

**Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН
Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической
физики им. Е.И. Забахина
Научный совет по радиационной физике твёрдого тела ОФН РАН**

**Шестнадцатый Международный Уральский
Семинар**



**РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

2 – 6 марта

Тезисы докладов

Сысерть, Россия

2026



Шестнадцатый Международный Уральский Семинар

**РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

2 – 6 марта

Тезисы докладов

**Сысерть, Россия
2026**

ОРГАНИЗАТОРЫ



Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН



Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина



Научный Совет ОФН РАН «Радиационная физика твердого тела»

ООО «Сигнифика»

СПОНСОРЫ



Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина



ООО «Фирма Беккер»



ООО «Мелитэк»

Организационный комитет сердечно благодарит спонсоров за их поддержку Российской науки. Мы надеемся, что наша встреча будет способствовать расширению и укреплению научных контактов.

Сопредседатели Семинара

Г.Н. Рыкованов, академик РАН, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.В. Сагарадзе, чл.-корр. РАН, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

Оргкомитет

Председатель Оргкомитета: А.В. Макаров, академик РАН, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
Зам. Председателя: В.В. Дрёмов, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск,
Зам. Председателя: А.В. Козлов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург,
А.В. Варивцев, АО «Институт реакторных материалов», Заречный
А.Ф. Губкин, Российское нейтронографическое общество
Н.В. Гущина, ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург

Секретарь конференции

Д.А. Перминов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Учёный секретарь

Консультативный комитет

В.Я. Баянкин, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск
Н.В. Глушкова, АО «Институт реакторных материалов», Заречный
А.Г. Залужный, ИТЭФ, Москва
М.В. Леонтьева-Смирнова, ВНИИНМ, Москва
М.В. Садовский, ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург
Л.С. Талантова, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.Ф. Терещенко, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
Z.W. Zhang, Harbin Engineering University, Harbin, China

Программный комитет

Председатель комитета: С.В. Рогожкин, ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ, Москва
П.А. Алексеев, НИЦ «Курчатовский институт», Москва
В.И. Бобровский, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
П.В. Быков, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск
А.В. Двуреченский, ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Дорошкевич, ЛНФ ОИЯИ, Дубна
Ю.Н. Зуев, Снежинск
А.В. Мирмельштейн, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.С. Неустроев, ГНЦ НИИАР, Димитровград
А.В. Павленко, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.И. Пастухов, АО «Институт реакторных материалов», Заречный
В.А. Печёнкин, ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск
В.П. Попов, ИФП СО РАН, Новосибирск
И.А. Портных, АО «Институт реакторных материалов», Заречный
В.А. Скуратов, ЛЯР ОИЯИ, г. Дубна
Д.В. Фёдоров, SKOLTECH, Москва
Е.В. Харанжевский, УдмГУ, г. Ижевск
В.М. Чернов, ВНИИНМ, Москва
А.В. Янилкин, ВНИИА, Москва

Локальный комитет

Председатель комитета: Д.А. Перминов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

Л.Т. Емельянова, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

Н.В. Катаева, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

К.А. Козлов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

М.В. Лапин, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

В.Н. Матвиенко, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

Н.В. Проскурнина, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

Комиссия по подведению итогов конкурса молодых докладчиков

Председатель комиссии: С.В. Рогожкин,

П.В. Быков

А.Ф. Губкин

В.С. Неустроев

В.А. Скуратов

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	11
MODELING FOR IRRADIATION SWELLING OF STRUCTURAL STEELS IN ADVANCED NUCLEAR SYSTEMS	13
<u>M. Zheng, X. Zhu, M. Yang, W. Ding</u>	
MULTI-SCALE HETEROGENEOUS DESIGN OF REFRACTORY HIGH ENTROPY ALLOYS FOR NUCLEAR APPLICATIONS	14
<u>Yang Zhang, Jingwei Hao, Yaxi Ma, Zhongwu Zhang</u>	
NANOPRECIPITATE STRENGTHENING AND HELIUM ION IRRADIATION EFFECTS OF FACE-CENTERED CUBIC HIGH-ENTROPY ALLOYS	15
<u>Z.W. Zhang, Y. Zhang, Liyuan Liu, Jihong Han</u>	
5f ОБОЛОЧКА ПЛУТОНИЯ: КОЛЛЕКТИВИЗИРОВАННЫЕ ИЛИ СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ?	16
<u>А.В. Мирмельштейн</u>	
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ	17
<u>В.В. Дремов, А.В. Караваев, П.В. Чирков, Р.М. Кичигин, Г.С. Ельцов, С.В. Стрельцов, А.И. Потеряев, А.О. Шориков, М.А. Коротин, Е.В. Комлева, П.П. Ковалева, К.А. Стародубец, А.В. Шапеев, И.С. Новиков, А.С. Котыхов</u>	
ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ И РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОХРУПЧИВАНИЯ НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯЭУ	18
<u>В.С. Неустроев, Е.И. Макаров, Д.Е. Маркелов, Д.Е. Соколовский</u>	
ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ИЗ ДРУЖЕСТВЕННЫХ СТРАН, АДАПТИРОВАННОЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ	19
<u>А.Е. Долгих</u>	
МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ: МИКРОСТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ	19
<u>И.Ю. Литовченко, С.А. Аккузин, Н.А. Полехина, В.В. Осипова, А.В. Ким, К.В. Спиридонова, П. Пахолкина, И.С. Тимошов, В.М. Чернов</u>	
МЕХАНИЗМЫ И КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКООБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК	20
<u>Б.З. Марголин, А.А. Сорокин, В.А. Швецова</u>	
НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ МАГНЕТИКИ В СФЕРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНЫХ ПОДХОДАХ	21
<u>А.Ф. Барабанов, В.Э. Валиулин, А.В. Михеенков, П.С. Савченков</u>	
ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КАСКАДА СМЕЩЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ X16N19 ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ БН-600	22
<u>А.В. Козлов, И.А. Портных, К.А. Козлов</u>	
РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ: БЕСЦЕННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ В АРСЕНАЛЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДИК РЕАКТОРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ	23
<u>А.Ф. Губкин, В.И. Бобровский</u>	
СОСТАВЫ, СТРУКТУРЫ, ДЕФЕКТЫ И СВОЙСТВА МАЛОАКТИВИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ДО-В ПРОЦЕССЕ-ПОСЛЕ» ВЫСОКОДОЗНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В БЫСТРЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ	24
<u>В.М. Чернов</u>	

ОГЛАВЛЕНИЕ

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ПУЧКАХ ИОНОВ. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И СТАТУС	26
<u>С.В. Рогожкин, Т.В. Кулевой, А.А. Никитин, А.А. Богачев, А.А. Хомич, Н.А. Искандаров, А.В. Клауз, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, П.А. Федин</u>	
<u>I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ</u>	<u>29</u>
ВОЗВРАТ ОСТАТОЧНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ, БЛИЖНЕЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ 5 МэВ СПЛАВАХ Fe-11Cr И Fe-16Cr	31
<u>А.Л. Николаев</u>	
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОЕ СТАРЕНИЕ СПЛАВА Fe-Ni-Al ПРИ ОТЖИГАХ И ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ	33
<u>С.Е. Данилов, Д.А. Перминов</u>	
РАЗРУШЕНИЕ ОБЛУЧЕННОГО СПЛАВА Zr-2.5Nb, ПОВРЕЖДЕННОГО ГИДРИДАМИ	33
<u>С.А. Аверин, А.Г. Нежданов, В.Ю. Ярков, В.К. Самедов, В.А. Цыгвинцев</u>	
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АУСТЕНИТНЫХ СПЛАВОВ, ОБЛУЧЕННЫХ ГЕЛИЕМ ПРИ АРРМ He/СНА > 1000	34
<u>Нгуен Ван Тьеп, Е.А. Корнеева, А.С. Сохацкий, В.А. Скуратов, С.В. Митрофанов, Д.А. Комарова, М. Нкоси</u>	
<u>II. ЦИФРОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ</u>	<u>37</u>
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ В СПЛАВЕ УРАНА С МОЛИБДЕНОМ И ЦИРКОНИЕМ ПРИ СФЕРИЧЕСКОМ СИММЕТРИЧНОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ	39
<u>Д.А. Беляев, А.С. Александров, Ю.Н. Зуев, И.Л. Святков, Е.А. Леви</u>	
МОДИФИКАЦИЯ ИОННЫМ ПУЧКОМ УЛЬТРАТОНКИХ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ	40
<u>А.В. Янилкин, Н.С. Смирнов, Е.А. Кривко, И.А. Родионов</u>	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДА НА ПРОЧНОСТЬ ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ	41
<u>Р.М. Кичигин, П.В. Чирков, А.В. Караваев, В.В. Дремов</u>	
НАНОРАЗМЕРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В MgAl₂O₄ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ	42
<u>Р.А. Рымжанов, J.H. O'Connell, В.А. Скуратов</u>	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗА РАДИАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕЙ КОРПУСОВ ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ	43
<u>Е.Д. Малиновский, С.В. Федотова, Е.А. Кулешова</u>	
РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗОВЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ МЕТОДОМ CALPHAD ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАДИАЦИОННО-УСКОРЕННОЙ ДИФФУЗИИ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ	44
<u>Е.А. Мешков, А.В. Янилкин</u>	
СТРУКТУРА ГИДРИДОВ В СИСТЕМЕ ТИТАН-ВАНАДИЙ: АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННО-ОБУЧЕННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ	45
<u>П.В. Чирков, А.А. Мирзоев, А.В. Караваев, В.В. Дремов</u>	

III. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ **47**

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ ДУО СТАЛЕЙ НА ИХ РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ПРИ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ **49**

А.А. Хомич, С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, А.А. Богачев, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, А.С. Шутов, А.В. Клауз, Н.А. Искандаров

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ В СТАЛЯХ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА ТИПА Cr16-Ni19 И Cr16-Ni15 **50**

С.В. Яркова, В.А. Цыгвинцев, Н.В. Глушкова, И.А. Портных, Д.Н. Вельмогин

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЗУЧЕСТИ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП 823, ВЛЮЧАЯ ДУО МОДИФИКАЦИЮ **51**

Н.В. Катаева, В.В. Сагарадзе, В.А. Завалишин, К.А. Козлов, М.В. Леонтьева-Смирнова, А.А. Никитина

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОСТИ В ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ СТАЛИ ТИПА Cr16-Ni19 ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛУЧЕНИЯ **52**

И.А. Портных, В.Л. Панченко, А.В. Козлов

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ, ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ **53**

А.В. Клауз, С.В. Рогожкин, А.А. Богачев, А.А. Халявина, А.А. Хомич

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ОКСИДНЫХ ЧАСТИЦ В ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЯХ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ **54**

А.А. Халявина, С.В. Рогожкин, А.В. Клауз, Д.А. Подгорный

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ: РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ **55**

В.Н. Фоменко, Б.З. Марголин, Ф.Л. Шишков, М.В. Леонтьева-Смирнова, Е.В. Чертопьятов

МИКРОСТРУКТУРА И ДЕФЕКТЫ В ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ НАНОЛАМИНАТАХ Nb/Zr ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ГЕЛИЯ **56**

А.Д. Ломыгин, Р.С. Лаптев

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ОБЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦАХ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ТИПА X16-N19: НЕЙТРОН-ДИФРАКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ **57**

Б.В. Краснояров, М.А. Сёмкин, И.А. Портных, В.Л. Панченко, В.И. Пастухов, В.И. Воронин, Н.А. Глушкова, А.Ф. Губкин

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ **58**

Р.А. Курский, А.В. Рожков, Д.В. Сафонов, О.О. Забусов, И.В. Федотов, А.С. Фролов

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЗАЩИТНОГО ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ВОДОРОДНУЮ И РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110 **59**

М.А. Кругляков, В.Н. Кудияров, Р.С. Лаптев

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА СТАЛЕЙ С ОЦК РЕШЕТКОЙ ПОСЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ **60**

Е.В. Юрченко, Б.З. Марголин, С.В. Рогожкин, А.А. Никитин

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ГИДРИДОВ В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110 В ПРОЦЕССЕ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОТВС **61**

Д.В. Сафонов, А.С. Фролов, Д.А. Мальцев, О.О. Забусов, Р.А. Курский, А.В. Рожков, В.В. Василенко

ОГЛАВЛЕНИЕ

РАДИАЦИОННОЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ С.В. Федотова, Е.А. Кулешова	62
РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ И УДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ О.В. Огородникова, А. Никитин, С. Рогожкин, А. Умеренкова, Н. Сергеев, В. Ефимов	63
СТРУКТУРНАЯ АТТЕСТАЦИЯ МАРГАНЦЕВОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 20Г20С2Ф С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ Н.В. Проскурнина, М.А. Сёмкин, В.И. Бобровский, В.И. Воронин, В.А. Казанцев	64
<u>IV. ТОПЛИВО ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: СТРУКТУРА, РАДИАЦИОННЫЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА</u>	67
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В УСТРОЙСТВАХ MAGLIF ПРИ ОПРЕДЕЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ Ж.Б. Сексембаев, Ж.М. Мыктыбай	69
СТРУКТУРНАЯ НЕЙТРОНОГРАФИЯ ПРОДУКТОВ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ МОДЕЛЬНОГО ОЯТ М.А. Сёмкин, Н.В. Проскурнина, Н.В. Глушкова, О.А. Голосов, Ю.В. Лапин, С.С. Хвостов, П.Н. Мушников, Ю.П. Зайков, А.Ф. Губкин	70
<u>V. СИЛЬНОКОРРЕЛИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</u>	73
МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕОБЫЧНОГО МАГНЕТИЗМА В ИНТЕРМЕТАЛЛИДАХ Eu С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ВАЛЕНТНОСТЬЮ. П.С. Савченков, П.А. Алексеев	75
<u>VI. РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ</u>	77
ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ АЗОТА НА ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ, ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК Ni/Al П.В. Быков, С.Г. Быстров, И.Н. Климова, И.К. Аверкиев, Н.А. Шушаков, Е.А. Печина, В.Л. Воробьёв, А.Н. Тарасенков, А.А. Колотов, В.Я. Баянкин	79
ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V В.Л. Воробьёв, В.С. Гладышева, С.Г. Быстров, П.В. Быков, В.Я. Баянкин, И.К. Аверкиев, А.Л. Ульянов	80
ИМПЛАНТАЦИЯ ИОНОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПОДВЕРГНУТЫХ НАГРЕВУ А.А. Колотов, В.Л. Воробьёв	81
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА АТОМНУЮ СТРУКТУРУ СПЛАВОВ Fe-Mn, Fe-Cr И Fe-Si Е.В. Макаров, В.А. Семёнкин, Н.В. Гущина, В.В. Овчинников	82
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СКОРОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК TiO _x И Au В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ Т.З. Гусейнов, О.Р. Бакиева	83
МОЛЕКУЛЯРНО – ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ Н.М. Созонова	84

<u>VII. РАДИАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МАГНЕТИКАХ, СВЕРХПРОВОДНИКАХ, ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИЗОЛЯТОРАХ</u>	85
IRRADIATION-INDUCED AMORPHIZATION ACCELERATED BY ELEMENTAL MIGRATION NEAR THE SURFACE OF FLUORAPATITE	87
<u>S. Jiang, R. Yin, X. Hu, J. Zhu, S. Liu, M. Ma, S. Dong, J. Zhang</u>	
IN-SITU ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРИСТАЛЛОВ Al_2O_3 НА ПУЧКАХ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ	90
<u>В.А. Скуратов, Н.С.Кирилкин, А. Исатов</u>	
ИОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ В ПОЛУЧЕНИИ И МОДИФИКАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПРОВОЛОК	91
<u>Д.Л. Загорский, И.М. Долуденко, Н.В. Гущина, В.В. Овчинников, К.В. Шаломов, С.А. Бедин, Н.С. Перов, Р.А. Макарьин, А.В. Сопетик, В.М. Каневский</u>	
ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕКЦИОННОГО ОТЖИГА ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ $A^{III}B^V$ С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ	92
<u>В.С. Носовец, О.В. Ткачев</u>	
ОСОБЕННОСТИ ФОТОСТИМУЛИРОВАННОГО ОТЖИГА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	93
<u>А.А. Коновалов, С.М. Дубровских, О.В. Ткачев</u>	
РЕАКЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУР НА ИМПУЛЬС ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	95
<u>И.Д. Приходько, В.С. Носовец, О.В. Ткачев</u>	
ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ В ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ	96
<u>Н.С. Кирилкин, Р.А. Рымжанов, В.А. Скуратов, Ж. О'Коннелл</u>	
<u>VIII. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА</u>	97
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ И ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ГАММА-КВАНТОВ В СМЕШАННЫХ ГАММА-НЕЙТРОННЫХ ПОЛЯХ	99
<u>М.С. Иванова, О.В. Ткачев, М.Г. Березовская, А.С. Кустов, И.А. Илларионова, И.Д. Приходько</u>	
МНОГОЦЕЛЕВОЙ ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЦ-140 ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	100
<u>С.В. Митрофанов, И.В. Калагин, В.А. Семин, В.А. Скуратов</u>	
ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ	101
<u>Д.Н. Вельмогин, В.А. Цыгвинцев, С.В. Яркова</u>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНЕГО ПРЕДЕЛА ВЕСА ВЫСОКОПЛОТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПЛОТНОСТИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	101
<u>М.С. Ремезова, А.В. Трошев, А.М. Голунов, Д.А. Ченцов, Д.А. Беляев</u>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ МЕТОДАМИ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	102
<u>Р.С. Лаптев, М.А. Кругляков</u>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОНОВ	103
<u>Т.С. Картапова, П.В. Быков, Ф.З. Гильмутдинов</u>	
ПОЗИТРОННЫЕ АННИГИЛЯЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫДЕЛЕНИЙ В ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОМ СТАРЕЮЩЕМ СПЛАВЕ Fe-35,2 ат.%Ni-2,9 ат.%Ti	104
<u>Д.А. Перминов, С.Е. Данилов</u>	

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ПИКОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ 50 ГВт	105
<u>В.Е. Патраков</u> , Л.Н. Лобанов, М.С. Педос, С.Н. Рукин, К.А. Шарыпов, С.А. Шунайлов, С.П. Тимошенко, М.И. Яландин	
СИНТЕЗ БОРСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ БОРА В НИХ	106
<u>Г.Н. Чурилов</u> , Н.С. Николаев, Т.А. Шалыгина, Г.А. Глушенко, В.И. Елесина	
УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКИ РАЗДЕЛЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	107
<u>В.И. Елесина</u> , Г.Н. Чурилов, Г.А. Глушенко, В.А. Лопатин, Н.Г. Внукова	
УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ	109

Пленарные доклады



MODELING FOR IRRADIATION SWELLING OF STRUCTURAL STEELS IN ADVANCED NUCLEAR SYSTEMS

M. Zheng^{1,2}, X. Zhu^{1,2}, M. Yang^{1,3}, W. Ding¹

¹*Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, China*

²*University of Science and Technology of China, Hefei, China*

³*Anhui University, Hefei, China*

The advanced nuclear systems provide promising energy resources due to their safety, efficiency, and economic advantages compared with the traditional nuclear systems. The materials in these advanced nuclear systems will stand extremely hard environments, especially high temperature, neutron irradiation, etc. The irradiation dose and temperature in the advanced nuclear systems are much higher than those in the traditional ones. Under the neutron conditions, there will be defect, microstructure evolution and property degradation in the materials. In fact, the neutron irradiation facilities which can provide the similar environment as that in the advanced nuclear systems are very precious, and the neutron irradiation experiments are expensive and time consuming. The ion irradiation experiments are often used to simulate the neutron-irradiation effects. To investigate the equivalence between the ion irradiation and neutron irradiation and predict the irradiation behaviors, the computational simulation modeling serve as important tools which are efficient, safe and economic.

The irradiation swelling of materials will become unacceptable under high dose irradiation in the advanced nuclear systems. The models for irradiation swelling have been developed for nuclear fuels, cladding and structural materials based on the methods of rate theory, phase field, etc. In the previous models, the nucleation of small defect clusters was modeled simply and roughly. The onset of irradiation swelling could not be predicted very well. The extrapolation of the model from low dose to high dose was not good enough. The recent development of advanced simulation and modeling approaches, as well as the rapid development of data-driven machine learning methods provide powerful and efficient tools for irradiation swelling modeling with high prediction accuracy.

This work presents the models for irradiation swelling based on the coupled model of machine learning and rate theory/cluster dynamics. The machine learning was introduced to predict the steady state irradiation swelling onset dose, while the improved rate theory was developed to simulate the swelling behavior after the incubation period. The cluster dynamics models were developed which are good at simulating the nucleation of small defect clusters. The prediction of irradiation swelling under high dose irradiation in the advanced nuclear systems were realized.

References

- [1] X. Zhu, X. Li, M. Zheng, *Metals*, **12** (2022), p. 651.

MULTI-SCALE HETEROGENEOUS DESIGN OF REFRACTORY HIGH ENTROPY ALLOYS FOR NUCLEAR APPLICATIONS

Yang Zhang, Jingwei Hao, Yaxi Ma, Zhongwu Zhang

¹*College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China (zhangyang0115@hrbeu.edu.cn; zwzhang@hrbeu.edu.cn)*

The development of nuclear structural materials with exceptional comprehensive performance is a critical challenge in advanced nuclear energy systems. Refractory high entropy alloys (RHEAs), composed of multiple high melting-point elements, exhibit high strength, high hardness, and outstanding high-temperature mechanical properties, making them promising candidates as novel high temperature structural materials for fourth-generation nuclear power systems. However, their limited work-hardening capability and poor resistance to irradiation defects significantly hinder their practical applications. This study delves into the deformation behavior and irradiation performance of RHEAs based on the principles of multi-scale heterogeneous design. This study delves into the mechanisms by which multi-scale heterogeneous design influences the deformation behavior and irradiation performance of RHEAs. It was found that through large deformation cold rolling and short-term high-temperature recrystallization, a microstructure comprising micron-sized heterogeneous grains and nano-precipitates can be constructed. This structure enhances dislocation multiplication and interaction processes through microband induced plasticity, providing a continuous and stable steady-state plastic deformation process for the alloy. Additionally, based on the phenomenon of electronic and ion irradiation-induced disordering of nano-precipitates in RHEAs, a gradient structure of solute atoms and local lattice distortion gradient structure was designed, extending from the peak irradiation damage region to the unirradiated area. This promotes long-range downhill diffusion of solute atoms, and the additional downhill diffusion process increases the annihilation rate of solute atoms and voids, allowing the alloy to maintain zero swelling even at a damage level of 132 dpa.

References

- [1] Yaxi Ma, Yang Zhang*, Lixin Sun, Zhongwu Zhang*, *Journal of Materials Science & Technology* **192** (2024) 215–227.
- [2] Yaxi Ma, Lixin Sun*, Yang Zhang*, Zhongwu Zhang, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **114** (2023) 106263.
- [3] Yaxi Ma, Yang Zhang*, Zhongwu Zhang*, Liyuan Liu, Lixin Sun, *Intermetallics* **157** (2023) 107872.
- [4] Jingwei Hao, Yang Zhang*, Qingyu Wang, Yaxi Ma, Lixin Sun, Zhongwu Zhang, *Journal of Nuclear Materials* **590** (2024) 154876.

NANOPRECIPITATE STRENGTHENING AND HELIUM ION IRRADIATION EFFECTS OF FACE-CENTERED CUBIC HIGH-ENTROPY ALLOYS

Z.W. Zhang, Y. Zhang, Liyuan Liu, Jihong Han

College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China (zwzhang@hrbeu.edu.cn)

Single-phase face-centered cubic (FCC) high-entropy alloys (HEAs) typically exhibit excellent ductility alongside functional properties like good irradiation resistance, but suffer from low strength. Nanoparticle strengthening is one effective method to enhance alloy strength; however, the increase in strength is invariably accompanied by a reduction in ductility. This paper systematically investigates the strengthening mechanisms and irradiation resistance of nanoparticle-strengthened HEAs. The influence of element content and type on nanoparticle formation was explored, revealing that chemical composition significantly affects the structural transformation of nanoparticles. With increasing pre-strain deformation, the precipitation time shortens, nanoparticle size decreases, and volume fraction increases. The effects of different nanoparticle characteristics on the magnitude and distribution of the matrix stacking fault energy (SFE) were systematically studied. The magnitude of the matrix SFE was found to depend on the volume fraction of precipitated nanoparticles, while the spacing between nanoparticles can regulate the distribution state of the matrix SFE. Finally, the impact of He²⁺ ion irradiation at 500°C on the microstructural evolution of the newly designed HEAs was investigated. High-density nanoparticles can increase the surface area for adsorbing helium atoms during irradiation, enhancing helium dispersion and improving the ability to suppress helium bubble coarsening. Simultaneously, the reduction in matrix SFE induced by precipitation inhibits the transformation from stacking fault loops to perfect dislocation loops, prolonging the incubation period of dislocation loops and delaying their growth.

References

- [1] Liyuan Liu, Yang Zhang*, Sergey Rogozhkin, Artem Klauz, Caiju Li, Junpeng Li, Zhongwu Zhang*, *Acta Materialia* **281** (2024) 120434.
- [2] Liyuan Liu, Yang Zhang*, Junpeng Li, Mingyu Fan, Xiyu Wang, Guangchuan Wu, Zhongbo Yang, Junhua Luan, Zengbao Jiao, Chain Tsuan Liu, Peter K Liaw, Zhongwu Zhang*, *International Journal of Plasticity* **153** (2022) 103235.
- [3] Liyuan Liu§, Yang Zhang§, Jihong Han, Xiyu Wang, Wenqing Jiang, Chain-Tsuan Liu and Zhongwu Zhang*, and Peter K. Liaw*, *Advanced Science* **8** (23) 2021, 2100870.
- [4] Liyuan Liu, Yang Zhang*, Zhongwu Zhang*, Junpeng Li, Weiguo Jiang, Lixin Sun, *International Journal of Plasticity*, **172** (2024) 103853.
- [5] Liyuan Liu, Yang Zhang*, Zhongwu Zhang*, *Journal of Materials Science & Technology*, **205** (2025) 27–41.
- [6] Liyuan Liu, Yang Zhang*, Jingming Ma, Yongxuan Shang, Jihong Han, Junpeng Li, Zhongwu Zhang*, *Scripta Materialia* **217** (2022) 114771.
- [7] Liyuan Liu, Yang Zhang*, Zhongwu Zhang, *Vacuum* **225** (2024) 113250.

5f ОБОЛОЧКА ПЛУТОНИЯ: КОЛЛЕКТИВИЗИРОВАННЫЕ ИЛИ СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ?

А.В. Мирмельштейн
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Россия
(mirmelstein@mail.ru)

На протяжении нескольких десятилетий проблема основного квантово-механического состояния металлического плутония остается одной из самых значимых в фундаментальной физике твердого тела и широко обсуждается в научной литературе. В значительной степени дискуссия фокусируется на магнитных свойствах, отражающих природу 5f электронных состояний Pu, балансирующих на границе между локализованным и коллективизированным поведением. Уже в ранних работах по исследованию свойств Pu обсуждалось влияние магнетизма на некоторые его свойства, такие как отрицательный коэффициент теплового расширения и электросопротивление [1,2]. Первые успешные теоретические описания электронной структуры Pu также требовали наличия магнитных моментов на его атомах [3,4]. Однако попытки их обнаружить экспериментально не увенчались успехом [5]. Это противоречие между теорией и экспериментом разрешалось в рамках альтернативного подхода, основанного на идее валентно-флуктуирующей (промежуточно-валентной) природе 5f электронной оболочки Pu [6,7]. Эта точка зрения подтверждалась экспериментами по неупругому магнитному рассеянию нейтронов, выполненными группой американских исследователей. Они показали, что дельта-плутоний является промежуточно-валентной системой с температурой Кондо 975 К [8]. Это означает, что 5f электроны в значительной степени локализованы, но их магнитные моменты полностью экранируются электронами зоны проводимости, приводя к немагнитному основному квантово-механическому состоянию. Казалось, этот результат разрешает многолетнее противоречие между теорией и экспериментом относительно магнетизма в плутонии. Однако, этот вывод был оспорен сторонниками описания электронной структуры с помощью теории функционала плотности (DFT) в рамках представления о коллективизированной природе 5f электронов в Pu [9], в противовес их трактовке как сильно коррелированных электронов в подходе, опирающемся на динамическую теорию среднего поля (DMFT) [8]. В докладе мы обсудим, как в рамках этих двух представлений, трактующих Pu как коллективизированную или сильно коррелированную электронную систему, можно объяснить необычные тепловые и упругие свойства металлического плутония [4,9,10], а также новые экспериментальные исследования, показывающие, что проблема электронного строения плутония еще далека от решения.

Литература

- [1] Lallement R., *J. Phys. Chem. Solids* v. **24** (1963), p. 1617.
- [2] Arko A.J., Brodsky M.B., Nellis W.J., *Phys. Rev. B* v. **5** (1972), p. 4564.
- [3] Solovyev I.V. et al., *Phys. Rev. B* v. **43** (1991), p. 14414.
- [4] Söderlind P. et al., *Advances in Physics*, v. **68** (2019), p. 1.
- [5] Lashley J.C. et al., *Phys. Rev. B* v. **72** (2005), p. 054416.
- [6] Shim J.H., Haule K., Kotliar G., *Nature* v. **446** (2007), p. 513.
- [7] Clementyev E., Mirmelstein A., and Böni, P., *Alloy. Compd.* v. **444-445** (2007), p. 292.
- [8] Janoshek M. et al., *Sci. Adv.* v. **1** (2015), p. e1500188.

[9] Söderlind P. et al., *Phys. Rev. B* v. **108** (2023), p. 104112.

[10] Mirmelstein A.V., Matvienko V.N., *ЖЭТФ* т. **168** (2025), № 5(11), с. 692.

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

В.В. Дремов¹, А.В. Караваев¹, П.В. Чирков¹, Р.М. Кичигин¹, Г.С. Ельцов¹, С.В. Стрельцов²,
А.И. Потеряев², А.О. Шориков², М.А. Коротин², Е.В. Комлева², П.П. Ковалева²,
К.А. Стародубец^{1,2}, А.В. Шапеев³, И.С. Новиков⁴, А.С. Котыхов⁴

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия

²ИФМ УрО РАН им. М.Н. Михеева, г. Екатеринбург, Россия

³Сколтех, г. Москва, Россия

⁴ВШЭ, г. Москва, Россия

Способность материалов сохранять механические свойства при радиационной нагрузке и температурах >0.3 от температуры плавления определяется скоростью температурно- и радиационно-стимулированных изменений микроструктуры. К таким процессам можно отнести перекристаллизацию, образование преципитатов вторичных фаз в пересыщенных растворах легирующих элементов, образование дислокационных петель и др.

Для атомистического моделирования этих процессов в перспективных сталях необходимо иметь модель межатомного взаимодействия, которая: 1) обеспечивает высокую точность воспроизведения результатов первопринципных расчетов энергетических и силовых характеристик на микроуровне; 2) обладает достаточной вычислительной эффективностью для моделирования интересующих процессов на высокопроизводительных вычислительных системах. Этим требованиям удовлетворяют современные машинно-обучаемые потенциалы. В сталях наиболее распространенным легирующим элементом, повышающим жаропрочность, является Cr. В данной работе для системы Fe-Cr был построен машинно-обучаемый потенциал нового поколения типа mMTP (magnetic Moment Tensor Potential), учитывающий локальные магнитные моменты на атомах и основанный на немагнитной версии MTP [1].

