.Ю.

АО «Чепецкий механический завод», 427 622 Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Глазов, ул. Белова, д.7

Для выполнения стратегической цели Госкорпорации «Росатом» по увеличению выручки от неядерных бизнесов к 2030 г в АО ЧМЗ проводятся работы по созданию технологии получения танталовой продукции на существующих производственных мощностях предприятия.

Проведены исследования в области разработки технологии получения черновых слитков тантала из пентаоксида тантала методом алюмокальциетермического восстановления. Определены требования к компонентам шихты и её предварительной подготовке. Установлен оптимальный состав шихтовых компонентов для максимального извлечения тантала в процессе восстановления. Проведена работа по рафинированию чернового тантала в электронно-лучевой установке ЕМО-250/06. Отработаны технологические режимы и установлена оптимальная скорость плавки, требуемая мощность электронного луча, остаточное давление в камере печи. Определена схема плавки, минимальное количество переплавов, уточнены требования к литейной оснастке, плавильному оборудованию. Проведены работы по механической обработке полученных слитков, подобран режущий инструмент и режимы резания. Получен рафинированный слиток тантала чистотой 99,98 масс. %, годный для дальнейшего изготовления танталовой продукции. Проведены исследования химического и фазового состава чернового и рафинированного тантала, изучено качество продуктов, образованных в процессе плавки. Отработаны и оптимизированы технологические параметры и режимы ведения процессов. Выполнены работы по переработке танталовых оборотов. Разработана и опробована в промышленных условиях технология возвращения оборотного металла в технологический процесс получения танталовой продукции.

В результате работы разработана технологическая схема получения слитков тантала высокой чистоты из пентаоксида тантала путём восстановительной плавки и многократного электронно-лучевого переплава. Полученные танталовые слитки соответствуют марке ЭЛП-2 ТУ 414-2019 «Слитки танталовые».

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ (при наличии)

1. Отчет о НИР «Разработка технологии получения слитков тантала по проекту: Организация производства танталовой продукции в АО ЧМЗ», Глазов, 2019, 146 с.

# ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКНИСТЫХ АРМИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И НЕОРГАНИЧЕСКОГО СВЯЗУЮЩЕГО

Нелюб В.А., д.т.н., Тарабрина Т.Д.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МГТУ им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)» (Москва, 105005, Россия)  
tanusha.tanya@inbox.ru.

Высокие температуры являются неотъемлемой частью атомной энергетики, что влечет за собой постоянные поиски термостойких материалов [1]. Углепластики относятся к числу наиболее востребованных современных конструкционных материалов [2], что связано с их уникальными теплофизическими свойствами, а также с высокими удельными характеристиками прочности и жесткости и, как следствие, наибольшей весовой эффективностью [3]. За счет этих свойств углепластики широко применяются в качестве конструкционных материалов в различных отраслях.

Традиционно, в качестве связующих используются органические материалы, чаще всего эпоксидные. Основным недостатком этих и других типов олигомерных связующих, является их низкая тепло- и термостойкость. Этих недостатков лишены композиты на основе неорганических связующих. Основными преимуществами неорганических связующих являются: высокая термостойкость (700-1500°C) и низкая стоимость [4].

В данной работе рассматривались композиты, полученные на основе неорганических связующих в различных соотношениях смолы к отвердителю и с использованием различных методов пропитки (вертикальной / горизонтальной). Проведено исследование полученных образцов на термостойкость с использованием термогравиметрического анализатора TG 209 F1 Perseus и на получение качественной структуры при помощи настольного сканирующего электронного микроскопа PHENOM proX с интегрированной системой ЭДС.

По результатам работы выявлено оптимальное соотношение смолы к отвердителю (7:1). Оценка полученных композитов на основе углеродной ленты с применением неорганических связующих в данном соотношении показала, что даже при максимальных температурах (1000°C) потери массы минимальны и не превысили 20%.

По анализу структур образцов, полученных различными методами, выявили зависимость, указывающую на возможность получить более качественный образец (на 15-20%) при использовании вертикального метода вакуумной пропитки.

## **Список используемой литературы:**

1. *Фортвов В.Е. Исследование теплофизических свойств материалов атомной энергетики при высоких температурах / В.Е.Фортвов // Теплофизика высоких температур 2013. – №3. – С.323.*

2. *Нелюб В.А. Исследование механизма структурообразования связующего в зависимости от микрорельефа поверхности углеродного волокна / В.А. Нелюб, А.С. Бородулин, Л.П. Кобец, Г.В. Малышева // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. – №2. – С.19-23.*

3. *Калинчев В.А., Ягодников Д.А, Технология производства ракетных двигателей твердого топлива. //М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.*

4. *Баурова Н.И., Зорин В.А. Технологическая наследственность при производстве деталей из полимерных композиционных материалов: монография. – М.: МАДИ, 2018. – 220 с.*



## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА Cu-Cr-Zr**

Суворова А.А.(АО «Наука и инновации», управляющая компания Госкорпорации «Росатом», Москва»), Коростелев А.Б., Гославский О.В. (АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала», Москва)

E-mail: AnnaSuvorova@rosatom.ru

При изготовлении неразъемных соединений для элементов конструкций термоядерных реакторных установок предполагается использование технологии горячего изостатического прессования, которая является одной из перспективных для получения качественных соединений металлических материалов. Однако горячее изостатическое прессование может оказывать существенное влияние на структуру и свойства материала.

Эксперименты по влиянию горячего изостатического прессования проводили на сплаве Cu-Cr-Zr, выбранном для изготовления отдельных внутрикамерных элементов конструкций реакторов термоядерного синтеза. Этот сплав является предпочтительным из-за повышенных характеристик электропроводности и теплопроводности, а также высоких характеристик прочности.

В настоящей работе представлены исследования влияния воздействия температур, имитирующих горячее изостатическое прессование, на структуру и свойства сплава. Определены оптимальные температуры горячего изостатического прессования в сочетании с последующей термической обработкой, обеспечивающие необходимый уровень физико-механических свойств сплава Cu-Cr-Zr.

**ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ**

**СЕКЦИЯ №3**

**«ОБРАЩЕНИЕ С ОЯТ И РАО В ЗЯТЦ,  
ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯРОО И  
СПЕЦИАЛЬНАЯ ХИМИЯ»**

## **Определение количественных характеристик ядерных материалов в отходах химико-металлургического производства**

Хорун А.А., Семенов М.А., Галузин Д.Д., Ромадова С.И.  
ФГУП «ПО «Маяк», г. Озёрск, cpl@po-mayak.ru

Обеспечение безопасности при обращении с радиоактивными отходами является одной из важных составляющих национальной безопасности и обязательным условием использования атомной энергии в настоящее время и в будущем.

Федеральный закон № 190 «Об обращении с радиоактивными отходами» устанавливает, что основой системы безопасного обращения с радиоактивными отходами является знание их радиационных характеристик и радионуклидного состава. На всех этапах обращения с радиоактивными отходами они должны быть охарактеризованы и классифицированы в соответствии с действующими нормативными документами для выбора наиболее эффективного варианта их кондиционирования.

В работе представлены подходы, реализуемые на ФГУП «ПО «Маяк», по измерению количественных характеристик ядерных материалов в радиоактивных отходах химико-металлургического производства. Один из подходов подразумевает применение гамма-спектрометрического оборудования и метода численного моделирования с использованием специализированного программного обеспечения, реализующего метод Монте-Карло. Второй подход основан на использовании колодезных счетчиков нейтронных совпадений типа JCC-41, JCC-51 и программы анализа INCC («метод множественности»).

На основании данных подходов на ФГУП «ПО «Маяк» разработаны и аттестованы методики измерений массы плутония в отходах химико-металлургического производства. В работе описаны основные этапы построения данных методик измерений, представлены их области применения и метрологические характеристики, а также результаты их внедрения и применения в производственных условиях ФГУП «ПО «Маяк» в течении более чем 5 лет.

Внедрение данных методик измерений позволило:

- провести измерения ядерного материала в отходах и получить достоверную информацию о количестве ядерных материалов в подобных объектах, а также позволило существенно снизить неопределенность таких измерений;
- обеспечить выполнения требований федеральных норм и правил по ядерной безопасности и учету и контролю ядерных материалов;
- провести оптимизацию обращения с данными материалами, с целью повысить безопасность и эффективность при обращении с ними, а также снизить риски связанные с нераспространением.

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К КОНДИЦИОНИРОВАНИЮ РАО В ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ № 2 И ХВОСТОХРАНИЛИЩЕ № 1

Богатырёв Н.В., Боровиков Д.М., Зиганшин А.Г., Копарулина Е.С., Полянский А.И.,  
Штуца М.Г. - АО «ЧМЗ»  
Скрипченко С.Ю., Наливайко К.А., Титова С.М. - УрФУ ФТИ

Открытое поверхностное хвостохранилище № 2 эксплуатируемое с 1996 года по настоящее время. В донной части хвостохранилища накапливались радиоактивные осадки уранового производства, а жидкие нерадиоактивные соледержащие воды направлялись на подземное захоронение. В результате эксплуатации накоплено около 3 млн т урансодержащих осадков, отнесенных в результате первичной регистрации к особым низкоактивным радиоактивным отходам (РАО).

Цель проводимой работы: разработка и испытание оптимальной технологии кондиционирования имеющихся РАО.

В ходе работы решались следующие задачи:

- разработка и испытание сульфатной схемы кондиционирования РАО;
- разработка и испытание сорбционной схемы кондиционирования РАО;
- разработка и испытание карбонатно-азотнокислой схемы кондиционирования РАО.

В период с декабря 2019 года по апрель 2020 года проведены опытно-промышленные испытания сульфатной схемы переработки осадков хвостохранилища № 2. При этом подтверждено, что 80 % содержащегося в осадках урана извлекается, а оставшийся уран иммобилизуется на минеральной матрице в кислотоневыщелачиваемых формах. Извлеченный из осадков уран осаждается из растворов в виде загрязненного полиураната аммония (ПУА), который можно использовать как исходный концентрат для получения закиси-окиси (содержание урана 4-6 %). Повысить степень извлечения урана из осадков по сульфатной схеме не представляется возможным, так как «первичный» гипс серной кислотой не вскрывается и содержащийся в нем уран не выщелачивается.

Активность получаемых после вскрытия осадков гипса составляла в основном 8-12 Бк/г при норме 10. Таким образом, полученный гипс является РВ и может быть использован только для первичной консервации хвостохранилищ твёрдых радиоактивных отходов (ТРО).

Проведены опытно-промышленные испытания сорбционного извлечения урана из растворов сульфатного выщелачивания и экстракционной очистки десорбатов. В результате получено паспортное насыщение сорбента ураном, азотнокислые десорбаты с содержанием урана  $\sim 15 \text{ г/дм}^3$ , из которых экстракционной очисткой получен ПУА и далее ЗОУ, соответствующая по качеству требованиям ТТ 407-2016 (пригодная для получения гексофторида урана).

В альтернативу сульфатной схеме проведены опытно-промышленные испытания карбонатно-азотнокислой технологии переработки осадков хвостохранилища № 2. В результате опробования извлечено более 98 % содержащегося в осадках урана в виде грязного ПУА и получены вторичные ТРО в количестве 1-2 % от исходного осадка и

нерадиоактивный раствор нитрата кальция, который можно использовать для получения удобрений или утилизировать в соответствии с действующими нормами и технологическими инструкциями в подземные горизонты.

По результатам опытно-промышленных испытаний были оценены затраты на переработку РАО хвостохранилища №2 и определены преимущества и недостатки каждого из вариантов технологии.

Хвостохранилище № 1 состоит из трех отсеков – карт отделенных друг от друга разделительными дамбами, и защищенных внешней дамбой обвалования. Находящиеся в хвостохранилище РАО загрязнены естественными радионуклидами семейств урана и актиноурана с природным содержанием изотопа U-235.

Основываясь на имеющихся активностях изотопа U-238, расчёты содержания природного изотопа U-238 составляют около 25 тыс. т по карте № 3 и около 80 тыс. т по карте № 2. Данный расчёт позволяет предположить содержание природного урана в хвостохранилище № 1 до 10-20 %, масс., что соответствует содержанию урана в рудных концентратах. Данные расчёты косвенно подтверждаются вымыванием урана в приповерхностные грунтовые воды, содержание урана в которых на период с 2016 по 2019 г.г. составляло 1320-3800 Бк/дм<sup>3</sup>.

С учётом вышеизложенного проблему кондиционирования РАО в хвостохранилищах № 1 и № 2 необходимо решать в комплексе, при этом учитывая, что:

1 По результатам дополнительного инженерного и радиационного обследования хвостохранилища № 1 АО ЧМЗ (Технический отчёт АО ЦПТИ 2019 г.) содержание урана в осадках, размещённых в хвостохранилище № 1 составляет 64 280 т, что на 3 порядка выше числившегося.

2 Хвостохранилище № 3, предназначенное для размещения отходов циркониевого производства с повышенным содержанием радионуклидов, практически полностью заполнено, срок дальнейшей эксплуатации не превышает 10 лет.

3 В 2002 году разработан проект хвостохранилища № 4, объёмом 1,49 млн. м<sup>3</sup>, сметная стоимость, пересчитанная в текущих ценах, 3,5 млрд. руб. В связи с изменением нормативной базы требуется переработка проекта.

4 Разрабатываемая в АО ЧМЗ в настоящее время ИП по переработке минерального сырья с повышенным содержанием радионуклидов (лопарит, эвдиалит и др.) предполагает в среднесрочной перспективе необходимость размещения 50-100 тыс. м<sup>3</sup>/год ТРО.

5 Согласно Федеральному закону от 11.07.2011 № 190-ФЗ и в соответствии с НП–069 п. 2.3, п. 6.2 и п. 6.6. имеющиеся в хвостохранилищах № 1 и № 2 РАО подлежат кондиционированию. При этом необходимо решить вопрос об отнесении имеющихся РАО к статусу особых.

6 Рассмотреть варианты использования хвостохранилищ № 1, 2, 3 и необходимость строительства хвостохранилища № 4 в среднесрочной перспективе.

Таким образом, разработаны и испытаны сульфатная, сорбционная и карбонатно-азотнокислая схемы кондиционирования РАО. Оптимальной для комплексной переработки ТРО хвостохранилищ № 1 и № 2 с получением товарной продукции является сорбционная схема. В случае необходимости уменьшения объёма ТРО целесообразнее использовать карбонатно-азотнокислую схему.

## ШЛАКОЩЕЛОЧНЫЕ ЦЕМЕНТЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТРИЦЫ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Жеребцов А.А. (АО «ПРОРЫВ», Москва)

Варлаков А.П., Германов А.В., Маряхин М.А., Крапивина М.К. (АО «ВНИИНМ», Москва)

e-mail: mkkrapivina@list.ru

Интерес к минеральным вяжущим как к матрицам для иммобилизации радиоактивных отходов объясняется возможностью получения прочных компаундов, обладающих высокой устойчивостью к выщелачиванию, термическим и радиационным нагрузкам. Результаты исследований [1, 2] подтвердили устойчивость цементных матриц к воздействию доз ионизирующего излучения, эквивалентных высокоактивным отходам. Для улучшения технических характеристик компаундов и повышения надежности фиксации РАО могут быть использованы шлакощелочные вяжущие (ШЩВ) на основе доменных гранулированных шлаков – отходов металлургического производства.

В связи с этим целью исследования является оценка регламентированных свойств, состава, микроструктуры и влияния радиационных нагрузок, соответствующих высокоактивным отходам, на цементные соединения на основе ШЩВ Череповецкого металлургического комбината – компаунды с имитаторами ВАО ЖРО. Водоцементное соотношение составляло 0,2, в качестве щелочного компонента использовали NaOH. Цементные матрицы были приготовлены выдержкой в печи при температуре 200 °С и методом ГИП при температуре 300 °С и давлении 100 МПа.

В результате испытаний цементных компаундов на механическую прочность, морозостойкость, химическую стойкость установлено соответствие их свойств регламентированным требованиям для отвержденных ВАО.

В ходе исследований образцы подвергались воздействию дозы облучения до 1ГГр и  $10^{19}$  расп./г. Анализ результатов исследования показал, что радиационные нагрузки не привели к потере прочности на сжатие более 25%. Сравнительная оценка подтвердила отсутствие влияния ионизирующего излучения на фазовый состав, структуру и морфологию цементного камня.

Результаты эксперимента дают основания считать шлакощелочные цементы на основе доменных гранулированных шлаков перспективными матрицами для иммобилизации радиоактивных отходов высокой активности. Практическое применение отходов металлургических производств позволит улучшить экологическую обстановку в прилегающей к отвалам местности и повысить ресурсоэффективность при утилизации радиоактивных отходов.

*1. Влияние радиационных нагрузок, характерных для высокоактивных отходов, на свойства цементной матрицы / Варлаков А.П., Капустин В.В., Варлакова Г.А. [и др.] // Радиоактивные отходы. – 2018. – вып 1(2). – с. 89-96;*

*2. Химическая стойкость и структурные характеристики цементных компаундов с имитаторами радиоактивных отходов после воздействия ионизирующего излучения / Жеребцов А.А., Капустин В.В., Варлакова Г.А. [и др.] // Атомная энергия. – 2019. – т. 127, вып. 6. – с. 328-331.*

## СОРБЦИОННАЯ ДООЧИСТКА ЭКСТРАКЦИОННЫХ РАФИНАТОВ ОТ ПЕРЕРАБОТКИ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ТОПЛИВА

Войтенко М.Ю. Земченко М.А.  
АО «МСЗ», г. Электросталь, MYVoytenko@rosatom.ru

В настоящее время в АО «МСЗ» для получения порошков  $UO_2$  в ряде случаев используется сырье от переработки регенерированного топлива. Процесс получения порошков  $UO_2$  из регенерированного урана по АДУ - схеме сопровождается образованием жидких радиоактивных сред повышенной активности за счет присутствия  $^{232}Th$  и его дочерних продуктов распада.

В рамках работы по подбору оптимальной технологии переработки ЖРС в АО «МСЗ» было проведено исследование эффективности работы опытно-промышленной установки УДР-Э по снижению удельной активности азотнокислых экстракционных рафинатов, направляемых на нейтрализацию и далее на сброс в хвостохранилище. С этой целью использовали ионообменную очистку с помощью смолы хелатного типа, устойчивой при работе в кислых средах.

В результате проведенной работы было установлено, что выбранная смола обеспечивает снижение на порядок удельной активности азотнокислых рафинатов и, соответственно, осадков, получаемых при их нейтрализации. Также было установлено, что насыщение смолы наступает при пропуске 640-700 колоночных объемов.

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗРУШАЮЩИХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ АЭС «ФУКУСИМА- ДАЙИЧИ»**

Мурасова О.В., Безднякова Е.А., Погляд С.С., Дмитриева О.С., Хамдеев М.И.,  
Сивкова В.А., Замалтдинова А.Р., Ефимов В.А., Яндаев Д.М., Колобова А.А.,  
Болдаков В.А., Копанева К.О.,  
АО «ГНЦ НИИАР» г. Димитровград, e-mail: murasova.o@yandex.ru

Для ликвидации последствий аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи»<sup>1</sup>, требуется решить проблему безопасного извлечения, контейнеризации и хранения обломков топливных композиций, образовавшихся в ходе развития аварийной ситуации с потерей охлаждения. До начала извлечения топливных обломков необходимо получить недостающие данные - прогноз механических свойств, оценку выхода радионуклидов в охлаждающую воду, вероятность образования пылевых фракций и т.д.

Для проведения исследований изготовили образцы пяти разных составов, которые в полной мере отражают процессы, происходящие в подреакторном пространстве АЭС «Фукусима-Дайичи» в момент образования топливосодержащего материала (ТСМ). Для достижения воспроизведения условий, в которых находятся обломки топлива в аварийных энергоблоках АЭС «Фукусима Дайичи» создавали в имитаторах ту же удельную активность альфа-излучающих нуклидов, что и в ОЯТ Фукусима-1, путем пропитывания шихты азотнокислым раствором плутония-238.

Для определения изменения свойств образцов под воздействием разрушающих факторов были выбраны два основных экспериментальных направления, которые имитируют поведение материала в различных условиях - при длительном контакте с водой и хранение в воздушной среде.

