

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

Пятнадцатый Международный Уральский Семинар



РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

26 февраля – 1 марта

Тезисы докладов

Кыштым, Россия

2024



Пятнадцатый Международный Уральский Семинар

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

26 февраля – 1 марта

Тезисы докладов

**Кыштым, Россия
2024**

ОРГАНИЗАТОРЫ

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН
Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина
Научный Совет ОФН РАН по проблеме «Радиационная физика твердого тела»

Организационный комитет:

Г.Н. Рыкованов, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Со-
председатель
В.В. Сагарадзе, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Со-
председатель
В.В. Дрёмов, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Зам.
председателя
А.В. Козлов, ИРМ, Заречный, Зам. председателя
Д.А. Перминов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург,
Учёный секретарь
П.А. Алексеев, НИЦ «Курчатовский институт»,
Москва
В.Я. Баянкин, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск
В.И. Бобровский, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
П.В. Быков, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск
А.Ф. Губкин, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
А.В. Двуреченский, ИФП СО РАН, Новосибирск
А.Г. Залужный, ИТЭФ, Москва
Ю.Н. Зуев, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
Ю.В. Конобеев, ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск
М.В. Леонтьева-Смирнова, ВНИИНМ, Москва
А.В. Макаров, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
А.В. Мирмельштейн, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.С. Неустроев, ГНЦ НИИАР, Димитровград
В.В. Овчинников, ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург
А.В. Павленко, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.А. Печёнкин, ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск
В.П. Попов, ИФП СО РАН, Новосибирск
А.В. Порошин, ПО «Маяк», Озерск
С.В. Рогожкин, НИЯУ МИФИ, ФГБУ «ГНЦ РФ
ИТЭФ», Москва
М.В. Садовский, ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург
М.А. Семенов, ПО «Маяк», Озерск
Л.С. Талантова, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.Ф. Терещенко, Снежинск
В.М. Чернов, ВНИИНМ, Москва
Z.W. Zhang, Harbin Engineering University, Harbin,
China

Программный комитет:

А.В. Козлов, ИРМ, Заречный, Председатель
В.И. Бобровский, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
П.В. Быков, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск
А.Ф. Губкин, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
А.В. Двуреченский, ИФП СО РАН, Новосибирск
А.Г. Залужный, ИТЭФ, Москва
Ю.Н. Зуев, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
А.В. Мирмельштейн, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.С. Неустроев, ГНЦ НИИАР, Димитровград
В.В. Овчинников, ИЭФ УрО РАН
В.А. Печёнкин, ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск
С.В. Рогожкин, ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ, Москва
М.А. Семенов, ПО «Маяк», Озерск
В.М. Чернов, ВНИИНМ, Москва

Секретариат:

Д.А. Перминов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург,
Учёный секретарь
Е.В. Бублей, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
С.Е. Данилов, ИФМ УрО РАН, Россия
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
В.Ф. Терещенко, Снежинск

Комиссия по подведению итогов конкурса молодых докладчиков:

С.В. Рогожкин, Председатель
П.В. Быков
А.Ф. Губкин
В.В. Овчинников
В.А. Печёнкин

Наши спонсоры:

РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск
ФГУП ПО «Маяк», Озерск
ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
ООО «Мелитэк», Екатеринбург
АО «Завод ПРОТОН»
АО «Спектрометрические системы»