В качестве моделируемой системы был выбран сплав Fe-Cr-Ni, исходно находящийся в ОЦК фазе и содержащий примеси углерода C и фосфора P. Исследовано влияние легирующих добавок и примесей на скорость перекристаллизации при высоких температурах (>0.6 от температуры плавления). Ранее, техника прямого МД моделирования перекристаллизации была отработана в [2]. Прямое атомистическое моделирование показало, что фосфор и углерод мигрируя в процессе моделирования к границам зерен приводят к замедлению скорости перекристаллизации, количественно оцениваемой по изменению во времени совокупной площади границ зерен. Скорость перекристаллизации оценивается при этом относительно чистого железа. Наибольший эффект замедления наблюдается для образцов, в которых кроме перераспределения углерода, часть хрома (исходная концентрация которого выше предела растворимости) выделена в виде нанометровых преципитатов, которые выступают эффективными препятствиями для движущихся межзеренных границ. Расчеты выполнены для представительного набора исходных микроструктур, концентраций легирующих элементов и примесей и для разных температур в диапазоне от 0.6 до 0.9 от температуры плавления.

Работа выполнена в Миди-сайенс лаборатории №2 «Цифровые двойники промышленных объектов и цифровое материаловедение» Национального Центра Физики и Математики.

Литература

- [1] Shapeev A.V., *Multiscale Modeling and Simulation* v.14 (2016), pp.1153-1173.
[2] Dremov V.V., Karavaev A.V., Chirkov P.V., *Scientific Reports* v.11 (2021), 934.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ И РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ОХРУПЧИВАНИЯ НЕКОТОРЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯЭУ

В.С. Неустроев, Е.И. Макаров, Д.Е. Маркелов, Д.Е. Соколовский
АО «Государственный научный центр научно-исследовательский институт атомных реакторов», Димитровград, Российская Федерация

Для производства и эксплуатации элементов и трубопроводов АЭС используются различные конструкционные материалы, отличающиеся химическим составом. Такие материалы имеют различную радиационно-индуцированную микроструктуру и зависящие от нее механические свойства при различных условиях облучения: флюенсе нейтронов и температуре облучения. Хорошо известны и признаны всеми материаловедами границы интервалов температур испытания, внутри которых наблюдается снижение пластичности (охрупчивание) этих материалов.

Такие виды охрупчивания делятся в соответствии с температурой облучения и испытаний на низкотемпературное (300-450 °С) радиационное охрупчивание, среднетемпературное (450-550 °С) радиационное охрупчивание или охрупчивание, вызванное распуханием и высокотемпературное (550-750 °С) радиационное охрупчивание. Температурные границы этих видов охрупчиваний размыты и приблизительны.

Механизмы взаимосвязи микроструктуры с упрочнением и охрупчиванием, в общем, известны, но требуют уточнения для конкретных конструкционных материалов и дополнительных исследований, особенно, в отношении высокотемпературного радиационного охрупчивания.

Низкотемпературное радиационное упрочнение и охрупчивание связывают в основном с высокой концентрацией мелкодисперсных составляющих микроструктуры, что приводит к уменьшению суммарного усредненного расстояния между дефектами и к соответственному увеличению прочности и снижению пластичности.

Охрупчивание, вызванное распуханием, связывают с соотношением усредненного суммарного расстояния между радиационными дефектами внутри зерна (порами, частицами вторых фаз, их комплексами и дислокационными петлями) и шириной зоны свободой от дефектов вблизи границ зерен. Если эти параметры сравнимы по величине (а это происходит при величинах распухания больше 5-7 %), то наблюдается снижение прочности при нулевой пластичности при «квазивязком» разрушении образцов.

Взаимосвязи микроструктуры и перечисленных видов охрупчивания подтверждаются примерами на конструкционных материалах, облученных нейтронами при разных температурах в различных реакторах.

ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ИЗ ДРУЖЕСТВЕННЫХ СТРАН, АДАПТИРОВАННОЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ

А.Е. Долгих

ООО «Мелитэк» (alexandr.dolgikh@melytec.ru)

Компания Мелитэк является крупнейшим поставщиком исследовательского оборудования и сервисных услуг. Основным направлением деятельности является комплексное решение задач производственных и исследовательских организаций в области материаловедения, химического и фазового анализа, а также физико-механических испытаний.

Технологии и материалы для производства оборудования для ядерного энергетического комплекса и его контроля в ходе эксплуатации требуют применение высокоточного современного аналитического оборудования для контроля различных свойств материалов на всех этапах производства и эксплуатации. К данному виду оборудования предъявляется ряд требований, в частности возможность анализа активных образцов и его размещение в защитных боксах и камерах с контролируемой средой.

В связи с невозможностью оснащения лабораторий специализированным оборудованием западных компаний, ООО «Мелитэк» провел отбор производителей из дружественных стран, чья продукция отвечает требованиям и может быть доработана для использования в специальных условиях эксплуатации.

Испытательное оборудование, которое производится ООО «Мелитэк» либо прошедшее соответствующую доработку и адаптацию к требованиям заказчиков, поставляется под маркой «MELYTEC». В частности, под этой маркой поставляются испытательные машины, копры и т.д. Оборудование внесено в Государственный реестр средств измерений.

ООО «Мелитэк» имеет большой опыт в решении вопросов аналитического сопровождения разработки новых материалов, технологического контроля и контроля качества при производстве современных изделий.

МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ АУСТЕНИТНЫЕ СТАЛИ: МИКРОСТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

И.Ю. Литовченко^{1,2}, С.А. Аккузин¹, Н.А. Полехина¹, В.В. Осипова^{1,2}, А.В. Ким^{1,2},
К.В. Спиридонова¹, П. Пахолкина^{1,2}, И.С. Тимошов^{1,3}, В.М. Чернов⁴

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
(litovchenko@ispms.ru)

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск,

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

⁴АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара», Москва

Малоактивируемые аустенитные стали на хромомарганцевой основе были предложены

в качестве замены жаропрочных и радиационно-стойких хромоникелевых сталей, преимущественно используемых в качестве конструкционных материалов энергетики вплоть до настоящего времени [1]. Разработанные ранее малоактивируемые аустенитные стали уступали по стабильности аустенита высокоактивируемым хромоникелевым сталям [2].

В настоящей работе обобщены оригинальные результаты разработки и исследований [3-5] новых малоактивируемых аустенитных сталей системы Fe–11Cr–26Mn–Ti–V–W как перспективных конструкционных материалов реакторов нового поколения и гибридных энергетических установок. Показано, что существенным отличием новых сталей является повышенная стабильность аустенита по отношению к превращениям в α' -мартенсит и феррит. В закаленном и холоднодеформированном состоянии в сталях наблюдаются плоские дислокационные скопления, дефекты упаковки и деформационные микродвойники, а также дисперсные частицы карбидов MC (M – Ti, V, Ta, и др.) и $M_{23}C_6$ (M – Cr, Mn, Fe).

Прочностные свойства новых сталей в интервале температур 20 – 700 °С в закаленном и холоднодеформированном состояниях сравнимы, или превышают соответствующие значения для известных аналогов и хромоникелевых сталей. Удлинение до разрушения новых сталей до 3-х раз выше, чем у аналогов.

Показана стабильность зеренной и микродвойниковой структуры при длительных (до 1000 ч) отжигах при 700 °С. В этих условиях выделяются карбиды $M_{23}C_6$ по границам зерен и микродвойников, а также внутри зерен, в том числе в виде оболочек на частицах MC. На одном из составов в холоднодеформированном состоянии обнаружена тенденция к выделению σ -фазы. Прочностные и пластические свойства сталей после старения остаются на хорошем уровне. Обсуждаются возможности модификации элементного состава сталей и перспективы их применения в качестве малоактивируемых конструкционных материалов реакторных установок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00802-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00802/>.

Литература

- [1] Л.И. Иванов, Ю.М. Платов. *Радиационная физика металлов и ее приложения*. М.: Интерконтакт Наука. 2002. – 300 с.
- [2] R.L. Klueh, P.J. Maziasz. *Mater. Sci. Eng. A*. **V.127** (1990), P. 17–31.
- [3] I. Litovchenko, et al. *Metals*. **V.13** (2023), 2015.
- [4] I.Yu. Litovchenko, et al. *Materialia*. **V.39** (2025), 102335.
- [5] И.Ю. Литовченко, и др. *MuTOM*. **T.836** (2025), № 2, С. 23-33.

МЕХАНИЗМЫ И КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКООБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

Б.З. Марголин, А.А. Сорокин, В.А. Швецова
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»

Отличительной особенностью эксплуатации элементов оборудования атомной

энергетики является воздействие нейтронного облучения различной степени интенсивности. Корпуса реакторов подвергаются относительно не интенсивному нейтронному облучению, а интенсивность облучения внутриреакторных устройств может превышать интенсивность облучения корпусов реакторов на несколько порядков. Поэтому внутрикорпусные устройства для большинства типов реакторов изготавливаются из аустенитных сталей с ГЦК-решеткой, которые в подавляющем большинстве случаев имеют сопротивление радиационному охрупчиванию много выше, чем стали с ОЦК-решеткой. Корпуса реакторов, эксплуатирующиеся под высоким давлением теплоносителя, вынуждены изготавливать из сталей с ОЦК-решеткой, в частности, бейнитных сталей, так как эти стали имеют значительно более высокие прочностные свойства, чем аустенитные. При этом необходимо учитывать большую склонность сталей с ОЦК-решеткой к охрупчиванию под воздействием нейтронного облучения, чем у аустенитных сталей.

Для оценки прочности и срока эксплуатации реакторных установок необходимо знать служебные свойства используемых в них материалов и, что самое важное, уметь прогнозировать их деградацию под воздействием нейтронного облучения. Ясно, что без понимания механизмов и критериев разрушения материалов невозможно давать адекватные прогнозы деградации материалов и изменения их служебных свойств, определяющих работоспособность облучаемых элементов реакторных установок.

В настоящем докладе будут рассмотрены основные параметры нейтронного облучения (флюенс и флакс нейтронов, повреждающая доза, температура облучения, спектр нейтронов), влияющие на служебные свойства материалов различных классов (феррито-мартенситные, бейнитные и аустенитные стали), разрушение которых происходит по различным механизмам. Кроме параметров облучения (фактически – параметров эксплуатации на стационарном режиме) будет рассмотрен один из важных эксплуатационных параметров, а именно – температура эксплуатации при переходных режимах работы реактора, которая моделируется температурой испытаний в ряде случаев отличной от температуры облучения.

В докладе также будет показано, как реализация или отсутствие реализации того или иного механизма повреждения материала может кардинально изменить его механизм разрушения и служебные свойства.

НИЗКОРАЗМЕРНЫЕ МАГНЕТИКИ В СФЕРИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНЫХ ПОДХОДАХ

А.Ф. Барабанов¹, В.Э. Валиулин^{1,2}, А.В. Михеенков^{1,2}, П.С. Савченков^{3,4}

¹Институт физики высоких давлений РАН, 108840, Москва (mikheep@bk.ru)

²Московский физико-технический институт, 141701, Долгопрудный, Мос. обл.

³НИЦ Курчатовский институт, 123182, Москва

⁴НИЯУ «МФИ», 115409, Москва

В низкоразмерных системах, в том числе магнитных, роль квантовых флуктуаций оказывается существенной. Дополнительным дезорганизующим фактором служит фрустрация. Фрустрация в соединениях с локализованными магнитными моментами может приводить к интересным и зачастую интуитивно не очевидным эффектам. Это, например, образование нетривиальной спиновой конфигурации или потеря спинового упорядочения даже при нулевой температуре. Как и роль квантовых флуктуаций, эффекты

фрустрации особенно сильны в низкоразмерных, в частности, двумерных системах.

Описание подобного рода эффектов в рамках традиционных методов теории магнетизма может оказаться затруднительным. Это побуждает искать альтернативные алгоритмы. Один из них – сферически симметричный самосогласованный подход, СССР (англоязычная нотация rotation-invariant Green's function method, RGM) [1]-[3].

В докладе представлены основные идеи и некоторые полученные за последние 25 лет важнейшие результаты сферически симметричного самосогласованного подхода и ряда родственных теоретических алгоритмов [4].

Ключевая идея этого класса подходов, важнейшее отличие от спин-волнового рассмотрения и близких к нему – сохранение исходной симметрии задачи, как SU(2) спиновой, так и трансляционной. Это позволяет исследовать низкоразмерные спиновые модели гейзенберговского типа, в том числе фрустрированные, при точном учете теоремных (Мермина-Вагнера и Маршалла) ограничений, а также узельного спинового констрейнта.

Таким образом, обходятся трудности, которые могут возникать при традиционном анализе низкоразмерных магнитных систем. Подход может быть встроен в более сложные конструкции при рассмотрении спиновых моделей со свободными носителями, таких как базовая и трехзонная модели Хаббарда, t-J и s-d модели, решетка Кондо. Это порождает нетривиальные реализации идеи спинового полярона.

Алгоритмы метода работают и при анализе низкоразмерной спин-псевдоспиновой модели (модели Кугеля-Хомского). Причем в этом случае, помимо стандартных термодинамических характеристик, удается получить указания на квантовую запутанность подсистем.

Литература

- [1] J. Kondo and K. Yamaji, *Prog. Theor. Phys.*, **v.47** (1972), N3, p.807.
- [2] H. Shimahara and S. Takada, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **v. 60** (1991), N7, p. 2394.
- [3] А. Ф. Барабанов, В. М. Березовский, *ЖЭТФ*, **т.106** (1994), с. 1156.
- [4] А.Ф. Барабанов, В.Э. Валиулин, А.В. Михеенков, П.С. Савченков, *УФН* (2025), DOI: 10.3367/UFNr.2025.06.039948 (принято в печать).

ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КАСКАДА СМЕЩЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ X16H19 ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ БН-600

А.В. Козлов¹, И.А. Портных², К.А. Козлов¹

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, 620108, Екатеринбург, Россия
(sashok-k48@mail.ru)

²АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия

В настоящее время аустенитная сталь X16H19 используется в качестве основного материала оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах. Образование и эволюция каскадов смещений при действии на сталь нейтронного облучения является первым этапом эволюции микроструктуры, влияющей на ресурс работы твэла.

В работе проведено описание образования и эволюции каскадов смещений в оболочках твэлов из аустенитной стали X16H19 при облучении в реакторе БН-600. При этом весь диапазон энергий нейтронов разбит на интервалы, в которых получены аналитические выражения для плотности потока нейтронов и для сечений их упругого взаимодействия с атомами стали, как функции от энергии нейтронов. Для этого выполнено усреднение сечения взаимодействия нейтронов в выбранных интервалах энергий по основным компонентам стали: Fe, Cr и Ni.

Генерация точечных дефектов на динамической стадии рассчитывалась в рамках стандартной модели [1]. Для описания эволюция каскадов на кинетической стадии использовалось описание спонтанных процессов: рекомбинации вакансий и междоузлий и образования комплексов одноименных дефектов. При описании термодинамической стадии использована статистическая модель миграции дефектов [2], в рамках которой рассчитывается их выход из каскадных областей в кристаллическую матрицу. Из-за более высокой энергии связи междоузлий в межузельных комплексах, по сравнению с вакансиями в вакансионных комплексах каскадная эффективность вакансий (доля оставшихся от генерированных на динамической стадии) выше, чем междоузлий.

В итоге рассчитаны скорости поступления в кристаллическую матрицу точечных дефектов после окончания формирования каскадов в зависимости от микроструктуры и характеристик нейтронного облучения, которые впоследствии будут использованы для описания эволюции микроструктуры и свойств материала оболочек твэлов из стали X16H19 при эксплуатации в реакторе БН-600.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

Литература

[1] Nordlund K., Zinkle S.J., Sand A.E., Granberg F., Averback R.S., Stoller R.E., Suzudo T., Malerba L., Banhart F., Weber W.J., Willaime F., Dudarev S.L., Simeone D. Primary radiation damage: A review of current understanding and models, *J. Nucl. Mater.* **v.512** (2018), p.450.

[2] Kozlov A.V., Portnykh I.A., Isimbaev A.R. Modal of the final stage of nonstationary radiation swelling of metals, *Phys. Met. Metallogr.* **v.121** (2020), №7, p.611.

РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ: БЕСЦЕННЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ В АРСЕНАЛЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДИК РЕАКТОРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

А.Ф. Губкин^{1,2}, В.И. Бобровский¹

¹Институт физики металлов им М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
(agubkin@imp.uran.ru)

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

Постоянный рост потребления электроэнергии в мире требует увеличения объемов её производства, в том числе, за счет роста объемов атомной генерации. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в этой области в обозримой перспективе будут нацелены как на дальнейшее повышение безопасности и эффективности существующих технологий генерации на атомных реакторах, работающих на тепловых нейтронах, так и на развитие технологий реакторов на быстрых нейтронах.

Медленные нейтроны, получаемые в исследовательских источниках нейтронов разных типов, являются уникальным инструментом для решения связанных с этим материаловедческих и инженерных задач от анализа кристаллохимии ядерного топлива до инженерной дифракции на оболочках ТВЭЛов или конструкционных материалах ядерных реакторов.

Повышение потока медленных нейтронов, достигнутое на современных источниках, а также использование сложных модераторов, смещающих нейтронный спектр в холодную или горячую области привели к появлению и бурному развитию новых экспериментальных методов, основанных на рассеянии тепловых, холодных или горячих нейтронов. Так, например, оснащение исследовательских реакторов источником горячих нейтронов позволяет проводить количественные исследования структурных свойств неупорядоченных и плохо-упорядоченных материалов. В отличие от традиционных дифракционных методов, изучающих структуру *идеальных* объектов, дифракция на горячих нейтронах позволяет изучать структурные свойства *реальных* материалов и, поэтому, эту область науки называют сегодня «кристаллографией XXI века».

Высокая проникающая способность нейтронного излучения позволяет создавать сложные системы окружения образца, в которых можно имитировать экстремальные условия эксплуатации материалов атомной энергетики. Этот подход, называемый за рубежом, «lab-on-the-beam», позволяет изучать кинетику реакций, эволюцию структурных, микроструктурных и механических свойств при рабочих температурах ядерного реактора и в условиях агрессивных сред, имеющихся в атомных реакторах. Полученные в нейтронных экспериментах данные служат реперными точками для верификации расчетных моделей и моделирования эксплуатационных свойств материалов.

Прогресс в области разработки систем для детектирования нейтронов открыл возможность для исследования высокорadioактивных образцов после эксплуатации в активной зоне атомного реактора. Так, например, современные методы нейтронной визуализации позволяют проводить неразрушающий контроль облученного ядерного топлива и иных материалов, где необходимо визуализировать тяжелые элементы (например, уран или цирконий) вместе с легкими (например, кислород или водород).

В данном докладе будет сделан обзор использования экспериментальных методов, основанных на рассеянии медленных нейтронов, для исследования реакторных материалов.

АФГ благодарен Российскому научному фонду за финансовую поддержку этой работы (проект № 25-22-00854).

СОСТАВЫ, СТРУКТУРЫ, ДЕФЕКТЫ И СВОЙСТВА МАЛОАКТИВИРУЕМЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ДО-В ПРОЦЕССЕ-ПОСЛЕ» ВЫСОКОДОЗНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В БЫСТРЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

В.М. Чернов

АО «ВНИИНМ», Москва, Россия (VMChernov@bochvar.ru)

Конструкционные материалы (КМ) определяют длительности топливных кампаний

(ТК) и эффективность ядерного топливного цикла (ЯТЦ) быстрых (БР) и термоядерных (ТЯР) реакторов. Конструкции БР и ТЯР накладывают предельные изменения свойств КМ (изделий) для обеспечения длительностей и эффективности ТК. Для созданных БР (БР-III, открытый ЯТЦ) и планируемых демонстрационных ТЯР (ДЕМО-ТЯР) определены требования для длительностей ТК (до 3 лет) и для свойств КМ-III (100 сна, жаропрочность до 700 °С). Созданные КМ-III (Fe-Cr-Ni-Nb-Mo стали) обеспечивают требования БР-III и являются сильно-длительно радиоактивными после облучения (тысячелетия). Для БР нового поколения (БР-IV, замкнутый ЯТЦ) определены более высокие требования. Перспективен полный замкнутый ЯТЦ, включающий использование облученных КМ (изделий).

Рассмотрены составы, структуры, дефекты и механизмы формирования свойств КМ для БР и ТЯР в условиях «до-в процессе-после» высокодозного (200+ сна) облучения. Малоактивируемые КМ (МАКМ, время до использования после облучения менее 100 годов) перспективны для БР-IV и безальтернативны для ДЕМО-ТЯР и ТЯР. МАКМ должны не уступать (превосходить) по физико-механическим свойствам обычным (сильно-длительно радиоактивным) КМ и превосходить их по ядерно-физическим свойствам (меньшее паразитное поглощение нейтронов, меньшая и быстро спадающая радиоактивность). Созданные МАКМ-III (фер.-март. стали Fe-(8-12)Cr-W, ауст. марганцевые стали Fe-Cr-Mn, сплавы V-Ti-Cr) удовлетворяют требованиям БР-III и ДЕМО-ТЯР. Для МАКМ-IV-ТЯР (длительности ТК 5 лет) определены требования для повреждаемости 200+ сна и жаропрочности до 1000 °С. Для БР-IV и ТЯР требуются МАКМ-IV нового поколения. МАКМ-IV разрабатываются на основе модификации МАКМ-III и новых многокомпонентных тугоплавких сплавов.

Рассмотрены составы, структуры, дефекты, свойства и механизмы их формирования в МАКМ-III-IV. Определяющее значение для формирования микроструктур, дефектов и свойств (прочность, ползучесть, хладноломкость, жаропрочность, распухание) имеет тип, энергетика и подвижность атомов (матричных, легирующих, примесных) и дефектов (точечных, кластеров, дислокаций, пор). Существенное влияние оказывает γ -облучение. Возникающая в МАКМ (хладноломких «до-после» облучения) «в процессе» облучения радиационная ползучесть ослабляет формирование хладноломкости «в процессе» облучения.

Рассмотрены составы, микроструктуры, дефекты, физико-механические и ядерно-физические свойства МАКМ-III-IV «до», «в процессе» начального (<100 сна, деградация исходных и формирование радиационных дефектов, структур и свойств) и высокодозного (>100 сна, эволюция радиационных дефектов, структур и свойств) и «после» облучения. Высокодозные микроструктуры, дефекты и свойства определяются, в основном, композиционными составами и слабо зависят от исходных микроструктур и дефектов (режимов ТМО) и различны при облучениях в БР и ТЯР. Перспективными МАКМ-IV являются однофазные тугоплавкие многокомпонентные сплавы ванадия.

УСКОРЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ПУЧКАХ ИОНОВ. СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И СТАТУС

С.В. Рогожкин^{1,2}, Т.В. Кулевой^{1,2}, А.А. Никитин^{1,2}, А.А. Богачев^{1,2}, А.А. Хомич^{1,2},
Н.А. Искандаров^{1,2}, А.В. Клауз^{1,2}, А.А. Лукьянчук^{1,2}, О.А. Разницын^{1,2}, П.А. Федин^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия (SVRogozhkin@mephi.ru;
Sergey.Rogozhkin@itep.ru)

Для создания перспективных ядерных энергетических установок требуются материалы, выдерживающие дозы до 200 смещений на атом (сна) и выше, причем в широком интервале температур не менее 350-700 °С. Сдерживающим фактором разработки новых радиационно-стойких материалов является необходимость проведения длительных сеансов облучения для достижения предельных нагрузок. Реальным выходом из этой ситуации является проведение облучения при повышенных скоростях набора дозы радиационных повреждений для оценки радиационной стойкости в условиях эксплуатации.

Для проведения предварительного анализа радиационной стойкости новых материалов возможно использование пучков ионов, которые могут генерировать радиационные повреждения на 2–3 порядка быстрее, чем реакторное облучение. При облучении материалов ионами образование радиационных дефектов происходит неоднородно вдоль направления пробега ионов, поэтому в имитационных экспериментах на пучках ионов микроскопическими методами анализируется область радиационного повреждения. В настоящее время наиболее приемлемым в имитационных экспериментах считается использование тяжелых ионов с энергией несколько МэВ. При облучении сталей используют ионы Fe с энергией ~5 МэВ. Эти энергии обеспечивают в широком диапазоне доз радиационных повреждений наличие интервала глубин облученной области материала, где можно пренебречь влиянием поверхности и напряжениями, возникающими в области внедрения ионов.

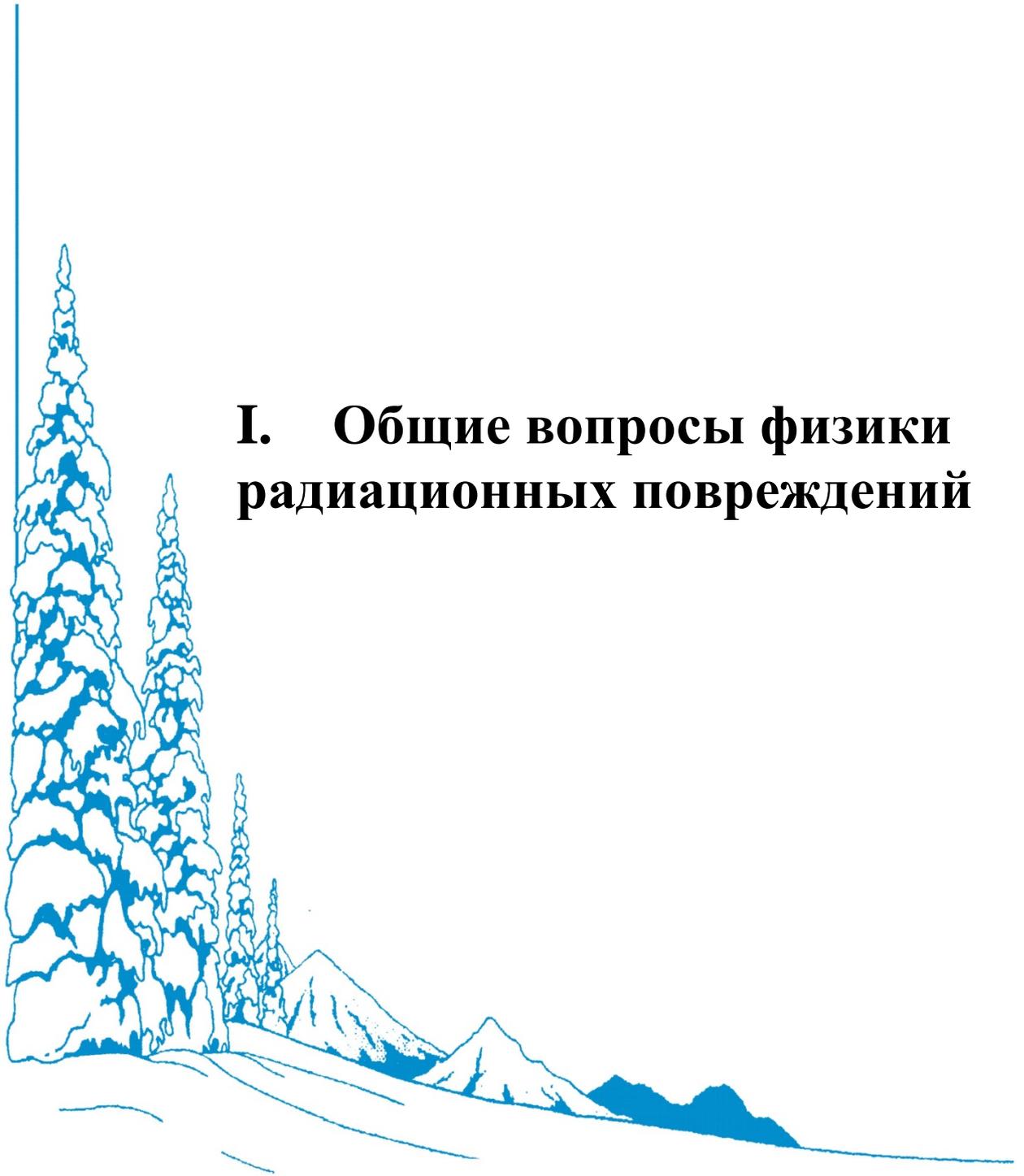
Основным направлением в таких экспериментах является облучение образцов и последующее исследование микроструктуры поврежденных приповерхностных слоев материала методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и атомно-зондовой томографии (АЗТ). Этому способствовало развитие методов прецизионной пробоподготовки с использованием фокусированных ионных пучков для исследований методами ПЭМ и АЗТ из облученных ионами образцов. Для исследований изменения механических свойств облученных ионами образцов применяются методы наноиндентирования для анализа влияния радиационных повреждений на упрочнение материала.

В настоящей работе представлено описание комплекса имитационных экспериментов на пучках тяжелых ионов ускорителя ТИПр, реализованного в НИЦ «Курчатовский институт» [1]. Применение тяжелоионного облучения апробировалось при анализе радиационной стойкости ряда материалов, таких как Eurofer 97, ЭК-181 и ЧС-139, титановых сплавов, сплавов вольфрама. Обширные исследования проведены по анализу радиационной стойкости дисперсно-упрочненных оксидами сталей дисперсно-упрочненных оксидами сталей.

Литература

[1] С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, А.А. Хомич, Н.А. и др. *Ядерная физика и*

I. Общие вопросы физики радиационных повреждений



ВОЗВРАТ ОСТАТОЧНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ, БЛИЖНЕЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ 5 МэВ СПЛАВАХ Fe-11Cr И Fe-16Cr

А.Л. Николаев

Институт физики металлов УрО РАН им. М.Н. Михеева, Екатеринбург, Россия

Получены и проанализированы данные по возврату остаточного электросопротивления (ВОЭС, $R(T) = \Delta\rho(T)/\Delta\rho_0$, где $\Delta\rho_0$ и $\Delta\rho(T)$ – начальный и текущий приросты остаточного электросопротивления (ОЭС) после облучения и последующего отжига при температуре T , соответственно) в сплавах Fe-11Cr и Fe-16Cr после низкотемпературного (<77 К) облучения. $R(T)$ рассматривается как сумма двух компонент (частей) $R(T) = R_d(T) + R_{SRO}(T)$, где $R_d(T) = \Delta\rho_d(T)/\Delta\rho_0$ – часть обусловленная вкладом дефектов $\Delta\rho_d(T)$ в ОЭС, а $R_{SRO}(T) = \Delta\rho_{SRO}(T)/\Delta\rho_0$ – часть обусловленная изменением ОЭС $\Delta\rho_{SRO}(T)$ вследствие радиационно-ускоренного ближнего упорядочения (БУ), т. е. БУ, ускоренного дальней миграцией точечных дефектов. Спектры ВОЭС также состоят из двух частей: $dR(T)/dT = dR_d(T)/dT + dR_{SRO}(T)/dT$. При низких температурах $R_{SRO}(T) = 0$ и становится отличным от нуля только с началом дальней миграции дефектов.

Зависимости ВОЭС для образцов одного сплава, облученных до различных исходных приростов ОЭС (концентраций дефектов), расходятся, начиная со 172 К (рис. 1). Расхождение связано с поведением компоненты $R_{SRO}(T)$, которая увеличивается с уменьшением $\Delta\rho_0$. Появление компоненты $R_{SRO}(T) \neq 0$ и связанное с этим расхождение зависимостей $R(T)$ указывают на начало дальней миграции дефектов при 172 К и эта температура соответствует низкотемпературному краю стадии начала дальней миграции наиболее подвижного дефекта из пары Френкеля.