Изучение химической устойчивости проводили по ГОСТ Р 52126-2003 при температуре 90 °С. Повышенная температура водной среды необходима для ускорения процесса деградации материала в рамках приемлемого временного периода.

Хранение образцов в воздушной атмосфере осуществляли в печи при температуре 150±1°С в течение 500, 800 и 1200 часов непрерывно. Температура и присутствие влажного воздуха в свободном объеме контейнера являются влияющими факторами на процесс старения.

Изучение свойств образцов проводили на дифрактометре ДРОН-7 для определения фазового состава, на электронном микроскопе сверхвысокого разрешения Zeiss SUPRA 55WDS VP для изучения микроструктуры.

По результатам изучения микроструктуры установлено, что Si, Al, Ca, O, Pu распределены достаточно равномерно по всему образцу, а Cr, Ni, U, Fe образуют вкрапления. Скорость выщелачивания компонентов для всех образцов с течением времени уменьшается. Заметна разница в скоростях выщелачивания образцов,

---

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет средств субсидии Исследовательского института Mitsubishi Research Institute (Япония) № NSU 51-18 от 27.11.2019 по реализации проекта «Вывод из эксплуатации и обращение с загрязненной водой (разработка технологий анализа и оценки свойств топливных осколков (разработка технологии оценки старения свойств топливных осколков)»



хранившихся в различных атмосферах - в азотной атмосфере скорость выхода компонентов выше. В результате рентгенофазового анализа установлено, что исследуемые образцы состоят преимущественно из твердого раствора  $U_xZr_{1-x}O_2$  (или  $UO_2$ ) и демонстрируют постоянство фазового состава под воздействием разрушающих факторов.

# СОРБЦИОННО-ОСАДИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЫДЕЛЕНИЯ УРАНА И ПЛУТОНИЯ ИЗ ОТХОДОВ НАСЛЕДИЯ РАДИОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Коробейников А.И., Дьяченко А.С., Алексеенко В.Н.  
ФГУП «Горно-химический комбинат», artkormcc@gmail.com

В результате деятельности производств по наработке оружейного плутония образовывались большие объемы водных некондиционных азотнокислых растворов, не предназначенные для дальнейшего применения в технологической цепочке («хвостовые» растворы). Данные растворы содержат значительные концентрации урана (до 100 г/л U), плутония (до 10 мг/л Pu) и железа (до 7 г/л), а также продукты деления тяжелых ядер (ПД), продукты коррозии сталей и радиолитических экстрагентов.

Для переработки указанных растворов на резервном оборудовании радиохимического производства (емкостные и сорбционные аппараты) и с приемлемым образованием дополнительных ЖРО была разработана сорбционно-осадительная технология выделения и очистки урана и плутония. Данная технология включает следующие стадии: сорбционное выделение плутония на фосфор-содержащих катионитах; пероксидное осаждение урана при  $pH = 2 \pm 0,2$  в присутствии устойчивого к окислению комплексобразователя ионов железа – аминокислоты; отмывка пероксидного осадка; растворение пероксидного осадка; десорбция плутония с катионита и его переочистка на анионите.

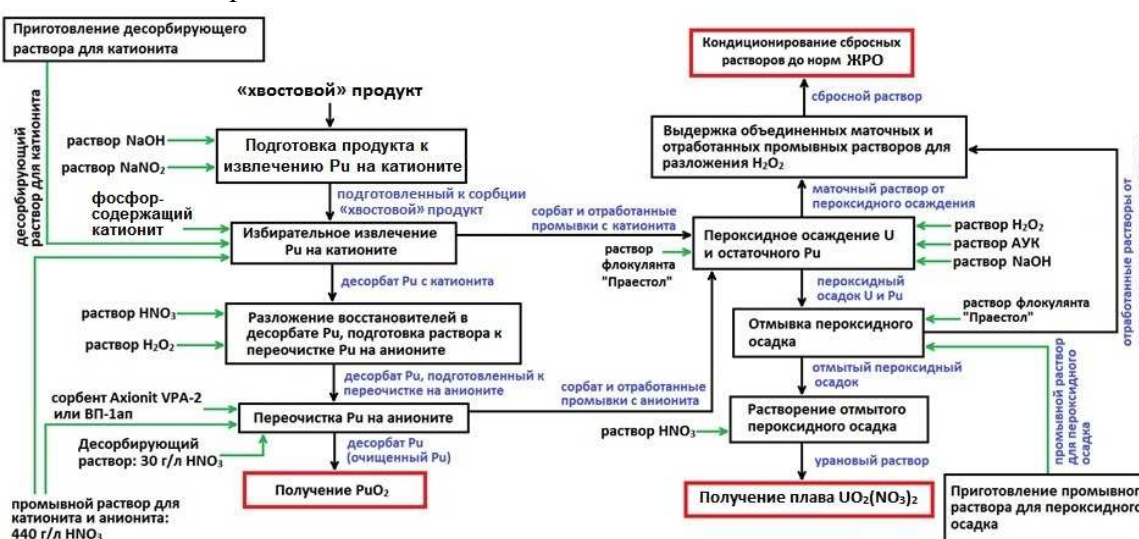


Рисунок 1 – Технологическая схема сорбционно-осадительной переработки

Представленная технология позволяет извлечь 99,5% урана и 98% плутония с образованием дополнительных ЖРО на уровне 180% от объема исходного продукта и с кратностью очистки от примесных компонентов: урана – 300-400, плутония – 1000. Увеличение количества и объема промывок пероксидного осадка позволяет получить уран более высокой чистоты, а повторное использование в каскадном режиме отработанных промывочных растворов позволяет снизить образование дополнительных ЖРО до 140% вне зависимости от количества промывок.

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ LiCl В LiOH МЕТОДОМ МЕМБРАННОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА

Таюрский Д.Р.

АО «АЭХК», г. Ангарск, dimarekit@gmail.com

Возрастающая потребность в литиевой продукции характерно тем, что рынок литий-ионных батарей становится более востребован, в связи с бурно развивающейся индустрией бытовой техники, цифровых устройств и электромобилей.

Для получения высокочистых литиевых продуктов в качестве сырья используется моногидрат гидроксид лития ( $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) соответствующий марке ЛГО-1. На сегодняшний день на АО «АЭХК» действует принципиально новая опытно-промышленная установка получения гидроксида лития, не имеющая аналогов в мире.

Наиболее приемлемым способом получения гидроксида лития является электрохимический метод, который представляет собой процесс диссоциации и переноса ионов электролита через селективную катионообменную мембрану под действием постоянного электрического поля. Процесс осуществляется в мембранном электролизёре фильтр-прессного типа, состоящий из биполярных ячеек, через которые циркулируют анолит – раствор хлорида лития ( $\text{LiCl}$ ) и католит – раствор гидроксида лития (рис. 1).

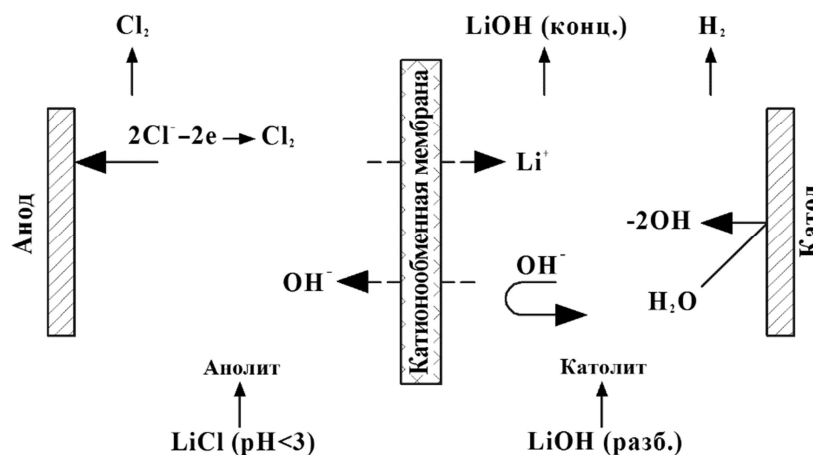


Рисунок 1 – Схема мембранного электролиза

Мембранный электролиз проводят при плотности тока  $2\text{--}5 \text{ кА/м}^2$ , концентрацию хлорида лития в анолите поддерживают на уровне  $50\text{--}300 \text{ г/л}$ , концентрацию гидроксида лития в получаемом на операции электрохимической конверсии растворе поддерживают в пределах  $40\text{--}80 \text{ г/л}$ . В процессе анолит обедняется по ионам лития, а на катоде происходит разложение воды с образованием гидроксид-ионов и молекулярного водорода. Таким образом, в катодных ячейках происходит образование и концентрирование достаточно чистого раствора гидроксида лития. В течении работы необходимо поддерживать заданный состав циркулирующих растворов и кислотность анолита для исключения образования в анодном пространстве оксихлоридов, негативно влияющих на процесс электролиза и срок службы электродов и мембран.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАРГАНЕЦСОДЕРЖАЩИХ ФОСФАТНЫХ И БОРОФОСФАТНЫХ СТЕКОЛ

Чеснокова А.Ю., Беланова Е.А., Козлов П.В., Ремизов М.Б., Шабурова Е.С.  
ФГУП «Производственное объединение «Маяк», г. Озерск, Россия  
e-mail:cpl@po-mayak.ru

В рамках проекта комплекса цементированния САО предполагается направление избыточного количества  $\alpha$ -излучающих нуклидов на остекловывание в составе коллекторов, в качестве которых может выступать  $MnO_2$ . Поскольку опыт отверждения  $MnO_2$  в алюмофосфатные стекла до настоящего времени отсутствовал, то представлял интерес по наработке экспериментального материала по свойствам марганецсодержащих стекол. Целью работы являлось исследование показателей качества марганецсодержащих фосфатных и борофосфатных стекол.

Качественные характеристики остеклованных ВАО представлены в НП-019-2015.

В экспериментальной части были приготовлены фосфатные и борофосфатные марганецсодержащих стекла. Массовую долю  $MnO_2$  варьировали от 2 до 7,25 %, его включение осуществляли за счет уменьшения массовой доли  $Al_2O_3$  от 19,6 до 15,4 %. Массовые доли матричных и примесных компонентов составляли, % мас.:  $Na_2O \sim 22$ ,  $Cs_2O \sim 2$ ,  $P_2O_5 \sim 51$  (для борофосфатных стекол) и 54 (для фосфатных стекол),  $B_2O_3 \sim 3$  (для борофосфатных стекол),  $K_2O$  – от 0,1 до 0,3.

Установлено, что температура варки фосфатных стекол составляет от 1000 до 1100°C, борофосфатных – от 950 до 1000 °C. Согласно результатам рентгенофазового анализа (РФА) все закаленные стекла получились рентгеноаморфными.

Для определения термической устойчивости закаленные образцы отжигали при 450°C в течение 30 ч. Практически у всех составов фосфатных и борофосфатных стекол после отжига на поверхности обнаружен матовый слой, в котором с помощью РФА идентифицированы фазы  $AlPO_4$  и  $Al_2P_6O_{18}$ , при этом внутри образцы остаются рентгеноаморфными. Исключение составляют отожженные фосфатные стекла с высоким содержанием  $Al_2O_3$  (19,6 % мас.). В указанных стеклах наблюдалась частичная кристаллизация по объему. В дальнейшем этот отрицательный эффект приводит к сильному растворению матрицы, в то время как все остальные фосфатные стекла остаются химическими устойчивыми. Из этого можно сделать вывод, что массовая доля  $Al_2O_3$  не должна превышать 18 %. Что касается борофосфатных стекол, то их химическая устойчивость несколько хуже, чем фосфатных стекол. Таким образом, показана принципиальная возможность включения  $MnO_2$  в исследуемые стекла.

Следует отметить, что в большинстве случаев скорость выщелачивания цезия из отожженных стекол согласуется с нормативными величинами, однако в НП-019-2015 при термических испытаниях полностью исключается кристаллизация стекла. Следовательно, температура хранения остеклованных ВАО (и температура отжига при термических испытаниях модельных стекол) должна быть ниже 450 °C.

**СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ**

**СЕКЦИЯ №1**

**«МАТЕРИАЛЫ И ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ  
ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ И РЕАКТОРОВ НА  
БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ»**

## СОПОСТАВЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ

Доброхотов П.Л.<sup>\*1</sup>, Шевяков А.Ю.<sup>1</sup>, Исаенкова М.Г.<sup>2</sup>, Клюкова К.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, г. Москва

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, г. Москва

\* petr.dobr@yandex.ru

При изготовлении изделий из циркониевых сплавов, предназначенных для работы в активной зоне ядерных реакторов, используется технологический отжиг при высоких температурах (530-610 °С), целью которого является получение материала с разной степенью рекристаллизации. При этом доля объема материала, претерпевшего рекристаллизацию, зависит от его исходного состояния (степени предварительной деформации, примесного состава, распределения вторых фаз и т.д.), так, что степень рекристаллизации для изделий из различных циркониевых сплавов заметно отличается даже при сходных условиях отжига. В свою очередь, от доли рекристаллизованного объема зависят структурно-чувствительные механические и физические свойства изделий, ввиду чего возрастает необходимость определения степени рекристаллизации материала в результате его отжига. На практике применяется множество разнообразных методов определения степени рекристаллизации, однако они обладают разной точностью, доступностью и сложностью реализации. В связи с этим, целью текущей работы стал сравнительный анализ и отбор наиболее точных, простых и доступных методик для определения степени рекристаллизации в различных изделиях из циркониевых сплавов.

В данной работе для характеристики степени рекристаллизации выбраны наиболее распространенные современные методы оценки структурного состояния: просвечивающая электронная микроскопия (ТЕМ), дифракция обратно рассеянных электронов (EBSD), рентгеновский дифракционный структурный и текстурный анализ, оптическая металлография. Кроме того, для оценки степени рекристаллизации выбраны методы измерения механических свойств материала: кратковременные испытания на растяжение, а также измерение микротвердости.

С помощью выбранных методов проведены исследования образцов, изготовленных из листов и труб из сплавов Э110 и Э635 в состоянии поставки и после дополнительного лабораторного отжига при 605 °С в течение 6 часов. Выбраны структурные параметры, способные отразить изменения, протекающие в ходе отжига, а также проанализировано изменение при отжиге механических свойств.

Отдельно проведен последовательный отжиг холоднодеформированных образцов при температурах 480-640 °С в течение 3 часов, что позволило отследить кинетику изменения отобранных ранее параметров структуры и свойств в зависимости от температуры рекристаллизационного отжига.

# ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛУЧЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110 В ПРОДОЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Чертопьятов Е.В., Мазаев А.О.  
АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, gpk@niiar.ru

Нагрев облучённых материалов до температур выше температуры облучения приводит к отжигу радиационных дефектов, сопровождаемому частичным или полным возвратом их механических свойств к исходным (до облучения) значениям. При воздействии реакторного облучения на изделия из циркониевых сплавов в их структуре образуются радиационные дефекты в виде дислокационных петель, препятствующие при деформировании материала движению дислокаций в плоскостях скольжения и приводящие, тем самым, к его радиационному упрочнению. Из-за наличия кристаллографической текстуры и различия морфологии радиационных дефектов в разных плоскостях скольжения в оболочках твэлов их механические свойства изменяются в различных направлениях как под действием облучения, так и в результате послерадиационного отжига, по-разному. Длительные термические испытания твэлов ВВЭР-1000 при температуре 380°C привели к частичному возврату механических свойств оболочек в поперечном направлении. Целью настоящей работы является определение изменений механических свойств оболочек твэлов из сплава Э110 в продольном направлении в результате воздействия облучения в реакторе ВВЭР-1000 и последующих длительных термических испытаний при температуре 380°C.

Для исследований использовали твэлы тепловыделяющих сборок (ТВС) ВВЭР-1000 с глубиной выгорания топлива ~20 и ~70 МВт·сут/кгU, достигнутых в результате их эксплуатации в течение одного года и шести лет соответственно. Твэлы каждой ТВС подвергли термическим испытаниям в среде гелия в стационарном режиме при температуре 380°C в течение 468 сут. и в режиме термоциклирования (с 48-ю термоциклами) с изменением температуры от комнатной до 380°C и общим временем выдержки 427 сут при температуре 380°C.

Длительные термические испытания привели к частичному возврату значений прочностных ( $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$ ) и пластических ( $\delta_0$ ) характеристик радиационно-упрочнённых оболочек в продольном направлении. Изменение режима термических испытаний (термоциклирование или стационарный) в пределах разброса данных не привело к различию значений этих характеристик у сегментных образцов. Уменьшение радиационного упрочнения сопровождалось повышением значений общего относительного удлинения.

Снижение  $\sigma_b$  сегментных образцов при  $T_{исп}=20^\circ\text{C}$  составило 127-147 МПа, а  $\sigma_{0,2}$  – 199-241 МПа, причём эффект возврата этих свойств для оболочек твэлов с меньшим выгоранием топлива был больше, чем для твэлов с высоким выгоранием. При повышении  $T_{исп}$  до 380°C снижение  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$  было меньшим, чем при  $T_{исп}=20^\circ\text{C}$ , и составило 92-112 МПа и 135-144 МПа соответственно. Значения  $\delta_0$  сегментных образцов в результате проведения термических испытаний, наоборот, увеличились при

$T_{\text{исп}}=20^{\circ}\text{C}$  на 13-18%, а при  $T_{\text{исп}}=380^{\circ}\text{C}$  – на 12-17%. Возврат механических свойств оболочек твэлов в продольном направлении вследствие термических испытаний произошёл в большей мере, чем в поперечном.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00799 А*



## ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА AlSi10Mg, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Рожкова Ю.Н., Марков И.С., к.х.н. Федотов С.А.  
ФГУП ВНИИА, г. Москва, mailbox75@vniia.ru

Сплавы, полученные методом селективного лазерного сплавления, имеют характерные особенности структуры, которые отсутствуют у сплавов в литом состоянии [1-2]. Изучение взаимосвязи между структурой сплавов, полученных методом селективного лазерного сплавления, и их механическими характеристиками является актуальной задачей, так как в литературных источниках эта проблема не освещена в полном объеме. По данным проведенных ранее исследований образцы из сплава AlSi10Mg, полученные методом селективного лазерного сплавления, обладают анизотропией механических свойств в зависимости от направления синтеза, но причина ее возникновения находится в процессе изучения.

Целью данной работы является исследование причины возникновения анизотропии механических свойств сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления.

В ходе выполнения работы проведен анализ механических свойств образцов из сплава AlSi10Mg, синтезированных в различных направлениях, фрактографический анализ образцов, анализ кристаллографической текстуры и металлографические исследования структуры сплава. В исследовании использовали методы оптической, электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

1. Дынин, Н. В. Влияние параметров процесса селективного лазерного сплавления на структуру алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg / Н. В. Дынин, А. В. Заводов, М. С. Оглодков, Д. В. Хасиков // Труды ВИАМ. – 2017. – № 10 (58). – С. 3-14.

2. Trevisan F. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties / F. Trevisan, F. Calignano, M. Lorusso, J. Pakkanen, A. Aversa, E. P. Ambrosio, M. Lombardi, P. Fino, D. Manfredi // Materials. – 2017. – № 10 (1), 76.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ПОРОШКА ДИОКСИДА УРАНА НА МОЛОТКОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ, С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОЦЕНКОЙ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА**

Власов А.Ю., Главин К.В., Скомороха А.Е., Кузнецов А.И., Жаров Д.А.  
АО «МСЗ», г. Электросталь, AYuvlasov@rosatom.ru

В АО «МСЗ» изготовление крупки диоксида урана гранулированного (ДУГ) производится по нескольким различным технологиям. В 2019 году, с целью компактизации производства, была запущена новая цепочка по получению гранулированного топлива (на основе диоксида урана) для снаряжения дисперсионных твэлов. Принципиальное отличие данной цепочки в том, что в данную цепочку введена операция помола (активации) порошка, на молотковой мельнице. Введение молотковой мельницы обеспечивает гибкость технологического процесса, позволив регулировать заданную насыпную плотность не изменяя режимы спекания.

В рамках данной работы проведено исследование режимов обработки порошка диоксида урана при разной скорости вращения привода ротора молотковой мельницы с последующей оценкой фракционного состава получаемого порошка, после проведения помола (активации). Определение фракционного состава производилось на лазерном дифракционном микроанализаторе размеров частиц Analizette 22. Дополнительно в данной работе была проанализирована морфология порошков, полученная при разных режимах активации (помола) методом растровой электронной микроскопии.