На спектрах ВОЭС (рис. 2) наблюдается три пика стадий при тех же температурах, что и в пионерской работе [1] – 85-100 К, 180 К и 230 К (верхние кривые). Разница в амплитуде пиков при 230 К обусловлена наличием 70 атм примеси азота в наших сплавах. Такая структура спектров ВОЭС выглядит аномальной, т. к. двум процессам – началам дальней миграции собственных междоузельных атомов (СМА) и вакансий – в спектре соответствует единственная стадия вблизи 230 К. Анализ выявил, что стадия, соответствующая началу дальней миграции вакансий отсутствует в $dR_d(T)/dT$ и наблюдается только в $dR_{SRO}(T)/dT$ вблизи 200 К. Вследствие свойств компоненты $R_{SRO}(T)$ эта стадия не просматривается в $dR(T)/dT$ при высоких концентрациях дефектов (рис. 2, верхние кривые). Появление заметной вакансионной стадии в $dR_{SRO}(T)/dT$ при меньших концентрациях дефектов выглядит в $dR(T)/dT$ как рост пика стадии при 180 К и его смещение в сторону высоких температур (рис. 2, нижние кривые).

Стадия вблизи 230 К, наблюдаемая в $dR(T)/dT$ (рис. 2), наоборот не прослеживается в $dR_{SRO}(T)/dT$. Этот факт указывает на малую эффективность по ускорению БУ мигрирующих на этой стадии дефектов по сравнению с эффективностью вакансий, и позволяет интерпретировать эту стадию как начало дальней миграции СМА.

Литература

[1] Benkaddour A., Dimitrov C., Dimitrov O. Irradiation-induced defects in ferritic Fe-Cr alloys, *Mater. Sci. Forum.* – 1987. – Vol. 15–18. – P. 1263–1268

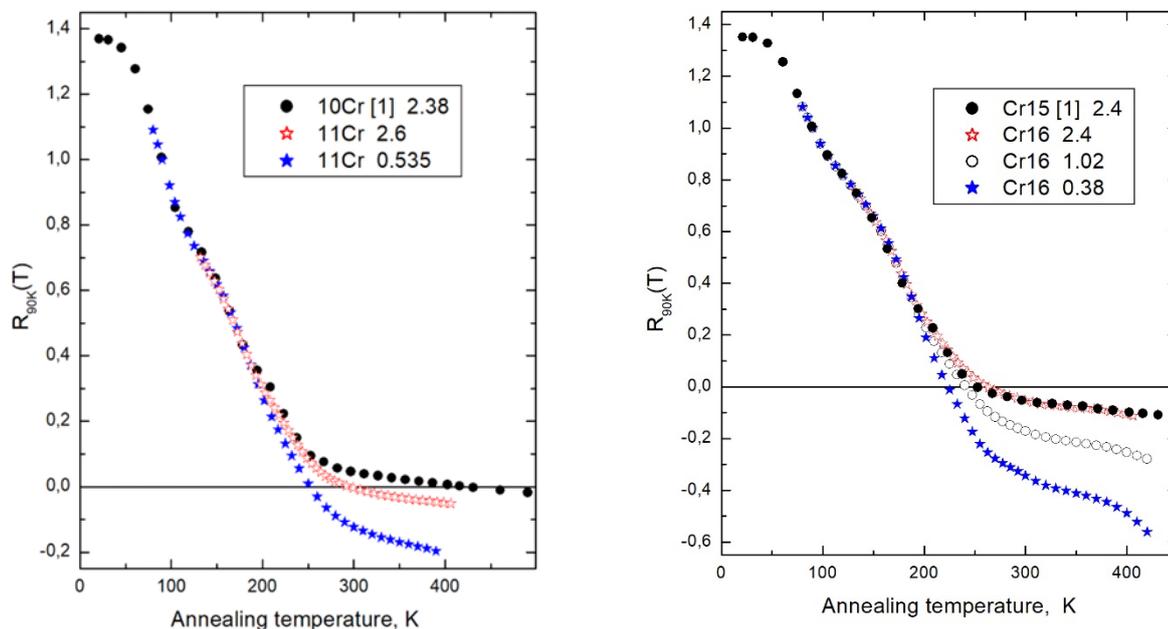


Fig. 1. Зависимости ВОЭС для образцов сплавов Fe-10Cr [1] и Fe-11Cr (слева), Fe-15Cr [1] и Fe-16Cr (справа), облученных до различных значений прироста ОЭС. Числа в легендах указывают на значения приростов ОЭС в 10^{-6} Ом см после отжига при 90 К.

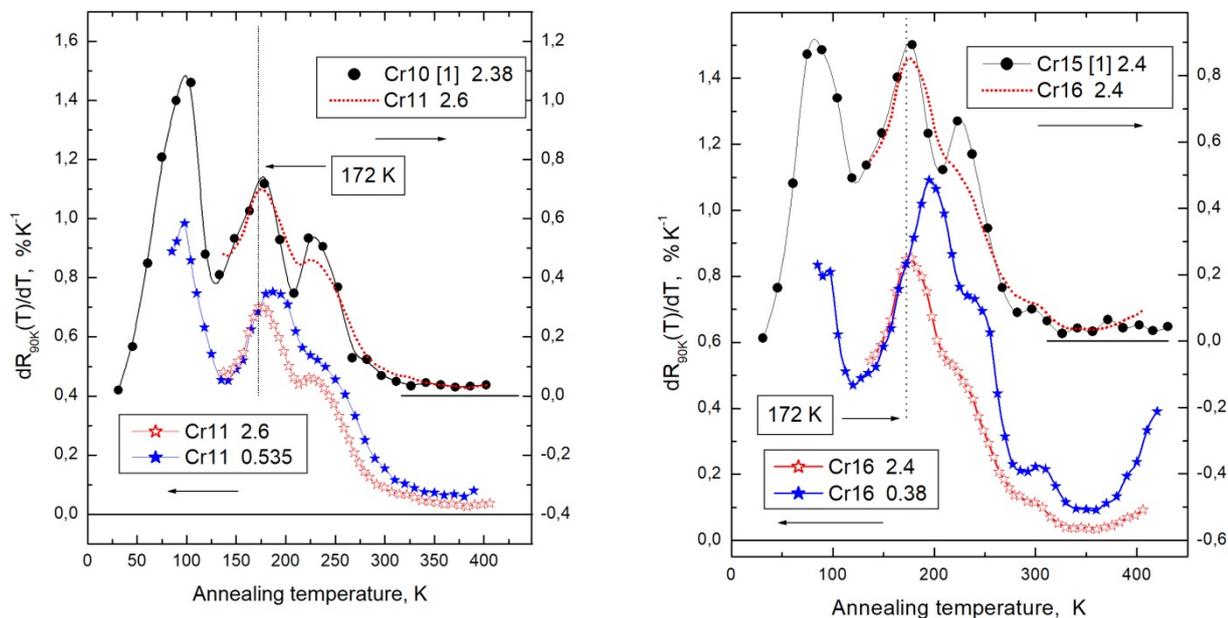


Fig. 2. Спектры ВОЭС для образцов сплавов Fe-10Cr [1] и Fe-11Cr (слева), Fe-15Cr [1] и Fe-16Cr (справа), облученных до различных значений прироста ОЭС. Вертикальные линии отмечают температуру начала дальней миграции дефектов.

**ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОЕ СТАРЕНИЕ СПЛАВА Fe-Ni-Al ПРИ
ОТЖИГАХ И ОБЛУЧЕНИИ ЭЛЕКТРОНАМИ**

С.Е. Данилов, Д.А. Перминов

*Институт физики металлов УрО РАН, 620990 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
(danilov@imp.uran.ru)*

Методом измерения остаточного электрического сопротивления исследованы этапы формирования интерметаллидных наночастиц, типа Ni_3Al , и поведение вакансионных дефектов в ГЦК сплаве Fe-Ni-Al, содержащем 33,3 ат.% Ni и 10.8 ат.% Al, при отжигах и при электронном (5 МэВ) облучении. Было показано, что в закаленном от 1050 К сплаве Fe-Ni-Al в ходе изохронного отжига при температурах выше 600 К происходит образование когерентных частиц, повышающих остаточное электросопротивление, а при температурах выше 700 К из этих частиц образуются наноразмерные (~4,5 нм) интерметаллидные выделения состава Ni_3Al , равномерно распределенные в матрице сплава, рост которых приводит к уменьшению остаточного электросопротивления. Это связано с укрупнением выделений (их коалесценцией) и уменьшением концентрации Al в твердом растворе сплава.

В результате облучения при комнатной температуре происходит накопление вакансионных дефектов в виде вакансионных комплексов. Диссоциация этих комплексов при температуре около 400 К приводит к образованию свободно мигрирующих вакансий и, как следствие, усиленной самодиффузии и образованию когерентных частиц состава Ni_3Al . При дальнейшем повышении температуры образование интерметаллидных частиц продолжается аналогично тому, как это наблюдается при отжиге закаленного сплава. Аналогичная зависимость электросопротивления облученного сплава Fe-Ni-Ti от температуры изохронного отжига известна.

**РАЗРУШЕНИЕ ОБЛУЧЕННОГО СПЛАВА Zr-2.5Nb,
ПОВРЕЖДЕННОГО ГИДРИДАМИ**

С.А. Аверин, А.Г. Нежданов, В.Ю. Ярков, В.К. Самедов, В.А. Цыгвинцев

*Акционерное общество «Институт реакторных материалов», г. Заречный. Россия
(averin@irmatom.ru)*

Циркониевые сплавы широко применяют в атомной промышленности. Они являются основным конструкционным материалом активных зон водо-водяных ядерных реакторов на тепловых нейтронах. При эксплуатации происходит взаимодействие с теплоносителем, изменение структуры и свойств конструкционных материалов.

Проведены исследования влияния низкотемпературного длительного нейтронного облучения циркониевого сплава Zr-2.5Nb в двух структурных состояниях (отожженное и многократно деформированного с отжигами), контактирующего с водным теплоносителем.

Исследования включали кратковременные механические испытания на разрыв, фрактографические и структурные исследования.

Установлено, что со стороны водного теплоносителя происходит наводороживание сплава с образованием гидридов, которые группируются в локальные поверхностные скопления в виде «блистеров». Наиболее сильное гидридное повреждение наблюдается в сплаве с отожженной структурой.

Разрушение при испытаниях на разрыв начинается по блистерам хрупко сколом, с формированием речного рельефа, обусловленного разрушением по гидридным пластинам. Это приводит к изменению схемы нагружения от плосконапряженного к расклинивающему отрыву.

Уровень падения прочностных свойств и охрупчивания зависит от степени повреждения гидридами, структуры сплава и повреждающего флюенса быстрых нейтронов. Степень гидридного повреждения определялась через долю хрупкого разрушения по результатам фрактографических исследований.

Выражаем благодарность Панченко В.Л. за проведение просвечивающих электронно-микроскопических исследований.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА АУСТЕНИТНЫХ СПЛАВОВ, ОБЛУЧЕННЫХ ГЕЛИЕМ ПРИ АРРМ He/СНА > 1000

Нгуен Ван Тъеп^{1,2}, Е.А. Корнеева¹, А.С. Сохацкий¹, В.А. Скуратов¹, С.В. Митрофанов¹,
Д.А. Комарова¹, М. Нкоси³

¹*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская область, Россия,
ekorneeva@jinr.ru*

²*Институт физики, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам*

³*Лаборатория ионно-ускорительных исследований iThemba (iThemba LABS), Кейптаун,
ЮАР*

В настоящей работе исследованы модельные аустенитные стали ЭИ847 (06С–Fe–16Cr–15Ni–3Mo–1Nb) и ЭП753 (18Cr–40Ni–5Mo–Mn–Nb) с различной исходной микроструктурой. Образцы были облучены ионами He²⁺ с энергией 3 МэВ по методике однородного легирования [1] в лаборатории iThemba LABS (ЮАР) с целью изучения радиационно-индуцированных процессов в условиях избыточного содержания примесных атомов.

Структурные исследования и измерения радиационного упрочнения проводились в области равномерного распределения гелия. Показано, что в облученном слое формируется высокая плотность радиационно-индуцированных дефектов. Для выявления дефектной структуры образцы были дополнительно отожжены при 500 °С в течение 30 мин. В микроструктуре наблюдались дислокационные петли размером ≈6 нм, плотность которых для обеих сталей росла линейно до дозы 0,1 сна и далее выходила на насыщение. При этом линейная плотность дислокаций в стали ЭИ847 оказалась несколько выше, чем в ЭП753. Отмечено, что скорость накопления радиационных дефектов при данном режиме облучения существенно превышает значения, характерные для нейтронного и традиционного ионного облучений [2, 3]. Измерения нанотвёрдости показали согласованное поведение: наблюдается рост твёрдости до дозы 0,1 сна с последующим насыщением. Наибольшее радиационное упрочнение отмечено у образцов с гомогенизированной исходной микроструктурой. Оценённые параметры радиационных дефектов дают значения коэффициента α , хорошо согласующиеся с литературными

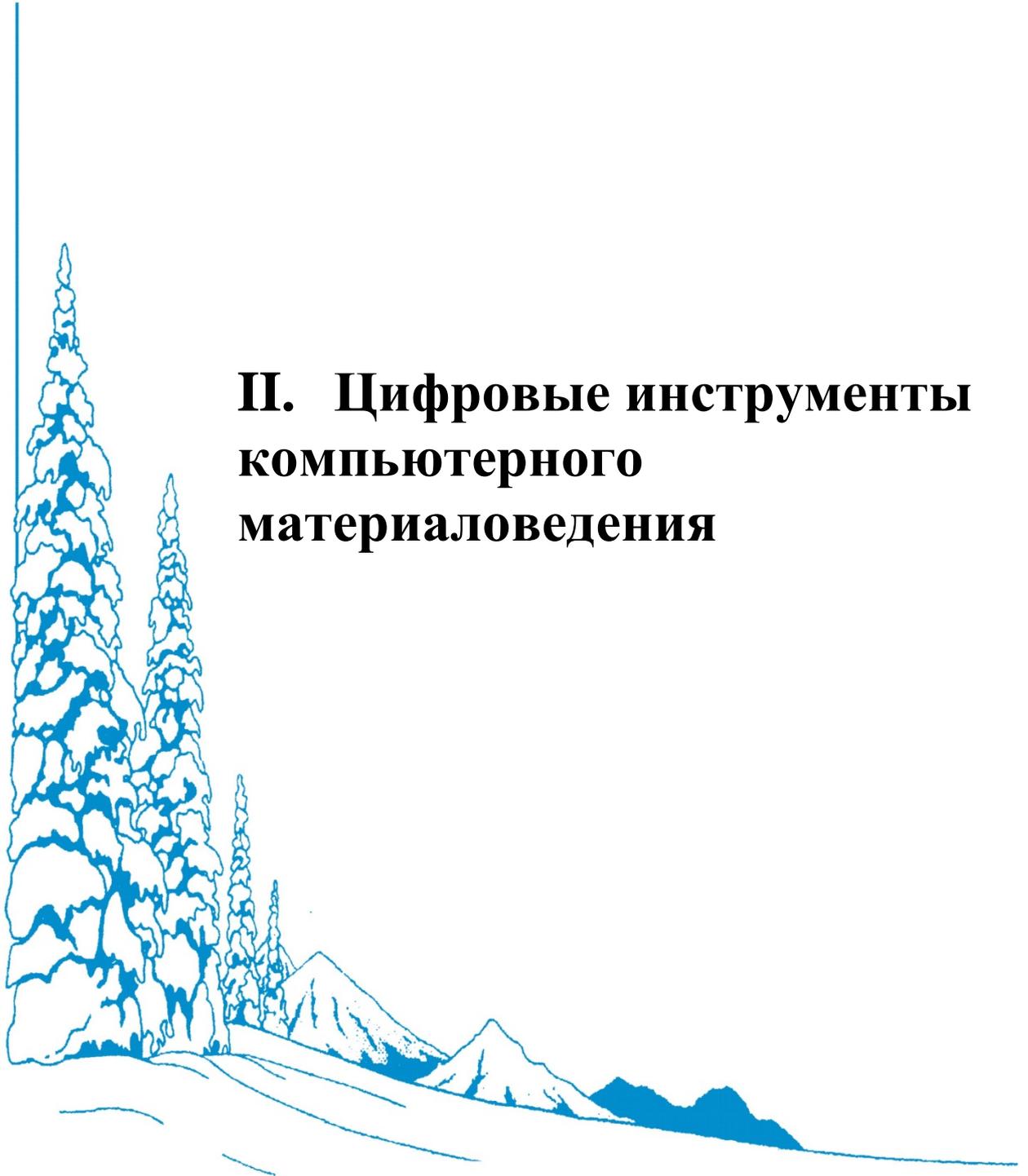
данными в модели дисперсионного барьерного упрочнения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-72-10101, <https://rscf.ru/project/25-72-10101/>.

Литература

- [1] Sohatsky A.S., Komarova D.A., Nguyen T.V., Skuratov V.A., Mitrofanov S.V., Khumalo Z.M., C. Mtshali, M. Nkosi, J.H. O'Connell, *J. Nucl. Mater.* **v.606** (2025), p. 155601.
- [2] Katoh Y., Stoller R.E., Kohno Y., Kohyama A., *J. Nucl. Mater.*, **v. 210**, 1994, p. 290-302.
- [3] Ma Z., Ran G., Qiu X., Li Y.P., Ding Y., Zhang R., *J. Nucl. Mater.*, **v. 563**, 2022, p. 153645.

II. Цифровые инструменты компьютерного материаловедения

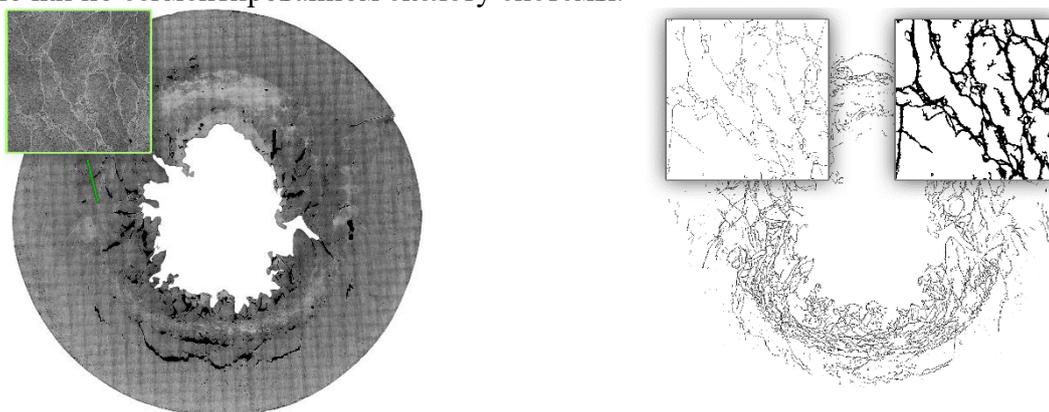


ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ В СПЛАВЕ УРАНА С МОЛИБДЕНОМ И ЦИРКОНИЕМ ПРИ СФЕРИЧЕСКОМ СИММЕТРИЧНОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Д.А. Беляев, А.С. Александров, Ю.Н. Зуев, И.Л. Святков, Е.А. Леви
 ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия
 (bad1331@vniitf.ru)

Проведено металлографическое исследование сохраненной после взрывного нагружения оболочки сплава урана с молибденом и цирконием, в меридиональном сечении которой выявлена сложно устроенная система локализованной деформации [1].

Для количественного описания структуры предложен и реализован способ получения количественных характеристик выявленной системы локализованной деформации с привлечением обучаемых алгоритмов компьютерного зрения для семантического сегментирования изображений, реализованных в современном прогрессивном свободно распространяемом компьютерном программном обеспечении [2 — 5]. Получены и проанализированы статистические данные по локализации деформации в сечении оболочки по сегментированному скелету системы.



Меридиональное сечение сохраненной после взрывного нагружения оболочки с выявленной системой локализованной деформации [1]

	Среднее	СКО	Медиана	Макс
Средняя длина веток, мкм	16,8	17,3	13,2	14
Максимальная длина веток, мкм	68,0	98,7	26,9	97
Наибольший кратчайший путь, мм	0,38	1,22	0,029	23
Количество веток, шт.	29,9	210,8	3	67

Коллектив авторов выражает благодарность за полезное обсуждение результатов металлографического анализа микроструктуры сотруднику ИФМ УрО РАН д-ру физ.-мат. наук Талуц Нине Иосифовне.

Литература

[1] Д.А. Беляев, А.С. Александров, Ю.Н. Зуев, Е.А. Козлов, И.Л. Святков, Е.А. Леви. Структура материала оболочки из сплава урана с молибденом и цирконием после взрывного нагружения. *Тезисы докладов XI Международного Уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов»*. Кыштым, Дальняя дача, 27 февраля — 4 марта 2017. С. 50.

[2] Bankhead, P. et al. QuPath: Open source software for digital pathology image analysis. *Scientific Reports* (2017). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17204-5>.

[3] Berg, S., Kutra, D., Kroeger, T. et al. ilastik: interactive machine learning for (bio)image analysis. *Nat Methods* **16** (2019) 1226–1232. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0582-9>.

[4] Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E. et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* **9** (2012) 676–682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>.

[5] Rueden, C.T., Schindelin, J., Hiner, M.C. et al. ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics* **18** (2017) 529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>.

МОДИФИКАЦИЯ ИОННЫМ ПУЧКОМ УЛЬТРАТОНКИХ ОКСИДНЫХ СЛОЕВ

А.В. Янилкин¹, Н.С. Смирнов^{1,2}, Е.А. Кривко^{1,2}, И.А. Родионов^{1,2}

¹ФГУП ВНИИА, Москва, Россия (yanilkin@vniia.ru)

²Шуховские лаборатории, МГТУ, Москва, Россия

Многослойные наномасштабные системы, включающие скрытые ультратонкие туннельные переходы, двумерные материалы и твёрдые электролиты, играют ключевую роль в разработке логических элементов, памяти, квантовых и нейро-вдохновлённых вычислений следующего поколения. Однако управление ультратонкими слоями на атомном уровне остаётся сложной задачей для передовых приложений. В недавней статье [1] был предложен масштабируемый подход, использующий облучение фокусированным ионным пучком для конструирования закопанных ультратонких слоёв с контролем толщины на уровне ангстрема. Экспериментально показана его эффективность при настройке джозефсоновских переходов в диапазоне изменения сопротивления от 2 до 37% со стандартным отклонением 0,86% по всему чипу размером 25×25 мм. Кроме того, продемонстрирован контроль частоты с точностью ±17 МГц (что соответствует изменению толщины туннельного барьера ±0,172 Å) для сверхпроводящих трансмонных кубитов со временем когерентности до 500 пкс, что является перспективным для практической реализации устойчивых к ошибкам квантовых вычислений. Данная работа обеспечивает возможность конструирования ультратонких многослойных наносистем на предельно малых масштабах за счёт генерации кристаллических дефектов с контролируемой глубиной.

В настоящей работе обсуждается механизм модификации ультратонких закопанных оксидов под воздействием ионного пучка. Наши моделирования методом молекулярной динамики облучения структуры Al/a-AlO_x/Al ионами Ne⁺ подтверждают ключевую роль кристаллических дефектов, создаваемых ионами.

Литература

[1] Smirnov N.S. et al., *Science Advances* **v.11** (2025), eads9744.

**МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
УГЛЕРОДА НА ПРОЧНОСТЬ ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ**

Р.М. Кичигин¹, П.В. Чирков¹, А.В. Караваев¹, В.В. Дремов¹
¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия

Статические прочностные свойства конструкционных материалов играют важную роль при анализе реакции конструкций на различные нагрузки. Механические и инженерные характеристики, такие как предел текучести, предел прочности, пластичность во многом определяются, в отличие, например, от модулей упругости, их микроструктурой (различными дефектами, присутствующими в материалах).

Практический интерес с точки зрения количественного атомистического описания механизмов упругопластической деформации представляют широко используемые в промышленности ферритные и феррито-мартенситные стали. Одним из факторов, определяющим механические свойства ферритных сталей, является углерод, а именно его количество и распределение в материале. При малых концентрациях, характерных для сталей, углерод является примесью внедрения. При этом он обладает достаточной подвижностью в ОЦК решетке ферритных сталей для того, чтобы моделировать его динамику в прямых атомистических расчетах.

Моделирование статических прочностных свойств реальных материалов является нетривиальной задачей в силу того, что типичные временные масштабы, доступные для прямого моделирования в рамках Классической Молекулярной Динамики (КМД) за разумное время, не превосходят сотен наносекунд. В настоящей работе для определения статических прочностных характеристик сталей использован КМД метод моделирования, предложенный и развитый в работах [1–3]. Метод основан на атомистическом моделировании релаксации сдвигового напряжения в специально сконструированных КМД образцах определенной геометрии с внедренными дислокациями. Это позволяет оценивать напряжение, при котором происходит остановка дислокаций, то есть оценивать напряжение Пайерлса и рассчитывать оценку квазистатического предела текучести. Возможности методики, а также ее проверка на обширных экспериментальных данных продемонстрированы для различных материалов, таких как чистые металлы [1], ГЦК-сплавы Pu-Ga [2–3], аустенитные Fe-Ni-Cr стали [4].

В данной работе продемонстрировано применение данного метода расчёта предела текучести с помощью КМД-моделирования к ферритным сталям с учетом реального содержания и распределения углерода. Рассматривается его динамика и влияние на прочность. В работе также затрагиваются вопросы моделирования с учетом выпадения вторичных фаз максимально приближенными по морфологии к реально наблюдаемым в экспериментах.

Литература

- [1] Karavaev A.V. et al., *EPJ Web of Conf.* – 2015. – **Vol. 94.** – P. 04007.
- [2] Karavaev A.V. et al., *J. Nucl. Mater.* – 2017. – **Vol. 496.** – P. 85.
- [3] Karavaev A. V. et al., *J. Nucl. Mater.* – 2019. – **Vol. 524.** – P. 149.
- [4] Ivanov I.A. et al, *Sci. Rep.* – 2021. – **Vol. 11.** – P. 23501.

НАНОРАЗМЕРНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В $MgAl_2O_4$ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Р.А. РЫМЖАНОВ^{1,2}, J.H. O'Connell³, В.А. Скуратов^{1,4,5}

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия (rymzhanov@jinr.ru)

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

³Университет Нельсона Манделы, Порт-Элизабет, ЮАР

⁴Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

⁵Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Магний-алюминиевая шпинель $MgAl_2O_4$ является одним из наиболее перспективных оптических материалов благодаря своей высокой радиационной стойкости к нейтронному облучению, химической и термической стабильности, механической прочности, а также оптической прозрачности в широком спектральном диапазоне — от инфракрасной до ультрафиолетовой области. Совокупность этих свойств делает данный материал привлекательным для использования в качестве диагностических окон в термоядерных реакторах, в дозиметрии, а также как функциональной керамики с высокой литий-ионной проводимостью.

В настоящей работе исследуется структурный отклик $MgAl_2O_4$ на воздействие быстрыми тяжёлыми ионами (БТИ) методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и численного моделирования, включающего Монте-Карло модель TREKIS [1] и молекулярно-динамические расчёты [2–4]. Обсуждаются механизмы и кинетика формирования одиночных треков в шпинели, облучённой ионами Bi с энергией 700 МэВ, в зависимости от кристаллографического направления. Экспериментальные и численные результаты показывают, что прохождение БТИ приводит к образованию трека сложной структуры. Центральная часть повреждённой области характеризуется сильным разупорядочением и может быть частично аморфной. Эта аморфная фаза является нестабильной и быстро рекристаллизуется под воздействием электронного пучка ПЭМ. Аналогичное поведение наблюдается в молекулярно-динамических расчетах: кристаллизация аморфной области происходит за десятки пикосекунд при повышенной температуре. Периферийная часть трека сохраняет кристаллическое строение, однако для неё характерно ослабление некоторых дифракционных пиков, типичных для шпинели. Анализ повреждённой области показывает, что её структура соответствует искажённой решётке типа каменной соли. В переходной зоне между треком БТИ и неповреждённым материалом также наблюдаются антисайт-дефекты (дефекты перестановки катионов).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-72-10101, <https://rscf.ru/project/25-72-10101/>.

Литература

- [1] N.A. Medvedev et al., *J.Phys. D.* **т.48** (2015), с.355303.
- [2] R.A. Rymzhanov et al. *J. Appl. Phys.* **т.127** (2020), с.015901.
- [3] R.A. Rymzhanov et al. *Appl. Surf. Sci.* **т.566** (2021), с.150640.
- [4] R.A. Rymzhanov et al. *Com. Mat. Sci.*, **т.221** (2023) с.112078.

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ
ПРОГНОЗА РАДИАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ОСНОВЕ
СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЕЙ КОРПУСОВ ВОДО-
ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ**

Е.Д. Малиновский¹, С.В. Федотова¹, Е.А. Кулешова^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (*zhenya.malinovskiy.2001@mail.ru*)

²НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Развитие водо-водяных реакторов (ВВЭР, PWR) идет в направлении повышения эффективности и безопасности эксплуатации, увеличения проектного срока службы. Одним из необходимых условий длительной эксплуатации является сохранение целостности корпуса реактора (КР), являющегося наиболее габаритной и, как следствие, незаменимой частью реакторной установки, определяющей её срок службы.

В процессе длительной эксплуатации под воздействием повышенных температур (~300°C) и нейтронного облучения происходит деградация свойств материалов КР. Эксплуатационные воздействия приводят к изменениям структуры, что приводит к деградации механических свойств материала – явление радиационного охрупчивания. Одним из механизмов радиационного охрупчивания является упрочняющий механизм, связанный с радиационным упрочнением материала, вызванным образованием радиационных дефектов и радиационно-индуцированных кластеров растворенных атомов. При этом определяющий вклад в упрочнение и, как следствие, радиационное охрупчивание по упрочняющему механизму вносит образование и рост плотности радиационно-индуцированных кластеров, в связи с чем микроструктурные исследования параметров кластеров позволяют с большей точностью расчетно-экспериментальным методом устанавливать величину радиационного упрочнения. При этом для повышения проектного срока службы реакторной установки необходим прогноз радиационно-индуцированных структурных изменений на длительный срок.

Для радиационно-индуцированных кластеров характерны размеры 3–5 нм и плотность 10^{23} – 10^{24} м⁻³, в связи с чем наиболее предпочтительным и широко применяемым методом исследования является атомно-зондовая томография (АЗТ). К настоящему времени в мире накоплен большой объем результатов АЗТ-исследований кластеров в сталях КР различного химического состава в интервале Cu=(0,02–0,5) масс.%, Ni=(0,2–5,5) масс.%, Mn=(0,2–2,0) масс.%, облученных в энергетических и исследовательских реакторах с различными плотностями потока и флюенсами быстрых нейтронов. Установление закономерностей в таком широком наборе данных является трудной задачей, в связи с чем перспективным является использование методов машинного обучения.

В работе на основе накопленных собственных и литературных данных АЗТ-исследований радиационно-индуцированных кластеров в сталях КР построена регрессионная модель машинного обучения. Архитектура полученной модели основана на архитектуре модели Cubist: модель совмещает деревья решений и линейные модели путем обучения в каждом из узлов дерева обобщенной линейной модели. Дополнительно в данной модели проводится линейное сглаживание, позволяющее учитывать при прогнозе не только модель, которая обучалась в листе дерева, но и модели, расположенные на пути от листа к корню. Это позволяет учитывать информацию не только от «похожих» данных, а от всех данных набора, что улучшает обобщающую способность. На основе химического состава и условий облучения сталей предсказывались значения параметров радиационно-индуцированных кластеров. С использованием предсказанных значений

параметров кластеров в модели барьерного упрочнения получены дозовые зависимости радиационного упрочнения сталей ВВЭР, показавшие хорошее соответствие с экспериментальными данными радиационного упрочнения, не использовавшимися при обучении.

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ФАЗОВЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ МЕТОДОМ CALPHAD ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ РАДИАЦИОННО-УСКОРЕННОЙ ДИФФУЗИИ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ

Е.А. Мешков¹, А.В. Янилкин^{1,2}

¹ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова», г. Москва, Россия (EAMeshkov@vniia.ru)

²ФГАОУВО «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия

Рассматривается кинетика образования и роста вторичных фаз в многокомпонентных системах с учётом радиационного воздействия методом термодинамического моделирования Calphad с использованием программного кода Thermo-Calc [1]. Объектами исследования являются многокомпонентные системы на основе перлитной стали 15X2НМФА, феррито-мартенситной ЭП823 и аустенитной ЭК164 В расчётах учитывалось влияние радиационно-ускоренной диффузии, кластеров междоузлий и баллистического перемешивания. Эмпирические параметры расчётов с использованием программы Thermo-Calc (энергия межфазной границы и дополнительная энергия Гиббса для фаз) подбирались на основе экспериментальных данных по зависимости характеристик выделений от дозы облучения для сталей 15X2МФА, НТ9 и НСМ12А.

Полученные величины объёмной концентрации и среднего размера выделений вторичных фаз согласуются с опубликованными экспериментальными данными для рассматриваемых систем. Показано, что при различных типах облучения (например, ионном и нейтронном) различно соотношение между числом баллистических и диффузионных скачков. Это оказывает сильное влияние на дозовую зависимость объёмной концентрации и среднего размера выделений для различных типов облучения.

Литература

[1] Andersson, J.O., Helander, T., Hoglund, L., Shi, P.F., Sundman, B., *Calphad*, т. 26 (2002), с. 273.

**СТРУКТУРА ГИДРИДОВ В СИСТЕМЕ ТИТАН-ВАНАДИЙ:
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАШИННО-ОБУЧЕННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ**

П.В. Чирков^{1,2}, А.А. Мирзоев², А.В. Караваев¹, В.В. Дремов¹

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск, Россия

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Водородное охрупчивание конструкционных материалов, в том числе и в условиях радиационного облучения, представляет собой значительную проблему, которая вызвана в первую очередь чрезвычайно высокой подвижностью атомов водорода в металле. Кроме того, титан и его сплавы с ванадием рассматриваются как перспективные материалы для хранения водорода. Однако на данный момент фундаментальные знания о физических свойствах системы Ti-V-H фрагментарны и ограничены данными о фазовой диаграмме [1] для комнатной температуры, а также первопринципными расчетами при нулевой температуре рамках теории функционала плотности (Density functional theory – DFT) [2].

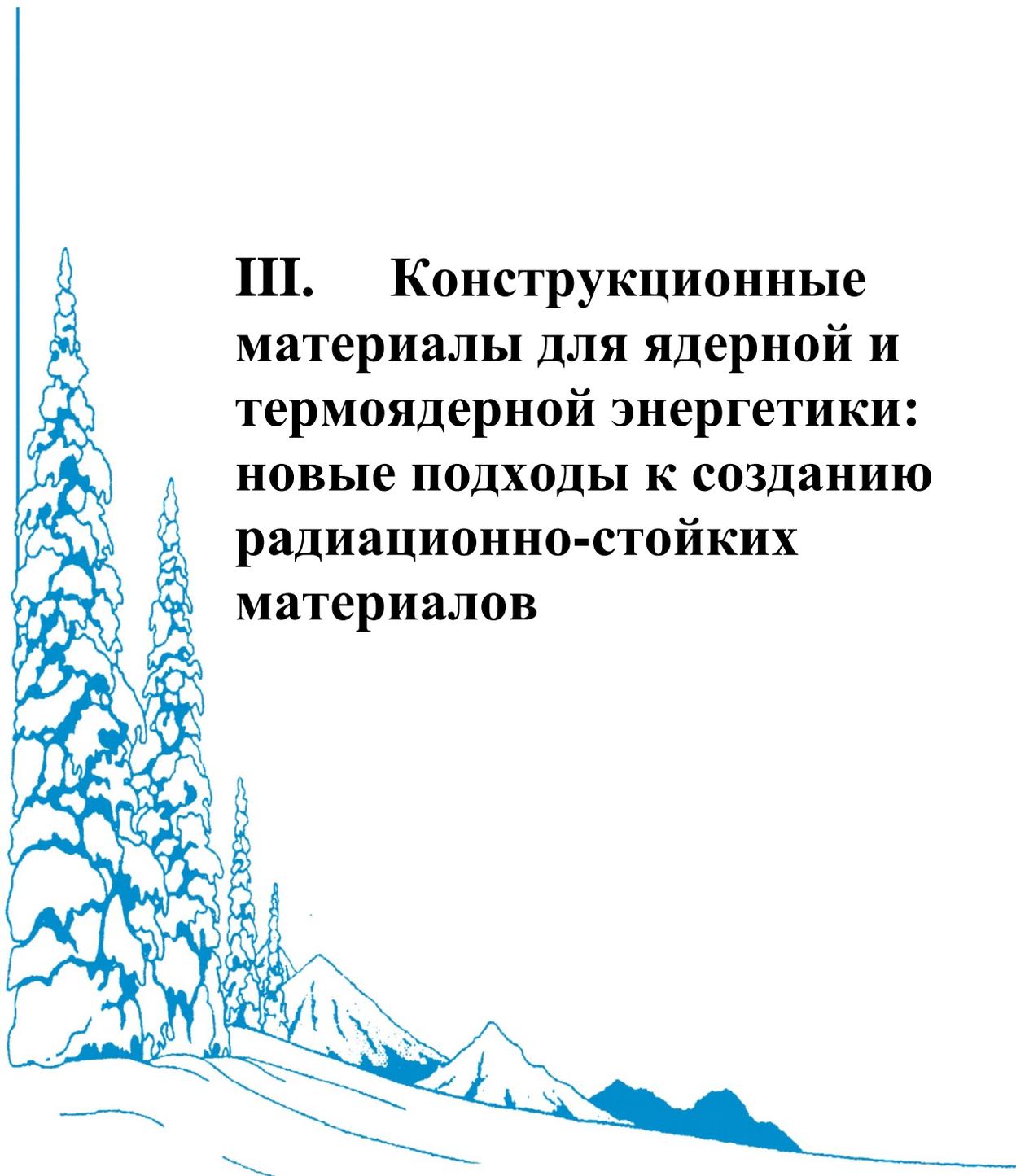
В связи с вышесказанным в данной проводилось молекулярно-динамическое моделирование для различных кристаллических фаз системы $Ti_{1-x}V_xH_y$. Для достижения точности сопоставимой с *ab initio* расчетами было выполнено построение машинно-обученного потенциала в рамках модели тензорных моментов (Moment Tensor Potential – MTP) [3]. Для обучения межатомного потенциала использовались результаты DFT расчетов потенциальных энергий и сил, действующих на атомы. Были рассмотрены как структуры с содержанием водорода ($y < 1.0$) и кристаллической решеткой Ti-V ГПУ (α) и ОЦК (β) типов. Также для различного содержания ванадия была рассмотрена δ -фаза $Ti_{1-x}V_xH_2$, которая имеет кристаллическую структуру типа флюорита с пространственной группой $Fm\bar{3}m$, в которой атомы металлов располагаются в гранецентрированной кубической решетке (ГЦК), а водород занимает тетраэдрические междуузлия решетки. Обучение потенциала выполнено со среднеквадратичной ошибкой по сравнению с обучающей выборкой для потенциальной энергии на уровне ~ 2.6 мэВ/атом и 156 мэВ/Å для сил, действующих на атомы.

С использованием построенного потенциала межатомного взаимодействия были рассчитаны значения коэффициента диффузии водорода в различных фазах для температур 500-1000 К, из которых получены значения энергии активации для различного содержания ванадия в сплаве. Также выполнен расчет модулей упругости при конечных температурах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ No. 25-22-20062.

Литература

- [1] Hagi T., Sato Y., Yasuda M., Tanaka K. *Trans. of the Japan Inst. of Metals* **v.28** (1987), 198.
- [2] Otani N., Kuwabara A., Ogawa T. et al. *Acta Materialia* **v.134** (2017), 274.
- [3] Shapeev A.V., *Multiscale Modeling and Simulation* **v.14** (2016), pp.1153-1173.



III. Конструкционные материалы для ядерной и термоядерной энергетики: новые подходы к созданию радиационно-стойких материалов

**ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ ДУО СТАЛЕЙ НА ИХ
РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ПРИ УСКОРЕННЫХ
ИСПЫТАНИЯХ**

А.А. Хомич, С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, А.А. Богачев, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын,
А.С. Шутов, А.В. Клауз, Н.А. Искандаров

*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Курчатовский
комплекс теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия
(artem.khomich@gmail.com)*

Дисперсно-упрочненные оксидные (ДУО) стали превосходят традиционные ферритно-мартенситные стали по жаропрочности благодаря наличию большого количества равномерно распределенных наноразмерных оксидных частиц. Данные материалы активно разрабатываются и являются перспективными для применения в ядерной энергетике, включая конструкции первой стенки термоядерных реакторов, оболочки твэлов реакторов на быстрых нейтронах и другие ключевые компоненты реакторов IV поколения [1, 2].

Эксплуатационный потенциал ДУО сталей предполагает рабочую температуру до 750 °С и устойчивость к радиационному набуханию до 200 смещений на атом [3]. Их механические свойства в значительной степени определяются наноструктурой, а именно размером и пространственным распределением дисперсных включений. Эти характеристики, в свою очередь, напрямую зависят от состава легирующих элементов и режимов термомеханической обработки. Для количественного анализа оксидных включений требуется комплексное применение методов микроскопии, таких как просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и атомно-зондовая томография (АЗТ).

Учитывая, что высокие эксплуатационные свойства ДУО сталей непосредственно связаны со стабильностью оксидных наночастиц и кластеров в матрице, особое внимание уделяется исследованию эволюции их наноструктуры в условиях облучения [3, 4].

Целью настоящей работы является систематическое и комплексное изучение радиационно-индуцированных изменений в ДУО сталях различных классов (9Cr ODS, 10Cr ODS, 13Cr ODS, ЭП450 ДУО, ЭП823 ДУО), имеющих существенные различия в исходной структуре. Исследование выполнено после имитационного облучения до дозы 30 сна при температуре 350°С, что соответствует области низкотемпературного радиационного охрупчивания.

Литература:

- [1] Carlan Y. *J. Nucl. Mater.* 2009. **V. 386–388**. P. 430.
- [2] Jeong Y.H., Kim W.J. *Proc. Eng.* 2014. **V. 86**. P. 1.
- [3] Wharry J.P. *J. Nucl. Mater.* 2017. **V. 486**. P. 11.
- [4] Liu X., Miao Y. *Scripta Mater.* 2017. **V. 138**. P. 57.

**ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА
МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ В СТАЛЯХ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА ТИПА
Cr16-Ni19 И Cr16-Ni15**

С.В. Яркова, В.А. Цыгвинцев, Н.В. Глушкова, И.А. Портных, Д.Н. Вельмогин
АО «Институт реакторных материалов» 624250, г. Заречный Свердловской обл., а/я 29.

Стали аустенитного класса типов Cr16-Ni19 и Cr16-Ni15 применяются в качестве оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах. Основными факторами, ограничивающими использование сталей этого класса являются: их склонность к коррозионным повреждениям, радиационная ползучесть, снижение прочности, охрупчивание и радиационное распухание [1]. Изменение физических и механических свойств материала, искажение форм и размеров твэлов под действием облучения влияет на безопасность работы реактора.

Структурными факторами, сдерживающими распухание, являются [2]: повышение стабильности твердого раствора и стабильности дислокационной структуры, полученные при холодной деформации ~ 20 % на заключительном этапе обработки оболочечных труб.

Дислокационная структура, сформированная при холодной деформации, является основной причиной возникновения в материале микронапряжений, вызывающих микродеформацию кристаллической решетки. Под облучением дислокационная структура трансформируется и образуются радиационные дефекты кристаллической структуры [3], такие как кластеры, дислокационные петли и поры, вследствие чего меняется уровень микронапряжений.

Изменение состояния структуры под облучением зависит как от температуры облучения, так и от скорости набора повреждающей дозы, а также от исходной степени холодной деформации. Разделение вкладов облучения и исходного состояния возможно прослеживанием изменения микронапряжений после эксплуатации оболочек твэлов.

Оценка микронапряжений проводится методом рентгеновской дифракции по уширению и положению дифракционных максимумов.

В работе приведены результаты рентгеноструктурных исследований влияния нейтронного облучения в реакторе на быстрых нейтронах на микронапряжения оболочек твэлов. Методом регрессии оценен вклад различных факторов, таких как температура облучения и повреждающая доза облучения, на микронапряжения в трубах из сталей типов Cr16-Ni19 и Cr16-Ni15.

Литература

[1] Калинин Б. А., Годин Ю. Г., Тенишев А.В., Новиков В.В. *Физическое материаловедение* // М.: МИФИ Т. 6. № 2 Ядерные топливные материалы. – 2008. – 604 с.

[2] Баканов М.В., Чуев В.В., Крюков О.В. Лукин А.В. и др. Оптимизация структурного состояния материала оболочечных труб из стали ЧС68 в холоднодеформированном состоянии // *Известия ВУЗов. Ядерная энергетика*. – 2005.– №1. – С. 139-145.

[3] Портных И.А., Глушкова Н.В., Панченко В.Л., Кинёв Е.А., Козлов А.В. Различия радиационного распухания оболочек твэлов из стали ЧС-68, происходящего при близких условиях нейтронного облучения // *ВАНТ. Сер.: Материаловедение и новые материалы*. 2007. № 1. С. 377-388.

**ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЗУЧЕСТИ
ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП 823, ВКЛЮЧАЯ ДУО
МОДИФИКАЦИЮ**

Н.В. Катаева¹, В.В. Сагарадзе¹, В.А. Завалишин¹, К.А. Козлов¹,
М.В. Леонтьева-Смирнова², А.А. Никитина²

¹*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия,
(kataeva@imp.uran.ru)*

²*ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, г. Москва, Россия*

В настоящее время одним из перспективных материалов для ядерно-энергетических установок со свинцово-висмутовым теплоносителем является феррито-мартенситная сталь ЭП 823. Целью настоящей работы было исследование структурно-фазовой стабильности в процессе длительных испытаний на ползучесть и длительную прочность стали ЭП 823.

В работе были проведены длительные испытания на ползучесть микрообразцов стали ЭП 823-Ш (электрошлаковый переплав) после обработки по режимам VSQ и АТОН при температурах 500–600 °С и напряжениях 100–300 МПа. Показана более высокая эффективность обработки АТОН. В частности, при 600 °С и напряжении 200 МПа образцы стали ЭП 823 АТОН выдерживают без разрушения более 1200 ч, а образцы ЭП 823 VSQ только около 30 ч. Выполнены электронно-микроскопические исследования структуры различных образцов из реакторной стали ЭП 823-Ш (трубки Ø 9.7×0.5 мм после термообработки VSQ; трубки Ø 9.7×0.5 мм после термообработки АТОН; трубки Ø 10.5×0.5 мм после термообработки АТОН; трубки Ø 12.2×0.5 мм после закалки и высокого отпуска при 700–720 °С). Все исследованные образцы содержат небольшое количество ферритных зерен и, в основном, состоят из высокоотпущенного реечного мартенсита, претерпевшего возврат, частичную полигонизацию и сохранившего повышенную плотность дислокаций. По границам мартенситных реек располагаются карбиды Me₂₃C₆ размером 50–200 нм, а в объеме кристаллов – дисперсные карбиды типа VC размером ~ 5 нм. Высокотемпературные испытания на ползучесть вызывают дополнительное развитие процессов возврата, полигонизации и частичной рекристаллизации в мартенситных рейках.

Определены характеристики ползучести и структурные изменения поперечных образцов, изготовленных из твэльных трубок Ø 6.9×0.4 мм, реакторных сталей ЭП 823-Ш, ЭП 823 и ЭП 823-ДУО (дисперсно-упрочненная оксидами) при напряжениях 60–100 МПа и температурах 650 и 670 °С. При 650 °С и напряжении 100 МПа сталь ЭП 823-Ш выдержала 1882 ч, а сталь ЭП 823 всего 258 ч. При 670 °С и напряжении 100 МПа стали ЭП 823-Ш и ЭП 823 имеют время до разрушения 371 ч и 74 ч, соответственно. Это говорит о преимуществе (по сопротивлению ползучести) стали электрошлакового переплава ЭП 823-Ш. Показано, что наибольшую длительную прочность при 650 и 670 °С имеют вырезанные из пластины образцы стали ЭП 823-ДУО, содержащей упрочняющие Y-Ti оксиды. Образцы, изготовленные из представленных оболочечных трубок этой же стали имеют существенно меньшую длительную прочность.

Проанализированы структура и жаропрочность образцов стали ЭП 823, включая ДУО-модификацию, в сравнении с другими российскими ОЦК сталями (ЭП 900, ЭК 181, ЧС 139, ЭП 450, ЭП 450-ДУО). Из «безоксидных» сталей самое низкое сопротивление высокотемпературной ползучести имеет сталь ЭП 823.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ

УрО РАН.

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОСТИ В ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ СТАЛИ ТИПА Cr16-Ni19 ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛУЧЕНИЯ

И.А. Портных¹, В.Л. Панченко¹, А.В. Козлов²

¹АО «ИРМ», г. Заречный Свердловской обл., Россия (*Portnyh_IA@irmatom.ru*)

²ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Нейтронное облучение в реакторах типа БН приводит к сильному изменению структуры материала оболочек твэлов, что влечет за собой также и изменение физико-механических свойств оболочки. Различные участки оболочек твэлов во время эксплуатации находятся в разных условиях облучения, таких как температура и скорость набора повреждающей дозы, что за различное время облучения приводит к разной набранной повреждающей дозе. За последние более чем десять лет, накоплен большой объем данных по изменению микроструктуры материала стали типа Cr16-Ni19 х.д., используемой в настоящее время в качестве основного материала оболочек твэлов реакторов БН. Целью данной работы было систематизировать накопленные данные и выявить доминирующие факторы, влияющие на изменение микроструктуры материала стали типа Cr16-Ni19 под действием нейтронного облучения.

Проведены сравнительные исследования характеристик пористости, сформировавшейся в стали типа Cr16-Ni19 после эксплуатации в реакторе БН-600 в зонах различного обогащения в течение разного времени. В зонах различного обогащения различается спектр нейтронов, что приводит не только к отличию в скорости набора повреждающей дозы в материале, но и к тому, что из-за различия спектров отличается и повреждаемость материала.

Изучались изменения элементов микроструктуры: дислокационная структура – ее качественное описание; выделения вторых фаз – качественно (тип, состав, решетка, связь с другими элементами), характеристики пористости (качественно – связь с другими элементами, количественно – гистограммы распределения пор по размерам). При этом выделялись три типа пор: «мелкие», являющиеся газо-вакансионными зародышами пор, «средние» и «крупные». Для выявления влияния температуры облучения на изменение характеристик пористости, образовавшейся в стали типа Cr16-Ni19, проанализированы зависимости среднего размера и концентрации «крупных» и «средних» пор от температуры облучения для образцов оболочек всех исследованных твэлов из ТВС различных зон обогащения, отработавших разное время, разбитых на узкие интервалы по скоростям набора повреждающей дозы (не более $0,2 \times 10^{-6}$ сна/с).

Показано, что во всех интервалах скоростей набора повреждающей дозы наблюдается увеличение среднего размера «крупных» пор с ростом температуры облучения. Концентрация «крупных» пор резко увеличивается с ростом температуры облучения от ~ 420 °С до ~ 430 °С, дальнейший рост температуры облучения приводит к резкому снижению концентрации «крупных» пор во всех интервалах скоростей набора повреждающей дозы. Средний размер «средних» пор слабо изменяется с ростом температуры облучения, в основном находится в диапазоне от 10 до 15 нм во всем

исследованном диапазоне температур облучения и скоростей набора повреждающих доз. Концентрации «средних» пор в зависимости от температуры облучения ведут себя неоднозначно в образцах различных твэлов разных ТВС. Также были построены и проанализированы удельная площадь поверхности пор и пористость в зависимости от температуры облучения в различных диапазонах скоростей набора повреждающей дозы.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ, ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ И МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ

А.В. Клауз^{1,2}, С.В. Рогожкин^{1,2}, А.А. Богачев^{1,2}, А.А. Халявина^{1,2}, А.А. Хомич^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (klauz@itep.ru)

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

В перспективных ядерных и термоядерных реакторах материалы активной зоны должны обладать высокой радиационной стойкостью и жаропрочностью при температурах до 650 °С и дозах до 200 сна (смешений на атом). Перспективными материалами, способными удовлетворить эти требования, являются дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали, содержащие в своей матрице однородно распределенные термически стабильные наноразмерные оксиды.

В настоящей работе наноструктура ДУО сталей изучалась методами малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и атомно-зондовой томографии (АЗТ) [1-3]. Исследуемые стали отличаются содержанием Cr, V, Ti, Al и Zr. Методы локального анализа ПЭМ и АЗТ выявили значительное количество наноразмерных оксидных частиц и кластеров. Определены их размеры, насыпные плотности и составы.

Использование МУРН позволило выявить наличие магнитных и немагнитных включений различных размеров в исследуемых материалах. Показано, что использование магнитных полей позволяет лучше идентифицировать диффузные наноразмерные кластеры, обнаруживаемые методом атомно-зондовой томографии.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП КАМИКС (<http://kamiks.itep.ru>) НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

[1] Rogozhkin S.V. et al. *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotr. Neutron Tech.* (2022), **Vol.16**, No. 6, pp. 1189–1200.

[2] Rogozhkin, et al. *Nanomaterials* (2024), **Vol.14**, p. 194.

[3] Rogozhkin S. V., et al. *Physics of Atomic Nuclei.* (2022). **Vol.85**, No. 12, P. 12.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ОКСИДНЫХ ЧАСТИЦ В
ДИСПЕРСНО- УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЯХ ПОСЛЕ
ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ**

А.А. Халявина^{1,2,3}, С.В. Рогожкин^{1,3}, А.В. Клауз^{1,3}, Д.А. Подгорный²

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (khalyavina@itep.ru)

²НИТУ МИСИС, Москва, Россия

³НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Дисперсно-упрочнённые оксидами (ДУО) стали являются перспективными материалами для использования в активной зоне реакторов деления и синтеза нового поколения. Данные материалы должны выдерживать эксплуатацию при высоких дозах радиационных повреждений до 200 смещений на атом (сна) в широком диапазоне температур (300–700) °С. Высокотемпературная стабильность в ДУО сталях обеспечивается за счет тугоплавких оксидных частиц, равномерно распределённых в матрице [1]. Данная работа посвящена изучению изменений оксидных частиц, происходящих при длительных высокотемпературных воздействиях.

В работе с помощью метода атомно-зондовой томографии [2] производилось исследование сталей Eurofer ODS, 10Cr ODS и KP-3 ODS с различным химическим составом в исходном состоянии и после термического старения при температуре 650 °С в течение 500 и 1000 часов.

Анализ полученных данных показывает, что во всех исследуемых материалах наблюдается изменение среднего размера, объёмной плотности и химического состава кластеров. Отмечается рост объёмной плотности кластеров (при сохранении или росте среднего размера) при старении в течение 500 ч. После старения в течение 1000 ч обнаружено уменьшение объёмной плотности. Данные наблюдения хорошо описываются моделью содержащей стадии зарождения, роста и последующей коалесценции.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП КАМИКС (<http://kamiks.itep.ru>) НИИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1] Xu S., Zhou Z., Jia H. et al., *J. Steel research int.* 2018, **90**, 1800594.
[2] Gault B. et al. Atom probe tomography // *Nature Reviews Methods Primers.* – 2021. – Т. 1. – №. 1. – С. 51.

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ:
РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

В.Н. Фоменко¹, Б.З. Марголин¹, Ф.Л. Шишков¹, М.В. Леонтьева-Смирнова²,
Е.В. Чертопьятов³

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург
(*margolinbz@yandex.ru*)

²АО ВНИИНМ, Москва

³АО ГНЦ «НИИАР», Димитровград

Для расчета напряженного состояния оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) необходимо знать реальную диаграмму деформирования материала, в том числе для материала в облученном нейтронами состоянии. В оболочках ТВЭЛов, в большинстве случаев, наибольшие напряжения действуют в окружном направлении, поэтому образцы и процедура испытаний должны быть разработаны таким образом, чтобы именно в этом направлении можно было определить все необходимые механические свойства.

Кроме того, при расчетах прочности оболочки ТВЭЛов с трещиноподобными дефектами, а также для применения концепции «течь перед разрушением» необходимо знать трещиностойкость материала.

Свойства в окружном направлении могут быть определены на базе испытаний трубчатых образцов, нагруженных давлением, однако проще всего использовать кольцевые образцы, особенно для облученного металла, когда взаимодействие с образцами в «горячих» камерах производится с помощью манипуляторов.

В настоящий момент есть различные типы кольцевых образцов, которые позволяют в той или иной степени определять механические свойства в окружном направлении. Однако, их использование сопряжено с рядом проблем, возникающих при испытании: изгиб, изменение эффективной длины рабочей части в процессе нагружения, влияние трения между образцом и нагружающими пуансонами.

Вследствие этого, имеющиеся кольцевые образцы и методы их испытаний не позволяют с необходимой точностью получать механические свойства и адекватно определять диаграмму деформирования материала в окружном направлении.

В докладе представлены новая конструкция кольцевых образцов, методика их испытаний, а также расчетное и экспериментальное обоснование методики, выполненное на базе испытаний образцов из облученных оболочек ТВЭЛов из сталей ЭП823 и ЧС68. Проведено сопоставление результатов испытаний кольцевых образцов новой конструкции и используемых в настоящее время стандартных кольцевых образцов.

Кроме того, в докладе рассмотрены кольцевые образцы с трещиноподобными надрезами для определения трещиностойкости оболочек ТВЭЛов, методика их испытаний, а также некоторые результаты для указанных сталей.

МИКРОСТРУКТУРА И ДЕФЕКТЫ В ФУНКЦИОНАЛЬНО-
ГРАДИЕНТНЫХ НАНОЛАМИНАТАХ Nb/Zr ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ
ИОНАМИ ГЕЛИЯ

А.Д. Ломыгин¹, Р.С. Лаптев¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
Россия (adl4@tpu.ru, laptevrs@tpu.ru)

Накопление гелия – критический фактор деградации материалов в термоядерных реакторах. Функционально-градиентные наноламинаты (ФГН) Nb/Zr с высокой плотностью границ раздела рассматриваются как перспективный материал для защиты компонентов из сплава Э110 благодаря их потенциальной способности эффективно поглощать радиационные дефекты и атомы гелия, подавляя образование пузырей и охрупчивание [1]. Цель данной работы – экспериментальное изучение микроструктурной стабильности и дефектной структуры в градиентных Nb/Zr наноламинатах при имплантации ионов гелия. Архитектура покрытия включала адгезионный слой Zr (~8 мкм), наноламинат, состоящий из чередующихся слоев Zr и Nb (толщина отдельных слоев ~60-80 нм, суммарно ~1,4 мкм) и коррозионный слой Nb (~3,2 мкм). ФГН Nb/Zr были нанесены методом магнетронного распыления на подложку из сплава Э110. Облучение проводили ионами гелия с энергией 2 МэВ при комнатной температуре до флюенсов $3,4 \times 10^{14}$, $3,4 \times 10^{15}$ и 6×10^{16} ион/см². Микроструктуру анализировали методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и рентгеноструктурного анализа (РСА). Для изучения дефектной структуры использовали позитронную аннигиляционную спектроскопию (ПАС), включая доплеровскую спектроскопию уширения (ДУАЛ) с переменной энергией для приповерхностного слоя (~1 мкм) и измерение времени жизни позитронов (ВРАП) для объёмного анализа (~150 мкм). ПЭМ-анализ показал полное сохранение слоистой архитектуры покрытия после облучения во всем диапазоне флюенсов. Фазовые превращения отсутствовали. Наблюдалась тенденция к небольшому снижению внутренних напряжений и сглаживанию рельефа слоев при максимальном флюенсе. ПЭМ высокого разрешения зафиксировала незначительное уменьшение межплоскостного расстояния в нанослое Zr у границы с Nb ($d_{Zr(100)}=0,269$ нм) после максимального облучения, в то время как параметры решетки Nb оставались неизменными. Дифрактограммы не выявили появления новых фаз или существенного изменения параметров решетки α -Zr ($a=3,22$ Å, $c=5,11$ Å) и β -Nb ($a=3,30$ Å). Данные ПАС свидетельствуют о чрезвычайно низком уровне накопления радиационных дефектов. ВРАП-спектры всех образцов содержали три характерные компоненты: $\tau_F=163 \pm 1$ пс (делокализованные позитроны в Zr), $\tau_A=182 \pm 1$ пс (дислокации или некогерентные границы раздела) и $\tau_B=514 \pm 2$ пс (крупные вакансионные комплексы). При увеличении флюенса до 6×10^{16} ион/см² среднее время жизни позитронов не претерпело значимых изменений. Единственным статистически заметным эффектом стал слабый рост интенсивности долгоживущей компоненты I_B с $(2,5 \pm 0,2)\%$ до $(4,2 \pm 0,4)\%$, что указывает на очень ограниченное образование наноразмерных вакансионных кластеров, возможно, содержащих гелий. Это согласуется с данными СДУАЛ: при максимальном флюенсе параметр S незначительно увеличился с 0,6006 до 0,6018, а параметр W уменьшился с 0,01022 до 0,01008. Такие малые изменения подтверждают отсутствие масштабного накопления дефектов и неизменность химического окружения в местах аннигиляции, которое оставалось типичным для циркония.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № FSWW-2026-0044.

Литература

[1] Laptsev R., Stepanova E., Pushilina N., Kashkarov E., Krotkevich D., Lomygin A., Sidorin A., Orlov O., Uglov V. *Coatings*. **v.13** (2023), №1, p. 193.

**МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ОБЛУЧЕННЫХ ОБРАЗЦАХ
АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ТИПА X16-N19: НЕЙТРОН-
ДИФРАКЦИОННЫЙ АНАЛИЗ**

**Б.В. Краснояров¹, М.А. Сёмкин^{1,2}, И.А. Портных³, В.Л. Панченко³, В.И. Пастухов³,
В.И. Воронин², Н.А. Глушкова³, А.Ф. Губкин^{1,2,3}**

¹Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов им. М.Н. Михеева, УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

³АО «Институт реакторных материалов» ГК Росатом, г. Заречный, Россия
(agubkin@imp.uran.ru)

Аустенитные нержавеющие стали являются наиболее предпочтительным материалом оболочек ТВЭЛ реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем из-за их высокой прочности и вязкости при умеренных температурах, превосходной совместимости с натрием и высокой коррозионной стойкости. Основным фактором, ограничивающим длительность работы ТВЭЛов, является радиационное распухание оболочек из аустенитной стали [1]. Для повышения эффективности реакторов на быстрых нейтронах планируется увеличение срока эксплуатации ТВЭЛов до достижения выгорания топлива более 15 % т. а. (тяжелых атомов) и, соответственно, повреждающей дозы не менее 140 сна. Для решения этой задачи необходимо знание механизмов, определяющих эволюцию структурно-фазового состояния материала при облучении в диапазоне температур и доз, характерных для быстрых реакторов. Это ставит перед экспериментаторами задачу аккуратной количественной оценки фазового состава и (микро)структурных параметров материала при различных значениях повреждающей дозы и температурах облучения.