В данной исследовательской работе подобраны режимы обработки (активации) порошка, обеспечивающие получение крупки ДУГ требуемого качества.

## ВЛИЯНИЕ ПОМОЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКА ДИОКСИДА УРАНА

Уваров А.А.<sup>1,2</sup>, Тенишев А.В.<sup>2</sup>, Скомороха А.Е.<sup>1</sup>, Кузнецов А.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ПАО «МСЗ», г. Электросталь, Московская обл.

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, г. Москва

countries4@gmail.com

С течением времени возрастают требования, предъявляемые к ядерному топливу, что приводит к актуальности постоянного усовершенствования технологий изготовления топливных таблеток, в том числе и таблеток на основе диоксида урана как одного из самых распространённых.

Одной из наиболее важных тем является вопрос влияния дисперсности исходных материалов для получения топливных таблеток на основе диоксида урана и их влияния на свойства получаемого топлива. Целью исследований, посвящённых этому вопросу, является определение возможности повышения качества топливных таблеток и улучшения их основных и структурных свойств.

В настоящей работе рассматривается влияние помола чистого порошка диоксида урана на его характеристики и параметры «сырых» таблеток, получаемых из него. Так, в ходе эксперимента исследуемый порошок диоксида урана, полученный методом сухой конверсии, был подвергнут помолу в планетарной мельнице 6 раз в течение 10 мин (в общей сложности время помола составило 60 минут). После каждой операции измельчения порошка измерялись такие характеристики, как насыпная плотность, пикнометрическая плотность и гранулометрический состав. Полученные результаты сравнивались с результатами для порошка диоксида урана, не подвергнутого помолу. Также после каждого помола были отпрессованы образцы при разном давлении прессования с определением их сырой плотности геометрическими методами. В дальнейшем полученные таблетки были спечены с последующим изучением их микроструктуры (крупность зерна, пористость, размеры пор), геометрии и пикнометрической плотности.

Таким образом, в ходе настоящей работы проведены исследования свойств полученных в ходе измельчения порошков и выбрано оптимальное время помола порошка диоксида урана как одного из компонентов ядерного топлива.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ-ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Макаров Ф.В., Пономаренко А.П., Дзюбинский И.А., Захаров Р.Г., Глебов А.В.,  
Багдатьяев А.Д., Глебова Е.М., Кузнецов Д.В., Кожева Д.А., Антиа А.В.,  
Сафронов Б.В.

АО «ВНИИНМ», г.Москва, FVMakarov@bochvar.ru

Композиты на основе карбида кремния являются наиболее перспективным материалом для использования в ядерных установках в качестве материала тепловыделяющих элементов вместо циркониевых сплавов, применяемых в качестве основного материала твэлов в настоящий момент [1, 2].

Среди способов формирования керамики и композитов большое распространение получил метод, основанный на термически активированных химических реакциях образования карбида кремния из газообразных реагентов (Chemical Vapor Deposition – CVD). Данный метод позволяет синтезировать не только пленочные структуры, но и покрытия на зернистых материалах, заравнивать поры внутри твердых тел, волокон, слоев карбидокремниевой матрицей (Chemical Vapor Infiltration – CVI) [3].

В работе представлены исследования процессов формирования композитов C/SiC и SiC/SiC методом инфильтрации волокнистого каркаса газообразным метилсиланом с последующим осаждением карбида кремния методом CVI/CVD. Определены оптимальные параметры процесса инфильтрации и осаждения SiC, исследован фазовый состав образующегося SiC и изучена микроструктура композитов.

Выделены основные направления последующей отработки процессов получения экспериментальных образцов труб SiC/SiC методами CVI/CVD основанные на смещении равновесия реакции термического разложения метилсилана в сторону гетерогенного взаимодействия на поверхности филаментов волокна и повышения скорости диффузии реагента в пористом теле.

Установлено, что газофазный процесс осаждения карбида кремния из метилсилана при температурах 660 – 700 °С и пониженном давлении, без использования газов разбавителей, позволяет получать плотные поликристаллические осадки (матрицу) карбида кремния преимущественно кубической модификации ( $\beta$ -SiC) и обеспечивает удовлетворительную степень уплотнения пористого волокнистого каркаса.

### Список литературы:

1. Безумов В.Н., Новиков В.В., Кабанов А.А., Захаров Р.Г., Макаров Ф.В., Пономаренко А.П. Вопросы разработки оболочки твэла из композиционного материала на основе карбида кремния в рамках концепции безопасности водоохлаждаемых реакторов в условиях аварий // Вопросы атомной науки и техники: Материаловедение и новые материалы. 2014. № 4. с. 76–90.
2. Макаров Ф.В., Пономаренко А.П., Захаров Р.Г., Дзюбинский И.А., Иванов С.И., Глебов А.В., Лебедев М.Ю. Создание труб-оболочек твэлов из композиционных материалов на основе карбида кремния // Наноиндустрия. 2017 №3, с.60-67
3. Minato K, Fukuda K. Chemical vapor deposition of silicon carbide for coated fuel particles // J. Nucl. Mater. 1987. V. 149, N2. P. 233–246.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ОБЪЕМЕ ХОЛОДНОЙ ЛОВУШКИ

Сутягин И.А., Алексеев В.В., Зыкова Р.О.  
АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, Россия  
e-mail: sutyaginivan010@gmail.com

Массоперенос в натриевом теплоносителе осуществляется как в растворенном состоянии, так и в виде взвесей. Массообмен частиц с потоком жидкости в отсутствие химического взаимодействия обусловлен растворением твердой фазы или кристаллизацией из раствора [1]. В натриевых контурах ЯЭУ имеют место условия неизотермичности, которые необходимы для переноса, кристаллизации и растворения примесей, а так же наличие в теплоносителе примесей в концентрациях, превышающих предел их растворимости.

Для описания процессов очистки натрия в холодной ловушке использована система уравнений гидродинамики, теплообмена и уравнения переноса концентраций компонентов примесей в натрии для сжимаемой среды с использованием  $k-\varepsilon$  модели турбулентности, так как она стабильна, не требует значительных вычислительных ресурсов и долгое время была промышленным стандартом в трехмерной динамической постановке, включающая в себя уравнения.

Разработка трёхмерного кода проводилась для расчёта массопереноса примесей в объеме ХЛ. Пространственное распределение примесей, моделировалось с использованием программ вычислительной гидродинамики (CFD). Геометрия расчетной области представляет собой упрощенную конфигурацию макета ХЛ: цилиндрический сосуд, в котором натрий проходит пустую область и область с сеточной набивкой [2].

На рисунке 1 изображена модель макета холодной ловушки с нанесенной расчётной сеткой.

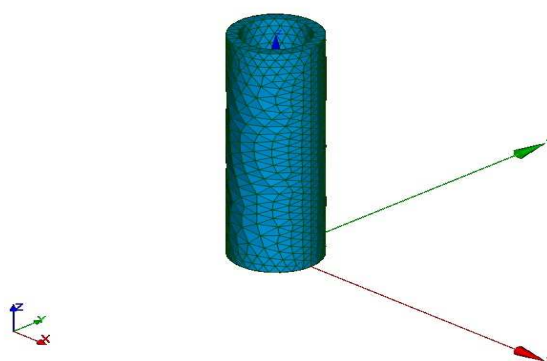


Рисунок 1 – Сечение макета ХЛ геометрии и общий вид геометрии.

В результате проведенных расчётов были получены распределения температуры и концентрации оксида натрия по объему ХЛ, потоки примеси на поверхности

массообмена в объеме ХЛ. Задача дальнейших исследований состоит в валидации расчётных данных.

### **Литература**

1. Алексеев В.В., Козлов Ф.А., Загоруйко Ю.И., Лихарев В.А., Краев Н.Д. Исследование динамики поведения взвесей в натриевых контурах быстрых реакторов: препринт ФЭИ-2576. – Обнинск, 1996. – 16 с.

2. Latge C. A study of sodium oxide crystallization mechanisms and kinetics in cold traps. Proc. of int. conf. on Liquid metal engineering and technology. London: BNES, 1984

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ РАСЧЁТНОЙ ДЛИНЫ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ КОЛЬЦЕВОГО ОБРАЗЦА ИЗ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА

Карагерги Р.П., Евсеев М.В., Козлов А.В.

Акционерное общество «Институт реакторных материалов»

г. Заречный Свердловской области, karagergi\_rp@irmatom.ru

Одним из недостатков методики поперечного растяжения кольцевых образцов из оболочек твэлов является погрешность определения характеристик пластичности материала, связанная с вычислением начальной расчётной длины рабочей части образца ( $l_0$ ) по формуле (1) [1, 2].

$$l_0 = \frac{\pi}{2} (D_{cp} - k(d_3 + a)), \quad (1)$$

где  $D_{cp}$  – средний диаметр кольцевого образца, мм;  $d_3$  – диаметр захватов, мм;  $a$  – толщина стенки образца, мм;  $k$  – коэффициент деформации, учитывающий заторможенность участков неоднородной деформации материала на опорах, возникающих на начальной стадии изгиба рабочих частей образца.

В ранних работах до 1980 г. было установлено, что для образцов оболочек твэлов из циркониевых сплавов при расчёте  $l_0$  необходимо применять  $k = 0,85$  [3], а в исследовании [4] показано, что для данного материала  $k = 0,65$ . В методике АО «ИРМ» для расчёта  $l_0$  образцов из оболочек твэлов реактора БН-600 применяют значение  $k = 0,5$ , экспериментально обоснованное в работах, выполненных до 1980 г.

В настоящее время актуальным вопросом является экспериментальное обоснование коэффициента деформации  $k$  для действующей и перспективной номенклатуры современных материалов оболочек твэлов реакторов типа БН.

В работе показан способ вычисления коэффициента деформации  $k$  для кольцевых образцов из аустенитной стали ЧС-68 и проведено сравнение расчётного значения  $l_0$  с истинной длиной рабочей части. Установлено, что для расчёта  $l_0$  образцов  $\varnothing 6,9 \times 0,4 \times 2,4$  мм при растяжении на опорах  $d_3 = 4,8$  мм наиболее корректно использовать значение  $k = 0,5$ .

## Список литературы

1. Неклюдов И. М., Ожигов Л. С., Савченко В. И., Стукалов А. И., Грицина В. М., Вахрушева В. С., Ковалев В. В., Бухановский В. В. Особенности определения характеристик пластичности кольцевых образцов из циркониевых сплавов в поперечном направлении // Проблемы прочности. – 2001. – №2. – С. 137-141.
2. Леонтьева-Смирнова М.В., Калинин Б.А., Морозов Е.М., Костюхина А.В., Федотов П.В., Такташев Р.Н. Методические особенности испытаний на растяжение кольцевых образцов // Физика и химия обработки материалов. – 2019. – № 6. – С. 62-71.
3. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.
4. Прохоров В.И., Финько А.Г., Минеев Р.И. Экспериментальное определение рабочей длины кольцевых образцов, из оболочек твэлов при поперечном растяжении. – Димитровград, 1977. – 24 с.

## **ФОРМИРОВАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРАКТИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ «ЦЕНТРА ЦИФРОВОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ»**

Багдатыев А.Д., Пономаренко А.П., Глебов А.В., Макаров Ф.В., Дзюбинский И.А.,  
Глебова Е.М., Перцев А.А.  
АО «ВНИИНМ», г.Москва, AIDBagdatyev@bochvar.ru

Современная технико-экономическая обстановка в мире трактует повсеместную цифровую трансформацию и внедрение инструментов цифровизации под эгидой перехода в Индустрию 4.0. Грядущие изменения касаются всех без исключения процессов операционной, коммерческой и управленческой деятельности, формирующих индивидуальные сферы и направления внедрения цифровых технологий.

Учитывая вышеуказанные предпосылки и специфику исследовательской деятельности, особый интерес вызывает процесс цифровизации научно-исследовательской опытно-конструкторской разработки (далее – НИОКР), не столько в организационной форме, сколько в прикладной научно-исследовательской и опытно-конструкторской сфере, а так же в процессе разработки, сопровождения и оптимизации технологических процессов.

НИОКР как исследовательский процесс разделяют на научно-исследовательские работы, опытно-конструкторские работы и технологические работы. Подобной структуре следуют и инструменты цифровизации, формирующие сферы цифрового материаловедения и цифрового инжиниринга. Данные инструменты принадлежат к области моделирования, как процессов, так и образов изделий. Рассматривая инжиниринг не сложно обеспечить точность геометрических параметров изделия, в то время как подтверждение результатов расчетов процессов, происходящих в материале изделия в различных условиях, при решении задач, является нетривиальным процессом, который сопровождают итерации как теоретического, так и практического подтверждения. В идеальном состоянии, компьютерная модель процесса, облаченная в код или результаты расчета на ядре программного обеспечения, должна пройти этапы верификации, то есть подтверждения результатов расчета на другом программном коде или в другом программном комплексе. Далее идет этап валидации – подтверждения результатов расчета физически на исследуемом производственном процессе. Так или иначе, предварительные расчеты в среде моделирования позволяют сформировать благодатную почву для принятия эффективного управленческого решения в случае выбора технологии, а так же сократить издержки при опытно-промышленном производстве и его наладке.

В данном докладе подробно рассмотрены предпосылки цифровизации НИОКР, приведена классификация компьютерного моделирования в НИОКР в соответствии с принятой структурой; приводится обоснование целесообразности формирования Центра цифрового материаловедения в АО «ВНИИНМ», наработки на этапе апробации концепции по направлениям классификации, их валидация на производстве, особенности софта и решаемых инженерных задач, перспективы развития.



# ВЛИЯНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ЩЕЛОЧНОЙ ДОБАВКИ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ БОРНОЙ КИСЛОТЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АВАРИЙНОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР

Сахипгареев А.Р., Морозов А.В., Шлепкин А.С.

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г.Обнинск,  
asakhipgareev@ippe.ru

В современных российских проектах атомных станций с реакторами ВВЭР для преодоления аварии с потерей теплоносителя предусмотрена система пассивного залива активной зоны (СПЗАЗ) из гидроемкостей. Система включает в свой состав емкости, заполненные раствором борной кислоты с концентрацией 16 г/кг [1]. Совместного объема теплоносителя СПЗАЗ достаточно для аварийного расхолаживания на протяжении 3-х суток после начала аварии.

Из-за кипения теплоносителя в результате разгерметизации первого контура, длительности процесса и низкого содержания бора в пару может наступить момент, когда борная кислота начнет кристаллизоваться в активной зоне. Это может привести к блокировке проходных сечений для поступающего теплоносителя.

В результате предварительного расчетного анализа [2] было установлено существенное превышение предельной концентрации борной кислоты через 24 ч после аварий. Для снятия допущений, принятых при проведении данных расчетов, необходимо экспериментально исследовать теплофизические свойства борной кислоты в диапазоне концентраций, характерном для возможной аварийной ситуации.

В рамках программы исследований было проведено измерение свойств растворов борной кислоты с добавкой гидроксида калия, используемого для соответствия показателям водно-химического режима ВВЭР. Плотность растворов  $H_3BO_3$  была измерена в диапазоне концентраций 2,5-230 г/кг  $H_2O$ , вязкость – 2,5-100 г/кг  $H_2O$ , а поверхностное натяжение – 2,5-150 г/кг  $H_2O$ . На основании обработки экспериментальных данных получены аппроксимирующие зависимости для определения плотности и кинематической вязкости водных растворов борной кислоты.

Полученные результаты позволяют расширить диапазон известных параметров растворов борной кислоты. Полученные экспериментальные данные имеют важное прикладное значение для АЭС с ВВЭР нового поколения.

## Список литературы

1. V.M. Berkovich, I.I. Kopytov, G.S. Taranov, M.B. Mal'tsev. *Salient features of the design for a new generation nuclear power station equipped with a VVER-1000 reactor having enhanced safety. Thermal Engineering. 2005. Vol. 52. No. 1. PP. 9-16.*

2. А.В. Морозов, А.П. Сорокин, С.В. Рагулин, А.В. Питык, А.Р. Сахипгареев, А.С. Сошкина, А.С. Шлепкин. *Влияние процессов массопереноса борной кислоты на ее накопление в активной зоне при аварийных режимах АЭС с ВВЭР. Теплоэнергетика. 2017. № 7. С. 33-38.*

# ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И РАСПУХАНИЯ СТАЛИ 08X18H10T ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БОР-60 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 350–420°С

Макаров Е.И., Маркелов Д.Е.

АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Димитровград, niar@niar.ru

В настоящей работе рассмотрено влияние напряжений разного знака на радиационную ползучесть и распухание стали 08X18H10T – материала ВКУ действующих и разрабатываемых реакторов ВВЭР. Газонаполненные образцы сложной формы (состоящие из двух коаксиальных трубок и концевых деталей), изготовленные из стали 08X18H10T, были облучены в реакторе БОР-60 при температурах 350–420°С в диапазоне повреждающих доз от 5 до 68 смещений на атом. В оболочках облученных образцов одновременно создавались сжимающие, растягивающие напряжения и в то же время облучались образцы, в которых эти напряжения практически отсутствовали [1].

В работе получены дозные зависимости изменения геометрических размеров, а также результаты исследования микроструктуры материала газонаполненных образцов сложной формы [2-4].

Проведено сравнение влияния сжимающих и растягивающих напряжений на распухание, параметры вакансионной пористости и ползучесть стали 08X18H10T.

Полученные результаты могут быть использованы в расчетах по уточнению срока службы внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР и его продления, а также для проверки моделей влияния напряжений разного знака на радиационную ползучесть и распухание.

## Список литературы

1. Makarov E.I., Kireev N.V., Neustroev V.S., Markelov D.E., Belozеров S.V. *Simulated stressed-strained state of a pressurized contoured specimen // Материалы 15 Международной школы-конференции для молодых ученых и специалистов «Новые материалы – Материалы инновационной энергетики: разработка, методы исследования и применение».* – М.: НИЯУ МИФИ, 23-27 октября, 2017 г. – С. 54-55.

2. Неустроев В.С., Белозеров С.В., Макаров Е.И., Островский З.Е. *Влияние растягивающих и сжимающих напряжений на радиационное распухание и деформацию ползучести в аустенитной стали X18H10T // Физика металлов и металловедение.* – 2010 г. – Т. 110. – № 4. – С. 412-416.

3. Неустроев В.С., Белозеров С.В., Макаров Е.И., Обухов А.В. *Влияние растягивающих напряжений на эволюцию вакансионной пористости в стали X18H10T, облученной в реакторе БОР-60 // Физика металлов и металловедение.* – 2014 г. – Т.115. – № 10. – С. 1070-1074.

4. Макаров Е.И., Неустроев В.С., Белозеров С.В. *Закономерности радиационной ползучести сталей 08X18H10T и 07X16H12M3T, облученных в реакторе БОР-60 при температуре 330–350°С // Ядерная физика и инжиниринг.* – 2018. – Т. 9. – № 4. DOI: 101134/S2079562918040139. – С. 1–6.

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ДО 22000 ЧАСОВ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ФЕРРИТНО- МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ ЭК181 И ЧС139

Николаева Н.С., Леонтьева-Смирнова М.В., Можанов Е.М.  
АО «ВНИИНМ», г. Москва, NSeNikolaeva@bochvar.ru

Одним из важных параметров, характеризующих конструкционный материал для оболочек твэлов, является стабильность структуры при воздействии на него длительных выдержек при рабочих температурах. Основными процессами, протекающими при термическом старении ферритно-мартенситных сталей, являются: распад реечной структуры мартенсита, коагуляция карбидов и карбонитридов, трансформация дислокационной структуры, рост и формирование субзерен, образование новых фаз.

В работе представлены основные результаты исследования влияния термического старения при температурах (450-700) °С с максимальной выдержкой 22000 ч на стабильность структуры оболочечных труб из сталей ЭК181 и ЧС139.

Старение до 19000 ч при температурах 450 и 550 °С характеризуется малой скоростью распада пересыщенного твердого раствора и сохранением структурных параметров сталей ЭК181 и ЧС139, в частности размеров карбидов, на исходном уровне.