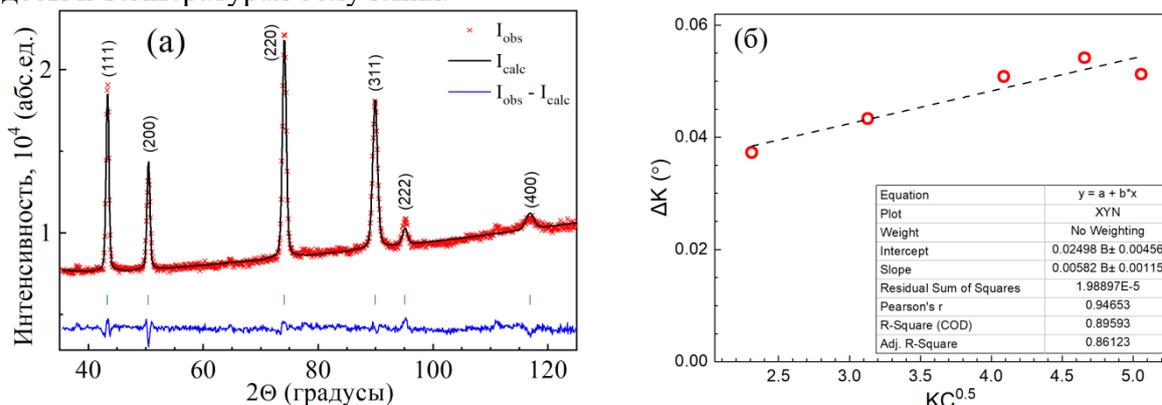


Рисунок 1 (а) Нейтронограмма образца стали X16-N19 с повреждающей дозой 5 сна, облученного при температуре 370 °С. (б) Линейная аппроксимация зависимости уширения дифракционных пиков ΔK от параметра $KC^{0.5}$.

В данной работе нейтронная дифракция высокого разрешения использовалась для оценки структурных и микроструктурных параметров серии образцов аустенитной стали

типа X16-N19, облученных до различных значений повреждающей дозы в интервале от 5 до 99 сна при различных температурах. В рамках проведенного анализа удалось получить величины микродеформаций и размер области когерентного рассеяния (ОКР) (стандартный метод Уильямсона-Холла), величину плотности дислокаций и преобладающий тип дислокаций (модифицированный метод Уильямсона-Холла).

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-22-00854.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ

Р.А. Курский¹, А.В. Рожков¹, Д.В. Сафонов¹, О.О. Забусов^{1,2}, И.В. Федотов¹, А.С. Фролов¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (Kurskiy_RA@nrcki.ru)

²НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

В настоящее время накопление отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) на АЭС существенно опережает возможности его радиохимической переработки. В связи с этим значительная часть выгруженных тепловыделяющих сборок (ТВС) направляется в места временного хранения. Однако ввиду ограниченной вместимости хранилищ мокрого типа, а также высокой стоимости капитальных затрат на данный момент активно развиваются методы сухого хранения ОЯТ. Данный способ хранения ОЯТ широко применяется за рубежом, показав свою безопасность на длительный срок и коммерческие преимущества перед мокрым хранением, что в совокупности позволяет хранить ОЯТ до момента перехода на замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ), либо окончательное захоронение. В связи с этим технология сухого хранения ОЯТ рассматривают для включения в проекты строящихся зарубежных блоков ВВЭР-1000. Таким образом, внедрение сухого хранения для отечественных реакторов является необходимым условием для сохранения конкурентоспособности на мировом рынке атомной энергетики, а также является стратегически важным шагом на пути к переходу к ЗЯТЦ.

На данный момент создан термомеханический код РТОП-СХ (реакторное топливо — сухое хранение) улучшенной оценки описывающий поведение твэлов во время сухого хранения. Код РТОП-СХ верифицирован на результатах экспериментов, имитирующих условия сухого хранения, проведенных в НИЦ «Курчатовский институт».

В данном докладе представлены экспериментальные данные изменения структуры и свойств оболочек твэлов из сплава Э110 после эксплуатации в ВВЭР-1000 до выгораний 64 МВт/сут·кг U и термомеханических испытаний, имитирующих условия технологических этапов (сушки и транспортировки) и последующего сухого хранения в широком диапазоне варьируемых параметров. Определены наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на снижение механических характеристик сплава Э110 в таких условиях. Проведен сравнительный анализ сплава Э110 с материалами оболочек твэлов зарубежных реакторов и показано, что отечественный сплав сохраняет пластические свойства при предполагаемых режимах сухого хранения, в том числе при внештатных ситуациях.

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЗАЩИТНОГО ХРОМОВОГО
ПОКРЫТИЯ НА ВОДОРОДНУЮ И РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ
ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Э110**

М.А. Кругляков¹, В.Н. Кудияров¹, Р.С. Лаптев¹

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск,
Россия (kruglyakov97@tpu.ru, kudiyarov@tpu.ru, laptevrs@tpu.ru)*

Существует множество исследований, направленных на определение механизмов дефектообразования циркониевых сплавов в результате водородного воздействия, а также эволюцию дефектной структуры конструкционных материалов современной ядерной энергетики под действием радиационного облучения, однако, практически отсутствуют работы, направленные на изучение синергетического воздействия этих аспектов. Отчасти это связано с необходимостью наличия целого комплекса дорогостоящего экспериментального оборудования, но главная причина заключается в высокой сложности проведения исследований из-за наличия наведенной радиоактивности материалов после нейтронного облучения. Одним из решений данной проблемы является облучение другими высокоэнергетическими частицами, например, как в данной работе - ионы криптона (Kr) с энергией 145 МэВ, являющиеся продуктом распада урана.

Авторами работы были проведены комплексные исследования, направленные на изучение особенности изменения структурно-фазового состава сплава Э110 с Cr-покрытием при высокотемпературном наводороживании и облучении ионами Kr, а также определены механизмы образования и эволюции дефектной структуры исследуемого материала. Было установлено, что в результате наводороживания образца без Cr-покрытия происходит формирование фаз двух гидридов: ZrH и ZrH₂: в образце с Cr-покрытием весь Zr переходит в ZrH₂, кроме того, Cr-покрытие уменьшает толщину зоны радиационного повреждения Kr на 15–20% и снижает плотность радиационных дефектов по сравнению со сплавом Э110 без защитного покрытия. Стоит отметить, что образцы с Cr-покрытием характеризуются более равномерным распределением водорода. Согласно расчетам из первых принципов и данным позитронной аннигиляционной спектроскопии, в сплаве Э110 с Cr-покрытием после наводороживания и облучения преобладают дислокации, не содержащие водорода. Данные результаты подтверждают эффективность осаждения Cr-покрытий на циркониевые сплавы в целях снижения степени радиационного повреждения и повышения водородной стойкости материалов современной ядерной энергетики.

Данное исследование было профинансировано государственной программой, Грант № FSWW-2026-0044.

ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА СТАЛЕЙ С ОЦК РЕШЕТКОЙ ПОСЛЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Е.В. Юрченко¹, Б.З. Марголин¹, С.В. Рогожкин², А.А. Никитин²

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия
(elena_urch@mail.ru)

²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

Рассмотрены особенности изготовления и эксплуатации материалов облучаемого элемента – опорной конструкции (ОК) корпусов реакторов (КР) ВВЭР. Показано, что ОК реакторов типа ВВЭР-440 (проектов В-179 и В-230) могут ограничивать срок эксплуатации реактора в целом. Это связано с высоким уровнем нейтронного облучения (флюенс нейтронов за 60 лет эксплуатации достигает $\sim 8 \cdot 10^{23}$ 1/м²), с низкой температурой эксплуатации (облучения) ОК, не превышающей 90°C, и с использованием нерадиационноустойчивых материалов, которые обычно используются для изготовления строительных металлоконструкций. Кроме того, сварные соединения ОК не подвергаются послесварочному отпуску для снятия остаточных напряжений. Сочетание перечисленных неблагоприятных факторов приводит к значительному охрупчиванию материала ОК и к высокой нагруженности конструкции, обусловленной остаточными напряжениями.

В докладе представлены результаты комплексных исследований материалов ОК в исходном и облученном состояниях, включающие определение стандартных механических свойств, вязкости разрушения, а также микроструктурные и фрактографические исследования. В частности, показано, что при уровне флюенса нейтронов, соответствующем 60 годам эксплуатации опорной конструкции, форма кривой $K_{IC}(T)$ изменяется (выползает) относительно кривой для материалов в исходном состоянии. Предложена модель для прогнозирования радиационного охрупчивания материалов ОК в зависимости от флюенса нейтронов и содержания примесных элементов – фосфора и меди.

Обнаружено, что вклад меди в радиационное охрупчивание материалов ОК (по отношению к фосфору) ниже, чем для корпусных реакторных материалов ВВЭР. Показано, что такая закономерность обусловлена низкой температурой эксплуатации ОК (50÷90 °C) по сравнению с температурой эксплуатации КР (270÷290 °C). Пониженный вклад меди в радиационное охрупчивание материалов ОК подтвержден анализом радиационно-индуцированных изменений в пространственном распределении химических элементов выполненным методом атомно-зондовой томографии.

Как известно, одним из компенсирующих мероприятий, которое позволяет уменьшить степень охрупчивания материала, является пострadiационный отжиг.

В докладе представлены результаты исследований по влиянию температуры отжига на степень восстановления свойств материалов ОК реакторов ВВЭР-440, облученных при низкой температуре (50÷90) °C. Выявлены основные процессы, которые протекают при отжиге материалов ОК после низкотемпературного облучения и приводят к неоднозначному влиянию температуры отжига на степень восстановления свойств материалов ОК.

На основании обобщения данных для ОК и КР проанализировано влияние температуры облучения на различные механизмы, приводящие к радиационному охрупчиванию материала по двум механизмам: упрочняющему - за счет генерации точечных дефектов, формирования дислокационных петель, выпадения преципитатов меди и

неупрочняющему – за счет образования сегрегаций фосфора. Показано, что вклад неупрочняющего механизма не изменяется при изменении температуры облучения, а вклад упрочняющего механизма носит немонотонный характер в случае высокого содержания меди в материале.

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ГИДРИДОВ В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110 В ПРОЦЕССЕ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОТВС

Д.В. Сафонов¹, А.С. Фролов¹, Д.А. Мальцев¹, О.О. Забусов^{1,2}, Р.А. Курский¹,
А.В. Рожков¹, В.В. Василенко¹

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия (Safonov_DV@nrcki.ru)

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

В настоящее время атомная промышленность развитых стран сталкивается с проблемой долгосрочной эксплуатации и последующей утилизации ОТВС. Нарращивание мощностей атомных электростанций в мире и в России, в частности, в купе с отсутствием экономически выгодной технологии переработки ОТВС требует увеличение числа хранилищ, что существенно повышает эксплуатационные затраты и конечную стоимость ядерной энергии, делая ее менее конкурентоспособной. Одним из решений данной проблемы является развитие технологии сухого хранения, позволяющей существенно сократить капитальные и эксплуатационные затраты на хранение отработавших твэлов.

В процессе эксплуатации атомных реакторов ВВЭР-1000 оболочки твэлов из сплава Э110 подвергаются воздействию теплоносителя при температурах эксплуатации, что приводит к накоплению водорода в результате окислительной реакции. Количество водорода, накопленного в материале за время эксплуатации, может быть определяющим фактором при обосновании безопасности сухого хранения ОТВС. Так, формирование радиально-ориентированной структуры гидридов приводит к значимому снижению механических свойств. В различных работах показано, что на формирование гидридной структуры влияет множество факторов, одним из которых является эффект памяти гидридов, который заключается в преимущественном образовании гидридов в местах предыдущего их растворения. Это обусловлено наличием дислокационных дефектов, образующихся в процессе релаксации напряжений при выделении гидридов из-за разницы в удельных объемах матрицы и гидрида циркония. Исследование влияния эффекта памяти на поведение гидридов широко проведено в зарубежных сплавах циркония, однако, данные эффекты для отечественных сплавов, в которых содержание водорода в оболочках твэлов после штатной эксплуатации значительно ниже, изучены недостаточно.

В работе представлены микроструктурные исследования, а также исследования методом и дифференциальной сканирующей калориметрии необлученных оболочек твэлов из сплава Э110 после наводороживания до концентраций водорода 75, 115 и 200 wppm. Определена температурная зависимость растворения гидридов от содержания водорода в оболочке твэла с использованием метода ПЭМ in-situ с использованием спектроскопии потерь энергии электронов, а также проведено сравнение данных с результатами аналогичных ДСК-исследований. Определены температуры отжига дислокационных структур, оставшихся в местах растворения гидридов, при которых наблюдается подавление эффекта памяти. В работе непосредственно в колонне просвечивающего электронного микроскопа проведены отжиги различной длительности

для оценки возможности подавления эффекта памяти при различных температурах, вплоть до максимально допустимой в случае возникновения внештатных ситуаций в условиях сухого хранения.

РАДИАЦИОННОЕ ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ

С.В. Федотова¹, Е.А. Кулешова^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (*s_v_fedotova@mail.ru*)

²НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Ключевую роль в решении актуальных задач атомной энергетики играют конструкционные материалы, которые должны выдержать все увеличивающиеся нагрузки как при продлении сроков эксплуатации действующих реакторов, так и удовлетворять ужесточающимся требованиям новых проектов. Длительная эксплуатация в реакторной среде, сочетающей интенсивные потоки нейтронного облучения, высокую температуру и напряжения, значительно влияет на деградацию структуры и, как следствие, механических свойств конструкционных материалов, что потенциально может привести к недопустимому преждевременному выходу из строя элементов конструкций, из них изготовленных. К компонентам легководных реакторов с ограниченным сроком службы, замена которых технически крайне сложна и из-за очень высокой стоимости не предусмотрена, относят корпус реактора (КР) и элементы внутрикорпусных устройств (ВКУ). В качестве конструкционных материалов в ядерных реакторах для изготовления КР применяют малолегированные перлитные стали со структурой бейнита отпуска с о.ц.к.-решёткой, а для ВКУ – аустенитные коррозионностойкие стали с г.ц.к.-решёткой.

Нейтронное облучение материалов непрерывно создает избыточные концентрации точечных дефектов – вакансий и межузельных атомов. Потоки точечных дефектов к различным стокам, увлекающие за собой растворенные атомы, лежат в основе всего разнообразия взаимосвязанных явлений, характерных для облученных материалов, которые приводят к эволюции микроструктуры и перераспределению химических элементов и, следовательно, влияют на свойства реакторных материалов в процессе эксплуатации изделий из них. В этой связи для обоснования работоспособности материалов КР и ВКУ, наряду с механическими характеристиками, требуется понимание процессов радиационной повреждаемости и получение надёжной количественной информация об изменении микроструктуры. Несмотря на существенные различия в составе, типе, структуре и условиях эксплуатации материалов КР и ВКУ, общим следствием облучения для них является образование наноразмерных преципитатов с характерными средними размерами (2–5) нм и плотностями 10^{22} – 10^{24} м⁻³. Для определения параметров таких преципитатов наиболее подходящим методом исследования является метод атомно-зондовой томографии (АЗТ).

В работе по результатам АЗТ-исследований параметров преципитатов в сталях КР и ВКУ реакторов ВВЭР и PWR после облучения в энергетических и исследовательских реакторах обобщены закономерности фазообразования в зависимости от состава сталей (содержания преципитат-образующих элементов) и условий облучения (дозы, скорости набора дозы и температуры облучения). Для этого сформирована база данных результатов АЗТ-анализа сталей КР и ВКУ, выполненных различными исследователями, с

сопоставимыми оценками параметров преципитатов. С учетом результатов моделирования и существующих теоретических представлений о радиационной повреждаемости конструкционных материалов обобщены механизмы фазообразования и выявлена их взаимосвязь с другими процессами радиационной деградации структуры в сталях КР и ВКУ. Полученные результаты позволяют повысить надежность и достоверность прогнозирования свойств конструкционных реакторных материалов на различных стадиях эксплуатации, включая продленный ресурс.

РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ И УДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

О.В. Огородникова^{1,2}, А. Никитин^{1,2}, С. Рогожкин^{1,2}, А. Умеренкова¹, Н. Сергеев¹,
В. Ефимов¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31,
115409 Москва, (olga@plasma-mephi.ru)

²Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, пл. Курчатова, 1,
123098 Москва, Россия

Энергетический кризис и огромный потенциал термоядерной энергетики побуждают нас прилагать большие усилия для развития термоядерного синтеза. Конечное применение термоядерной энергии в основном зависит от разработки ключевых материалов для термоядерного реактора. Также ведется разработка материалов для новых ядерных и гибридных реакторов. Вследствие высокой температуры плавления, хорошей теплопроводности, низкой эрозии, низкой проницаемости и накопления изотопов водорода, материалы на базе вольфрама являются референсными в качестве материалов, контактирующих с плазмой. Ферритно-мартенситные стали с низкой активацией, такие как Eurofer и стали с оксидным дисперсионным упрочнением (ODS) с добавлением частиц Y_2O_3 являются перспективными конструкционными материалами для термоядерных реакторов, в качестве оболочек топливных элементов в реакторах на быстрых нейтронах, и для ряда конструкций реакторов IV поколения. Однако стабильность свойств данных материалов как при нейтронном, так и при дейтериевом облучении мало изучена, особенно при высоких температурах. Стабильность свойств материала при нейтронном облучении и водородное охрупчивание в ядерных, термоядерных и гибридных реакторах, являются важными факторами, которые определяют применимость материала и могут привести к сокращению срока службы компонентов реактора. Кроме того, по соображениям безопасности, стоимости и утилизации, общее содержание трития в термоядерных материалах не должно превышать допустимого уровня. Таким образом, необходимо уметь прогнозировать количество радиоактивного трития, содержащегося в материалах, и разрабатывать процедуры его удаления. По этой причине в данной работе исследуются стабильность структуры и свойств материалов при облучении и удержание дейтерия (D) в радиационных дефектах в перспективных материалах. Для моделирования радиационных дефектов, материалы были облучены ионами железа с энергией 5,6 МэВ в диапазоне температур 250-500°C и доз 3-50 сна. Радиационные дефекты были исследованы с помощью просвечивающей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектрометрии и атомно-зондовой томографии. Для декорирования радиационно-индуцированных дефектов в поврежденные материалы был

имплантирован дейтерий с низкой энергией 20-670 эВ, не создающий дополнительных повреждений материала. Удержание D было изучено методом термодесорбционной спектроскопии (TDS). Было обнаружено, что (i) радиационно-индуцированные дефекты в сплаве W-Cr-Y в основном представляют собой дефекты вакансионного типа, и (ii) радиационно-индуцированные кластеры Cr подавляют образование дефектов как вакансионного, так и дислокационного типа в сплаве W-Cr-Y. Напротив, образование радиационно-индуцированных кластеров Cr-Mn в Eurofer незначительно уменьшает развитие дислокационных петель. И упрочнение материала, и накопление D в радиационных дефектах коррелирует с образованием (i) кластеров вакансий в W, (ii) кластеров Cr в сплаве W-Cr-Y и (iii) кластеров Cr-Mn, дислокационных петель и вакансионных кластеров в Eurofer. Было показано, как определенные легирующие элементы подавляют развитие пор и накопление дейтерия при облучении. Были рассчитаны энергии связи дейтерия с различными видами радиационных дефектов в перспективных материалах.

СТРУКТУРНАЯ АТТЕСТАЦИЯ МАРГАНЦЕВОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 20Г20С2Ф С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Н.В. Проскурнина, М.А. Сёмкин, В.И. Бобровский, В.И. Воронин, В.А. Казанцев
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
(*proskurnina@imp.uran.ru*)

Выполнена аттестация структурного состояния и деформационно-индуцированных превращений в промышленной листовой аустенитной стали марки 20Г20С2Ф с эффектом памяти формы (ЭПФ). Целью данной работы – получить количественную информацию о фазовом составе и структурном состоянии стали 20Г20С2Ф после термических и механических воздействий, и в дальнейшем – после радиационных воздействий. Таким образом, наше исследование направлено на установление природы ЭПФ путем прямого определения концентрации ϵ -фазы и наблюдения за ее изменениями при проявлении данного эффекта.

Исходные заготовки в форме полос сечением (8×2) мм² и длиной около 100 мм были вырезаны из промышленной листовой стали 20Г20С2Ф в направлении прокатки. Анализ элементного состава стали показал, что в ней содержится 76,8 мас. % железа, 20,0 мас. % марганца, 2,0 мас. % кремния, 1,0 мас. % ванадия и 0,2 мас. % углерода, что соответствует заявленному составу для данной марки материала.

Структурные исследования образцов выполнены методом рентгеновской дифракции на порошковом дифрактометре ДРОН-4-07 в $\text{CuK}\alpha$ излучении ($\lambda = 0,15424$ нм) и методом упругого когерентного рассеяния тепловых нейтронов на дифрактометре высокого разрешения Д-7а ($\lambda = 0,15313$ нм), функционирующем в Нейтронном материаловедческом комплексе ИФМ УрО РАН на реакторе ИВВ-2М. Обработка результатов дифракционных экспериментов проводилась полнопрофильным методом Ритвельда. Дилатометрические измерения проводились с помощью дилатометра DL-1500 RHP (ULVAC SINKU_RIKO) в интервале температур от 25 до 450 °С в два прохода в режиме динамического нагрева с постоянной скоростью 3 °С/мин.

Исследуемые образцы наряду с основной γ -фазой с преимущественной ориентацией кристаллитов {200} содержат дополнительную, менее 5,0 вес. % ϵ -фазу. Содержание

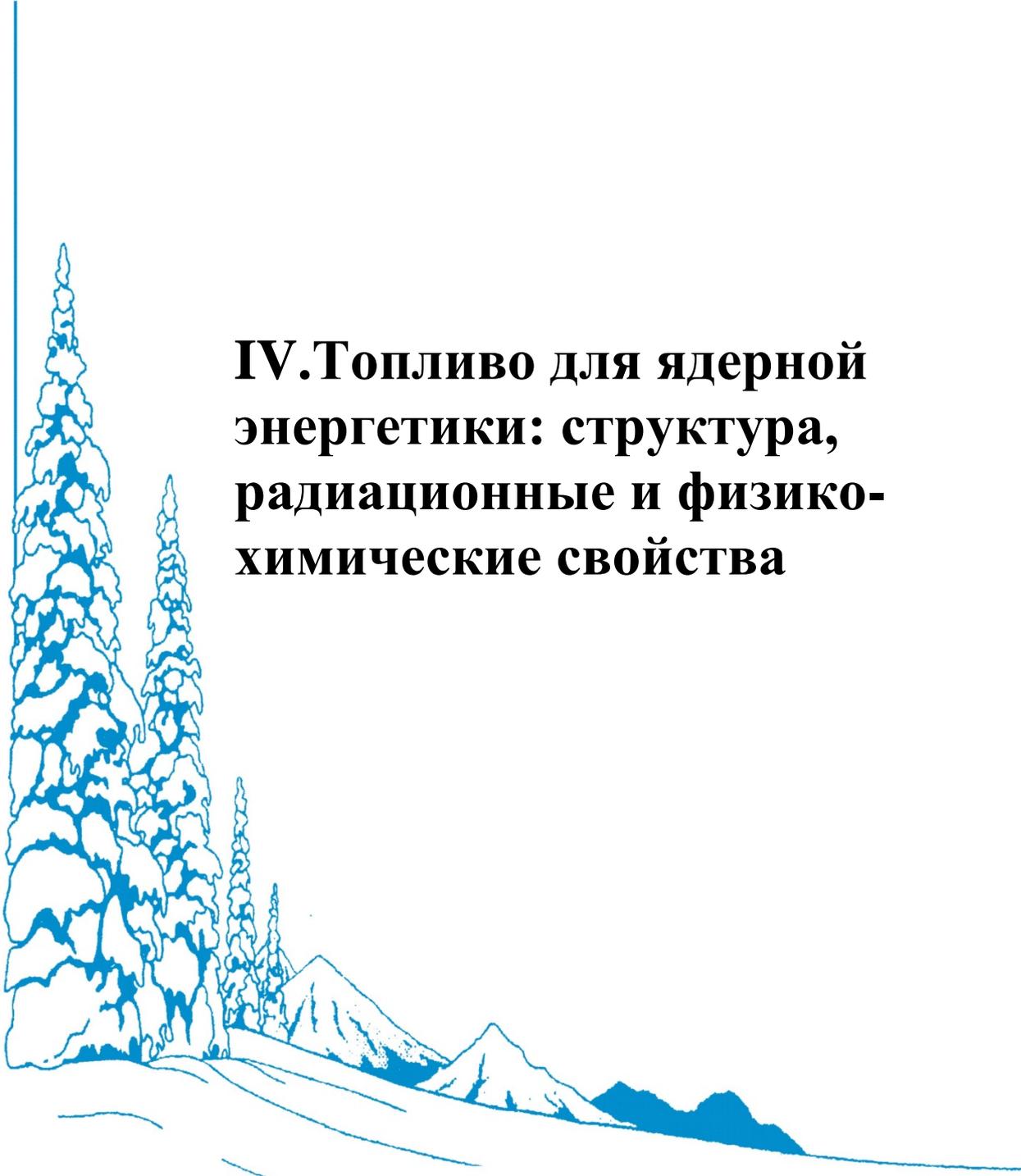
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ϵ -фазы продемонстрировало прирост на 12,4 вес. % при деформации 3,5 % и на 22,0 вес. % при деформации 2,6 %. Анализ фазового состава образцов, ширины дифракционных линий, коэффициентов преимущественной ориентации зерен показал, что деформационно-индуцированные изменения фазового состава материала и их поведение в результате термических воздействий заметно зависят от технологии приложения деформаций.

Дилатометрические измерения на недеформированных образцах продемонстрировали полностью обратимое температурное поведение относительного удлинения. В то же время на растянутых образцах отчетливо проявился ЭПФ. Предельные значения вкладов в удлинение образцов, обусловленные $\epsilon \rightarrow \gamma$ превращениями, наблюдаются в районе температур от 280 °С до 300 °С, и при температуре 400 °С эти явления заканчиваются. Величина ЭПФ для стали 20Г20С2Ф, растянутой на 2,6 % составляет около 0,5 %, что является достаточно высоким значением.

Полученные результаты структурной аттестации важны для прогнозирования эксплуатационных свойств аустенитных сталей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН на базе Уникальной научной установки «Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ».



**IV.Топливо для ядерной
энергетики: структура,
радиационные и физико-
химические свойства**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В УСТРОЙСТВАХ MAGLIF ПРИ ОПРЕДЕЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Ж.Б. Сексембаев¹, Ж.М. Мыктыбай²

¹*Astana Business Campus, Nazarbayev University, Астана, Казахстан (jandos_s90@mail.ru)*

²*Quantum STEM School, Астана, Казахстан*

Перспективные термоядерные реакторы на базе Magnetised Liner Inertial Fusion (MagLIF) требуют создания особых условий для зажигания и удержания термоядерного топлива. Необходимо реализовать правильную комбинацию электрического и магнитного полей, которое позволит достичь экстремальных значений температур и плотностей, соответствующих реакциям термоядерного синтеза [1, 2].

В данной работе рассматривается процесс термоядерного горения плазмы в экстремальных условиях, наиболее типичных для устройств MagLIF, где предполагается их реализация. Диапазон температур принимается на уровне порядка десятка кэВ и выше. Плотности вещества принимаются на уровне плотностей твердого тела [1, 2]. Анализ кривых реактивностей основных термоядерных реакций показывает, что при более низких температурах скорость взаимодействия $D+T$ имеет сравнительно более высокие значения, а с увеличением температуры горения скорость взаимодействия $D+{}^3\text{He}$ возрастает быстрее и начинает преобладать над другими взаимодействиями.

С учетом повышения температуры области горения за счет энерговыделения соответствующих основных реакций синтеза, а также с учетом основных видов радиационных потерь оценена кинетическая картина термоядерного горения.

В результате получается, что, с учетом первоначально заданных условий, горение разных видов топлива имеет совершенно разный характер. При горении DD топлива все энерговыделение компенсируется радиационными потерями. Горение топлив DT и $D{}^3\text{He}$ на начальных стадиях имеет быстрый рост температуры. Расчеты привели нас к выводу, что их горение является самоподдерживающимся и эти виды топлива перспективны. Кроме того, топливо $D{}^3\text{He}$ сравнительно безнейтронное, что может быть важным аргументом в пользу выбора этого типа топлива. Подсчитано, что энерговыделение, приходящееся на заряженные компоненты в 10-15 раз больше, чем нейтронов.

При горении всех видов топлива концентрация основного компонента будет уменьшаться с образованием вторичных продуктов. По-видимому, при более длительном удержании плазмы в дальнейшем должно наблюдаться в основном горение смеси $D-T-{}^3\text{He}$.

Литература

[1] Voronchev V.T., Kukulkin V.I., *Physics of Atomic Nuclei*, **v.73** (2010), №1, с.38-58.

[2] Кукулин В.И., Ворончев В.Т., *Ядерная Физика*, **т.73** (2010), №8, с.1418-1426.

СТРУКТУРНАЯ НЕЙТРОНОГРАФИЯ ПРОДУКТОВ ПИРОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ МОДЕЛЬНОГО ОЯТ

М.А. Сёмкин¹, Н.В. Проскурнина¹, Н.В. Глушкова², О.А. Голосов², Ю.В. Лапин²,
С.С. Хвостов², П.Н. Мушников³, Ю.П. Зайков³, А.Ф. Губкин^{1,2}

¹*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

²*АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия*

³*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
(agubkin@imp.uran.ru)*

Развитие технологической сферы безопасного использования объектов ядерной энергетики зависит от решения вопросов переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ), что необходимо как для эффективного применения делящихся материалов, так и для концентрирования и захоронения продуктов радиоактивных отходов. Наиболее эффективной схемой построения ядерной энергетики будущего представляется параллельное использование оптимизированного набора ядерных реакторов на тепловых и быстрых нейтронах, где последние обеспечивают первых ядерным топливом. Успех подобных программ требует развития и отработки технологий обращения с такими материалами в том числе их модельными композициями.