Термическое старение при 650 и 700 °С инициирует процессы разупрочнения и деградации структуры в сталях ЭК181 и ЧС139. Показано, что при этих температурах процессы разупрочнения, сопровождаемые перестройкой субзеренной структуры и коагуляцией карбидов типа  $M_{23}C_6$ , наблюдаются, начиная с выдержки 1000-3000 ч.

При температуре 650 °С в интервале 14000-22000 ч старения происходит стабилизация прочностных свойств сталей в результате замедления процессов разупрочнения, в частности коагуляции карбидной фазы. Несмотря на длительность выдержки до 22000 ч, в сталях сохраняется частичная ориентация структуры по бывшим мартенситным рейкам.

В отличие от стали ЭК181 при температуре 650 °С в интервале 1000-3000 ч старения, в структуре стали ЧС139 выделяется фаза Лавеса  $Fe_2(Mo, W)$  размером 0,5-1 мкм. В результате, скорость разупрочнения стали ЧС139 при температуре 650 °С выше, чем стали ЭК181.

Интенсивная коагуляция карбидов типа  $M_{23}C_6$  и преобразование субзеренной структуры при температуре 700 °С в течение 3000 ч старения приводит к снижению значений микротвердости образцов обеих сталей на ~25 % относительно исходного состояния. Появление в структуре равноосных субзерен размером ~1,2-1,5 мкм в интервале 14000-19000 ч старения приводит к дальнейшему снижению прочности сталей в результате уменьшения эффективности субструктурного механизма упрочнения.

## **СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ ЭК164-ИД Х.Д., ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Соколовский Д.А., Гильмутдинов Ильнур Ф., Беляева А.В., Чертопьятов Е.В.  
АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, sokdmirii95@mail.ru

На ближайшую перспективу хромоникелевая сталь аустенитного класса ЭК164-ИД х.д. является основным перспективным материалом для оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Проведенные ранее исследования стали в охрупченном состоянии указывают на имеющийся запас пластичности основной доли материала оболочек, который может быть оценен при схеме нагружения образцов, наиболее приближенной к условиям нагружения оболочки при эксплуатации. Цель работы – проведение сравнительных механических испытаний оболочек твэлов с нитридным и оксидным топливом с применением различных методов и типов образцов.

Объекты исследования – оболочки из стали марки ЭК164-ИД х.д. из двух экспериментальных твэлов со смешанным нитридным ураноплутониевым, смешанным оксидным ураноплутониевым топливом после испытаний в реакторе БН-600.

Проведены сравнительные испытания различными способами образцов разного типа, вырезанных из сечений вблизи центральной плоскости активной части твэлов с нитридным и оксидным топливом: одноосное растяжение кольцевых и продольных сегментных образцов, испытания трубчатых образцов внутренним давлением пластичного наполнителя и кольцевых образцов внутренним давлением деформируемой вставки.

Результаты испытаний показали, что значения пластичности образцов из оболочки твэла с нитридным топливом ниже, чем с оксидным, во всех методах, что связано с охрупчиванием оболочки под облучением и наличием науглероженного слоя на ее внутренней поверхности.

Показано, что испытание кольцевых образцов из охрупченного материала на полукруглых опорах является наиболее консервативным способом механических испытаний, так как показывает нулевые значения общего удлинения при имеющемся запасе пластичности основной доли металла. Методы, в которых напряженно-деформированное состояние более приближено к рабочим условиям в твэле, такие как испытания трубчатых и кольцевых образцов пластичным наполнителем, позволяют регистрировать остаточные значения общего удлинения.

Резюмируя результаты проведенных экспериментов, можно отметить, что выбор метода или комбинации методов должен осуществляться индивидуально с учетом свойств материала, геометрических характеристиках изделия, условиях его эксплуатации, возможности изготовления достаточного количества образцов и, возможно, иных факторов.

## **ВЛИЯНИЕ ПОСТРАДАЦИОННОГО ОТЖИГА НА ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И МИКРОТВЁРДОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛИ ЭП823-Ш**

Маркелов Д.Е., Соколовский Д.А., Беляева А.В.  
АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, dmitry.mark1@yandex.ru

В настоящее время в России существует два направления проектирования реакторов на быстрых нейтронах большой мощности – это реакторы типа БН с натриевым теплоносителем (БН-1200) и реакторы типа БРЕСТ со свинцовым теплоносителем (БРЕСТ ОД-300, БРЕСТ-1200). Именно эти реакторы рассматриваются как основа будущей атомной энергетики России. В настоящее время ферритно-мартенситные стали относят к наиболее перспективным материалам для элементов активных зон реакторов на быстрых нейтронах. В качестве материала для изготовления оболочек твэлов реактора БРЕСТ-ОД-300 рассматривается сталь 16Х12МВСФБР-Ш (ЭП823-Ш). К особенностям этой стали, как и других сталей ферритно-мартенситного класса, относится склонность к низкотемпературному радиационному упрочнению и охрупчиванию (НТРО). Механизмы упрочнения и охрупчивания НТРО, в области сравнительно низких температур облучения (300-400°С), определяются изменениями дислокационной структуры и структурно-фазовыми (в частности, карбидными и нитридными) превращениями в стали. Природа изменения механических свойств сталей связана с изменениями их структуры в условиях нейтронного облучения. Поэтому получение новых экспериментальных данных о влиянии условий облучения на изменение микроструктуры стали и, как следствие, на её механические свойства актуально.

В докладе проведены исследования микроструктуры образцов из ферритно-мартенситной стали ЭП823-Ш до облучения и после облучения в качестве оболочки твэла при температуре 380-390 °С, а также проведены исследования влияния пострадиационного отжига на изменения структурно-фазового состояния, микротвердости и других механических свойств оболочек.

Результаты аналитической трансмиссионной электронной микроскопии показали, что причиной снижения характеристик пластичности, повышения характеристик прочности и значений микротвёрдости по толщине оболочек является образование упрочняющих мелкодисперсных (~5 нм) выделений η-фазы ( $M_6X$ ) и формирование характерной для низкотемпературного облучения дислокационной структуры. В результате отжига облучённых образцов в вакууме при температуре 550 °С в течение 1 и 3 часов произошёл возврат микротвёрдости материала к её значениям до облучения, снижение прочности и повышение пластичности при испытании продольных сегментных образцов (предела прочности от 1100 МПа до 715-770 МПа, общего относительного удлинения от 0 % до 5,0-6,3 %). По результатам электронной микроскопии отжиг при температуре 550°С в течение 1 и 3 часов привёл к ступенчатому уменьшению концентрации мелкодисперсных выделений η-фазы ( $M_6C$ ) в феррите и сорбите и трансформации дислокационной структуры.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТАЛИ 08X18N10T, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Глушкова А.К., Карсаков А.А.  
АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, Россия  
e-mail – aleksandra.glushkova@rambler.ru

В связи с проектированием и разработкой новых ядерных реакторов и установок встает вопрос о создании конструкционных материалов, соответствующих более высоким требованиям к механическим и эксплуатационным характеристикам. Решением данной проблемы является либо создание новых конструкционных материалов, либо совершенствование уже существующих. В связи с чем всё больший интерес представляют материалы, полученные методами интенсивной пластической деформации. Одним из наиболее распространенных методов интенсивной пластической деформации является метод равноканально-углового прессования (РКУП). Особенностью материалов, обработанных методом РКУП, является измельчение исходной крупнозернистой структуры, преобладание большеугловых границ зерен, увеличение объемной доли поверхностей раздела (тройных стыков, неравновесных границ зерен), что приводит к формированию уникальных физико-механических свойств материалов, в том числе к повышению прочностных характеристик. Однако вследствие повышенной дефектности получаемых структур встает вопрос об устойчивости ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов под воздействием внешних факторов.

Цель работы – исследовать структуру, свойства и стабильность УМЗ материалов под влиянием внешних факторов (температуры, нейтронного облучения). Объектом исследований является сталь 08X18N10T в состоянии поставки и после РКУП (прессование по маршруту В<sub>c</sub>, 8 проходов, угол прессования 120°, температура – 400 °С). Показано, что после РКУП в образцах сформирована однородная равноосная УМЗ структура со средним размером зерен 200-300 нм, которая в необлученном состоянии стабильна до температур 600-650 °С. Наблюдается увеличение прочностных характеристик по сравнению с образцами стали в состоянии поставки во всем исследуемом интервале температур (20-600 °С), при этом пластичность остается на уровне не ниже 10 %. Получены первые результаты по исследованию явления сверхпластичности в данных материалах при температуре 800 °С.

После нейтронного облучения при всех параметрах, заданных в работе (облучение в реакторе БОР-60 до 5-15 сна, в реакторе СМ-3 до 50 сна), зафиксировано увеличение прочностных характеристик материала в УМЗ состоянии, при этом пластичность остается на уровне необлученного состояния. При температурах испытаний выше 500-550 °С помимо увеличения прочностных характеристик образцов стали в УМЗ состоянии, фиксируется так же увеличение относительного удлинения.

Полученные результаты демонстрируют перспективу в повышении радиационной стойкости аустенитных нержавеющей сталей.

## РАЗРАБОТКА ФЕРРИТНОЙ СТАЛИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Al-Si ДЛЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Савельев М.Д., Тарасов Б.А. Голубничий А.А.

Высокотехнологический Научно-Исследовательский Институт Неорганических  
Материалов имени академика А. А. Бочвара, Москва, Россия

E-mail: SavelyevMD@gmail.com

В настоящее время в мире ведутся исследования топлива для легководяных ядерных реакторов, имеющего повышенную устойчивость к тяжёлым запроектным авариям. Одним из направлений исследований является изучение и разработка материалов для оболочек тепловыделяющих элементов. Среди кандидатных материалов рассматриваются стали различного состава. Ранее авторами было установлено, что сплавы состава Fe-5%Cr-5%(Al+Si) имеют высокую коррозионную стойкость в воде высоких параметров (523 К, 16 МПа) [1]. И не подвержены явлению распада твёрдого раствора, характерному для хром-алюминиевых сталей [2]. Изменения прочностных характеристик материала оболочки твэла в процессе работы реактора должны быть незначительны.

Целью данной работы является установление закономерностей изменения прочностных характеристик низкохромистой стали на основе Fe-Cr-Al-Si и оценка структурных и размерных факторов дисперсно-упрочняющих частиц оксида иттрия, полученных методом горячего прессования и последующей холодной деформацией.

Для оптимизации термомеханической обработки и достижения наилучших прочностных характеристик была проведена серия отжигов при различных температурах. Параллельно была использована технология упрочнения материала путём введения дисперсно-упрочняющих оксидных частиц  $Y_2O_3$ . В данной работе рассмотрены сплавы, содержащие 5 мас.% Cr, 5 мас.% (Al+Si) и дополнительно легированные для повышения комплекса свойств различным количеством Nb, Ti, Zr, Mo, В и Y.

\*\*\*

Показано, что наблюдается резкое падение микротвёрдости для изучаемых сплавов после отжига в интервале температур 600-700 °С.

Проведённые в ПЭМ исследования показали, что исходные частицы оксида иттрия растворяются в процессе механоактивации и выпадают при спекании в виде алюминий-содержащей фазы, вероятнее всего алюмо-иттриевого граната. Получено распределение частиц по размерам, а так же изучена эволюция распределения частиц после деформации и рекристаллизационного отжига. Обнаружено, что форма и параметры распределения частиц по размерам не претерпевает изменения, сохраняя подобие с исходным распределением.

### Литература

1. Tarasov B. A., Savelyev M. D., Shornikov D. P. *Corrosion Resistance of Fe-Cr-Al-Si Alloys with Low Chromium Content //KnE Materials Science. – 2018. – Т. 4. – №. 1. – С. 480-490.*
2. Tarasov B. A. et al. *Short-term Mechanical Properties of Fe-Cr-Al-Si Alloys //KnE Materials Science. – 2018. – Т. 4. – №. 1. – С. 491-497.*

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ДЛЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РЕАКТОРА СМ

Курганов С.В. АО «МСЗ», г. Электросталь, SeVKurganov@rosatom.ru;  
Леонтьева-Смирнова М.В. АО «ВНИИНМ», г. Москва,  
MVLeontyeva-Smirnova@bochvar.ru

Исследовательский реактор СМ – это корпусной ядерный реактор, в конструкции которого реализована идея получения высокой плотности потока тепловых нейтронов с жестким спектром в замедляющей ловушке в центре активной зоны.

Для реализации проектных показателей в конструкции реактора СМ используются твэлы дисперсионного типа. Оболочкой твэла служит труба из коррозионно-стойкой аустенитной стали ЭИ847-ИД. К оболочечной трубе предъявляется комплекс технических требований, обеспечивающих ее функциональную пригодность. В части теплофизических и механических характеристик изготавливаемые трубы из стали ЭИ847-ИД отвечают требованиям конструкторов. Однако, рассматриваемая труба характеризуется низкой технологичностью, что вызывает существенные трудности при последующих технологических операциях изготовления из неё готового твэла, что, по нашему мнению, связано с особенностями напряженно-деформированного состояния оболочечных труб. При изготовлении твэлов обнаруживается проблема: в оболочках некоторых твэлов при контроле после выполнения всех операций выявляются трещины, которые распространяются от внутренней поверхности оболочки к наружной и величина данных трещин превышает допустимые значения, установленные техническими требованиями.

Анализ существующей деформационной схемы производства и структурного состояния трубы по сечению показал, что направление исследований, связанное с вопросами деформационного воздействия на трубы в процессе их изготовления, может быть рассмотрено как основной путь решения имеющейся проблемы. Прежде всего, это выбор оптимального способа деформации для создания в поверхностном слое трубы сжимающих внутренних напряжений, которые будут снижать суммарные растягивающие напряжения от приложенного деформационного воздействия при формовке твэлов и градиента температур в объеме трубы в процессе спекания твэлов.

На данном этапе исследований определены потенциально возможные схемы деформационного воздействия, определены необходимые исходные данные для создания моделей напряженно-деформированного состояния конкретной металлопродукции, разработана программа комплексных структурных исследований. Критерием оценки качества труб и оптимального их структурного состояния приняты характеристики напряженного состояния труб, изготовленных с применением различных схем деформационного воздействия.

Итог работы предполагает научно-технологическое обоснование возможности совершенствования технологического процесса изготовления труб  $\text{Ø}5,5 \times 0,2$  мм из коррозионно-стойкой аустенитной стали ЭИ847-ИД в АО «МСЗ».



## СТАТИЧЕСКИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ В ЖИДКОМ СВИНЦЕ

Сайфутдинова М.С., Науменко И.А., Краснов Н.В.,  
АО «ВНИИНМ», г. Москва, sayfutdinova.marina@bk.ru

Для перспективных реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым жидкометаллическим теплоносителем актуальна проблема коррозионной стойкости материала оболочки твэла с одновременным обеспечением высокого уровня механических характеристик в заданном интервале температур 420-750 °С.

Температура 420°С обусловлена нижней границей температуры эксплуатации жидкого свинца, 750°С – экспериментальная температура на оболочке твэла для имитации экстремальных режимов коррозионных исследований.

Скорость и характер протекания процессов коррозии зависят от многих факторов [1]: от температуры, концентрации кислорода в свинце, структурно-фазового состояния поверхности материала и др.

Одним из путей повышения коррозионной стойкости оболочечных труб является нанесение защитных покрытий, например, гальванизацией, плакированием, методом диффузионной обработки, металлизации [2].

Недостатком практически любого способа защиты является образование дефектов на поверхности материала в зоне коррозионного взаимодействия, микротрещины в покрытии, что вызывает появление и развитие очагов коррозионного поражения матрицы защищаемых сталей. Коррозия металла под действием жидкого свинца развивается в местах нарушения сплошности оксидной пленки и распространяется вглубь металла при отсутствии условий самозалечивания дефектов.

Создание покрытий - трудоемкий технологический процесс, требующий отработки большого количества образцов, точности исполнения режимов нанесения покрытий и контроля сплошности этого покрытия. Возникает необходимость применения метода экспресс-оценки коррозионной стойкости материалов, в том числе с защитными покрытиями, в среде жидкого свинца. Таким методом может быть метод статических коррозионных испытаний с последующим анализом структурно-фазового состояния поверхности образца и оценкой сплошности защитного покрытия.

Перед проведением испытаний стоит задача оценить исходное состояние поверхности; после испытаний - зафиксировать изменения состояния поверхности образцов оболочечных труб (качественно оценить коррозионные разрушения), степень равномерности ее коррозии (сплошная, локальная, питтинговая, межкристаллитная и др.), тип коррозии и сделать вывод о механизме коррозии в зависимости от условий испытаний, химического состава и структуры сплава, способа термообработки образцов, температуры и химического состава жидкого свинца.

По результатам эксперимента станет возможным отобрать материал, максимально удовлетворяющий критериям оценки коррозионной стойкости (толщина зоны взаимодействия системы «образец – свинец»; изменение структурно-фазового состояния поверхности и матрицы оболочечных труб; изменение комплекса

механических свойств материала в различных структурных состояниях и типом поверхности) в расплаве свинца.

Предлагается методика проведения модельных статических изотермических коррозионных испытаний различных материалов в среде жидкого свинца с применением герметичного контейнера. Методика позволит получить и обобщить экспериментальные данные большого количества образцов по заданным условиям эксперимента: концентрации кислорода в расплаве свинца, температуре и времени.

Таким образом, с помощью предлагаемой методики проведения коррозионных испытаний станет возможным за короткий промежуток времени получить первичные данные коррозионного поведения материалов, защитных функций и сплошности их покрытий с учетом диапазона заданных концентраций кислорода в свинце, диапазона температур и времени испытаний.

### **Список литературы**

- [1]Повышение коррозионной стойкости стали ЭП823 в жидком свинце путем ее обработки потоками высокотемпературной импульсной плазмы / В.М. Троянов, А.Е. Русанов, А.П. Демишонков и др. // ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2005. - № 3. (86). - С. 128-133
- [2]Material Wehavior and Physical Chemistry in Ligid Metal Systems./ Ed.by H.U.Borstedt. New York: Plenum Press, 1982, p. 253 - 264.

## РАСЧЕТЫ В ОБОСНОВАНИЕ ОЧИСТКИ НАТРИЯ ОТ КИСЛОРОДА РАСТВОРИМЫМИ ГЕТТЕРАМИ

Зыкова Р.О., Алексеев В.В., Сутягин И.А.  
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск, Россия  
e-mail: zykovaruslana@yandex.ru

Одной из основных задач при использовании натрия в качестве теплоносителя БР является очистка натрия от кислорода. В настоящее время возрастает роль исследований по очистке натрия геттерными ловушками с растворимыми геттерами [1].

Проанализированы эффективности двух вариантов системы очистки с растворимым геттером (Са,Ве). Они обладают способностью активного химико-физического взаимодействия с оксидом натрия с образованием твердого оксида геттера [2]. Расчеты проводились с использованием математической модели процесса коагуляции в диапазоне температур – 350-450 °С.

На рисунке 1 отображена зависимость среднего размера частиц в ансамбле, которые вносят основной вклад в массоперенос, при температуре натрия 350 °С от времени.

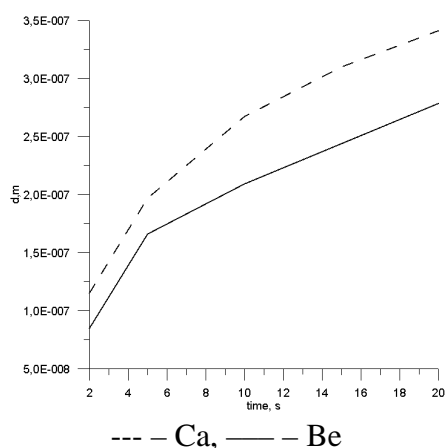


Рисунок 1 – Зависимость среднего размера частиц взвеси от времени

Исследуя два типа растворимых геттеров, можно заключить, что при одинаковых исходных условиях процесса коагуляции эффективность Са, как геттера, выше, чем Ве. Это связано с образованием наиболее крупных частиц для последующего улавливания фильтрующим устройством. Но также стоит отметить, что растворимость Ве выше, чем у кальция, что способствует быстрому взаимодействию всего геттера с кислородом, соответственно время очистки натрия от кислорода будет меньше.