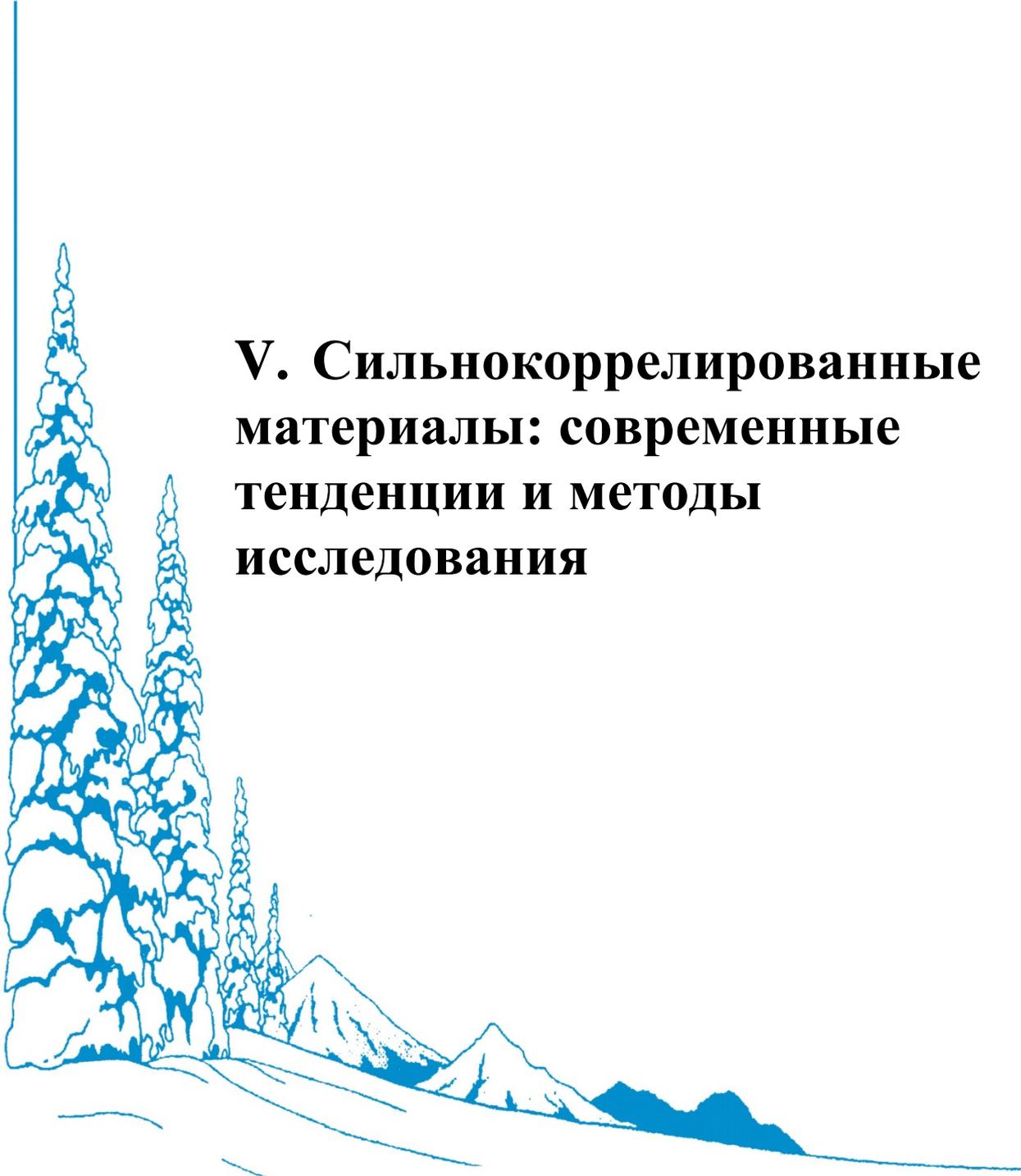
Метод дифракции нейтронов является одним из наиболее эффективных способов изучения кристаллической структуры и фазового анализа состава сложных композиционных топливных материалов. Высокая проникающая способность нейтронов позволяет упаковывать исследуемые образцы в герметичные ванадиевые контейнеры, исключая контакт содержащихся в них материалов и композиций с атмосферой в ходе проведения эксперимента. Особый механизм рассеяния нейтронов ядрами атомов приводит к нерегулярной зависимости амплитуды рассеяния ядрами химических элементов в зависимости от его порядкового номера в периодической таблице, что делает возможным нейтронографическую идентификацию фаз и кристаллических структур композиционных материалов, одновременно состоящих из тяжелых атомов (например, уран) и легких атомов (таких как кислород, азот), «невидимых» для метода дифракции рентгеновского излучения.

Авторами проведены структурные нейтрон-дифракционные исследования ряда образцов модельного ОЯТ на основе механической смеси диоксида урана с оксидами лантана, циркония или церия в исходном состоянии и после различных стадий их пирохимической переработки. Подготовленные в ИВТЭ УрО РАН образцы модельного ОЯТ были упакованы в специальные герметичные ванадиевые контейнеры. Измерения нейтронограмм выполнены на дифрактометре высокого разрешения Д-7а исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М (г. Заречный). Анализ экспериментальных данных выполнен с использованием полнопрофильного метода Ритвельда в пакете программ *FullProf Suite*.

Показано, что в результате отжига исходных механических смесей оксидов в различных номинальных сочетаниях формируются их твердые растворы. После этапа электролитического восстановления и отгонки электролита выявлено, что повышенное содержание двуокиси циркония снижает процент выхода металлического урана, оставляя почти в два раза большую долю невосстановленного диоксида урана. В докладе будут представлены результаты структурной аттестации пятнадцати образцов модельного ОЯТ.

Работа выполнена в рамках договора ИВТЭ УрО РАН с головным заказчиком АО «Прорыв» на базе Уникальной научной установки «Нейтронный материаловедческий

комплекс ИФМ УрО РАН на реакторе ИВВ-2М».



V. Сильнокоррелированные материалы: современные тенденции и методы исследования

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕОБЫЧНОГО МАГНЕТИЗМА В ИНТЕРМЕТАЛЛИДАХ Eu С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ВАЛЕНТНОСТЬЮ.П.С. Савченков^{1,2}, П.А. Алексеев^{1,2}¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия (savch92@gmail.com)²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

Физика сильно коррелированных электронных систем (СКЭС) остается одним из наиболее актуальных направлений современной физики конденсированного состояния. Интерес к ним обусловлен многообразием экзотических фаз — от высокотемпературной сверхпроводимости до нефермижидкостного поведения, — которые часто возникают в окрестности квантовой критической точки, где конкуренция взаимодействий достигает максимума. Особое место в ряду СКЭС занимают соединения на основе европия, демонстрирующие однородную промежуточную валентность. Уникальность таких систем, в частности семейства EuT_2X_2 (где T — 3d/4d металл, X — Si/Ge), заключается в формировании квантово-механически смешанного основного состояния. Оно возникает из-за сильной гибридизации локализованных 4f-электронов с зоной проводимости и конкуренции между магнитной конфигурацией $\text{Eu}^{2+}(J=7/2)$ и немагнитным синглетом $\text{Eu}^{3+}(J=0)$. Вопреки теоретическим ожиданиям полного подавления магнитных корреляций быстрыми валентными флуктуациями, ключевой особенностью ряда этих систем является аномальное сосуществование дальнего магнитного порядка и устойчивого состояния однородной промежуточной валентности.

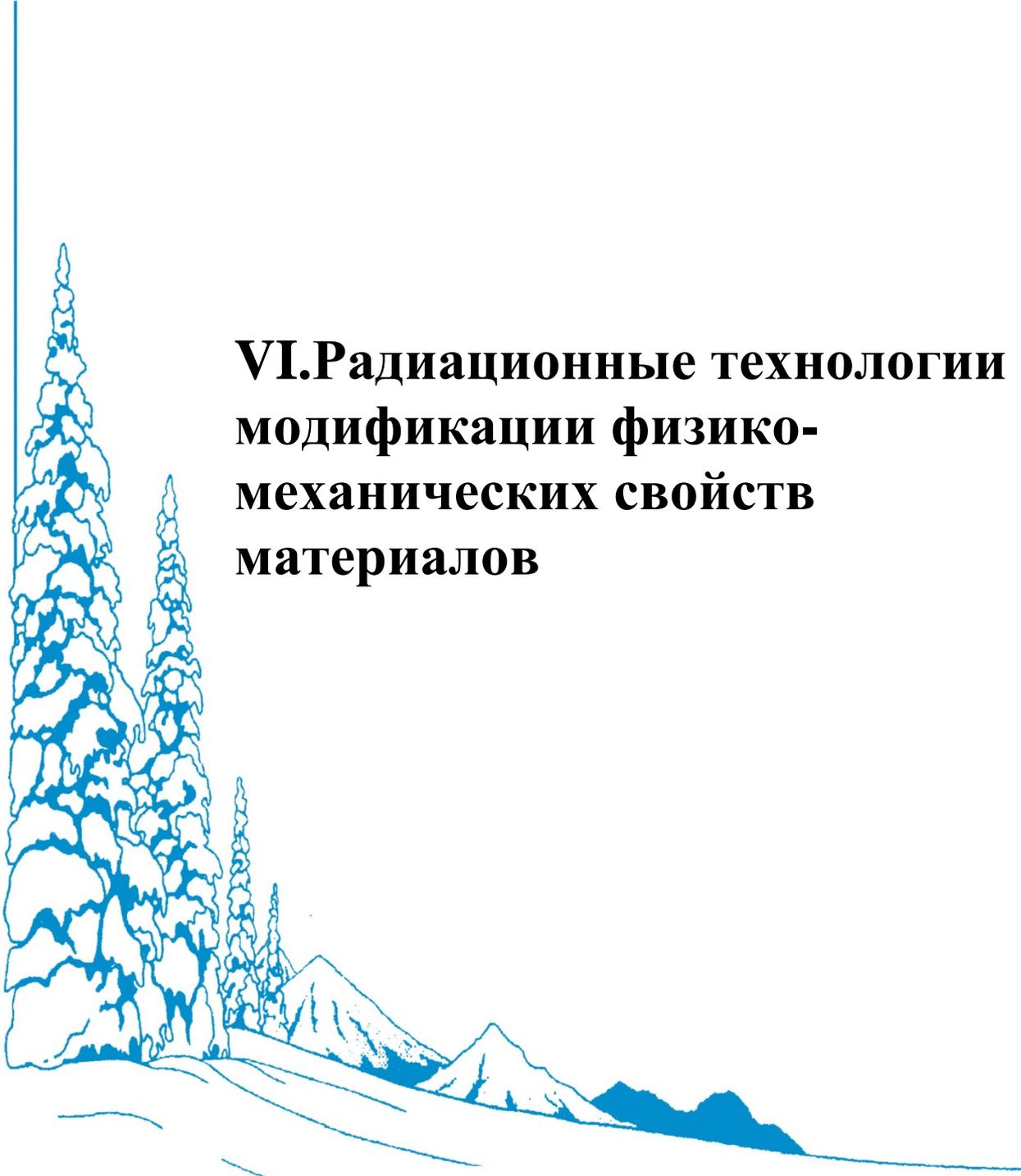
Ключевым нерешенным вопросом для систем EuT_2X_2 остается микроскопическая природа этого магнетизма. Экспериментальные данные указывают на то, что при низких температурах в этих системах реализуется немагнитное синглетное основное состояние, отделенное спиновой щелью от возбужденных состояний. Это делает ситуацию схожей с ван-Флекковскими парамагнетиками или системами типа PrNi, где магнитный порядок возникает не за счет переориентации готовых моментов, а путем поляризации синглетного основного состояния — механизм наведенного магнетизма. Однако для систем с промежуточной валентностью Eu вопрос о динамике такого перехода и устойчивости магнитной фазы остается открытым. Стандартные теоретические модели (например, примесная модель Андерсона) не дают полного описания сосуществования валентных флуктуаций и дальнего магнитного порядка.

В докладе представлены результаты комплексного исследования, ключевым элементом которого стало неупругое рассеяние нейтронов. Использование нейтронной спектроскопии позволило напрямую изучить спиновую динамику и эволюцию магнитных возбуждений при переходе в упорядоченное магнитное состояние. Будет показано, что формирование дальнего магнитного порядка в системах EuT_2X_2 происходит по сценарию наведенного магнетизма.

Литература

[1] Savchenkov P. S., Alekseev P. A. Uncommon magnetism in rare-earth intermetallic compounds with strong electronic correlations // *Crystals*. – 2023. – Т. 13. – №. 8. – С. 1238.

[2] Alekseev P. A., Lazukov V. N., Savchenkov P. S. Neutron magnetic form factor in studies of f-electron instability // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. – 2025. – Т. 195. – №. 7. – С. 695-711.



**VI. Радиационные технологии
модификации физико-
механических свойств
материалов**

ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ АЗОТА НА ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ, ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК Ni/Al

П.В. Быков¹, С.Г. Быстров¹, И.Н. Климова¹, И.К. Аверкиев¹, Н.А. Шушаков²,
Е.А. Печина^{1,2}, В.Л. Воробьев¹, А.Н. Тарасенков³, А.А. Колотов¹, В.Я. Баянкин¹

¹УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия, (bykovpv@udman.ru)

²ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

³МИЭТ, Зеленоград, Россия

Методы ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки, имея ряд принципиальных преимуществ по сравнению с традиционными методами химико-термической обработки, получили активное развитие в области модификации поверхностных слоев металлов и сплавов с целью повышения их прочностных свойств [1-3]. В дополнение к классическим преимуществам ионной обработки (возможность превышения предела растворимости, контроль глубины распределения примеси, возможности селективной обработки участков деталей и т.д.) в последнее десятилетие удалось добавить и совершенно новые методики воздействия на приповерхностные слои материалов. В частности, с помощью формирования на поверхности мишени, одного или нескольких слоев других материалов нанометрового диапазона толщин, и их последующей ионной обработкой высокоэнергетическими частицами, удалось сформировать новые соединения и фазы в поверхностных слоях [4, 5].

В данной работе, методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, атомной силовой микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и измерения микротвердости проведено исследование морфологии поверхности, формирования химического состава и изменения физико-механических характеристик поверхностных слоев многослойных нанокристаллических пленок Ni/Al на поверхности титана ВТ1-00 в зависимости от дозы облучения ионами азота (10^{16} - 10^{18} ион/см²).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 124021900017-1. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН.

Литература

- [1] Курзина И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. *Градиентные поверхностные слои на основе интерметаллидных частиц: синтез, структура, свойства*. Томск: Изд-во НТЛ, 2013. 260 с.
- [2] Budzynski P. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. **342** (2015), p.1-6.
- [3] Bykov P.V., Bayankin V.Y., Cherdyntsev V.V., Vorob'ev V.L., Pechina E.A., Sviridova T.A., Shushkov A.A., Chukavin A.I., Alexandrova S.S. *Metals*. **11** (2021), p.1706.
- [4] Воробьев В.Л., Климова И.Н., Колотов А.А., Быков П.В., Баянкин В.Я. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. (2019), № 12, с.50.
- [5] Шушков А.А., Быков П.В., Воробьев В.Л., Баянкин В.Я., Вахрушев А.В., Шестаков

В.А. Химическая физика и мезоскопия. 26 (2024), № 4, с.510.

ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-6Al-4V

В.Л. Воробьев, В.С. Гладышева, С.Г. Быстров, П.В. Быков, В.Я. Баянкин, И.К. Аверкиев,
А.Л. Ульянов

УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия (vasily_l.84@udman.ru)

Сплавы титана широко применяются в различных областях техники из-за их высокой прочности, пластичности и низкой биотоксичности. Актуальной является разработка технологий модификации поверхности титановых сплавов для повышения их твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и биосовместимости [1, 2].

В работе исследовано формирование морфологии поверхности, элементного и фазового состава поверхностных слоёв, микроструктуры, а также микротвердости титанового сплава ВТ6 в условиях азотирования в плазме тлеющего разряда ионов N^+ при температуре 800 °С. Напуск азота в камеру осуществляли со скоростью 165 мл/мин. Время обработки 1 час.

Микроструктура исходного образца представлена в основном зернами фазы α -Ti с незначительной долей фазы β -Ti по границам зерен со средней площадью размеров зерен около 6 μm^2 .

После ионно-плазменной обработки поверхностные слои имеют зонную структуру: I – зона мелких кристаллов нитридов титана TiN, Ti₂N и зерен α -Ti; II – диффузионная зона крупных кристаллов твердого раствора азота в α -Ti (размер зерна увеличивается до 101 μm^2); III – дуплексная структура пластинок α -Ti и β -Ti.

Исследование методом атомно-силовой микроскопии свидетельствуют об увеличении параметра шероховатости поверхности Ra обработанных образцов в 7 раз, что обусловлено фазообразованием нитридов титана TiN и Ti₂N по всей поверхности.

Образование нитридов титана, диффузионной зоны твердого раствора и смешанной, дуплексной структуры обуславливают увеличение микротвердости образцов в 2,7 раза.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № ГЗ124021900017-1 и при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2025-455 от 26.05.2025 в части проведения исследований методом сканирующей электронной микроскопии. Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН.

Литература

[1] Bai H., Zhong L., Kang L., Liu J., Zhuang W., Lv Z., Xu Y. *Journal of Alloys and Compounds*. **V. 882** (2021), p.160645.

[2] Liu X., Chu P., Ding C. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. **V. 47** (2004), p. 49–121.

ИМПЛАНТАЦИЯ ИОНОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПОДВЕРГНУТЫХ НАГРЕВУ

А.А. Колотов, В.Л. Воробьев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (УдмФИЦ УрО РАН), г. Ижевск, Россия (less@udman.ru)

Работа посвящено исследованию металлических материалов предварительно нагретых и облученных ионами газов: аргона, азота, кислорода. Как известно, ионная имплантация, являясь энергетическим воздействием, может существенно изменять физико-химические свойства материалов. В процессе ионного облучения, поверхность обрабатываемого материала получает значительное количество энергии, которая диссипируя вглубь материала приводит к разогреву материала. Температура разогрева зависит от плотности ионного тока, энергии ионов и теплофизических характеристик материала мишени. В некоторых случаях температура в области термических пиков может достигать нескольких тысяч градусов. Безусловно, разогрев материалов до таких температур приводит к целому ряду эффектов – например, структурно-фазовым превращениям, ускоренной диффузии и пр. В экспериментах по исследованию влияния имплантации ионов в металлических материалах воздействие температурного фактора стараются уменьшить путем дополнительного охлаждения мишени, увеличением теплоотвода, уменьшением мощности ионного пучка и т.д. В то же время, большая часть металлических материалов, подвергающихся ионному облучению (как и другим типам энергетического воздействия) находится всегда в нагретом состоянии – это справедливо как для исследовательских объектов, так и для деталей находящихся в режиме эксплуатации, например, деталей реакторов. В этом случае, меняется подход к планированию эксперимента по изучению влияния имплантации ионов – исследуется влияние имплантации в нагретую металлическую мишень.

В работе исследуются образцы металлических сплавов железа, сплавов на основе медно-никелевого сплава, сплавов на основе алюминия. Нагрев образцов производится в индукционной печи, расположенной непосредственно в вакуумной камере источника ионов. Температура образца контролируется как в процессе нагрева, так и при облучении. Облученные образцы исследовались методами рентгенофотоэлектронной спектроскопии, структурного анализа, измерения микротвердости, методами атомно-силовой микроскопии. По результатам проведенных работы определено, что облучение ионами предварительно нагретых образцов, приводит к увеличению глубины модифицированного слоя, изменению микротвердости поверхности. При этом имеет значение степень предварительного нагрева мишени перед облучением.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА АТОМНУЮ СТРУКТУРУ СПЛАВОВ Fe-Mn, Fe-Cr И Fe-Si

Е.В. Макаров, В.А. Семёнкин, Н.В. Гущина, **В.В. Овчинников**

Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (efre-m@yandex.ru)

Работа посвящена исследованиям процессов формирования различных типов ближнего и дальнего атомного порядка, а также образования фаз в бинарных сплавах на основе железа под воздействием облучения непрерывными пучками ионов аргона ($E = 10 - 15$ кэВ) при температурах ниже порога начала интенсивного протекания термоактивируемых процессов.

Показано, что в ряде сплавов на основе Fe, находящихся в метастабильном состоянии, под воздействием непрерывных пучков ионов Ar^+ ($E = 10 - 15$ кэВ) удается получить состояния, которые не наблюдаются при обычном термическом нагреве при используемых в экспериментах температурах (ниже термической активации). Так, в модельном двухкомпонентном сплаве Fe – 6,29 ат. % Mn после холодной пластической деформации кратковременное облучение ($t = 4$ с) с нагревом до температур $300 - 450$ °C вызывает $\alpha \rightarrow \gamma$ фазовое превращение с образованием обогащенного Mn аустенита (от 23,8 до 38,0 ат. %). После ИПД процесс $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения в сплаве с Fe – 7,25 ат. % Mn происходит уже при облучении при максимальной температуре 280 °C. При аналогичном термическом нагреве сплавы остаются однофазными.

В сплаве Fe – 6,25 ат. % Si после холодной пластической деформации, разрушающей атомный порядок в образце, тем не менее, наблюдается не равная нулю степень дальнего атомного порядка ($\eta = 0,42 \pm 0,02$), в виду высокой склонности железо-кремнистых сплавов к упорядочению. После облучения образца холоднодеформированного сплава ионами аргона в течение 4 с с нагревом в ходе облучения до ~ 300 °C удалось достичь увеличения степени дальнего порядка до $\eta = 0,52$. После нагрева пчью в схожих режимах степень дальнего порядка увеличилась незначительно: $\eta = 0,45$. В сплаве Fe – 6,25 ат. % Si, подвергнутом ИПД ($\eta = 0,21$), при облучении в течение 6 с при $T = 200$ °C произошло образование дальнего атомного порядка, а именно, сверхструктуры 3-го ранга $Fe_{15}Si$ (наилучшее описание мёссбауэровского спектра в модели $Fe_{16-k}Si_k$ достигается при $k = 1$). Параметр дальнего порядка достигает высокого значения ($\eta = 0,70$). При нагреве без облучения значения η имеют более низкие на 20 – 30 % значения.

В сплаве Fe – 15 ат. % Cr после ИПД в результате облучения ($t = 1$ с, $T = 300$ °C) наблюдается образование ближнего атомного порядка с достаточно высоким параметром α , равным 0,41. Для образца после ИПД, отожженного при 300 °C в течение 1 ч, $\alpha = 0,34$. При облучении при $T < 200$ °C в течение 1 – 5 с $\alpha = 0,24$.

Все указанные процессы протекают по всей толщине 25 мкм исследуемых образцов при среднем проективном пробеге ионов до 10 – 12 нм, при пониженных температурах, при которых диффузия заторможена в этих сплавах, и за короткие времена (секунды и десятки секунд облучения). Установленные закономерности косвенно подтверждают факт гигантского увеличения подвижности атомов в результате радиационной тряски среды посткаскадными ударными волнами [1 – 3].

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-20173).

Литература

- [1] Ovchinnikov V.V., *Surf. Coatings Technol.* **v.355** (2018), p.65.
[2] Овчинников В.В., Гущина Н.В., Овчинников С.В., *ФММ.* **т.116** (2015), №12, с. 1294-1303.
[3] Ovchinnikov V.V., Makarov E.V., Gushchina N.V., *Metals* **v.11** (2021), article №1667.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СКОРОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПЛЕНОК TiO_x И Au В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ

Т.З. Гусейнов, О.Р. Бакиева

Удмуртский Федеральный Исследовательский Центр, Ижевск, Россия

Одними из основных элементов микроэлектроники являются тонкие пленки наноразмерного масштаба. Необходимые физико-химические свойства этих объектов достигаются строгой чистотой элементного состава и определенным типом химической связи. Современные методы позволяют успешно синтезировать нано-пленки, однако в процессе диагностики при ионном профилировании часто остается открытым вопрос о скорости распыления нанослоев, поскольку справочная литература дает информацию в основном для макрообъектов. Особенно актуально решение этой проблемы для работ, связанных с исследованием наноразмерных слоев нестехиометрических оксидов переходных металлов. Такие пленки используются в мемристивных технологиях, при этом концентрация кислорода в оксидном слое и его распределение является основным фактором, определяющим функциональные свойства мемристора, поскольку его работа обеспечивается миграцией кислородных вакансий внутри слоя.

Данная работа посвящена исследованию наноразмерных пленок TiO_x нанесенных на подложку из монокристаллического кремния. Пленки синтезированы методом магнетронного напыления, оксидный слой TiO_x был сформирован в аргонно-кислородной среде с поэтапным повышением концентрации кислорода. Пленки Au различной толщины были синтезированы методом магнетронного напыления на подложке из монокристаллического кремния в среде аргона. Методом оже-электронной спектроскопии, с использованием распыления ионами аргона малых энергий, определено изменение химического состава и элементной концентрации синтезированных пленок. Аналогичные исследования проведены для наноразмерных пленок золота, используемых в качестве контактного слоя мемристора. Определены средние скорости распыления оксидных пленок TiO_x и золота различной толщины.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения N 075-15-2021-1351. Исследования проводились с использованием средств совместного исследовательского центра "Поверхность и новые материалы" УдмФИЦ УрО РАН.

МОЛЕКУЛЯРНО – ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Н.М. Созонова

*ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук», г. Ижевск, Россия (Sozonova@udman.ru)*

В современном материаловедении тонкопленочные системы — это наиболее активно развивающееся направление, поскольку последовательная комбинация веществ с различными физическими свойствами позволяет формировать структуры и системы с управляемыми функциональными свойствами. При разработке и изучении подобных систем возникает необходимость проведения структурных исследований с целью изучения процессов самоорганизации, интердиффузии элементов, характера границ раздела.

Для структурных исследований систем используются несколько методов компьютерного моделирования. При моделировании методом Монте – Карло используются случайные числа. Существует несколько разновидностей, которые часто используются для атомистического моделирования. Metropolis MC имитирует термодинамический ансамбль, минимизируя энергию путем имитации отжига. Кинетический МК - это моделирование активированных процессов (например, диффузии). Большинство симуляций методом молекулярной динамики используют случайные числа, но они по-прежнему не считаются истинными симуляторами Монте – Карло.

Метод молекулярной динамики учитывает взаимодействие налетающей частицы или атома отдачи со всеми соседними атомами. Уязвимостью в данном методе является многочастичный потенциал взаимодействия, который нужно подбирать исходя из поставленной задачи.

В данной работе методом молекулярной динамики были проведены расчеты с использованием пакета программ LAMMPS [1]. Взаимодействие между атомами описывалось потенциалом погруженного атома, который демонстрирует достаточную точность в описании межатомных взаимодействий Fe-C, а также чистого железа, поэтому широко используется для исследования свойств системы. Уравнения движения интегрировались по методу Верле с временным шагом $5 \cdot 10^{-18}$ с. Была построена двухкомпонентная модель, состоящая из ~50 тысяч атомов. Расчет велся на протяжении 1 пс. Начальная энергия налетающих ионов Ar^+ 30 кэВ.

Результаты моделирования показали, что после прохождения ионов Ar^+ через границу раздела наблюдается формирование сложной конфигурации, где происходит перемешивание атомов. Выявлено разрушение кристаллической решетки на границе раздела двух сред. Также образуется каскад атомных соударений, который обнаруживается в области расположения атомов железа.

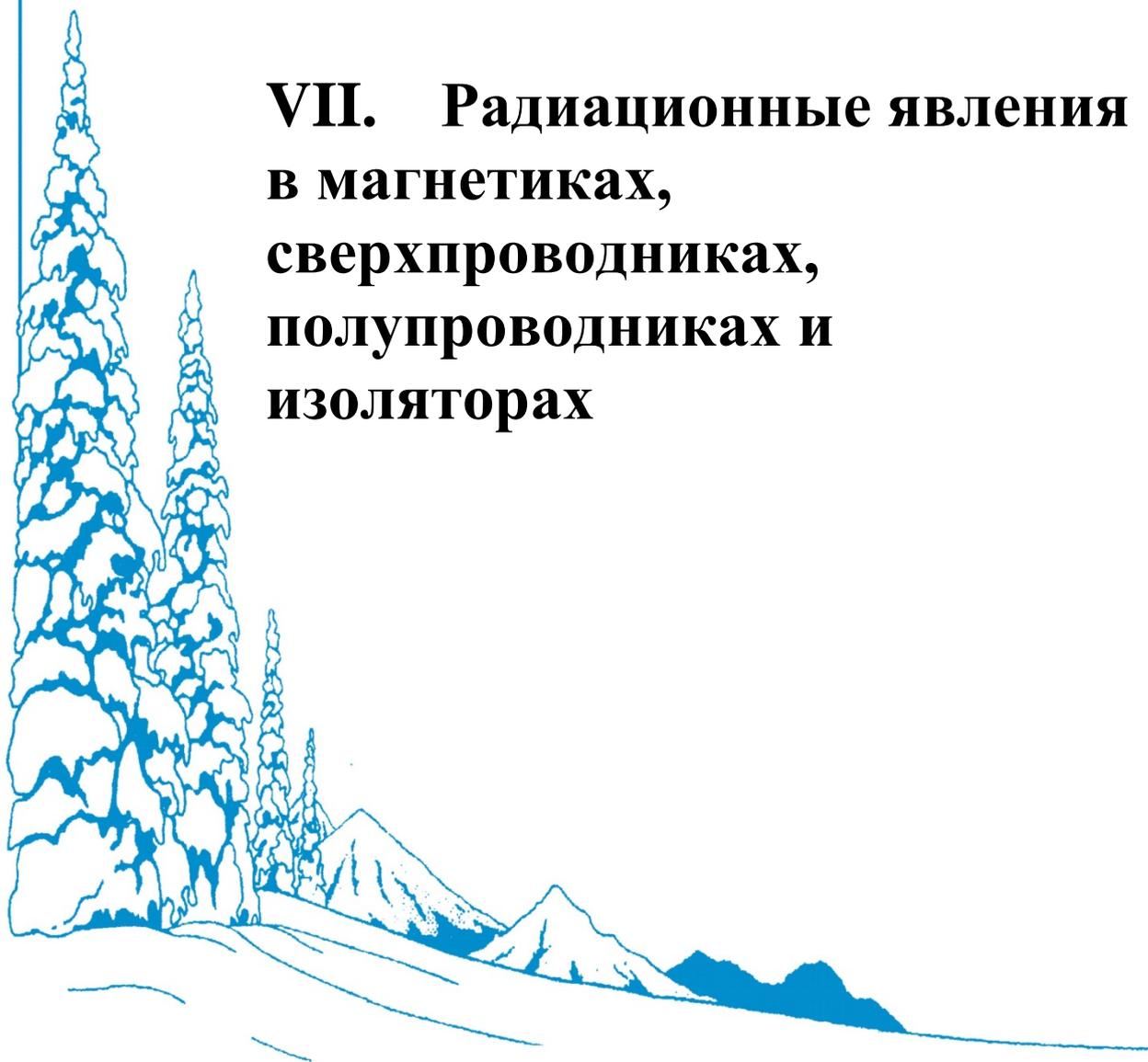
Предложенная компьютерная модель является тестовой системой для исследования основных закономерностей формирования структурных неоднородностей в двухкомпонентных образцах.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №124021900017-1.

Литература:

[1] URL: <http://lammps.sandia.gov/>.

**VII. Радиационные явления
в магнетиках,
сверхпроводниках,
полупроводниках и
изоляторах**



IRRADIATION-INDUCED AMORPHIZATION ACCELERATED BY ELEMENTAL MIGRATION NEAR THE SURFACE OF FLUORAPATITE

S. Jiang¹, R. Yin², X. Hu², J. Zhu², S. Liu², M. Ma², S. Dong², J. Zhang²

¹*Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, China (shmjiang@inest.cas.cn)*

²*College of Energy, Xiamen University, Xiamen, China*

The free surface, acting as a sink, invariably exerts an impact on the evolution of irradiation damage in the near-surface region, though its mechanism in multi-component compounds remains unclear. This study investigates fluorapatite, a potential nuclear waste form, through ex-situ and in-situ irradiation experiments, and MD simulations. Results show that the near-surface region tends to be amorphous preferentially due to the unbalanced elements diffusion, with effects extending over 400 nm at 493 K. Directional irradiation induces displacement atoms inward, increasing surface vacancy accumulation. Higher defect concentrations enhance element diffusion coefficients. Once amorphized, defects diffuse rapidly and are pinned by sinks, such as the free surface and numerous vacancy-type defects. Studying the amorphization of the near-surface region is helpful for grasping the weaknesses of irradiation resistance, and is crucial for evaluating the long-term service performance of nuclear waste forms.

The authors are grateful for the full financial support provided by the National Natural Science Foundation of China with Grant No. 12075200.

References

- [1] I.W Donald, B.L Metcalfe, R.N.J. Taylor, The immobilization of high level radioactive wastes using ceramics and glasses, *J. Mater. Sci.* **32** (1997) 5851-5887.
- [2] J.A.L. Rabone, N.H. De Leeuw, Interatomic potential models for natural apatite crystals: Incorporating strontium and the lanthanides, *J. Comput. Chem.* **27** (2006) 253-266.
- [3] Z. Huang, Q. Li, Y. Zhang, J. Duan, H. Wang, Z. Tang, Y. Yang, J. Qi, T. Lu, Densifications and mechanical properties of single-phase Gd₂Zr₂O₇ ceramic waste forms with improved TRPO waste load, *J. Eur. Ceram. Soc.* **40** (2020) 4613-4622.
- [4] D. Liu, J. Wang, J. Wang, K. Liu, J. Wen, J. Xu, P. Jiang, Temperature dependences of phase composition, densification, and thermal/chemical stability of Sr_{0.5}Zr₂(PO₄)₃-Nd_{0.5}Sm_{0.5}PO₄ composite ceramics for nuclear waste form, *J. Eur. Ceram. Soc.* **44** (2024) 116806.
- [5] W. Han, M.J. Demkowicz, E. Fu, Y. Wang, A. Misra, Effect of grain boundary character on sink efficiency, *Acta Mater.* **60** (2012) 6341-6351.
- [6] L. Hsiung, M. Fluss, S. Tumey, J. Kuntz, B. El-Dasher, M. Wall, B. Choi, A. Kimura, F. Willaime, Y. Serruys, HRTEM study of oxide nanoparticles in K3-ODS ferritic steel developed for radiation tolerance, *J. Nucl. Mater.* **409** (2011) 72-79.
- [7] E. Fu, M. Caro, L.A. Zepeda-Ruiz, Y. Wang, K. Baldwin, E. Bringa, M. Nastasi, A. Caro, Surface effects on the radiation response of nanoporous Au foams, *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 191607.
- [8] J. Du, H. Chen, C. Xu, Y. Fan, Y. Qiu, H. Wang, E. Fu, Stress of misfit dislocation at Fe/MgO interface drives the annihilation of radiation induced defects, *Acta Mater.* **210** (2021) 116798.
- [9] L. Huang, Z. Chen, W. Liu, P. Huang, X. Meng, K. Xu, F. Wang, T. Lu, Enhanced irradiation resistance of amorphous alloys by introducing amorphous/amorphous interfaces,

Intermetallics **107** (2019) 39-46.

[10] H. Huang, X. Tang, K. Xie, Q. Peng, Enhanced self-healing of irradiation defects near a Ni-graphene interface by damaged graphene: Insights from atomistic modeling, *J. Phys. Chem. Solids* **151** (2021) 109909.

[11] X. Hu, S. Jiang, T. Feng, Z. Huang, S. Dong, J. Zhang, In-situ observation of Kr^{2+} irradiation induced amorphization on $\text{Ca}_{10-x}\text{La}_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{SiO}_4)_x\text{F}_2$ ($x=1, 2$ and 6), *J. Nucl. Mater.* **573** (2023) 154120.

[12] J. Zhou, T. Yao, J. Lian, Y. Shen, Z. Dong, F. Lu, Radiation-induced amorphization of Ce-doped $\text{Mg}_2\text{Y}_8(\text{SiO}_4)_6\text{O}_2$ silicate apatite, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms* **379** (2016) 102-106.

[13] J. Lian, L. Wang, K. Sun, R.C. Ewing, In Situ TEM of Radiation Effects in Complex Ceramics, *Microsc. Res. Tech.* **72** (2009) 165-181.

[14] H. Zhang, J. Xi, R. Su, X. Hu, J.Y. Kim, S. Wei, C. Zhang, L. Shi, I. Szlufarska, Enhancing the phase stability of ceramics under radiation via multilayer engineering, *Sci. Adv.* **7** (2021) eabg7678.

[15] M. Zhuo, E. Fu, L. Yan, Y. Wang, Y. Zhang, R.M. Dickerson, B.P. Uberuaga, A. Misra, M. Nastasi, Q. Jia, Interface-enhanced defect absorption between epitaxial anatase TiO_2 film and single crystal SrTiO_3 , *Scr. Mater.* **65** (2011) 807-810.

[16] J. Zhou, M. Kirk, P. Baldo, F. Lu, Radiation stability of nanostructured hydroxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ under ion irradiations, *J. Nucl. Mater.* **557** (2021) 153271.

[17] S. Kano, H. Yang, K. Murakami, H. Abe, Modification of the high fluence irradiation facility at the University of Tokyo: Assessment of radiation-induced amorphization of $\text{Zr}(\text{Cr,Fe})_2$ Laves phase under 180 keV- He^+ irradiation, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms* **531** (2022) 1-8.

[18] F. Li, M. Ishimaru, P. Lu, I.V. Afanasyev-Charkin, K.E. Sickafus, Damage evolution in Xe-ion irradiated rutile (TiO_2) single crystals, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms* **166** (2000) 314-321.

[19] Y. Sina, M. Ishimaru, C.J. McHargue, E. Alves, K.E. Sickafus, Ion beam induced epitaxial crystallization of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ at room temperature, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms* **321** (2014) 8-13.

[20] L. Wang, W.J. Weber, Transmission electron microscopy study of ion-beam-induced amorphization of $\text{Ca}_2\text{La}_8(\text{SiO}_4)_6\text{O}_2$, *Philos. Mag. A* **79** (1999) 237-253.

[21] B.H. Toby, EXPGUI, a graphical user interface for GSAS, *J. Appl. Crystallogr.* **34** (2001) 210-213.

[22] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack, SRIM - The stopping and range of ions in matter, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms* **268** (2010) 1818-1823.

[23] W.J. Weber, Y. Zhang, H. Xiao, L. Wang, Dynamic recovery in silicate-apatite structures under irradiation and implications for long-term immobilization of actinides, *RSC Adv.* **2** (2012) 595-604.

[24] C. Meis, Computational study of plutonium-neodymium fluorobrotholite $\text{Ca}_9\text{Nd}_{0.5}\text{Pu}_{0.5}\text{SiO}_4(\text{PO}_4)_5\text{F}_2$ thermodynamic properties and threshold displacement energies, *J. Nucl. Mater.* **289** (2001) 167-176.

[25] A.P. Thompson, H.M. Aktulga, R. Berger, D.S. Bolintineanu, W.M. Brown, P.S. Crozier, P.J.I. Veld, A. Kohlmeyer, S.G. Moore, T.D. Nguyen, R. Shan, M.J. Stevens, J.

Tranchida, C. Trott, S.J. Plimpton, LAMMPS-a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales, *Comput. Phys. Commun.* **271** (2022) 108171.

[26] H. El Feki, J.M. Savariault, A. Ben Salah, Structure refinements by the Rietveld method of partially substituted hydroxyapatite: $\text{Ca}_9\text{Na}_{0.5}(\text{PO}_4)_{4.5}(\text{CO}_3)_{1.5}(\text{OH})_2$, *J. Alloy. Compd.* **287** (1999) 114-120.

[27] M.E. Fleet, Y. Pan, Site preference of rare-earth elements in fluorapatite, *Am. Miner.* **80** (1995) 329-335.

[28] W. Yuan, H. Peng, X. Du, P. Lv, M. Sun, L. Chen, T. Wang, Origin of molecular oxygen formation in irradiated borosilicate glasses studied by molecular dynamics simulation, *Int. J. Appl. Glass Sci.* **9** (2018) 344-351.

[29] A. Einstein, On the movement of small particles suspended in stationary liquids required by the molecular-kinetic theory of heat, *Ann. Phys.* **322** (1905) 549560.

[30] K. Zheng, Z. Zhang, F. Yang, S. Sridhar, Molecular Dynamics Study of the Structural Properties of Calcium Aluminosilicate Slags with Varying $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ Ratios, *ISIJ Int.* **52** (2012) 342-349.

[31] E.E. Jay, P.C.M. Fossati, M.J.D. Rushton, R.W. Grimes, Prediction and characterisation of radiation damage in fluorapatite, *J. Mater. Chem. A* **3** (2015) 1164-1173.

[32] H. Njema, M. Debbichi, K. Boughzala, M. Said, K. Bouzouita, Structural, electronic and thermodynamic properties of britholites $\text{Ca}_{10-x}\text{La}_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{SiO}_4)_x\text{F}_2$ ($0 \leq x \leq 6$): Experiment and theory, *Mater. Res. Bull.* **51** (2014) 210-216.

[33] N. Ollier, G. Rizza, B. Boizot, G. Petite, Effects of temperature and flux on oxygen bubble formation in Li borosilicate glass under electron beam irradiation, *J. Appl. Phys.* **99** (2006).

[34] H. Trinkaus, B.N. Singh, A.J.E. Foreman, Glide of Interstitial Loops Produced under Cascade Damage Conditions-Possible Effects on Void Formation, *J. Nucl. Mater.* **199** (1992) 1-5.

[35] R. Bullough, M.R. Hayns, M.H. Wood, Sink Strengths for Thin-Film Surfaces and Grain-Boundaries, *J. Nucl. Mater.* **90** (1980) 44-59.

[36] A. D. Brailsford, R. Bullough, The theory of sink strengths, *Philos. Trans. R. Soc. London A* **302** (1981) 87-137.

[37] W. Jiang, L. Kovarik, M.G. Wirth, Z. Zhu, N.L. Canfield, L.M. Seymour, L.M. Bagaasen, M.E. Bowden, T. Varga, N.R. Overman, Z. Hu, L. Shao, D.J. Senior, Ion irradiation study of lithium silicates for fusion blanket applications, *J. Nucl. Mater.* **576** (2023) 154281.

[38] W. Jiang, L. Kovarik, M.G. Wirth, Z. Hu, L. Shao, A.M. Casella, D.J. Senior, Microstructural and compositional evolutions in γ -LiAlO pellets during ion irradiation at an elevated temperature, *J. Nucl. Mater.* **591** (2024) 154925.

[39] N. Nitta, Y. Ohoka, K. Sato, Q. Xu, Y. Hayashi, T. Yoshiie, M. Taniwaki, Surface sink effects on void formation in GaSb and InSb under ion irradiation, *Mater. Trans.* **49** (2008) 1546-1549.

[40] R.C. Ewing, W.J. Weber, Actinide Waste Forms and Radiation Effects. In: Morss, L.R., Edelstein, N.M., Fuger, J. (eds) *The Chemistry of the Actinide and Transactinide Elements*, Springer, Dordrecht (2010) 3854-3871.

[41] S. Wang, L. Wang, R.C. Ewing, Irradiation-induced amorphization: Effects of temperature, ion mass, cascade size, and dose rate, *Phys. Rev. B* **63** (2001) 024105.

- [42] J. Lian, J. Chen, L. Wang, R.C. Ewing, J.M. Farmer, L.A. Boatner, K.B. Helean, Radiation-induced amorphization of rare-earth titanate pyrochlores, *Phys. Rev. B* **68** (2003) 134107.
- [43] M. Posselt, Crystal-Trim and Its Application to Investigations on Channeling Effects during Ion-Implantation, *Radiat Eff. Defects Solids* **130** (1994) 87-119.
- [44] Y. Zhou, X. Yang, M. Hou, L. Zhao, X. Zhang, F. Liang, Manipulating amorphous and crystalline hybridization of $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$ for enhancing sodium-ion diffusion kinetics, *J. Colloid Interface Sci.* **667** (2024) 64-72.
- [45] J. Yeh, S. Chen, S. Lin, J. Gan, T. Chin, T. Shun, C. Tsau, S. Chang, Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes, *Adv. Eng. Mater.* **6** (2004) 299-303.
- [46] W. Hsu, C. Tsai, A. Yeh, J. Yeh, Clarifying the four core effects of high-entropy materials, *Nat. Rev. Chem.* **8** (2024) 471-485.
- [47] M.J. Stock, M.C.S. Humphreys, V.C. Smith, R.D. Johnson, D.M. Pyle, Eimf, New constraints on electron-beam induced halogen migration in apatite, *Am. Miner.* **100** (2015) 281-293.
- [48] C. Tse, D.O. Welch, B.S.H. Royce, The migration of F^- , OH^- and O^{2-} ions in apatites, *Calcif. Tissue Res.* **13** (1973) 47-52.
- [49] R. Sizmann, The effect of radiation upon diffusion in metals, *J. Nucl. Mater.* **69-70** (1978) 286-412.
- [50] S.L. Shang, H.Z. Fang, J. Wang, C.P. Guo, Y. Wang, P.D. Jablonski, Y. Du, Z.K. Liu, Vacancy mechanism of oxygen diffusivity in bcc Fe: A first-principles study, *Corros. Sci.* **83** (2014) 94-102.
- [51] C. Barouh, T. Schuler, C. Fu, T. Jourdan, Predicting vacancy-mediated diffusion of interstitial solutes in α -Fe, *Phys. Rev. B* **92** (2015) 104102.

IN-SITU ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КРИСТАЛЛОВ Al_2O_3 НА ПУЧКАХ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

В.А. Скуратов^{1,2,3}, Н.С. Кирилкин¹, А. Исатов

¹Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия (skuratov@jinr.ru)

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

⁵Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Монокристаллический корунд, α - Al_2O_3 , является одним из наиболее радиационно-стойких диэлектриков и широко применяется как оптический материал и электрический изолятор для работы в радиационных полях. Основной объем информации о дефектах в этих кристаллах был получен с использованием методов оптической спектроскопии в послерадиационных экспериментах. Значительно меньше работ посвящено кинетике накопления структурных нарушений в α - Al_2O_3 непосредственно во время облучения, особенно в процессе воздействия быстрых тяжелых ионов. В настоящем докладе представлен обзор результатов “in-situ” исследований эффектов ионизации высокой

плотности в формировании дефектной структуры корунда, облучаемого тяжелыми ионами с энергиями выше 1 МэВ/нуклон. В первой части обсуждаются измерения в режиме реального времени параметров поля механических напряжений, в зависимости от величины удельных потерь энергии на электронное торможение и флюенса ионов. Дозовая зависимость компонент тензора напряжений определялась с помощью метода, основанного на использовании пьезоспектроскопического эффекта, связывающего изменения в спектрах ионolumинесценции с величиной механических напряжений. Установлено, что при флюенсах, соответствующих началу перекрытия трековых областей, определенных по результатам микроструктурного анализа и моделирования методами молекулярной динамики [1,2], наблюдается релаксация напряжений в облучаемом слое кристалла.

Во второй части доклада рассматривается зависимость спектрального состава ионolumинесценции от удельных потерь энергии на ионизацию и проводится анализ кинетики затухания люминесценции монокристаллов Al_2O_3 , генерируемой одиночными тяжелыми ионами высоких энергий.

Литература

[1] O'Connell J.H. . et al. Latent Tracks and Associated Strain in Al_2O_3 Irradiated with Swift Heavy Ions// *Nucl. Instr. and Meth. B* -2016. - v. **374** – pp. 97-101.

[2] Rymzhanov R.A. et al. Overlap of swift heavy ion tracks in Al_2O_3 // *Nucl. Instr. and Meth. B*- 2018. - v. **435** – pp. 121-125.

ИОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ В ПОЛУЧЕНИИ И МОДИФИКАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПРОВОЛОК

Д.Л. Загорский¹, И.М. Долуденко¹, Н.В. Гущина², В.В. Овчинников², К.В. Шаломов²,
С.А. Бедин¹, Н.С. Перов³, Р.А. Макарьин³, А.В. Сопетик³, В.М. Каневский¹

¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия

²Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

³ФизФак МГУ, г. Москва, Россия (dzagorskiy@gmail.com)

В настоящей работе рассматриваются особенности ионного облучения при получении одномерных наноструктур – металлических нанопроволок (НП). НП создаются методом темплатного синтеза на основе матриц – полимерных трековых мембран (ТМ). В получении магнитных НП ионное облучение может применяться на начальном этапе (получение матриц) и на «финишном» этапе – обработка полученных массивов НП.

МАТРИЦЫ. Известно, что для получения самих ТМ используется облучение тяжёлыми высокоэнергетичными ионами. Последующая химическая обработка приводит к образованию сквозных каналов-пор. Производство ТМ в нашей стране осуществляется в ОИЯИ (г. Дубна). Основное применение ТМ – это тонкая фильтрация (медицина, пищевая промышленность). Темплатный синтез является альтернативным направлением применения. Требования к мембранам для фильтрации и для матричного синтеза заметно различаются. Во втором случае обычно требуются мембраны с порами, ориентированными единообразно, с небольшой плотностью – получение матриц с такими параметрами может быть достигнуто изменением условий ионного облучения, которое производится в ОИЯИ.

МАТРИЧНЫЙ СИНТЕЗ – процесс, при котором происходит заполнение пор в ТМ нужным веществом; обычно осуществляется гальваническим способом. Массивы металлических НП, получаемые этим способом, представляют интерес в различных направлениях – эмиттеры, катализаторы, устройства электроники. Одно из направлений – создание микромагнитов, где специфические особенности (прежде всего, высокое аспектное отношение) могут сыграть роль в изменении магнитных свойств.

ИОННОЕ ОБЛУЧЕНИЕ. В настоящей работе изучено влияние ионного облучения на структуру и магнитные свойства НП. Массивы НП из Ni и сплава $Fe_{0.56}Ni_{0.44}$ были облучены ионами Ar^+ и He^+ ($E = 20$ кэВ, $F = 10^{16} - 10^{18}$ $см^{-2}$). После облучения наблюдается наличие наномасштабных зон плавления на их поверхности, а также значительное искривление и разрушение отдельных НП. На следующем этапе образцы НП из Ni и из Co (двух типов – кубический и гексагональный) были облучены ионами Ar^+ ($E = 15$ кэВ, $F = 8,6 \cdot 10^{11} - 6,3 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$). СЭМ исследование показало, что начиная с флюенса $6,3 \cdot 10^{13}$ $см^{-2}$ происходит заметное изменение формы кончиков НП-из Co – изгиб и рекристаллизация (одни кончики НП приобретают шестигранную огранку, другие – кубическую). Магнитные измерения показали, что для этих образцов происходит немонотонное изменение магнитных свойств: до флюенса $6,3 \cdot 10^{13}$ $см^{-2}$ происходит значительное увеличение намагниченности насыщения и коэрцитивной силы (в 2-3 раза), с дальнейшим ростом флюенса эти параметры несколько уменьшаются. Причиной этого может быть накопление дефектов на первом этапе и их последующая аннигиляция с увеличением флюенса ионов.

Изучение описанных эффектов представляется важным как для оценки радиационной стабильности, так и для поиска возможностей получения магнитожёстких материалов из 3-d металлов, без использования редкоземельных металлов.

Работа выполнена в рамках Госзаданий НИЦ «Курчатовский институт», МГУ им. М.В. Ломоносова и ИЭФ УрО РАН. Авторы выражают благодарность П.Ю. Апелю (ОИЯИ, г. Дубна) за предоставление образцов ТМ.

ОСОБЕННОСТИ ИНЖЕКЦИОННОГО ОТЖИГА ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ $A^{III}B^V$ С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ

В.С. Носовец^{1,2}, О.В. Ткачев¹

¹РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Россия (dep5@vniitf.ru)

²УрФУ имени первого президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Оптоэлектронные приборы на основе $A^{III}B^V$ (GaAs, GaN, InGaP) являются важной частью современной аппаратуры космических аппаратов, авиации, ядерных энергетических установок. Среди таких приборов можно выделить светодиоды, оптроны, лазерные диоды, фотоприемники на основе квантовых ям и точек. Их внедрение позволяет существенно увеличить помехозащищенность и габаритно-массовые характеристики аппаратуры, объем и скорость обрабатываемой ею информации. Последнее особенно важно для развития перспективных автоматизированных систем, использующих машинное зрение и искусственный интеллект в реальном времени.

Однако при проведении радиационных испытаний современных приборов в настоящее время используются методы, разработанные и верифицированные на классических приборах, основанных на гомоструктурах. На данный момент отсутствует понимание всей

специфики радиационных эффектов в приборах, содержащих квантово-размерные гетероструктуры.

Представляемая работа направлена на продолжение нашего исследования [1], демонстрирующего одну из особенностей радиационных эффектов в квантово-размерных гетероструктурах – существенно более высокую роль инжекционного отжига по сравнению с гомоструктурами. Инжекционный отжиг наблюдается при пропускании инжекционного тока через облученный p-n переход и приводит к восстановлению его характеристик. В отличие от термического отжига восстановление происходит за счет неосновных носителей заряда, вводимых в материал. Возможными механизмами этого явления считаются изменение зарядового состояния дефектов и локальное выделение энергии на дефектах в результате безызлучательного захвата носителей заряда [2].

В работе экспериментально исследовано воздействие нейтронов делительного спектра, 8 МэВ электронов и гамма-квантов ^{60}Co на фотогальванические и светоизлучающие свойства гетероструктур с квантовыми ямами на основе GaAs, GaN, InGaP. Исследован инжекционный отжиг фотогальванических и светоизлучающих свойств. Плотность электрического тока, индуцирующего отжиг, варьировали в широком диапазоне 10^{-4} – 10^2 А/см².

Полученные результаты демонстрируют, что после инжекционного отжига изменение светоизлучающих характеристик исследуемых образцов в 6 раз больше, чем изменение их фотогальванических характеристик. Подобные различия в случае гомоструктур, согласно существующим исследованиям, составляют около 15 % [3]. Полученные результаты объясняются одной из основных особенностей квантово-размерных гетероструктур – ограничением области, в которой распределены инжектированные носители заряда. За счет этого инжекционный отжиг также ограничен областью квантовой ямы.

Литература

[1] В.С. Носовец, О.В. Ткачев, С.М. Дубровских, В.А. Пустоваров, *Письма в журнал технической физики*. **50** (2024), № 13, с. 28.

[2] J.C. Bourgoin, J.W. Corbett, *Radiation Effects*, **36** (1978), p. 157.

[3] M. Yamaguchi, K. Ando, A. Yamamoto, C. Uemura, *J. Appl. Phys.* **58** (1985), p. 568.

ОСОБЕННОСТИ ФОТОСТИМУЛИРОВАННОГО ОТЖИГА ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.А. Коновалов, С.М. Дубровских, О.В. Ткачев

РФЯЦ-ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия (dep5@vniitf.ru)

Несмотря на многочисленные работы по исследованию влияния ионизирующих излучений (ИИ) на характеристики оптических волокон, например [1, 2], недостаточно уделено внимание радиационным эффектам в оптических волокнах, длина которых значительно превосходит величину $1/\Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ – коэффициент радиационно-наведенного поглощения. В данном случае реакция системы будет определяться распространением фронта фотообесцвечивания от источника фотонов вдоль облученного волокна. Информация о подобных процессах важна, например, при проектировании мощных лазерных систем, а также при разработке оптических систем, в которых необходима

высокая синхронизация оптических сигналов, передаваемых по волоконным линиям.

Авторами в работе [3], описывался отжиг радиационных центров окраски (РЦО) в оптическом волокне с помощью оптического излучения при статическом облучении оптоволокна с мощностью дозы ≈ 100 Р/с. Облучение образцов проводилось при температурах жидкого азота, что позволяло сохранить нестабильные РЦО. Такие центры полностью поглощали оптический сигнал, что, при проведении фотостимулированного отжига, создавало движение фронта просветляющего излучения в оптическом волокне. Были получены зависимости скорости распространения и протяженности фронта фотообесцвечивания от дозы ИИ и параметров зондирующего источника: мощности и длины волны оптического излучения.

Исследование особенностей фотостимулированного отжига в протяженных оптических волокнах при воздействии импульсного ИИ является продолжением работы [3]. В настоящей работе облучение оптического волокна проводилось при длительностях импульса ИИ порядка 10^{-8} с. При таких временах нестабильные РЦО не успевают отжечься даже при комнатной температуре, что позволяет наблюдать движение фронта фотообесцвечивания в волокне с длительностью порядка микросекунд.

В качестве протяженных оптических сред выбраны стандартное телекоммуникационное волокно Corning SMF-28 и радиационно-стойкое волокно фирмы ПНППК. Облучение образцов осуществлялось на ускорителе электронов в режиме вывода тормозного излучения. Мощность экспозиционной дозы при облучении образцов составляла $\sim 10^{10}$ Р/с. В зависимости от условий эксперимента варьировали температуру образца от -196 до 20 °С, поглощенную дозу в образце от 100 до 600 Р, длину облучаемой части волокна от 3 до 30 м, а также мощность оптического излучения, пропускаемого через оптоволокно, от 0,01 до 1 мВт.

Получены зависимости длительности восстановления зондирующего излучения и параметров фронта фотостимулированного отжига оптического волокна от поглощенной дозы в волокне, температуры и длины облучаемой части волокна, а также зондирующей оптической мощности при импульсном воздействии ИИ.

Литература

- [1] S. Girard, et al, *Reviews in Physics*, **4**, 100032 (2019).
- [2] П.Ф. Кашайкин и др., *Журнал технической физики*, **89**, вып.5, 752-758 (2019).
- [3] А.А.Коновалов, О.В.Ткачев, С.М.Дубровских. Распространение фронта фотообесцвечивания в протяжённых оптических средах при вариации параметров стимулирующего оптического излучения // *ВАНТ, серия «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру»*. Выпуск 1, 2023, с. 22-30.

РЕАКЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ СТРУКТУР НА ИМПУЛЬС ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.Д. Приходько^{1,2}, В.С. Носовец^{1,3}, О.В. Ткачев¹

¹РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия (O.V.Tkachev@vniitf.ru)

²Челябинский государственный университет, Челябинск

³Уральский федеральный университет, Екатеринбург

На сегодняшний день, одним из перспективных направлений в электронике является разработка квантоворазмерных гетероструктур. Гетероструктуры являются основой современных полупроводниковых приборов СВЧ-электроники и оптоэлектроники. В конструктивном отношении они представляют собой сложные многослойные системы [1], состоящие из различных материалов.

Представлены результаты исследования реакции современных квантоворазмерных гетероструктур на импульсное воздействие пучка электронов. Исследованы необлученные и предварительно облученные образцы. Облучение проводили нейтронами спектра деления и гамма-квантами (Co^{60}). В качестве светоизлучающих структур были взяты: светодиоды и лазерные диоды на основе GaAs и GaN.

Реакция образцов на ионизацию представляет собой вспышку света (рис. 1), причем спектр ее излучения существенно отличается от спектра излучения при нормальной работе светодиодов. Наблюдаемое различие связано с рекомбинацией носителей заряда не только в квантовой яме (КЯ), но и в барьерных слоях и подложке. Причем, обращает на себя внимание тот факт, что интенсивность вспышки в КЯ гораздо больше, чем интенсивность вспышки в барьерных слоях, что объясняется компрессией носителей заряда в КЯ. С помощью современных методов численного моделирования показана компрессия носителей заряда в КЯ при объемной ионизации исследуемых образцов.

Показано, что радиационные дефекты влияют на характеристики излучения, а именно уменьшают амплитуду вспышки, возникающей при воздействии пучком электронов, как в КЯ, так и в барьерных слоях. Дополнительно было проведено исследование отжига радиационных дефектов, наблюдаемое при воздействии пучком электронов.

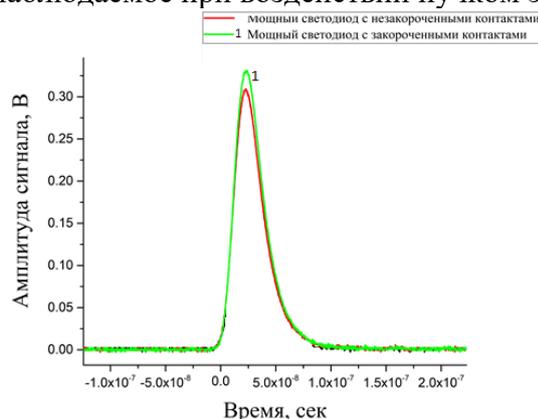


Рисунок 1. Характерная оциллограмма реакции светодиода при различных схемах подключения

Результаты исследования могут быть использованы для создания детектора ионизирующего излучения на основе квантоворазмерной гетероструктуры, отличающимся большим коэффициентом конверсии по сравнению с используемыми в настоящее время сцинтилляторами и возможностью задания определенной длины

ВОЛНЫ.

Литература[1] Алферов Ж.И. *Физика и техника полупроводников*, **32** (1), 3 (1998).**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ В ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ**Н.С. Кирилкин¹, Р.А. Рымжанов¹, В.А. Скуратов¹, Ж. О'Коннелл²¹Объединенный Институт Ядерных Исследований, г. Дубна, Россия (kirilkin@jinr.ru)²Центр просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, Университет им. Н. Манделы. Порт-Элизабет, Южно-Африканская Республика

Оксид алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ демонстрирует превосходные механические, оптические и электрические свойства, что обуславливает его широкое применение в различных областях науки и техники. Кроме того, высокая радиационная стойкость корунда делает его одним из перспективных материалов для применения в ядерной и термоядерной энергетике [1], вследствие чего он остаётся объектом систематических исследований на протяжении длительного времени.

В настоящей работе исследовано влияние температуры облучения высокоэнергетическими ионами Хе на морфологию дефектов и оптические характеристики монокристаллического оксида алюминия. Электронно-микроскопический анализ и моделирование молекулярной динамики показали, что воздействие быстрых тяжелых ионов приводит к образованию специфических радиационных повреждений в приповерхностной области - латентных треков, которые представляют собой нанометрические цилиндрические зоны, содержащие кластеры дефектов вакансионного типа, расположенные вдоль траектории иона [2]. Морфология треков заметно зависит от температуры облучения: при низких температурах (77 К) наблюдается повышенное накопление дефектов, тогда как при 300 К и особенно при 870 К более высокая подвижность точечных дефектов приводит к частичной релаксации радиационных повреждений.

Измерения спектров фотолюминесценции с временным разрешением показали, что возбуждение на длине волны 445 нм стимулирует излучение, спектральный состав которого меняется с температурой облучения. Предполагается, что зарегистрированные широкие перекрывающиеся полосы с максимумами при 560 нм и 630 нм и имеющие характерные времена жизни $8,0 \div 9,6$ нс и $0,9 \div 2,6$ нс, соответственно, связаны с F_2^{2+} -центрами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-72-10101, <https://rscf.ru/project/25-72-10101/>

Литература[1] E.R. Hodgson, Materials Challenges for Diagnostics beyond ITER, *Fusion Science and Technology* **62** (2012) 89–96.[2] J.H. O'Connell, R.A. Rymzhanov, V.A. Skuratov, A.E. Volkov, N.S. Kirilkin, Latent tracks and associated strain in Al_2O_3 irradiated with swift heavy ions, *Nucl Instrum Methods Phys Res B* **374** (2016) 97–101.

VIII. Техника и методика эксперимента



МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФЛЮЕНСА НЕЙТРОНОВ И ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ГАММА-КВАНТОВ В СМЕШАННЫХ ГАММА-НЕЙТРОННЫХ ПОЛЯХ

М.С. Иванова^{1,2}, О.В. Ткачѳв^{1,2}, М.Г. Березовская¹, А.С. Кустов¹, И.А. Илларионова¹,
И.Д. Приходько¹

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академ. Е.И. Забабахина» г. Снежинск, Челябинская область, Россия (dep5@vniitf.ru)

²СФТИ НИЯУ МИФИ, г. Снежинск, Челябинская область, Россия.

Технологическое развитие и уменьшение проектных норм при производстве интегральных микросхем привели к значительному увеличению влияния радиационных эффектов, обусловленных локальной ионизацией, вызванной, в том числе и отдельными нейтронами. Например, из работ [1-5] следует, что в микросхемах с проектными нормами менее 1 мкм вероятность проявления одиночных радиационных эффектов от нейтронов крайне высока. Характерные значения флюенса нейтронов, при которых могут проявляться данные эффекты $\sim 10^9$ част/см². При этом диапазон измеряемых флюенсов нейтронов стандартными методиками при проведении радиационных испытаний, как правило, составляет 10^{12} - 10^{15} част/см².