### Список литературы

1. Кузина Ю. А., Алексеев В. В., Сорокин А. П., Воронин И. А., Коновалов М. А., Зыкова Р. О. Исследование геттерной очистки натрия от кислорода // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. - Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2020. - С. 110-116.
2. Кузина Ю. А., Алексеев В. В., Сорокин А. П., Воронин И. А., Коновалов М. А., Зыкова Р. О. Исследование геттерной очистки натрия от кислорода // Теплофизика реакторов нового поколения. ТЕПЛОФИЗИКА-2020. – Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2020. - С. 41-42.

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВКЛАДЫШЕЙ ИЗ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ДЛЯ РЕАКТОРА ТИПА БРЕСТ МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ

Мишунин Д.Ю., Кувшинов А.Г., Колосовский В.Г., Сахипов О.Р.  
АО «Машиностроительный завод», г. Электросталь

В докладе представлен способ изготовления вкладышей из карбида вольфрама дополнительно легированного никелем методом горячего прессования. При выборе метода изготовления было принято решение применить технологию горячего прессования, которая, в отличие от классического метода холодного прессования с последующим спеканием, в данном случае имеет следующие преимущества:

- простота изготовления графитовой оснастки необходимого геометрического размера;
- отсутствие необходимости подбора пластификатора;
- простота изготовления ввиду уверенной отработки технологии горячего прессования;
- равномерное распределение температуры по всему объему вкладыша, а также механизм двухстороннего прессования для достижения более равномерной пропрессовки.

По окончанию работ были получены вкладыши из карбида вольфрама с высокими значениями плотности более  $\rho = 14,5 \text{ г/см}^3$ , выбрано оптимальное количество вводимого порошка никеля, отработан режим горячего прессования под данный вид изделий с подбором необходимой температуры и усилия.



Стоит отметить, что 2 опытные партии вкладышей из данных материалов были получены впервые для ПЭЛ РУ БРЕСТ-ОД-300, а данный тип реактора не использовался ранее в мировой атомной отрасли.

## ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИОКСИДА УРАНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЕГО ПОЛУЧЕНИЯ В ЛАБОРАТОРНОЙ СВЧ-УСТАНОВКЕ

Дмитриева О.С.<sup>1</sup>, Дмитриев М.Г.<sup>1</sup>, Капралов Д.А.<sup>2</sup>, Корнилов А.С.<sup>1</sup>,  
Копанева К.О.<sup>1</sup>, Колобова А.А.<sup>1</sup>

1 – АО «ГНЦ НИИАР»

2 – ДИТИ НИЯУ «МИФИ»

г. Димитровград, e-mail:osdmitrieva@niiar.ru

Проведенные ранее исследования [1] позволяют говорить о возможности внедрения промышленного метода термического разложения урансодержащих соединений под воздействием микроволнового излучения.

В работах [2,3] показано, что в зависимости от желаемой чистоты конечного продукта, возможно получение пульп различного состава для передачи их на термическое разложение. В работе [4] показана возможность получения оксидов урана методом термического разложения под воздействием МВ-излучения. Для внедрения технологии термического разложения под воздействием МВ-излучения были проведены исследования по получению оксидов из оксалата уранила, уранилтрикарбоната аммония и подтверждению возможности получения порошка с характеристиками соответствующими техническим условиям для топливных таблеток для реакторов типа ВВЭР (ТУ 95.1823-95Е).

Исследовалось влияние на качество конечного продукта исходной химической формы, крупности частиц исходной урансодержащей пульпы.

Термическое разложение урансодержащих соединений проводили в бытовой микроволновой печи в инертной атмосфере (Ar - 5% H<sub>2</sub>).

Фазовый состав полученных порошков анализировали методом рентгеновской дифракции.

При термическом разложении оксалата уранила под воздействием МВ-излучения была получена смесь оксидов, основная фаза - UO<sub>2+x</sub>, также в минорной фазе присутствует орторомбический U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. При термическом разложении аммоний уранилтрикарбоната получены фазы - основная кубическая UO<sub>2</sub> и в следовых количествах орторомбический U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

Определение гранулометрического состава порошков показало, при термическом разложении соединений урана под воздействием МВ-излучения средний условный размер зерна образующегося UO<sub>2</sub> увеличивается, по сравнению с исходным порошком. Химическая форма исходного порошка незначительно влияет на средний условный размер зерна образующегося UO<sub>2</sub>.

*1. Исследование режимов получения порошков оксидов актиноидов методом свч-денитрации на лабораторной боксовой установке / Дмитриев М.Г., Двоеглазов К.Н., Дмитриева О.С. [и др.] // Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2018 г.). / Под общей редакцией В.В. Калыгина. – Димитровград : АО «ГНЦ НИИАР», 2019. - С. 126-127.*

2. Корнилов А.С., Черноокая Е.В., Абдуллов Р.Г., Питеркина Е.В., Щербакова К.О., Макаров А.О., Дмитриева О.С. Осаждение аммонийуранилтрикарбоната из водно - спиртовых и ацетатных растворов // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. - 2021. - Т. 62. № 2. С. 115-120.

3. Копанева К.О., Корнилов А.С., Дмитриева О.С. Исследование растворимости оксалата уранила // Сборник трудов АО ГНЦ НИИАР. - 2020. - № 3. - С. 23-26.

4. Куляко Ю.М., Трофимов Т.И., Перевалов С.А., Маликов Д.А., Винокуров С.Е., Самсонов М.Д., Мясоедов Б.Ф., Травников С.С., Двоеглазов К.Н., Шадрин А.Ю.// Получение оксидов урана восстановительной денитрацией уранилнитрата при микроволновом нагреве. Радиохимия. 2015. Т. 57. № 3. С. 215-217.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАНАЛЬНЫХ ТРУБ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ Л-2

Литвинова М.А., Мальцев А.А.  
ФГУП «ПО «Маяк», г. Озерск, РФ, cpl@po-mayak.ru

В ходе эксплуатации каналы подвергаются как коррозионному, так и радиационному воздействию, в результате чего, поверхность каналов постепенно теряет защитную анодно-окисную пленку, и на ней образуются локальные коррозионные язвы, приводящие к снижению эксплуатационных характеристик каналов. На ФГУП «ПО «Маяк» проведены исследования каналов активной зоны реакторной установки (далее – РУ) Л-2, а также образцов необлучённых технологических труб двух видов алюминиевого проката Сав2Т.

Оценка состояния наружной поверхности облучённых каналов проводилась визуально по наличию дефектов труб, извлеченных из РУ после эксплуатации в течение одной или двух кампаний. На образцах, вырезанных из трубы нижней части облучённого канала, были проведены визуальная оценка динамики развития искусственных дефектов, гравиметрические исследования, а также исследования с применением сканирующей электронной микроскопии (далее – СЭМ). Образцы алюминиевого проката, вырезанные из двух различных необлучённых технологических труб (по пять штук от каждой), были помещены в воду бассейна транспортного отделения участка загрузки, выгрузки и комплектования готовой продукции РУ (далее – бассейн).

Визуальной оценкой определялось воздействие воды бассейна на алюминиевый прокат в течение определённого времени выдержки.

Графиметрическими исследованиями было установлено, что в первые семь суток происходила убыль массы образцов (менее 4,6 мг), что характерно при разрушении металла в агрессивной среде. Далее, примерно до 42 суток, наблюдались прирост массы образцов, обусловленный образованием оксидной плёнки, и дальнейшая стабилизация коррозионного процесса.

Материаловедческие исследования образцов с применением СЭМ не выявили значимых различий в элементном составе исследуемых материалов. Исследование осадков (плёнок), отобранных с поверхности каналов методом рентгеноспектрального микроанализа позволило сделать вывод об их органическом происхождении, которое подтверждается наличием повышенного содержания углерода и азота в элементных спектрах.

По результатам исследований не выявлено повышенной скорости коррозии образцов в условиях выдержки в бассейне, как поверхности, так и искусственных дефектов. Условия хранения каналов в бассейне выдержки можно сравнивать с хранением каналов в застойной зоне, нежели при работе в реакторе. Каналы РУ сохраняют устойчивое пассивное состояние в процессе их эксплуатации.

## **СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ**

### **СЕКЦИЯ №2**

#### **«МЕТАЛЛУРГИЯ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ»**



## РАЗРАБОТКА ДВУХОСЕВОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ ГОЛОВКИ ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Исаева И.А., Ким Я.И., Куренков А.В., Лепешкин С.Н., Молчанов В.В., Федосеев В.Н.,  
Шанин Ю.И., Шарапов И.С.  
ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ», г. Подольск, [ISSharapov@luch.com.ru](mailto:ISSharapov@luch.com.ru)

Процесс селективного лазерного плавления (СЛП) является одним из энергоемких процессов аддитивных технологий. Необходимость расплавления металлических порошков требует применения лазеров мощностью от 200 до 1000 Вт. Проектирование элементов лазерного сканатора зависит от приложения, которое диктует функциональные требования технического задания на разработку. Обычно указываются требования к лазеру (тип, длина волны, мощность), размеры пучка на входе, диапазон углов сканирования по осям, размеры рабочего поля, номинальный диаметр пятна в центре рабочего поля (по уровню  $1/e^2$  мощности) и допустимый диапазон отклонения от номинала, характеристики точности (разрешение и позиционная повторяемость), скоростные характеристики (скорости сканирования и позиционирования, время выполнения шага сканирования), интерфейс управления, ограничения на показания датчика углового положения при изменении температуры (изменения коэффициента усиления и смещение нуля, долговременный дрейф), требования к электропитанию гальвомоторов (напряжение и сила постоянного тока).

В мире архитектура построения 2-ух осевого сканатора уже хорошо отработана и апробирована на практике [1]. В России подобных разработок применительно к процессу СЛП не проводилось. Нами разработан двухосевой сканатор для СЛП с применением иттербиевого лазера мощностью 700 Вт и длиной волны 1,08 мкм. Сканатор состоит из трех узлов: коллиматора, сканирующей головки и F-theta-объектива. Коллиматор расположен между QBH-разъемом волоконного лазера и сканирующей головкой и расширяет входное лазерное излучение до получения на выходе параллельного пучка заданной апертуры (15 мм). В корпусе сканирующей головки смонтированы два мотора (гальвомоторы) с установленными на них сканирующими зеркалами. Разработанные нами гальвомоторы обеспечивают возможность кругового качания зеркал в двух взаимно перпендикулярных направлениях в пределах угла  $\pm 10^\circ$ , тем самым изменяя направление оси пучка. Датчик углового положения, устанавливаемый на одном из концов вала гальвомотора, служит для выработки сигнала управления мотором и точного позиционирования сфокусированного пучка на рабочем поле размером  $300 \times 300 \text{ мм}^2$ . Платы управления гальвомоторами и сопряжения с лазером установлены в сканирующей головке и запитывались от отдельного блока питания. F-theta-объектив присоединен к головке резьбовым соединением и имеет защитное стекло. При проектировании были проведены оптические расчеты коллиматора, F-theta-объектива и всей оптики в сборе, а также термомеханические расчеты. Узлы сканатора были изготовлены, собраны, отлажены, и сканатор был испытан на соответствие функциональным характеристикам технического задания. В своем большинстве заданные характеристики были превышены. Сканатор был также испытан при совместной работе со штатным лазером.

### Список литературы

1 Paul R. Yoder, Jr. Opto-Mechanical Systems Design/ Third Edition, Taylor & Francis Group, LLC. 2006. 867 p.

## РАЗРАБОТКА ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЛИТЕЙНОЙ ОСНАСТКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ИТТРИЯ

Обмуч К.В., Хусаинов М.Р., Козина Ю.В., Халтурин Д.В., Ерофеева М.В.  
ФГУП «ПО «Маяк», г. Озерск, cpl@po-mayak.ru

Одним из основных факторов, определяющих качество литья, является материал литейной оснастки. Наиболее распространённым материалом для изготовления литейной оснастки является графит. Учитывая характер взаимодействия расплавов радиоактивных материалов с графитом, литейную оснастку из графита можно использовать для плавки урана только с нанесенным на её рабочую поверхность защитным покрытием. Отливки, полученные в формах с покрытием, имеют меньше литейных дефектов и более чистую поверхность.

Используемые в настоящее время защитные покрытия имеют низкую седиментационную и агрегативную устойчивость и быстро теряют свои эксплуатационные характеристики.

Наиболее высокими эксплуатационными свойствами при защите графита от воздействия жидкого урана обладает оксид иттрия  $Y_2O_3$ .

Целью настоящей работы является разработка более технологичного (стабильного, не требующего постоянного перемешивания, имеющего большой срок хранения без потери эксплуатационных характеристик) защитного покрытия для литейной оснастки на основе оксида иттрия.

Известны различные защитные покрытия на основе оксида иттрия [1]. К основным недостаткам, понижающим их технологичность можно отнести применение агрессивных компонентов – кислот ( $HCl$ ,  $HNO_3$ ) и высокий расход оксида иттрия.

В ходе проведения работы был подобран наиболее оптимальный состав защитного покрытия и определены исходные требования к составляющим компонентам, критически влияющим на эксплуатационные характеристики: дисперсный состав, степень полимеризации, степень и однородность замещения.

Разработанное защитное покрытие является более технологичным, имеет высокую седиментационную и агрегативную устойчивость, высокую стойкость к смыванию при гидроударе и к воздействию высокой температуры.

Опытные отливки с применением разработанного защитного покрытия, при его однократном нанесении на литейную оснастку, показали удовлетворительный результат – низкую степень науглероживания отливок, легкое извлечение отливок из оснастки, снижение количества литейных дефектов, высокий коэффициент использования материала.

В дальнейшем планируется проведение работ по повышению эксплуатационных свойств разработанного защитного покрытия и увеличение диапазона рабочих температур для возможности получения отливок из высокотемпературных сплавов.

### **Список литературы**

*Бирюков С.И. Метелкин Ю.А. Плавка и литье урана и его сплавов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.*

## РАЗРАБОТКА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ TlBr

Демина А.Ю., Сосков О.В., Лисицкий И.С., Кузнецов М.С.,  
Зараменских К.С., Пимкин Н.А., Морозов М.В  
АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт  
редкометаллической промышленности «Гиредмет», Москва,  
deminaanna97@gmail.com

Полупроводниковые (ПП) детекторы ионизирующего излучения представляют большой интерес благодаря их высокому энергетическому разрешению, обеспечивающему проведение прецизионных спектрометрических измерений, а также лучшими в сравнении с газоразрядными и сцинтилляционными аналогами быстродействием и координатным разрешением, что расширяет области применения данных детекторов, в том числе в составе приборов неразрушающего контроля технологических отложений при учёте ядерных материалов, обращении с ОЯТ и РАО.

В последние десять лет резко возрос интерес к широкозонным неохлаждаемым ПП соединениям, что связано с возможностью получения на основе таких кристаллов детекторов ионизирующего излучения, которые имеют небольшой объем, не требуют охлаждения и обеспечивают высокую эффективность регистрации  $\gamma$ -излучения. Энергетический диапазон детектируемого ими  $\gamma$ -излучения лежит в интервале от 20 кэВ до нескольких МэВ, диапазон рабочих температур – в интервале от – 40 до + 50 °С.

В свою очередь, эффективность регистрации ПП детектора определяется материалом, поэтому использование кристаллов бромида таллия, имеющего высокие атомные номера составляющих компонентов, большую плотность – 7,56 г/см<sup>3</sup>, увеличивающую диапазон регистрируемых энергий, и соответственно, самую высокую среди используемых на настоящий момент материалов поглощающую способность  $\chi$ - и  $\gamma$ -излучений, а также широкую запрещенную зону 2,68 эВ, позволяет получать материал с высоким электрическим сопротивлением и с минимальными токами утечки при комнатной температуре, с высокой разрешающей способностью и радиационной стойкостью, а невысокая температура плавления 460 °С и отсутствие фазовых переходов при охлаждении от температуры кристаллизации до комнатной позволяют на сравнительно простом оборудовании выращивать из расплава монокристаллы диаметром до 100 мм.

Таким образом, по совокупности своих физических характеристик (высокого удельного сопротивления, хороших свойств переноса заряда и др.), технологичности и себестоимости бромид таллия предпочтительнее ныне используемых соединений, а при оптимальных условиях механической обработки и металлизации будет полностью их превосходить.

В настоящей работе приводятся сведения о разработанной методике получения высококачественных кристаллов бромида таллия и об изученных свойствах кристаллов, а также данные о работах по созданию детекторных сборок с целью применения этого материала для детекторов ионизирующего излучения.

## ВОЗМОЖНЫЕ ДЕФЕКТЫ В СВАРНЫХ ШВАХ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРЫ ПО ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ

Гареев И.С., Филимоненко А.Г., Собко С.А., Писарев М.С.  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» им. академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск,  
e-mail: avva@ted.ch70.chel.su

В работе обсуждены практические проблемы дефектности для различных вариантов конструкций из легких сплавов титана ОТ4 и алюминия АМгб при ручной и автоматической аргонодуговой сварке. Рассмотрены типичные поверхностные и объемные дефекты в сварных швах конструкций со сквозным проваром, изучены причины их возникновения, а также предложен ряд технологических мер и конструктивных решений по их предотвращению с применением, в том числе, математического моделирования термического цикла сварки [1].

Эти меры позволили во всех рассмотренных случаях предотвратить дефекты аргонодуговой сварки в виде пор, подрезов, непроваров, вогнутостей шва и избыточного провисания его корня, а также хрупких фаз в ОШЗ, оксидных плен в шве и недопустимых цветов побежалости. Разработанные технологические меры включают: применение специальных приспособлений [2]; временные перерывы в многопроходной сварке; применение нового метода сварки за один проход с применением сварочной проволоки [3]; регламентированное смещение шва относительно стыка, а также изменение технологических процессов, вызванное усовершенствованием разделки кромок соединений.

Примененный подход в виде усовершенствования и разработки принципиально новых конструкций сварных соединений из сплава АМгб основан на моделировании разделки сварочных кромок в части изменения размеров и углов, обеспечивающих контролируемое и бездефектное формирование корня шва [4].

Эффективность разработанных мер предотвращения дефектов подтверждена результатами системных исследований и направлена на обеспечение равнопрочности соединений при сварке со сквозным проваром и контролируемым формированием корня шва на весу или на подложке.

### Список литературы

1. Гареев И. С., Собко С. А., Писарев М. С. Прогнозирование зоны разрушения сварного соединения пластин из титанового сплава ОТ4 // Сварочное производство. – 2021. – №3. – С. 37-42.
2. Собко С.А., Гареев И.С., Писарев М.С., Брунеткина Е.В. Моделирование тепловых процессов при аргонодуговой сварке // Сварочное производство. – 2013. – №4. – С. 6-10.
3. Гареев И.С., Лобанов С.Н., Писарев М.С., Собко С.А. Технологические особенности сварки корпусных конструкций из титанового сплава ОТ4 // ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ: Труды IV Всероссийской конференции. – Москва, 2018. – С. 356-362.
4. Способ автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом: Пат. 2650463 Россия, МПК В23К 33/00, В23К 9/23. Госкорпорация "Росатом", ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина / Гареев И.С., Писарев М.С., Лобанов С.Н., Собко С.А., Филимоненко А.Г. №2017102809; Заявл. 27.01.2017; Опубл. 13.04.2018.

## **ИЗДЕЛИЯ ИЗ СПЛАВА ВТЗ-1 ДЛЯ ГАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Негодин Д.А., Поздеев С.А., Харьковский Д.Н., Лапина Н.А.  
АО «Чепецкий механический завод», г. Глазов, DNKharkovsky@rosatom.ru

В АО ЧМЗ ведётся разработка технологии изготовления изделий из высокопрочного сплава титана марки ВТЗ-1, предназначенных к использованию в газоразделительных центрифугах нового поколения.

К данным изделиям предъявляются высокие требования по механическим свойствам, структуре, качеству поверхности и точности размеров.

Для получения данных изделий в АО ЧМЗ освоена технология изготовления из слитков сплава ВТЗ-1 прутковых заготовок, обладающих необходимым уровнем физико-механических свойств.

В ходе математического моделирования процесса финишного формоизменения рассчитаны необходимые параметры кузнечно-прессового оборудования и режимы деформации: скорости, температура, усилия.

Опробованы кооперационные схемы изготовления изделий с применением штамповки и торцевой раскатки.

Методом штамповки изготовлено 1500 тыс. комплектов изделий, соответствующих требованиям. В данный момент проводится работа по отработке режимов торцевой раскатки. При получении положительных результатов данная технология может использоваться в качестве альтернативы штамповке. Ведутся работы по поиску других методов получения данных изделий.

**СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ**

**СЕКЦИЯ №3**

**«ОБРАЩЕНИЕ С ОЯТ И РАО В ЗЯТЦ,  
ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯРОО И  
СПЕЦИАЛЬНАЯ ХИМИЯ»**

## **НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОБРАЩЕНИЯ С РАО ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ УРАНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА АО ЧМЗ**

Полянский А.И., Касимова Р.А.

АО «Чепецкий механический завод», 427622, УР, г. Глазов, ул. Белова, д.7

В связи с остановкой уранового производства в АО ЧМЗ, вывод из эксплуатации объектов, входящих в состав ЯУ, приводит к образованию значительного количества радиоактивных отходов (РАО). В начале вывода из эксплуатации корпусов в больших объемах образуются твердые радиоактивные отходы: черный и цветной металлолом, в том числе гуммированный, футерованный, окрашенный и т.д., а также сгораемые отходы: графит, пластик, дерево, изоляция кабелей и т.д.

В настоящее время в АО ЧМЗ металлолом, отнесенный к РАО, поступает в корпус 403 цеха № 04 для дезактивации кислотной отмывкой. Максимальная производительность участка составляет 720 т металлолома в год. Недостатки метода: неэффективная дезактивация сложнопрофильного, нержавеющей, цветного, окрашенного, футерованного и гуммированного металлолома. А также невозможность увеличения производительности.

С целью снижения объемов РАО в АО ЧМЗ, образующихся при ВЭ, необходимо создание комплексного участка по переработке ТРО на базе цеха № 04 корпуса 208 с использованием участка дезактивации корпуса 403, включающего разделку, сжигание и переплав.

Для решения поставленных задач была разработана технология переработки РАО методом индукционного переплава.

По разработанной технологии переработка и утилизация металлических ТРО осуществляется путем разделки и фрагментации загрязненного оборудования, глубокой малоотходной дезактивации, переплавки скрапа под слоем специальных рафинирующих флюсов и контроля радиоактивной загрязненности на всех стадиях переработки. В процессе переплавки в шлаке накапливается радиоактивный металл, который находится на поверхности расплавленного металла. Шлак удаляется с поверхности расплава, гасится, разделяется на металл и пульпу. Пульпа передается на хвостохранилище. Металл разливается в изложницы, далее после дозиметрического контроля направляется на металлургические предприятия, где используется в качестве шихтовых слитков при выплавке сталей и сплавов. Шихтовые слитки металла являются экологически безопасными при их любой последующей переработке.

Переработка сгораемых ТРО осуществляется путем сжигания, что позволяет успешно решать задачу сокращения объема отходов, а также обеспечивать надежную очистку отходящих газов.

Создание комплекса на базе корпуса 208 позволит достичь необходимых объемов переработки ТРО, образуемых при выводе из эксплуатации ОИАЭ и РЗТ на площадях АО ЧМЗ. Следует отметить, что комплексом по переработке ТРО предусматривается частичный возврат затраченных средств путем реализации коммерческого металла в виде заготовок для проката или металлолома.

## **ЗАПУСК УСТАНОВКИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПИРОГИДРОЛИЗА ГЕКСАФТОРИДА УРАНА, ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Быкова Е.А., Скомороха А.Е., Кузнецов А.И., Ушаков Е.В.  
АО «МСЗ», г. Электросталь, EAnBykova@rosatom.ru

В АО «МСЗ» порошок диоксида урана производится по нескольким различным технологиям, наиболее перспективными считаются так называемые «сухие». В 2019 году была запущена новая установка, работающая по «сухой» технологии восстановительного пирогидролита гексафторида урана (ВПГУ). Введение на предприятии установки ВПГУ произведено с целью замещения устаревшей газопламенной технологии, существующей на предприятии с 70-х годов прошлого века.

В рамках данной работы проведена оптимизация технологических режимов изготовления порошков диоксида урана на установке ВПГУ при выводе установки на проектную мощность. В процессе оптимизации подобраны режимы, обеспечивающие получение требуемого качества порошка при заданной производительности установки.

Изготовление порошка  $UO_2$  велось на подобранных режимах в соответствии с принятыми технологическими инструкциями. Были проанализированы физико-химические (химический состав, кислородный коэффициент, содержание влаги, полная удельная поверхность) и технологические свойства изготовленных порошков (гранулометрический состав, насыпная плотность, текучесть, «прессуемость», «спекаемость»). Дополнительно была проанализирована морфология порошков  $UO_2$  методом растровой электронной микроскопии.

Партии изготовленных порошков удовлетворяют требованиям технологических условий. С помощью расчёта индексов воспроизводимости технологических процессов была проведена оценка стабильности технологического процесса установки ВПГУ.



## ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ МОНАЦИТСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Величкина Н.С., Кольцов В.Ю., Юдина Т.Б., Власова Т.В., Звонарева М.Е.  
АО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии»,  
г. Москва, natalia.velichkina@gmail.com

Ключевые слова: монацит, гранульная сульфатизация, сорбция, редкоземельные металлы.

Одним из основных источников получения РЗМ в настоящее время является монацит. В монаците обычно содержится до 60 % РЗМ и до 10 % оксида тория.

Однако источником получения РЗМ могут быть также и техногенные отходы. Так, например, при переработке россыпных золоторудных месторождений образуется большое количество монацитсодержащих техногенных отходов, переработка которых с одной стороны является важной экологической задачей, а с другой стороны они являются сырьем для получения РЗМ.

Наиболее распространенный способ переработки монацитсодержащего сырья – это сернокислотный метод, при котором в продуктивный раствор переходят редкоземельными металлами (РЗМ), а также сопутствующие им природные радионуклиды. Этот метод имеет ряд недостатков, которые могут быть устранены с использованием современного метода переработки – гранульной сульфатизации.

**Цель работы** – разработка технологии получения товарного РЗМ-концентрата из монацитсодержащих отходов.

### **Основные задачи:**

- выделения радионуклидов тория и урана в виде индивидуальных концентратов;
- получение концентрата редких земель, не содержащего радионуклиды.

### **Результаты и выводы**

1. Разработан способ переработки монацитсодержащего сырья, в том числе и техногенных отходов, включающий следующие методы: гранульную сульфатизацию; выщелачивание РЗМ, тория и урана; сорбцию урана и тория из продуктивного раствора; последующее выделение из очищенного раствора концентрата редких земель.

2. Разработана схема совместной сорбционной дезактивации раствора от урана и тория. Выбран сорбент для извлечения этих элементов.

3. Проведены исследования на представительной пробе гравитационного монацитсодержащего концентрата.

Получены следующие показатели по извлечению ценных компонентов:

- Сульфатизация и выщелачивание: РЗО – 94-98 %, Th – 90 %, U – 95 %.
- Сорбция: Th – 95 %, U – 95 %.

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОННОГО МЕТОДА ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ МАССЫ ДЕЛЯЩИХСЯ НУКЛИДОВ В ОТРАБОТАВШЕМ ЯДЕРНОМ ТОПЛИВЕ

Бежунов Г.М., Рыков Н.С., Рязанов Б.Г.  
АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», г. Обнинск, nrykov@ipre.ru, 8(484)39-43-22

Разработана установка для измерения массы ядероопасных делящихся нуклидов (ДН) в тепловыделяющих сборках (ТВС) и их частях со свежим или облученным ядерным топливом на основе импульсного нейтронного метода. Измерения выполняются путем регистрации временным анализатором импульсов от мгновенных и запаздывающих нейтронов делений ДН в ОЯТ, инициируемых импульсным нейтронным генератором.

Показано, что применение типичных импульсных нейтронных систем для измерения массы ДН в ТРО [1,2,3] с регистрацией тепловых или надкадмиевых нейтронов после импульсного введения быстрых нейтронов в измерительную камеру с контейнером с ТРО не позволяет проводить аналогичные измерения для объектов с значительным количеством ядерного материала в виде плотных ТРО больших объемов. Разрабатываемая система «СКАТ» предполагается для измерения таких объектов.

Выполнены сравнительные измерения для ГСО в виде усеченной модели ТВС реактора РБМК-1000 с длиной активной зоны 1 м и обогащением урана по U-235 2,48 % масс. на установке [2] для измерений массы ДН в ТРО и на макете системы «СКАТ». При удалении двух твэлов из центральной части ТВС (11 % массы урана) система [2] зарегистрировала изменение массы ДН в ТВС на 4 %, система «СКАТ» - на 9,6 %.

В расчетных исследованиях показано, что при увеличении обогащения урана по U-235 до 4,4 % масс. в ТВЭЛ, результат для системы «СКАТ» совпал с реальным значением массы ДН в ТВС в пределах 10 %.

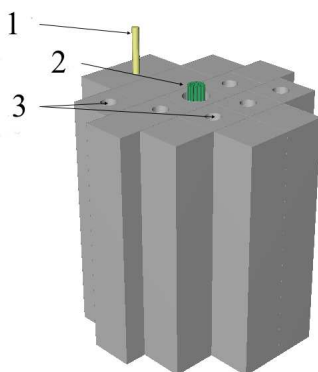


Рисунок 1. Система «СКАТ»  
где: 1 – Трубка ИНГ,  
2 – ГСО ТВС РБМК,  
3 – каналы для счетчиков  
нейтронов

Макет системы «СКАТ» приведен на рисунке 1. Высота полости для размещения измеряемого объекта или его части 1 м. Система с использованием ИНГ мощностью  $5 \cdot 10^8$  н/с позволяет проводить измерения при уровне нейтронного фона из измеряемого участка ТВС до  $10^6$  н/с, который характерен для «выгоревших» ТВС.

Параметры системы были рассчитаны и оптимизированы с помощью расчетов по программе MCNP, основанной на методе Монте-Карло.

Представленная система работает в двух режимах:

- Определения массы ДН в свежих и отработанных ТВС;
- Оценки относительного содержания основных ДН в топливе (U-235 и Pu-239).

В настоящее время проводятся расчетно-экспериментальные исследования по оптимизации параметров системы СКАТ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко В.С., Федоров В.С., Воробьев А.В. Установка с импульсным нейтронным генератором для измерения делящихся материалов в отходах. Труды Российской международной конференции по УиК и ФЗ ЯМ. Обнинск, 9-14 марта, 1997 г., с. 317.
2. Бежунов Г. М., Рыков Н. С., Рязанов Б. Г. Разработка малогабаритной импульсной нейтронной системы измерения массы делящихся нуклидов в твердых радиоактивных отходах. 2021, в печати редакции журнала ВАНТ.
3. Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials. U.S.NRC, NUREG/CR-5550; Ed.D.Reilli, N.Ensslin, H.Smith, Jr. and S. Kreiner. LA-UR-90-732. - March, 1991.

# ОЦЕНКА РАДИОНУКЛИДНЫХ СОСТАВОВ И РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСЧЕТНОГО КОДА TRACT

Блохин П.А., Казиева С.Т.  
ИБРАЭ РАН, Москва, kazieva@ibrae.ac.ru

Для планирования и анализа возможных сценариев обращения с облученными материалами при выводе из эксплуатации реакторных блоков АЭС необходимо проведение предварительных оценок содержания радионуклидов и радиационных характеристик на момент останова реактора и в процессе выдержки. Цель работы – оценка значений радиационных характеристик основных конструктивных элементов ЯЭУ типа ВВЭР для различных времен эксплуатации и выдержки. Для достижения этой цели в данной работе проанализированы исходные данные по материалам конструкций, режимам облучения и нейтронным спектрам реакторов типа ВВЭР-440, 1000 и 1200 [1-4].

Расчетные исследования активируемости конструкций проведены с использованием программного комплекса TRACT [5] в состав которого входит собственный набор библиотек ядерно-физических данных, содержащий библиотеку активационных ядерных сечений, скомпонованную на основе библиотек EAF-2010 и БРОНД-3/А, библиотеку распадных данных (ENDF/B-VII.1 и JEFF-3.3), библиотеку по выходам продуктов деления (ENDF/B-VII, UKNDL, JEFF-3, CENDL, JENDL, BROND) и т.д. [5].

На рисунке 2 представлены результаты расчетов изменения удельной активности в течение 1000 лет после останова реактора для основных конструктивных элементов ВВЭР-440.

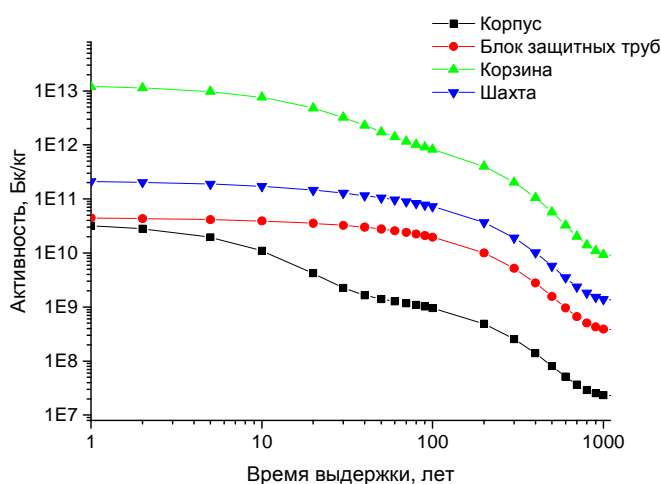


Рисунок 2 - Изменение удельной активности внутрикорпусных устройств (корзины, шахты, блока защитных труб) и корпуса реактора ВВЭР-440 (время облучения - 45 лет)

Результаты расчетов по изменению удельного энерговыделения и его составляющих для сплава Э-110 оболочки ОТВС ВВЭР-440 (время облучения – 3 года) [6] представлены на рисунке 3.

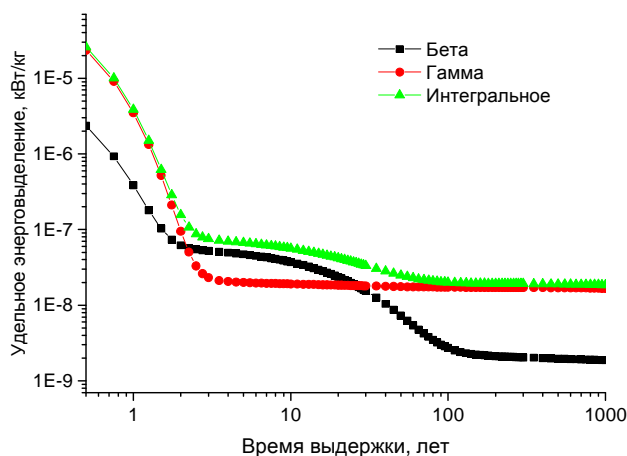


Рисунок 3 - Изменение удельного интегрального энерговыделения и энерговыделения от бета- и гамма- излучения оболочек ОТВС ВВЭР-440 (сплав Э-110)

Результаты проведенных расчетных оценок радиационных характеристик конструкционных материалов реакторов типа ВВЭР можно использовать для проведения дальнейшего анализа и прогнозирования возможных сценариев обращения с облученными конструкционными материалами.

#### Список литературы:

1. Былкин Б.К., Егоров А.Л., Журбенко Е.А., Цофин В.И. Ж.АЭ, 2009. Т.106, с.56.
2. Овчинников Ф.Я., Семенов В.В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. М., Энергоатомиздат, 1988, 359 с.
3. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций [Текст] / В.П. Денисов, Ю.Г. Драгунов. - Москва : ИздАТ, 2002. - 477 с.
4. Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Рудик А.П. Справочник по образованию нуклидов в ядерных реакторах. –М.: Энергоатомиздат, 1989. 576 с.
5. Блохин А. И., Блохин П. А., Сипачев И. В. Возможности расчетного кода TRACT для решения задач характеризации радионуклидного состава РАО и ОЯТ // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2 (3). — С. 95—104.
6. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Ружанский П. А., Сидоренко В. Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1983 - 382 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТАДИЙ КИНЕТИКИ СОРБЦИИ АМЕРИЦИЯ-241 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСТРАКЦИОННОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДОФАЗНОГО ЭКСТРАГЕНТА НА ОСНОВЕ ТОДГА

Савельев А.А.<sup>1,2</sup>, Клочкова Н.В.<sup>1</sup>  
АО «ВНИИХТ»<sup>1</sup> г. Москва, НИЯУ «МИФИ»<sup>2</sup> г. Москва  
e-mail: AASavelev@mephi.ru

Определение оптимальных характеристик экстракционного аппарата с использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА необходимо для эффективного использования емкостных показателей экстрагента в течении его эксплуатации. При исследовании стадий кинетики экстракции с использованием опытных модифицированных образцов ТВЭКС ТОДГА, была определена лимитирующую стадия, которая характеризует общую скорость процесса [1]. В ходе сравнительного анализа был выбран наиболее эффективный тип экстракционного аппарата. Использование экстракционной колонны с противоточным движением фаз позволяет создавать достаточно высокую скорость переноса вещества из раствора к поверхности сорбента и отсутствие, или слабое влияние диффузионного пограничного слоя на диффузию [2]. Проведена оценка зависимости скорости экстракции от величины коэффициентов разделения америция-241 с различным радионуклидным составом растворов ОЯТ. Показана возможность сокращения объема ТВЭКС ТОДГА и оптимизация времени процесса при проведении экспериментов по экстракции с использованием экстракционной колонны с противоточным движением фаз.

1. Клочкова Н.В., Савельев А.А., Позднякова Н.Ю., Писаненко С.С. Ананьев А.В. // Исследование сорбции америция из модельных растворов жидких радиоактивных растворов с использованием твердофазного экстрагента на основе ТОДГА. *Атомная энергия*. 2019. Т. 127. № 1. с. 35–39. doi: [10.1007/s10512-019-00581-7](https://doi.org/10.1007/s10512-019-00581-7)
2. Савельев А.А., Клочкова Н.В., Рачков В.И. // Определение коэффициентов диффузии америция и урана в процессе их сорбции на твердофазном экстрагенте на основе ТОДГА. *Вестник "НИЯУ МИФИ"*. 2020. Т. 9. № 4. с. 293–297. doi: 10.1134/S2304487X20040070

# СОЗДАНИЕ И ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ-ИМИТАТОРОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ U, Pu И Am С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАБИЛЬНЫХ Се И Eu ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДА ЛАЗЕРНОЙ ДЕЗАКТИВАЦИИ

Щербаков К.А., Шитова Е.С., Пеганов Е.А., Ким С.Д., Михейкин С.В.,  
Парабин П.В.

АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара», г.Москва  
KAScherbakov@bochvar.ru

При эксплуатации и выводе из эксплуатации ЯРОО образуется радиоактивные загрязнения поверхности, что создает большие проблемы в области обеспечения радиационной безопасности сотрудников, кроме того стоимость обращения с загрязненным материалом резко возрастает. В таких случаях целесообразным является дезактивация поверхностей. Разработка новых методов дезактивации связана с использованием дорогостоящего лабораторного оборудования. Для того чтобы избежать такого эффекта имеет смысл использовать модельные образцы со стабильными имитаторами загрязнения.

В настоящей работе обоснован выбор в качестве моделируемых радиоактивных загрязнений на образцах нержавеющей стали марки 08X18H10T для урана (U), плутония (Pu) и америция (Am). Ввиду схожих физических свойств в качестве имитаторов U и Pu предлагается использовать стабильный изотоп церия - ( $^{140}\text{Ce}$ ), а в качестве Am стабильный изотоп европия – ( $^{153}\text{Eu}$ ).

Подготовка образцов проводилась в три этапа: подготовка поверхности, выдержка в растворе нитратов соответствующих имитаторов и термическая обработка при температуре денитрации данных соединений (рисунок 1).