Оценки, выполненные с помощью численного моделирования, показывают, что расширить диапазон регистрируемых флюенсов нейтронов можно с помощью стандартных детекторов, традиционно используемых для фотонной дозиметрии. Однако проблема данного подхода состоит в том, что поглощенная доза в детекторах будет определяться не только нейтронами, но и сопутствующим гамма-излучением.

В данной работе для диагностики излучения в смешанных гамма-нейтронных полях установок авторами предлагается использовать уже существующие дозиметрические методики, в которых применяются детекторы, изготовленные из материалов с разной чувствительностью к нейтронному и гамма-излучениям. Использование при измерении одновременно двух детекторов фотонного излучения с разной чувствительностью позволяет разделить и далее оценить вклад гамма и нейтронной составляющих в общую дозу.

Для апробации предлагаемого способа были выбраны два типа фотонных детекторов, используемых в аттестованных методиках дозиметрического сопровождения испытаний на радиационную стойкость: термолюминесцентные детекторы ПСТ [6] и детекторы, основанные на эффекте электронного парамагнитного резонанса из аланина [7]. В качестве источника излучения использовали нейтронный генератор, реакторы с растворной и металлической активными зонами.

По результатам экспериментов и численного моделирования получено, что показания детекторов определяются поглощенной дозой созданной как нейтронами, так и гамма-излучением и применение комплекта из двух детекторов позволяет в пределах погрешности используемой методики (20%) выделить вклад каждого вида излучений в общую поглощенную дозу. Применение данного подхода позволит регистрировать флюенс нейтронов в диапазоне от 10^9 до 10^{14} част/см².

Литература

[1] A. Hands et al., Single event effects in power MOSFETs and SRAMs due to 3 MeV, 14 MeV and fission neutrons. - *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2011. **V. 58**, № 3. pp. 952-

959.

[2] W. Chen et al, Single-Event Upsets in SRAMs With Scaling Technology Nodes Induced by Terrestrial, Nuclear Reactor, and Monoenergetic Neutrons. - *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2019. **V. 66**, №. 6, pp. 856-865.

[3] A. Hands et al., Single event effects in power MOSFETs and SRAMs due to 3 MeV, 14 MeV and fission neutrons. - *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2011. **V. 58**, № 3. pp. 952-959.

[4] A. Hands et al., Single event effects in power MOSFETs and SRAMs due to 3 MeV, 14 MeV and fission neutrons. - *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2011. **V. 58**, № 3. pp. 952-959.

[5] A. Hands et al., Single event effects in power MOSFETs and SRAMs due to 3 MeV, 14 MeV and fission neutrons. - *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2011. **V. 58**, № 3. pp. 952-959.

[6] А.М. Членов, С.Ю. Ноздрачев, В.Н. Синёв и др. Сопоставление результатов измерений характеристик полей высокоинтенсивного фотонного излучения. – *Вопросы атомной науки и техники*. 2010, выпуск 3, с. 18-25

[7] W. L. McLaughlin. ESR dosimetry. *Radiation Protection Dosimetry*, 1993, **Vol. 47**, pp. 255–262.

МНОГОЦЕЛЕВОЙ ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЦ-140 ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С.В. Митрофанов, И.В. Калагин, В.А. Семин, В.А. Скуратов

Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия (mitrofanov@jinr.ru)

Основная деятельность Лаборатории ядерных реакций им. Флерова связана с фундаментальной наукой, но параллельно прилагается немало усилий на применение накопленного опыта в практической области. В настоящее время, основными направлениями прикладных работ в ЛЯР являются: разработка методов изготовления трековых мембран; ионно-имплантационные технологии и радиационное материаловедение; тестирование электронной компонентной базы (авионика и космическое применение) на радиационную стойкость.

Основываясь на своем долговременном опыте и стремясь повысить производительность прикладных работ, ЛЯР разработал и реализует проект нового многоцелевого ускорительного комплекса для прикладных исследований. Исходя из требований пользователей, простоты эксплуатации и ценовой политики, были определены основные параметры будущей машины и экспериментальных установок. ДС140 позволит получать пучки ускоренных ионов с энергиями 2.1 и 4.8 МэВ на нуклон вплоть до висмута.

Проект включает в себя создание специализированного компактного ускорителя тяжелых ионов ДС140 и комплекса специализированных исследовательских каналов. В докладе будет представлен статус работ по проекту, технологические параметры циклотрона и экспериментальной инфраструктуры. Комплекс примет первых пользователей в 2026 году.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.Н. Вельмогин, В.А. Цыгвинцев, С.В. Яркова

АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия, (irm@irmatom.ru)

Рентгеноструктурный анализ – один из наиболее распространенных физических методов исследования и контроля материалов и деталей в научно-исследовательских институтах и лабораториях. Используя различные методики рентгеноструктурного анализа можно определить фазовый состав материалов, состав твердых растворов, размеры и форму кристаллов, внутренние напряжения, преимущественные ориентировки кристаллов (текстуры) и другие параметры.

В АО «ИРМ» с 2023 года для различных исследований материалов и образцов с активностью до 1×10^8 Бк используется лабораторный дифрактометр, оснащенный помимо стандартного прободержателя, термокамерой и приставкой Эйлера.

Термокамера позволяет выполнять исследования в диапазоне температур от комнатной до 1600°C , с использованием системы откачки воздуха из камеры, позволяющей достичь вакуум порядка 5.5×10^{-3} mbar.

При помощи приставки Эйлера выполняются следующие задачи: определение напряжений I и II рода, а именно напряжения во всем объеме образца, а так же напряжения в отдельных зернах, создаваемые за счет дислокаций и других дефектов. Помимо этих функций, приставка Эйлера позволяет определять преимущественную ориентацию зёрен в структуре материалов (текстуру).

В докладе представлены разработанные в АО «ИРМ» методические подходы для дифракционных исследований материалов активных зон ядерных реакторов, нашедшие применение при обосновании их работоспособности и прогнозировании свойств.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНЕГО ПРЕДЕЛА ВЕСА ВЫСОКОПЛОТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПЛОТНОСТИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

М.С. Ремезова, А.В. Трошев, А.М. Голунов, Д.А. Ченцов, Д.А. Беляев
РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Российская Федерация (dep5@vniitf.ru)

Плотность высокоплотных, преимущественно радиоактивных металлов является важной характеристикой их качества и может изменяться в результате накопления радиационных дефектов и продуктов распада при длительном хранении, а также в результате каких-либо физических воздействий.

Среди всех методов определения плотности метод гидростатического взвешивания является наиболее доступным и легко реализуемым.

Целью работы являлась экспериментальная проверка влияния типа вспомогательной жидкости (дистиллированная вода, изопропиловый спирт, четырёххлористый углерод) на точность измерения плотности миниатюрных металлических образцов методом

гидростатического взвешивания при проведении измерений в условиях перчаточного бокса.

В исследованиях использовались образцы из вольфрама весом от ~200 мг до ~6 г, имитирующие образцы из высокоплотных материалов — урана или плутония. Установлено, что использование дистиллированной воды приводит к наиболее высокой погрешности определения плотности миниатюрных металлических образцов. Показано, что для обеспечения погрешности измерений плотности образцов менее $0,09 \text{ г/см}^3$ в качестве вспомогательной жидкости лучше всего подходит изопропиловый спирт или четырёххлористый углерод. При этом вес образца должен составлять не менее 2 г. Рекомендованные результатами данной работы вид вспомогательной жидкости и вес образцов применяются при работах в материаловедческой лаборатории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ МЕТОДАМИ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Р.С. Лаптев, М.А. Кругляков

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск,
Россия (laptevrs@tpu.ru, kruglyakov97@tpu.ru)*

Композитные материалы на основе магния, модифицированные различными добавками, в не теряют актуальности исследования в области водородной энергетики благодаря их перспективным характеристикам для обратимого хранения водорода. Легирующие элементы позволяют улучшить характеристики «чистого» магния, например, способствуют снижению энергии активации процессов диффузии водорода и диссоциации/рекомбинации молекул H_2 на поверхности, а также ослабляют связи Mg-H в гидриде, что приводит к понижению температуры десорбции водорода. Таким образом, для эффективного улучшения свойств композитов на основе магния необходимо понимание механизмов образования и эволюции дефектной структуры на протяжении всего цикла «сорбция-десорбция», с чем успешно справляются методы позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС).

Для изучения эволюции дефектов в композитах Mg/MgH_2 , содержащих однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ), металл-органические каркасные соединения (МОКС) MIL-101(Cr), наноразмерные порошки никеля (nanoNi) и алюминия (nanoAl) в *in situ* режиме доплеровской спектроскопии уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ) авторами работы используется специализированный комплекс ПАС, который объединяет несколько ключевых компонентов, включая автоматизированный газовый реактор, спектрометрические модули и вакуумную камеру. В процессе исследования была разработана методика для анализа ДУАЛ-спектров посредством оценки закономерностей изменения параметров S и W в условиях контролируемых термического и водородного воздействий. В результате анализа полученных данных определено существенное влияние каждой добавки на структуру дефектов, кинетику сорбции и десорбции водорода, а также термодинамические свойства. В данной работе подчеркивается польза *in situ* ПАС для выявления закономерностей, определяющих механизмы, способствующие улучшению свойств композитов на основе магния, а также предлагаются рекомендации для создания высокоэффективных современных материалов-накопителей водорода.

Данное исследование было профинансировано государственной программой, Грант № FSWW-2026-0044.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОНОВ

Т.С. Картапова, П.В. Быков, Ф.З. Гильмутдинов

*ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук», г. Ижевск, Россия (tskartapova@udman.ru)*

Интенсивные экспериментальные и теоретические исследования, проводимые в последние годы, позволили значительно продвинуться в технологиях формирования тонких плёнок. Однако из-за быстрого обновления информации в этой области необходимо регулярно рассматривать актуальные технологические подходы и их особенности. Одной из важнейших задач в данной сфере остаётся изучение характеристик плёнок, в частности — их массовой плотности, поскольку именно она позволяет судить о физико-химических свойствах материала [1].

Массовая плотность напрямую связана с такими характеристиками, как механическая прочность, теплопроводность, электрическая проводимость и оптические свойства. Более того, она служит важным критерием оценки качества покрытий в микроэлектронике, оптике, сенсорике и других направлениях, где от стабильности и однородности материала зависят эксплуатационные характеристики устройств [2]. Подобные подходы особенно актуальны для исследований плёнок нанометрового масштаба, нанесённых на чувствительные или нестандартные подложки. При этом одним из ключевых методов анализа остаётся рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, которая позволяет не только определить элементный состав поверхности, но и оценить химическое состояние элементов и, косвенно, структуру, и плотность плёнки. Например, наличие спутных пиков в спектрах элементов, таких как Си и Со, позволяет сделать выводы о фазовом состоянии и электронной плотности.

В данной работе основное внимание уделяется определению массовой плотности тонких плёнок углерода, кобальта и меди, нанесённых на металлические подложки с использованием технологии магнетронного напыления. Показано, что РФЭС может использоваться не только для определения элементного состава и химических состояний, но и для полуколичественной оценки плотности тонких плёнок. Особенно важными оказались спутные пики, позволившие точно определить состояние меди и кобальта.

Литература

[1] Мансуров Г. Н., Петрий О. А. *Электрохимия тонких металлических пленок.* – 2011.

[2] Ohring M. *Materials science of thin films: deposition and structure.* – Academic press, 2002.

ПОЗИТРОННЫЕ АННИГИЛЯЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВЫДЕЛЕНИЙ В ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОМ СТАРЕЮЩЕМ СПЛАВЕ Fe-35,2 ат.%Ni-2,9 ат.%Ti

Д.А. Перминов, С.Е. Данилов

*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
(perminov@imp.uran.ru)*

Введение в сталь краевых дислокаций и границ раздела выделений вторых фаз с матрицей позволяет снизить распухание аустенитных сталей, т.к. дислокации и выделения являются стоками для точечных дефектов, образующихся при облучении. Особый интерес представляет зарождение частиц выделений на дислокациях. В этом случае частицы не только играют роль стоков для точечных дефектов, но также могут влиять на эффективность взаимодействия дислокаций с дефектами и стабилизировать дислокационную структуру [1-2]. Однако при деформации в сталях и сплавах формируется сложная дефектная структура. При этом предварительная пластическая деформация существенно влияет на процессы образования выделений вторых фаз при термическом отжиге [3]. Поэтому для корректной интерпретации результатов облучения холоднодеформированных стареющих сталей и сплавов необходимо знание их исходной микроструктуры.

Просвечивающая электронная микроскопия является наиболее распространенным прямым методом изучения структуры сталей и сплавов. С его помощью надежно идентифицируется дислокационная структура, однако мелкие вакансионные дефекты, а также выделения вторых фаз размером менее 1 нм не обнаруживаются. Поэтому представляет интерес исследование деформированных сплавов методами, обладающими высокой чувствительностью как к видимым, так и к невидимым в ПЭМ дефектам.

Позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) и измерение остаточного электросопротивления (ОЭС) являются одними из таких методов. ПАС и ОЭС обладают высокой чувствительностью к точечным и линейным дефектам кристаллической решетки. Кроме того, ОЭС чувствительно к процессам атомного перераспределения в твердом растворе. Совмещение методов ПАС и ОЭС позволяет точнее идентифицировать процессы, происходящие при деформации и отжиге.

В работе методами ПАС и измерения ОЭС была изучена эволюция микроструктуры холоднодеформированного стареющего сплава Fe-35,2 ат.%Ni-2,9 ат.%Ti при изохронном отжиге. В результате работы было установлено, что наночастицы интерметаллидной γ' -фазы Ni_3Ti , образующиеся на дислокациях при отжиге вакансионных дефектов, снижают эффективность захвата позитронов дислокациями, причем этот эффект зависит от степени деформации. В частности, величина эффекта блокировки захвата позитронов определяется соотношением числа глубоких ловушек позитронов и частиц выделений, присутствующих на дислокациях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН.

Литература

- [1] Xiong Y., Ma S., Zhang J., Huang S., et al. *J. Nucl. Mater.* **v. 597** (2024). p.155144.
- [2] Perminov D.A. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures* (2024), №6, pp.203–214.

[3] Sun G., Peng J., Wang Z., et al. *Journal of Materials Science & Technology* **v.249** (2026), pp.264–274.

[4] Перминов Д.А., Данилов С.Е. *ФММ* **т.126** (2025), №10, с. 1260—1269.

ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ПИКОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ 50 ГВт

В.Е. Патраков, Л.Н. Лобанов, М.С. Педос, С.Н. Рукин, К.А. Шарыпов, С.А. Шунайлов, С.П. Тимошенко, М.И. Яландин

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия (patrakov@ier.uran.ru)

Получение мощных импульсных электронных пучков с длительностью менее 1 нс представляет интерес в задачах радиационной физики и химии, для получения коротких вспышек рентгеновского излучения, калибровки детекторов ионизирующих излучений, а также для генерирования мощных импульсов сверхвысокоочастотного излучения [1]. Для получения наиболее коротких и мощных электронных пучков традиционно используются ускорители прямого действия, основным элементом которых является генератор высоковольтных ускоряющих импульсов.

Высоковольтная субнаносекундная техника с применением коммутаторов на основе искровых разрядников позволяет получать импульсы ускоряющего напряжения с длительностью около 100 пс при напряжении до 1 МВ и пиковой мощности порядка 10 ГВт [2]. В последнее время активно развивается новый подход к получению сверхмощных импульсов субнаносекундной и пикосекундной длительности, основанный на нелинейном преобразовании бегущей волны в коаксиальных линиях, заполненных ферритом. Такой подход не требует использования коммутаторов и позволяет получать импульсы с пиковой мощностью около 100 ГВт при длительности 100 пс [3]. В настоящей работе описано применение такого импульса для получения пикосекундных пучков электронов с пиковыми мощностями в десятки ГВт в отпаянном вакуумном диоде ИМАЗ-150Э с выводом пучка в атмосферу и в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией (КДМИ).

Для передачи ускоряющего импульса на каждый из диодов были разработаны конструкции передающих линий и проходных изоляторов, обеспечивающие наилучшее согласование тракта. Для измерения энергии электронов использовались алюминиевые фильтры различной толщины, а для регистрации осциллограммы тока пучка использовался коллекторный датчик на основе коаксиальной линии передачи. Для анализа профилей поперечного сечения пучков использовалась дозиметрическая пленка ЦВИД.

При использовании диода ИМАЗ-150Э был получен электронный пучок круглого сечения со следующими параметрами: максимальная энергия 3.2 МэВ, амплитуда тока 12 кА, пиковая мощность около 40 ГВт, длительность импульса тока около 80 пс, диаметр пучка 20 мм. Было установлено, что за счет малой длительности ускоряющего импульса диод способен выдерживать без пробоя градиент 500 МэВ/м в ускорительном зазоре. В конструкции с КДМИ был получен пучок со следующими параметрами: максимальная энергия около 2 МэВ, амплитуда тока около 30 кА, пиковая мощность около 50 ГВт, длительность импульса тока около 90 пс. Поперечное сечение пучка представляло собой кольцо со средним диаметром 20 мм и шириной около 2 мм.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-19-00407,

<https://rscf.ru/project/24-19-00407/>.

Литература

- [1] Месяц Г.А., Яландин М.И., *УФН*, т. **175** (2005), № 1, с. 225.
- [2] Желтов К.А., Коробков С.А., Петренко А.Н., Шалиманов В.Ф., *ПТЭ*, т. **33** (1990), №1, с. 37.
- [3] Patrakov V.E., Pedos M.S., Ponomarev A.V., Rukin S.N., Timoshenkov S.P., *Rev. Sci. Instrum.*, vol. **95** (2024), №8, p. 084709.

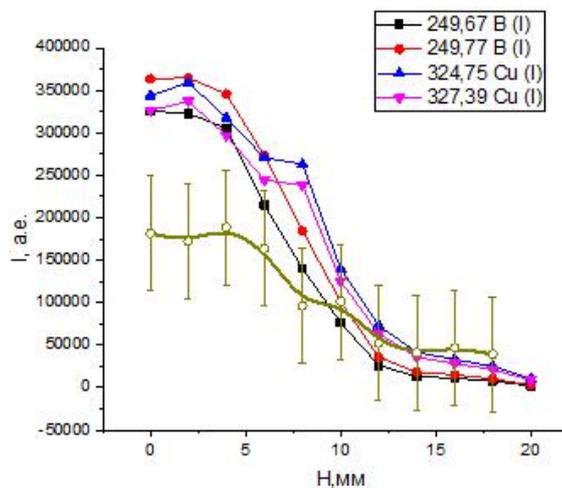
СИНТЕЗ БОРСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И МАГНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ БОРА В НИХ

Г.Н. Чурилов, Н.С. Николаев, Т.А. Шалыгина, Г.А. Глущенко, В.И. Елесина
Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
– обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
(churilov@iph.krasn.ru)

В данной работе описана методика и источник света для количественного анализа содержания бора в алюминиевых и магниевых борсодержащих сплавах, на основе оптического спектрального анализа. Исследования по получению бор содержащих алюминиевых сплавов показали, что их механические свойства существенно зависят от типа взаимодействия между собой Al и B [1]. В одном случае получаются сплавы, в которых алюминий и бор не растворяются друг в друге и не взаимодействуют химически (эвтектики), т.е. образуются две фазы, в другом – сплавы, в которых бор и алюминий образуют химические соединения (AlB_2). Тип сплава зависит от заданных параметров синтеза и количества вводимых элементов. При этом количественное определение стехиометрии полученного вещества – сложная задача, особенно для легких элементов. В связи с этим требуется метод определения количественного содержания бора в алюминиевой либо магниевой матрице. Для решения данной задачи мы разработали методику, основанную на атомно-эмиссионном спектральном анализе с использованием в качестве источника света двухструйного плазматрона [2], позволяющую с высокой точностью определять количественное содержание бора в алюминиевых и магниевых борсодержащих сплавах. Двухструйный плазматрон используется нами в качестве источника света и для управления количеством бора, добавляемого в матрицу в установке для синтеза борсодержащих сплавов. Для решения обеих задач нами были проведены исследования плазмы двухструйного плазматрона (рис. 1).



(а)



(б)

Рисунок 1. Фотография двухструйного плазматрона (а); картина распределения интенсивности излучения линий бора и меди по высоте разряда (б).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00794, <https://rscf.ru/project/25-29-00794/>.

Литература

[1] Churilov G.N. и др. Uniform alloying of aluminum with boron. *Pramana – Journal of Physics* (2025), принята в печать 27.10.2025.

[2] Чурилов Г.Н. и др. Источник света для спектрального анализа. *Патент RU 2326353*.

УСТРОЙСТВО И МЕТОДИКИ РАЗДЕЛЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.И. Елесина^{1,2}, Г.Н. Чурилов^{1,2}, Г.А. Глущенко¹, В.А. Лопатин¹, Н.Г. Внукова^{1,2}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия
(ev1kto@yandex.ru)

²Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Известно, что многие нанодисперсные порошковые материалы, в том числе для создания сплавов и композитных материалов (например, на основе бора для атомной энергетики), получают плазменным методом, что приводит к большой дисперсности (разбросу по размерам). При необходимости получения порошкового материала с частицами определенного размера (диапазона размеров) важно иметь соответствующую методику разделения. Существующие методики не всегда позволяют получить требуемый результат, поскольку частицы склонны к агрегации в большие конгломераты.

В работе представлены устройства и методики, предназначенные для разделения мелкодисперсных порошковых материалов. Одна методика (методика I) основана на плазменных технологиях (в аргоновой плазме), другая (методика II) – на использовании принципов механического разделения (из суспензии в специально разработанном устройстве [1]). С применением методики I частицы бора 100–1000 нм, предназначенные

для введения в алюминий при получении бор-алюминиевых сплавов, были разделены на частицы 4–11 нм (рис. 1а) [2], а с применением методики II – частицы FeNi/C на частицы 40–50 нм и 6–15 нм (рис. 1б) [3].

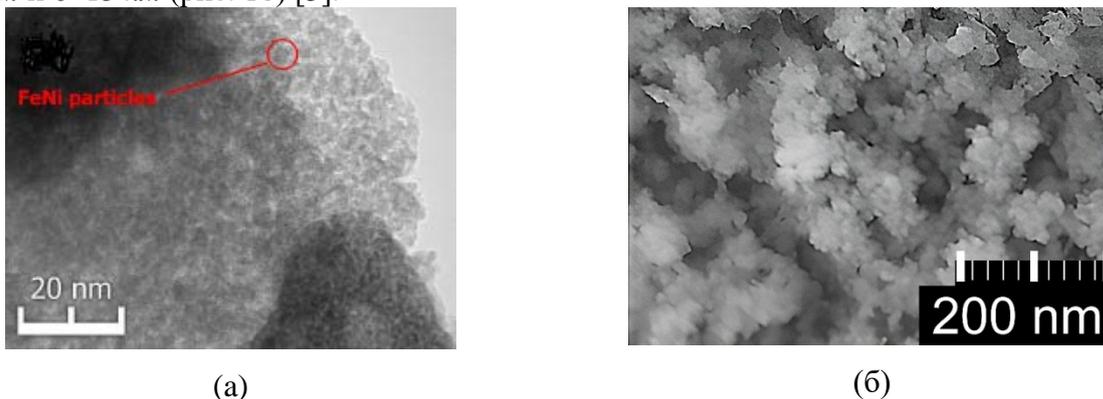


Рисунок 1. Обработанный в устройстве [1] порошок с частицами FeNi/C (а); обработанный плазмой порошок бора (б). Изображения получены в режиме картирования.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института физики им. Киренского ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр СО РАН"; Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00794, <https://rscf.ru/project/25-29-00794/> (в части плазменной обработки частиц бора).

Литература

- [1] Чурилов Г.Н., Елесина В.И. Патент RU 2744434 (2021).
- [2] Churilov G.N. et al. Uniform alloying of aluminum with boron. *Pramana – J. Phys.* (2025), принята в печать 27.10.2025.
- [3] Vnukova N.G. et al. *Fullerenes Nanot. Carbon Nanostruct.* 2024. **33**(3), p. 288–293.

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

D		B		Климова И.Н.	79
Ding W.	13	Валиулин В.Э.	21	Ковалева П.П.	17
Dong S.	87	Василенко В.В.	61	Козлов А.В.	22, 52
H		Вельмогин Д.Н.	50, 101	Козлов К.А.	22, 51
Han Jihong	15	Внукова Н.Г.	107	Колотов А.А.	79, 81
Hao Jingwei	14	Воробьев В.Л.	81	Комарова Д.А.	34
Hu X.	87	Воробьев В.Л.	79, 80	Комлева Е.В.	17
J		Воронин В.И.	57, 64	Коновалов А.А.	93
Jiang S.	87	Г		Корнеева Е.А.	34
L		Гильмутдинов Ф.З.	103	Коротин М.А.	17
Liu Liyuan	15	Гладышева В.С.	80	Котыхов А.С.	17
Liu S.	87	Глушкова Н.А.	57	Краснояров Б.В.	57
M		Глушкова Н.В.	50, 70	Кривко Е.А.	40
Ma M.	87	Глущенко Г.А.	106, 107	Кругляков М.А.	59, 102
Ma Yaxi	14	Голосов О.А.	70	Кудияров В.Н.	59
O		Голунов А.М.	101	Кулевой Т.В.	26
O'Connell J.H.	42	Губкин А.Ф.	23, 57, 70	Кулешова Е.А.	43, 62
Y		Гусейнов Т.З.	83	Курский Р.А.	58, 61
Yang M.	13	Гущина Н.В.	82, 91	Кустов А.С.	99
Yin R.	87	Д		Л	
Z		Данилов С.Е.	33, 104	Лапин Ю.В.	70
Zhang J.	87	Долгих А.Е.	19	Лаптев Р.С.	56, 59, 102
Zhang Y.	15	Долуденко И.М.	91	Леви Е.А.	39
Zhang Yang	14	Дремов В.В.	17, 41, 45	Леонтьева-Смирнова М.В.	51, 55
Zhang Z.W.	15	Дубровских С.М.	93	Литовченко И.Ю.	19
Zhang Zhongwu	14	Е		Лобанов Л.Н.	105
Zheng M.	13	Елесина В.И.	106, 107	Ломыгин А.Д.	56
Zhu J.	87	Ельцов Г.С.	17	Лопатин В.А.	107
Zhu X.	13	Ефимов В.	63	Лукьянчук А.А.	26, 49
A		З		M	
Аверин С.А.	33	Забусов О.О.	58, 61	Макаров Е.В.	82
Аверкиев И.К.	79, 80	Завалишин В.А.	51	Макаров Е.И.	18
Аккузин С.А.	19	Загорский Д.Л.	91	Макарян Р.А.	91
Александров А.С.	39	Зайков Ю.П.	70	Малиновский Е.Д.	43
Алексеев П.А.	75	Зуев Ю.Н.	39	Мальцев Д.А.	61
B		И		Марголин Б.З.	20, 55, 60
Бакиева О.Р.	83	Иванова М.С.	99	Маркелов Д.Е.	18
Барабанов А.Ф.	21	Илларионова И.А.	99	Мешков Е.А.	44
Баянкин В.Я.	79, 80	Исатов А.	90	Мирзоев А.А.	45
Бедин С.А.	91	Искандаров Н.А.	26, 49	Мирмельштейн А.В.	16
Беляев Д.А.	39, 101	К		Митрофанов С.В.	34, 100
Березовская М.Г.	99	Казанцев В.А.	64	Михеенков А.В.	21
Бобровский В.И.	23, 64	Калагин И.В.	100	Мушников П.Н.	70
Богачев А.А.	26, 49, 53	Каневский В.М.	91	Мыктыбай Ж.М.	69
Быков П.В.	79, 80, 103	Караваев А.В.	17, 41, 45	H	
Быстров С.Г.	79, 80	Картапова Т.С.	103	Нгуен Ван Тьеп	34
		Катаева Н.В.	51	Нежданов А.Г.	33
		Ким А.В.	19	Неустроев В.С.	18
		Кирилкин Н.С.	90, 96	Никитин А.	63
		Кичигин Р.М.	17, 41	Никитин А.А.	26, 49, 60
		Клауз А.В.	26, 49, 53, 54	Никитина А.А.	51
				Николаев А.Л.	31
				Николаев Н.С.	106
				Нкоси М.	34
				Новиков И.С.	17
				Носовец В.С.	92, 95

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

О		Святлов И.Л.	39	Хвостов С.С.	70
О'Коннелл Ж.	96	Сексембаев Ж.Б.	69	Хомич А.А.	26, 49, 53
Овчинников В.В.	82, 91	Семёнкин В.А.	82	Ц	
Огородникова О.В.	63	Семин В.А.	100	Цыгвинцев В.А.	33, 50, 101
Осипова В.В.	19	Сёмкин М.А.	57, 64, 70	Ч	
П		Сергеев Н.	63	Ченцов Д.А.	101
Панченко В.Л.	52, 57	Скуратов В.А.	34, 42, 90, 96, 100	Чернов В.М.	19, 24
Пастухов В.И.	57	Смирнов Н.С.	40	Чертотытов Е.В.	55
Патраков В.Е.	105	Созонова Н.М.	84	Чирков П.В.	17, 41, 45
Пахолкина П.	19	Соколовский Д.Е.	18	Чурилов Г.Н.	106, 107
Педос М.С.	105	Сопетик А.В.	91	Ш	
Перминов Д.А.	33, 104	Сорокин А.А.	20	Шаломов К.В.	91
Перов Н.С.	91	Сохацкий А.С.	34	Шалыгина Т.А.	106
Печина Е.А.	79	Спиридонова К.В.	19	Шапеев А.В.	17
Подгорный Д.А.	54	Стародубец К.А.	17	Шарыпов К.А.	105
Полехина Н.А.	19	Стрельцов С.В.	17	Швецова В.А.	20
Портных И.А.	22, 50, 52, 57	Т		Шишков Ф.Л.	55
Потеряев А.И.	17	Тарасенков А.Н.	79	Шориков А.О.	17
<u>Приходько И.Д.</u>	95, 99	Тимошенко С.П.	105	Шунайлов С.А.	105
Проскурнина Н.В.	64, 70	Тимошов И.С.	19	Шутов А.С.	49
Р		Ткачев О.В.	92, 93, 95	Шушаков Н.А.	79
Разницын О.А.	26, 49	Ткачëв О.В.	99	Ю	
Ремезова М.С.	101	Трошев А.В.	101	Юрченко Е.В.	60
Рогожкин С.	63	У		Я	
Рогожкин С.В.	26, 49, 53, 54, 60	Ульянов А.Л.	80	Яландин М.И.	105
Родионов И.А.	40	Умеренкова А.	63	Янилкин А.В.	40
Рожков А.В.	58, 61	Ф		Янилкин А.В.	44
Рукин С.Н.	105	Федин П.А.	26	Ярков В.Ю.	33
Рымжанов Р.А.	42, 96	Федотов И.В.	58	Яркова С.В.	50, 101
С		Федотова С.В.	43, 62		
Савченко П.С.	75	Фоменко В.Н.	55		
Савченко П.С.	21	Фролов А.С.	58, 61		
Сагарадзе В.В.	51	Х			
Самедов В.К.	33	Халявина А.А.	53, 54		
Сафонов Д.В.	58, 61				

Ответственный за выпуск
к.ф.-м.н. Д.А. ПЕРМИНОВ

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН, тираж 80 экз., заказ №04,
объем 3,2 печ.л., формат 298 x 210,
620108, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, дом №18, ИФМ УрО РАН