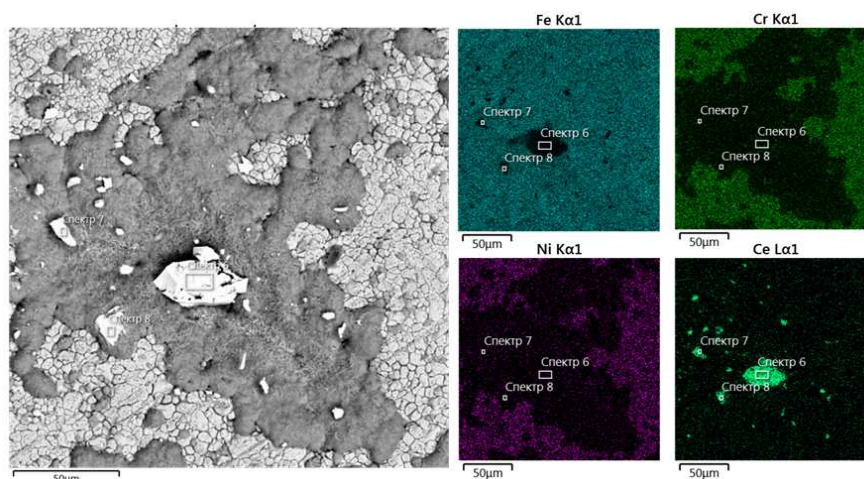


Рисунок 1 – Поверхность металлического образца (сталь 08X18H10T) с картированием основных элементов и включениями оксида Се

Образцы с модельными загрязнениями подвергались лазерной и химической очистке, имитирующие процесс дезактивации. Исследования микроструктуры и

химического состава до и после очистки на растровом электронном микроскопе (SEM) с приставкой для энергодисперсионного анализа (EDX) и методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) показали, что образцы имитаторов могут быть использованы для оценки эффективности дезактивации. В ходе исследований изучен характер распределения элементов и их соотношение до и после очистки. Далее в качестве имитаторов для U и Pu будут использованы стабильный изотоп церия - ( $^{140}\text{Ce}$ ), а в качестве имитатора для Am – стабильный изотоп европия- ( $^{153}\text{Eu}$ ).



## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТАЛЛИЯ ИЗ ЕГО ГАЛОГЕНИДОВ МЕТАЛЛОТЕРМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Сосков О.В., Демина А.Ю., Кузнецов М.С., Зараменских К.С.,  
Пимкин Н.А., Морозов М.В.

АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт  
редкометаллической промышленности «Гиредмет», Москва,  
olegsoskov0904@gmail.com

Монокристаллы на основе галогенидов таллия находят ряд применений в различных областях техники благодаря уникальным оптическим и электрофизическим свойствам, химической и радиационной стойкости. Прозрачность в диапазоне длин волн 0,5-50 мкм обуславливает интерес к кристаллам твердых растворов галогенидов таллия (в частности, состава  $TlBr-TlI$ ) с целью их использования в спектроскопии, при изготовлении объемных оптических элементов (окна, линзы, призмы, полупрозрачные зеркала) для приборов инфракрасной и лазерной техники ИК-диапазона. Детекторные элементы на основе полупроводникового бромида таллия перспективны для использования в гамма-спектрометрах и дозиметрах - мобильном оборудовании дистанционного неразрушающего радиационного обследования и контроля, в том числе для учета РАО, мониторинга радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Однако, некоторые сферы применения солей таллия в настоящее время не развиваются и не требуют новых высокочистых кристаллов. В частности, эта проблема касается хлорсодержащих галогенидов таллия, таких как  $TlCl$  и  $TlCl-TlBr$ , ранее используемых в радиаторах счетчиков Черенкова. Это сформировало излишек заготовок и синтезированных компонентов, которые не могут быть утилизированы в связи с высокой токсичностью таллия, а технологии их переработки для вторичного использования таллия, как и методы восстановления из них исходных компонентов отсутствуют.

Целью работы является изучение процессов восстановления таллия из его хлорсодержащих галогенидов и выбор оптимального метода для последующего применения на предприятии, обеспечивающего максимальный выход по металлу, и минимальные экономические и технологические затраты.

Экспериментально опробованы и оптимизированы процессы восстановления таллия гидрохимическим методом, электролизом водного раствора, электролизом расплава хлорида таллия и металлотермическим методом. Сравнение их эффективности продемонстрировало преимущества магниетермического способа восстановления таллия, который обеспечил выход по продукту 96-98%, высокую производительность, а также достаточную чистоту полученного металла – более 99,5%. Из полученного магниетермией таллия синтезирована шихта системы  $TlI - TlBr$ , из которой после цикла очистки выращен монокристалл КРС-5 оптического качества, что свидетельствует о потенциале дальнейшего применения данного метода на производстве.

## ЭКСТРАКЦИОННАЯ ОЧИСТКА УРАНА ОТ ИМИТАТОРОВ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ ИЗ КАРБОНАТНЫХ СРЕД КАРБОНАТОМ МЕТИЛТРИОКТИЛАММОНИЯ

Франкив С.О., Червяков Н.М., Бояринцев А.В., Степанов С.И.  
РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва. email: naton\_frank@mail.ru

В технологии переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) одной из важных задач является выделение и очистка делящихся материалов от примесей продуктов деления (ПД). В последние десятилетия во всем мире возрос интерес к разработке альтернативных не кислотных водно-химических методов для переработки ОЯТ [1-4]. Во всех этих методах предполагается переход от азотнокислых к карбонатным или карбонатно-щелочным средам. Одним из таких методов, разработанным в РХТУ им. Д.И. Менделеева, является КАРБЭКС процесс (КАРБонатная ЭКСтракция) в котором, для выделения очистки урана и плутония от примесей ПД предложено использовать метод жидкостной экстракции. Стадия экстракционной переработки карбонатных растворов с использованием в качестве экстрагента карбоната метилтриоктиламмония (МТОА) включает два последовательных цикла: 1) извлечение/частичная очистка U/Pu от примесей; 2) глубокая очистка U/Pu от примесей.

В работе представлены результаты проведения лабораторных испытаний экстракционной переработки урансодержащих многокомпонентных карбонатных растворов содержащих примеси имитаторов нерадиоактивных ПД (Cr, Mn, Cu, Sr, Te, Cs, Sn, Sb, Mo, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Re, Al, Y, Nd) на многоступенчатом противоточном каскаде, состоящем из двух циклов (извлечение и очистка) в режиме экстракция-промывка-реэкстракция с применением карбоната МТОА. На основании проведенных испытаний проведена оптимизация схемы экстракционной переработки карбонатных растворов, образующихся после окислительного растворения шихты имитатора уранового оксидного ОЯТ. Полученные в работе значения величин коэффициентов очистки урана от ряда примесей имитаторов ПД, а также от натрия составили  $10^4$ – $10^6$ , что подтверждает высокую эффективность экстракционного способа для выделения и очистки урана из карбонатных растворов в КАРБЭКС процессе.

### Список литературы

1. Asanuma N., Harada M., Ikeda Y., Tomiyasu H. *New approach to the nuclear fuel reprocessing in non-acidic aqueous solutions // Journal of Nucl. Sci. Technol.* 2001. Vol. 38. Iss. 10. P. 866–871.

2. Kim K.W., Chung D.Y., Yang H.B., et al. *An oxidative leaching of uranium in a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> system for a recovery of U alone from spent fuel without TRU // GLOBAL 2009. 2009. Annual Meeting.*

3. Soderquist C.Z., Johnsen A.M., McNamara B. K., Hanson B.D., Chenault J.W., Carson K.J. and Peper S.M. *Dissolution of Irradiated Commercial UO<sub>2</sub> Fuels in Ammonium Carbonate and Hydrogen Peroxide // Industrial & Engineering Chemistry Research.* 2011. №50. P. 1813–1818.

4. Степанов С.И., Чекмарев А.М. *Концепция переработки отработавшего ядерного топлива // Доклады АН.* 2008. Т. 423. № 1. С. 1–3.

## РАЗРАБОТКА ПОЛИМЕРНОГО ДЕЗАКТИВИРУЮЩЕГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ГИДРОГЕЛЯ, ОБЛАДАЮЩЕГО СВОЙСТВАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ВЯЗКОСТИ

Поляков А.А., Михейкин С.В., Широков С.С., Парабин П.В.  
АО ВНИИНМ имени академика А.А.Бочвара г.Москва  
pyds1809@gmail.com

При выборе метода дезактивации приходится сталкиваться с тем, что на ряде предприятий отсутствует система обращения с ЖРО, а в некоторых случаях образование ЖРО и вовсе является недопустимым. В таких случаях решением является применение для дезактивации механических методов или пленкообразующих составов, в результате использования которых образуются ТРО в виде отработавших пленок.

В рамках настоящей работы осуществлен синтез исходных полимерных композиций гелевой композиции нового поколения. В качестве основного пленкообразующего полимера использовался хорошо изученный поливиниловый спирт. Рассмотрены как однокомпонентные (ПВС, альгинат натрия, агар, гуаровая камедь, поливинилпирролидон), так и многокомпонентные (ПВС-тетраборат натрия, ПВС-Агар, ПВС-Гуаровая камедь, ПВС-Полиэтиленгликоль, ПВС-Поливинилпирролидон, ПВС-Глутаровый альдегид-Хитозан) составы. Исследованы их пленкообразующие свойства, способность к декапированию, самодеструкция, прочностные характеристики и адгезионные свойства синтезированных составов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Полученные пленочные покрытия

Изучено влияние массовой доли исходных компонентов на физико-механические свойства полимерных композиций и исследована совместимость композиций с травильными агентами и комплексообразователями.

Проведены предварительные испытания по удалению прочнофиксированных загрязнений с поверхности (рисунок 2).



Рисунок 2 – Процесс удаления пленки с загрязненной поверхности

Показано, что необходимыми реологическими свойствами обладают два состава: ПВС-тетраборат натрия и ПВС-Глутаровый альдегид-Хитозан.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СИНТЕЗА МЕТАЛЛ-ОРГАНИЧЕСКОЙ КАРКАСНОЙ СТРУКТУРЫ UIO-66

Вергун В.В.

АО «Гиредмет», ИОХ РАН г. Москва polubrat@mail.ru

Металлорганические каркасы – перспективные материалы, имеющие оригинальные свойства, высокую удельную поверхность, пористость и термостабильность [1], что позволяет использовать их в различных сферах промышленности. Важным направлением исследования этого класса веществ является их применение для очистки жидкостных [2] и газовых [3] сред от радионуклидов путем селективной сорбции последних. Перспективным вариантом среди этого класса соединений является структура UIO-66, представляющая из себя  $Zr_6$ -кластеры соединяемые бензолдикарбоксилатными линкерами, демонстрирующая высокие показатели при сорбции U(VI) из разбавленных водных растворов [2]. UIO-66 выделяется особенно высокой стабильностью - структура устойчива неограниченно длительное время в кислых водных растворах [4].

Перспективы промышленного применения UIO-66 ограничены тем, что в рамках классических методов синтез ведется сольвотермально из растворов N,N-диметилформамида – дорогостоящего, токсичного, трудного в регенерации растворителя. В качестве источника циркония используется его тетрахлорид – коррозионное, дорогостоящее вещество.

В рамках нашей работы разработан метод синтеза UIO-66 в менее токсичном ацетоне. В качестве источника циркония использованы менее дорогие его соединения - сульфатоцирконат натрия гидрат  $Na_4Zr(SO_4)_4 \cdot 3H_2O$  и цирконилсерная кислота  $H_2Zr(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$ . Выявлена возможность синтеза при атмосферном давлении и температуре кипения растворителя в условиях СВЧ-обработки реакционной смеси, что позволяет снизить время синтеза с 5 до 1 часа без существенной потери фазовой чистоты получаемого каркаса. Использование ацетона - значительно более летучего чем ДМФА, позволило проводить активацию без использования высокого вакуума путем нагревания каркаса в токе аргона при 250°C.

### Список литературы

1. X.L. Yang, Y. Zhang // Catal. Commun. 94 (2017) 9–12.
2. Jie Li, Xiangxue Wang, Guixia Zhao, Changlun Chen, Zhifang Chai, Ahmed Alsaedi, Tasawar Xiangke Wang Metal–organic framework-based materials: superior adsorbents for the capture of toxic and radioactive metal ions // Chem. Soc. Rev 47 (2018) p. 2322-2356
3. Sameh K. Elsaidi<sup>1</sup>, Mona H. Mohamed, Ahmed S. Radiation-resistant metal-organic framework enables efficient separation of krypton fission gas from spent nuclear fuel // NATURE COMMUNICATIONS 11 (2020) p. 3103
4. Jasmina Cavka, Søren Jakobsen, Unni Olsbye, Nathalie Guillou, Carlo Lamberti, Silvia Bordiga, Karl Petter Lillerud A New Zirconium Inorganic Building Brick Forming Metal Organic Frameworks with Exceptional Stability // J. AM. CHEM. SOC. 42, (2008) p. 13851

## ОКИСЛИТЕЛЬНОЕ РАСТВОРЕНИЕ $U_3O_8$ В КАРБОНАТНЫХ СРЕДАХ

Червяков Н.М., Франкив С.О., Бояринцев А.В., Степанов С.И.  
РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия.e-mail  
hixita@yandex.ru;

Стадия окислительного растворения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в растворах карбоната натрия или аммония является основной и определяющей в новых альтернативных некислотных подходах к переработке ОЯТ, активное развитие которых началось в 1990-2000 гг. в Японии [1] и позднее в Южной Корее [2], в США [3] и в России [4]. В России разработан способ переработки ОЯТ в карбонатных средах, который получил название КАРБЭКС процесс (КАРБонатная ЭКСтракция). Возможность быстрого и полного растворения основного компонента матрицы оксидного уранового ОЯТ – диоксида урана ( $UO_2$ ) в карбонатных растворах в окислительных условиях позволила обосновать карбонатные среды как альтернативу азотнокислым средам для переработки ОЯТ. В качестве подготовительной стадии перед растворением ОЯТ может быть высокотемпературное окисление (волоксидация), одной из задач которого является перевод  $UO_2$  в октаоксид триурана ( $U_3O_8$ ) и удаление газообразных, летучих радиоактивных продуктов деления. Температура волоксидации, в зависимости от поставленной задачи, может варьироваться от ~480 до ~1200°C.

В работе представлены результаты систематического изучения растворения образцов порошков  $U_3O_8$ , полученных в интервале температур 480-1200°C в водных растворах  $Na_2CO_3/NaHCO_3 - H_2O_2$  при различных условиях и режимах процесса. Показано, что в качестве альтернативного карбонатного и окислительного реагента для растворения  $U_3O_8$  может быть использован перкарбонат натрия ( $Na_2CO_3 \cdot 1.5H_2O_2$ ), который является общедоступным, крупнотоннажным и более безопасным реагентом по сравнению с концентрированными растворами пероксида водорода. Для всех изученных карбонатных систем установлены зависимости влияния температуры, а также концентрации реагента и окислителя на скорость и полноту растворения  $U_3O_8$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-63-46006.

### Список литературы.

1. Asanuma N., Harada M., Ikeda Y., Tomiyasu H. *New approach to the nuclear fuel reprocessing in non-acidic aqueous solutions // Journal of Nucl. Sci. Technol.* 2001. Vol. 38. Iss. 10. P. 866–871.

2. Kim K.W., Chung D.Y., Yang H.B., et al. *An oxidative leaching of uranium in a  $H_2O_2$ - $CO_3^{2-}$  system for a recovery of U alone from spent fuel without TRU // GLOBAL 2009. 2009. Annual Meeting.*

3. Soderquist C.Z., Johnsen A.M., McNamara B. K., Hanson B.D., Chenault J.W., Carson K.J. and Peper S.M. *Dissolution of Irradiated Commercial  $UO_2$  Fuels in Ammonium Carbonate and Hydrogen Peroxide // Industrial & Engineering Chemistry Research.* 2011. №50. P. 1813–1818.

4. Степанов С.И., Чекмарев А.М. *Концепция переработки отработавшего ядерного топлива // Доклады АН.* 2008. Т. 423. № 1. С. 1–3.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОБТИРОЧНОГО  
МАТЕРИАЛА, СОДЕРЖАЩЕГО ТЕХНИЧЕСКИЕ МАСЛА МЕТОДОМ  
ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ  
ВЗРЫВОПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ФГУП «ПО «МАЯК» В  
ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ**

Старовойтов Н.П., Коренев С.В., Дудкин В.А., Казаков В.А.

Федеральное государственное унитарное предприятие

«Производственное объединение «Маяк»

Россия, 456780, г. Озерск, пр. Ленина, д. 31,

e-mail: cpl@po-mayak.ru, starov-nik@yandex.ru

На ФГУП «ПО «МАЯК» проводится большая работа по решению вопросов обеспечения безаварийной работы пожаро- и взрывоопасных производств. Проблемы безопасности в настоящее время являются ключевыми.

В данной работе рассмотрены вопросы обеспечения взрывобезопасности процесса переработки твердых горючих отходов (таких как ткань ФПП, обтирочный материал) химико-металлургического производства, путем температурного воздействия.

Уточнена информация о том, что в действующей камере при переработке одновременно с одного кг твёрдых горючих отходов образуется газовая смесь (продукты разложения и поступающий воздух) с общим расходом более 50 м<sup>3</sup>/ч, а точнее - горючих газов 8,5-9,0 м<sup>3</sup>/кг и воздуха примерно 54,1-54,8 м<sup>3</sup>/кг, который участвует в окислении. Вся эта газовая смесь затем удаляются через подкамерное пространство и систему спецвентиляции. Возможностей системы спецвентиляции достаточно для удаления газовой смеси 63,1-63,3 м<sup>3</sup>/кг и разбавления горючей фазы 8,5-9,0 м<sup>3</sup>/кг до безопасных значений.

Показано, что максимально возможные объёмные концентрации горючих газов ( $C_{C_2H_2} = 0,001$  % об;  $C_{C_2H_4} = 0,4$  % об;  $C_{CO} = 1,3$  % об;  $C_{H_2} = 9,1 - 9,3$  % об) при процентном содержании азота выше 69 % не повлияют на безопасность процесса, если содержание кислорода не превысит по окончании процесса значение 5 % об. (при условии выполнения норм технологического режима эксплуатации).

Определено, что максимальная способность силикагеля поглощать продукты разложения масла не превышает 33,5 % по исходной массе продукта при соотношении масс образец и силикагель, как 1:10.

Установлено, что для эффективной работы силикагеля (поглощение продуктов пиролиза масла) время выдержки при температуре 350 °С необходимо установить в диапазоне от 77 мин до 120 мин.

Оценочно определено, что количество выделяющихся горючих газов с одного кг твёрдых отходов для ХБ+ВМ-4 и ФПП+ВМ-4 составило 39,3 % масс. из которых улетает через силикагель в спецвентиляцию 20,4 % об и 19,7 % об., соответственно.

Показано, что процентная доля горючих продуктов пиролиза (твёрдый углеродный остаток в виде золы, кокс, минеральные включения), осевших в виде отложений на охлаждаемых стенках в спецвентиляции может достигать значений от

2,6 % до 10,4 % от массы сжигаемого продукта, которая затем в результате испарения и осушения уменьшится до 0,3 % масс.

По результатам работы оптимизированы и обоснованы меры взрывопожаробезопасности применяемых на ФГУП «ПО «Маяк» процессов по сжиганию твёрдых отходов.

# СИНТЕЗ СТЁКОЛ В СИСТЕМАХ PbO-SiO<sub>2</sub>, PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПРОЗРАЧНЫХ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ

Бутенков Д.А.

АО «Гиредмет», ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Менделеева», Москва, dabutenkov@gmail.com

Свинцосодержащие оксидные стёкла – хорошо известные материалы, широко применяемые в качестве оптического клея, припоев для герметизации изделий, матриц для РЗЭ в фотонике и прекурсоров стеклокристаллических лазерных материалов[1]. Их важными достоинствами являются простота синтеза, дешевизна, возможности широкого варьирования свойств (показателя преломления, коэффициента линейного температурного расширения, температуры плавления) путём изменения валового состава исходной шихты и условий получения стекломассы [2].

Возможность введения в эти системы больших количеств оксида свинца открывает перспективы создания прозрачных радиационно-стойких материалов. Они могут быть использованы для изготовления смотровых окон реакторных установок, прозрачных боксов для работы с радиоактивными материалами[3].

В рамках нашей работы были синтезированы стёкла в системах PbO-SiO<sub>2</sub> и PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, легированные неодимом. Удалось получить качественные стёкла с содержанием оксида свинца до 70 мол. %. Синтез осуществляли в корундовых тиглях в муфельной печи ПМ-12М при температуре 1000 °С в течении 15 минут. Масса навески составляла 5 грамм, шихту готовили из реактивов марки ОСЧ. Отливку осуществляли в латунные формы. Характеристические температуры стёкол исследовали с помощью дифференциально-термического анализа на термоанализаторе SDT Q600 (TA Instruments, США). Показатель преломления определяли методом Лодочникова на микроскопе МИН-8, микротвердость стёкол измеряли на приборе ПМТ-3. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на дифрактометре D8 Advance (Bruker AXS Ltd.) с излучением CuK $\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) в диапазоне углов  $2\theta = 10 - 80^\circ$  при шаге сканирования  $0,01^\circ$  и экспозиции 2 с/шаг, обрабатывали данные с применением программного пакета EVA и TOPAS v.4.2. Спектральные исследования проводили при комнатной температуре, спектры поглощения – с помощью прибора UNICO 2800 (UV/VIS), спектры фотолюминесценции (ФЛ) – на спектрометре QE65000 (Ocean Optics) в диапазоне 800 – 940 нм при возбуждении 785 нм. КЛТР изменяли на кварцевом дилатометре Ботвинкина.

## Список литературы

1. Tanabe S. Spectroscopic studies on multiphonon processes in erbium doped fluoride and oxide glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. 1999. V. 256 – 257. P. 282 – 287.
2. Бутенков Д. А., Петрова О. Б. Синтез легкоплавких стёкол для склеивания деталей лазерной керамики на основе иттрий-алюминиевого граната // *Успехи в химии и химической технологии*. 2019. Т. 33, № 8. С. 7–9.
3. S. Vaccaro, Monika, G. Sharma, K.S. Thind, D.P. Singh. Variation of optical band gap with radiation dose in PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> glasses // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2008.V.266. P. 594-598.



## КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ РАДИОАКТИВНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В УСТАНОВКЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ МРО

Посажеников А.М., Воронин И.А., Скворцов С.С., Зуборева М.В., Саутин С.А.  
Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –  
Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского», Обнинск  
aposzhenikov@ippe.ru, ivoronin@ippe.ru, , iskvortsov@ippe.ru, sautin@ippe.ru

В настоящее время за рубежом и в России при термической переработке металлических радиоактивных отходов (МРО) используют различные методы дезактивации МРО: плазменный, индукционный, пирометрический, электродуговой и другие. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки. Применение каждого из методов переплава МРО сопровождается образованием радиоактивных аэрозолей и пыли, попадание которых в окружающую среду не допустимо. Одним из эффективных способов борьбы с такими радиоактивными примесями является фильтрация газовых потоков с использованием соответствующих систем очистки. Негативным фактором высокотемпературных технологий переработки радиоактивных отходов является высокая степень уноса в газовую фазу отдельных радионуклидов, которая, например, для  $^{137}\text{Cs}$  достигает 80-98 %.

Сравнение различных методов переплавки МРО по степени газовых выбросов показывает, что индукционный метод наиболее предпочтителен. Применительно к указанному способу переработки МРО потребовалась разработка многоступенчатой системы очистки отходящих газов.

В докладе представлена принципиальная компоновка системы газоочистки. В состав которой вошли циклонный фильтр, фильтры предварительной и высокоэффективной очистки.

Для проверки правильности выбранных решений на испытательном стенде были проведены испытания системы газоочистки на аэродинамические характеристики и испытания на эффективность очистки отдельных элементов. Результаты подтвердили достижение заложенных характеристик. Так испытания высокоэффективного фильтра показали высокую эффективность очистки - 99,95%.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ, ИМИТИРУЮЩИХ УСЛОВИЯ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОЯТ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000, НА ПЕРЕОРИЕНТАЦИЮ ГИДРИДОВ В ОБОЛОЧКАХ СПЛАВА Э110**

Курский Р.А.<sup>1</sup>, Забусов О.О.<sup>1</sup>, Рожков А.В.<sup>1</sup>, Сафонов Д.В.<sup>1</sup>  
Ruslan.kurskiy@rambler.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва

Темпы накопления отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), превышающие скорость его переработки, а также переполненность хранилищ мокрого типа представляет собой серьезную проблему в ядерно-топливном цикле. До момента полноценного запуска заводов по переработки ОЯТ решением данного вопроса является разработка и внедрение технологии сухого хранения, являющейся экономически выгодной, более безопасной и позволяющей увеличить сроки хранения более чем до 60 лет. При обосновании данной технологии для ОЯТ ВВЭР-1000 необходимо понимать механизмы деградации материала оболочек твэлов отечественного сплава Э110 на протяжении всего периода хранения, с учётом истории эксплуатации.

Одной из ключевых проблем в процессе сухого хранения, способной привести к деградации механических свойств оболочек твэлов и их разгерметизации, является переориентация гидридов. Как известно, в исходном состоянии до облучения в реакторе гидриды в оболочках твэлов имеют преимущественно окружную ориентацию, что связано с технологическим процессом изготовления оболочечных труб. Результатом взаимодействия оболочек твэлов с теплоносителем является образование оксида на поверхности оболочки и атомарного водорода, который может проникнуть внутрь оболочки. При постепенном охлаждении во время сухого хранения и достаточно высокой концентрации водорода, образуются хрупкие гидриды, ориентация которых определяется действующими полями напряжений и температур. Водородное охрупчивание может усилиться при наличии радиально направленных гидридов, образование которых вызвано действием растягивающих напряжений в оболочке за счет распухания топлива и выделения газообразных продуктов деления. При длительном хранении ОЯТ необходимо уметь прогнозировать долю радиальных и тангенциальных гидридов при различных температурах и напряжениях.

Для определения влияния параметров хранения на структуру гидридов и деградацию механических свойств материала оболочек твэлов были проведены термомеханические испытания, имитирующие условия сухого хранения, на облученных и необлученных образцах в диапазонах температур до 400°C, напряжений до 100 МПа и выдержкой до 100 суток. Переориентация гидридов в облученных образцах после термомеханических испытаний была значительно выше по сравнению с необлученными образцами. В некоторых образцах наблюдалось хрупкое разрушение и резкое падение механических свойств.

## РАЗРАБОТКА ЛЕГКОПЛАВКИХ СОСТАВОВ БОРОСИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ПЛАВИТЕЛЯ ДИЗАЙНА ФГУП «ПО «МАЯК»

Шайдуллин С.М.<sup>1,2</sup>, Козлов П.В.<sup>1,3</sup>, Ремизов М.Б.<sup>1</sup>, Джewelло К.А.<sup>1</sup>, Жиганов А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Производственное объединение «Маяк», г. Озерск, Челябинской обл.

<sup>2</sup>Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, г. Северск, Томской обл.

<sup>3</sup>Озерский технологический институт НИЯУ МИФИ, г. Озерск, Челябинская обл.

e-mail: cpl@po-mayak.ru

Ориентировочно в 2027 г. на ФГУП «ПО «Маяк» должен быть запущен новый комплекс остекловывания, универсальный по составу отверждаемых ЖРО. Согласно разработанной концепции в его составе предполагается использование двух эвакуируемых плавителей прямого электрического нагрева на алюмофосфатном стекле и эвакуируемого плавителя на боросиликатном стекле. Боросиликатное стекло характеризуется (по сравнению с алюмофосфатным) большей емкостью по отношению к продуктам деления, химической и радиационной стойкостью, устойчивостью к раскристаллизации. Они могут включать весь спектр ОЯТ при температурах на сотни градусов ниже тех, которые необходимы для аналогичных силикатных стекол, не содержащих бор. Например, температура расплава будет поддерживаться на уровне 1150 °С, в то время как стекловидные базальты потребуют температуры плавления около 1350 °С. При данной температуре ни один из летучих радионуклидов (например, Cs и Ru) не будет удерживаться в стекле [1]. Кроме того, коррозионное воздействие расплава стекла на конструкционные материалы плавителей напрямую зависит от температуры, причем зависимость эта носит нелинейный характер.

В свете сказанного особую актуальность приобретают исследования в области уменьшения температуры варки боросиликатных стекол и изучения химической устойчивости полученных стекол. Цель настоящей работы состоит в поиске наиболее устойчивого легкоплавкого состава боросиликатного стекла, предназначенного для нового малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк», разрабатываемого для нового комплекса остекловывания. В рамках данной работы были синтезированы пять составов боросиликатных стекол с содержанием оксида натрия от 17 до 25 %. Установлено, что температура варки стекол лежит в диапазоне от 950 °С до 1050 °С, а температура легкого слива от 1050 °С до 1150 °С. При увеличении содержания оксида натрия от 17 % до 25 % температура варки снижается на 100 °С. Приемлемой химической устойчивостью обладает стекло с минимальным содержанием оксида натрия в пределах изученного диапазона.

### Список литературы

1. *Thierry Advocat, Jean-Marc Delayve, Sylvain Peugot, Oliver Pinet, Xavier Deschanel, Nuclear glass formulation, structure and properties, Nuclear Waste Conditioning, 2009, P. 33-49.*

## **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ ПЕЧИ НЕПРЕРЫВНОЙ ПЛАВКИ РАДИОАКТИВНОГО СТАЛЬНОГО ЛОМА**

Посажеников А.М., Скворцов И.С., Зубарева М.В., Воронин И.А., Саутин С.А.  
Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –  
Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского», Обнинск  
aposzhenikov@ippe.ru, iskvortsov@ippe.ru, ivoronin@ippe.ru, sautin@ippe.ru

Вывод из эксплуатации объектов ядерной энергетики сопровождается образованием различного вида радиоактивных отходов которые различаются по агрегатному состоянию, уровню удельной активности, радионуклидом, химическому и физико-химическому составам и характеризуются различными сроками потенциальной опасности. При этом к категории радиоактивных отходов могут быть отнесены материалы, изделия, сооружения и т.п., имеющие поверхностное сверхнормативное загрязнение радионуклидами, неподлежащее дезактивации [1]. Отнесение этих отходов к радиоактивным исключает повторное использование, и такие материалы подлежат захоронению. Так на АЭС при штатном режиме работы накапливается примерно 1-2 тыс. т металлических радиоактивных отходов (МРО) в год [2]. Кроме того, при проведении ремонтных работ и работ по модернизации действующих объектов также образуется значительное количество МРО. К настоящему времени на предприятиях атомной энергетики накоплено более 600 тыс.т МРО [3].

Для сокращения объема металлических отходов применяют разные методы, такие как прессование, фрагментированные и переплав у каждого метода есть свои преимущества и недостатки. Однако одним из наиболее перспективных методов, позволяющий более чем на порядок сокращать объемы МРО, по сравнению с традиционными методами, является индукционный переплав.

Одна из основных проблем при создании индукционных печей, является подбор высокотемпературных материалов для теплоизоляции.

В докладе представлены результаты исследований теплоизоляционного высокотемпературного материала на основе микрокорундовых сфер после цикла непрерывной плавки стального лома и показаны его улучшенные теплоизоляционные свойства.

### **Список литературы**

1. *Нормы радиационной безопасности. НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09.* - М.: Минздрав России, 2009.- 115 с.
2. *Skomorokhova S.N., Nikolaev A.N., Askhadullin R.S.H., Trifanova E.M., Sitnikov I.V. The Immobilization Of The Ash Residue Produced As A Result Of Processing Radioactive Ion-Exchange Resins In A Lead Melt // Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences. 2016. T. 18. № 4. C. 1063-1069.*
3. *Cheremisin P. I. Treatment of metal waste contaminated with radioactive substances / waste Recycling. 2008. № 2 (14). C. 2 - 5.*

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПАЛЛАДИЯ ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ НА РАДИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Андрюшенко Н.А.

ФГУП «Горно-химический комбинат», г. Железногорск, tomskkorpus@mail.ru

В процессе переработки отработавшего ядерного топлива помимо выделения урана и плутония целесообразно также попутно выделять другие ценные компоненты. При введении в технологический процесс операции извлечения палладия можно выделить палладий в виде металла, в смеси с другими платиноидами или в виде устойчивых соединений.

Несмотря на то, что известные способы извлечения палладия опробованы в лабораторном и укрупненно-лабораторном масштабе, в технологию промышленной переработки отработавшего ядерного топлива не были внедрены по ряду причин: высокая радиоактивность технологических растворов, увеличение объемов маточных растворов и другие.

Для того, чтобы определить оптимальные условия проведения процесса извлечения палладия осадительным методом были исследованы параметры процесса введения восстановителя (нитрата гидразина) и комплексообразователя (аминоуксусной кислоты) в заранее подготовленный модельный раствор объемом 800 мл, содержащий 353 мг/л палладия, 30,2 мг/л урана, 29 мг/л технеция, 39,5 мг/л серебра, 547 мг/л циркония, 785 мг/л лантана, 1430 мг/л бария, 52 мг/л кадмия.

В нагретый до 90°C заранее подготовленный раствор вводили подогретый раствор аминоксусной кислоты с концентрацией 1,8 моль/л и, далее, при непрерывном перемешивании вводили со скоростью около 1,5%/мин раствор нитрата гидразина с концентрацией 5 моль/л. Затем реакционная смесь выдерживалась до окончания газовыделения. Отделенный осадок растворяли в 11,8 моль/л азотной кислоты. Концентрация палладия в растворе составила 248 г/л. Полученные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Концентрация гидразина, моль/л	нитрата	Мольный избыток аминоксусной кислоты, раз	Полнота выделения палладия, %
1		5	42
1,5		5,5	54
2		6,7	78
2,5		10	99,3

Дальнейшее увеличение концентрации нитрата гидразина и количества вводимой аминоксусной кислоты не приводит к увеличению полноты выделения палладия.

Романовский В.Н. Труды Радиевого института имени В.Г. Хлопина – 2014 – Том XVII – С. 3–4.

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАБОТ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ФГУП «ПО «МАЯК»

Антипьева М.В., Смирнова Е.В., Буева Е.Е.  
ФГУП «ПО «МАЯК», г. Озерск, cpl@mayak.ru

На ФГУП «ПО «Маяк» в рамках ФЦП «Обеспечение ядерной радиационной безопасности 2016 - 2025 и на период до 2030 года» ведутся работы по выводу из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов, являющихся «ядерным наследием». Комплексное инженерное и радиационное обследование (далее - КИРО) зданий и сооружений является необходимым мероприятием для получения информации об их техническом и радиационном состоянии. КИРО является ответственным этапом по обоснованию и планированию работ по выводу из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов.

Для получения данных о количественном и качественном составе РАО, которые образуются при выводе зданий из эксплуатации, необходимо определение радионуклидного состава и измерений удельной активности в пробах строительных материалов (песок, цемент, штукатурка, краска), грунта (донные отложения, ил), воды из скважин. Для этого разработаны и аттестованы методики измерений:

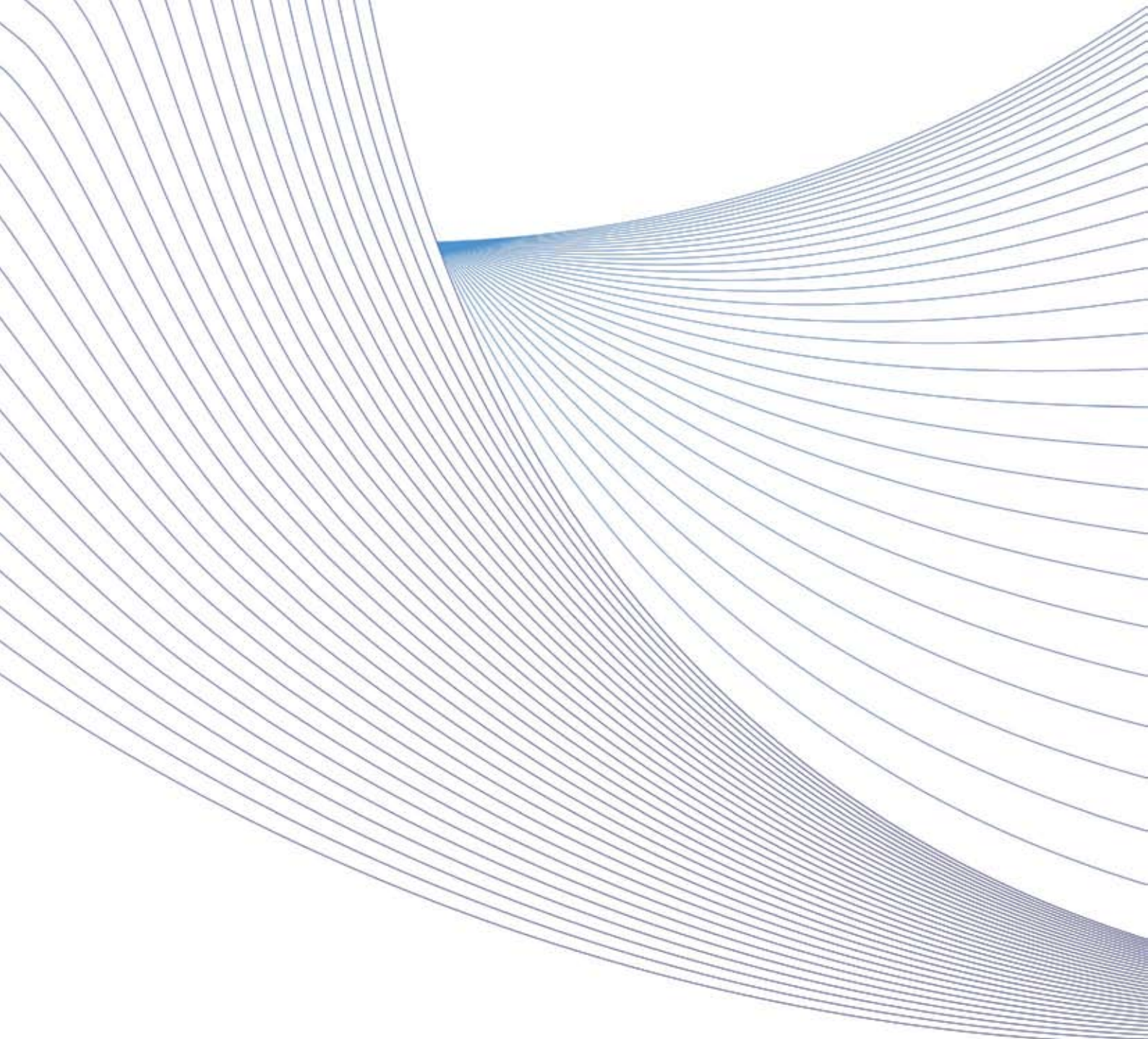
– Стронций-90. Методика измерений удельной активности в пробах строительных материалов и грунта»;

– Альфа-, бета-излучающие радионуклиды. Методика измерений удельной активности в пробах строительных материалов и грунта»;

– Цезий-137, кобальт-60, америций-241. Методика измерений объемной (удельной) активности радионуклидов в объектах окружающей среды и строительных материалах;

– Альфа-излучающие радионуклиды. Методика измерений удельной активности и определение состава в пробах строительных материалов и грунта.

Подготовка проб техногенных материалов заключалась в предварительном измельчении, высушивании и прокаливании пробы с последующим приготовлением счетных образцов: закрепление навески пробы на подложке - для установления активности альфа-, бета-излучающих радионуклидов радиометрическим методом; переводение пробы в суспензию с помощью глицерина с размером твердых частиц до 1 мкм - для измерений активности альфа-излучающих радионуклидов альфа-спектрометрическим методом; переводение пробы в раствор и выделение экстракционным методом дочернего радионуклида иттрий-90 с помощью моноизооктилметилфосфоновой кислоты (МИОМФК) из азотнокислой среды, в присутствии ионов трехвалентного железа для измерений удельной активности стронций-90. Удельную (объемную) активность радионуклидов в пробах техногенных материалов устанавливают расчетным методом по результатам измерений активности радионуклида в счетном образце с учетом массы навески пробы, коэффициентов, учитывающих самопоглощение альфа- и бета- излучения, потери при прокаливании пробы, выхода радионуклидов. В настоящее время выполнено КИРО 21 здания.



---

Акционерное общество  
«Высокотехнологический научно-исследовательский  
институт неорганических материалов имени академика  
А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»)  
ул. Рогова, д. 5а, Москва, 123098  
Телефон: (499) 190-89-99,  
факс: (499) 196-41-68  
E-mail: [vniinm@rosatom.ru](mailto:vniinm@rosatom.ru)

---