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

I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ	1
ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗМА ДИФФУЗИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА СТОКОВЫЕ СИЛЫ ДИСЛОКАЦИЙ В ОЦК-МЕТАЛЛАХ Fe И V	3
<u>Д.Н. Демидов, А.Б. Сивак</u>	
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ОКСИДА НИОБИЯ	4
С.В. Ремпель, В.Д. Пархоменко, И.Ф. Бергер, А.Н. Пирогов, <u>М.А. Сёмкин</u> , А.А. Валеева	
ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ	5
<u>С.А. Аверин</u>	
ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ В ПРОЦЕССЕ ПОСТРАДИАЦИОННЫХ ИЗОХРОННЫХ ОТЖИГОВ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ 12X18H10T И 08X16H11M3, ОБЛУЧЕННЫХ В РЕАКТОРАХ БН-350 И ВВР-К.	6
<u>А.Ю. Тарапеева, Д.А. Мережко, М.С. Мережко, М.Р. Short</u> ²	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-450, ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ В РЕАКТОРЕ БН-350	7
<u>Е.Р. Ким, М.С. Мережко, Д.А. Мережко, К.В. Цай, С.Б. Кислицин, М.Р. Short</u>	
КИНЕТИКА ИНЖЕКЦИОННОГО ОТЖИГА ТОЧЕЧНЫХ И ГРУППОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В СВЕТОДИОДАХ GaN	8
<u>В.С. Носовец, Е.Д. Хорошенина, О.В. Ткачев, С.М. Дубровских</u>	
КОМБИНИРОВАННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ТАНТАЛА	9
<u>Н.А. Епифанов, И.В. Боровицкая, В.Н. Пименов, Г.Г. Бондаренко, С.А. Масляев, А.С. Демин, Е.В. Морозов</u>	
МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ В МЕТАЛЛАХ	10
<u>А.Б. Сивак</u>	
ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ	11
<u>А.В. Козлов, Н.В. Глушкова, К.А. Козлов, К.М. Ладейщиков, В.Л. Панченко, А.А. Зырянова, Е.В. Шабельников</u>	
ПОСТРОЕНИЕ НАБОРА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ЕДИНИЧНОЙ И НУЛЕВОЙ РАЗМЕРНОСТИ	12
<u>В.В. Овчинников</u>	
СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ С ДОБАВКОЙ ОКСИДА ИТТРИЯ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ	13
<u>Е.А. Корнеева, Динь Фьонг Доанг, Ван Тьеп Нгуен, Бао Чунг Чан, Ван Тоан Нгуен, Чи Линь Динь, А.С. Сохацкий, В.А. Скуратов, Т.Н. Вершинина</u>	
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПУХАНИЯ МЕДИ, ВАНАДИЯ И АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ	13
<u>А.М. Овчаренко</u>	
II. ЦИФРОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ	15
ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ И ДЕФЕКТОВ НА ДИНАМИКУ ФОНОНОВ ПО ДАННЫМ ПЕРВОПРИНЦИПНЫХ РАСЧЕТОВ	17
<u>П.В. Чирков, Г.С. Ельцов, А.В. Караваев, В.В. Дремов, А.А. Мирзоев</u>	

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЕЛИЧИНЫ СЕТКИ НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ	18
<i>М.В. Лапин, С.Э. Карпенко, В.Н. Матвиенко, Л.Р. Хлабыстина, Ю.Н. Шелан</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ	18
<i>В.Р. Пеленицын</i>	
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ, ТЕРМООБРАБОТКИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК	19
<i>М.В. Лапин, С.Э. Карпенко, В.Н. Матвиенко, Л.Р. Хлабыстина, Ю.Н. Шелан</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ФАЗ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ	20
<i>Е.А. Мешков, А.В. Янилкин</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО НИЗКОЭНЕРГИТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ВЫБИТЫХ ИОНАМИ УМЕРЕННОЙ ЭНЕРГИИ В КРЕМНИЕВЫХ УСТРОЙСТВАХ	21
<i>А.А. Грачков, К.П. Мигдал, А.В. Янилкин</i>	
МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПУХАНИЯ С ЯВНЫМ УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СТОКОВ	22
<i>А.С. Рохманенков, А.В. Янилкин</i>	
МУЛЬТИМАСШАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ	23
<i>Р.А. Рымжанов, Н. Медведев, J.H. O'Connell, M. Ćosić, А.Е. Волков, В.А. Скуратов, A. Janse van Vuuren</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗЛОМОВ ПРИ ФРАКТОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ: ДОСТОИНСТВА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ	24
<i>Д.А. Беляев, С.А. Лекомцев, Ю.Н. Зуев, И.Л. Святлов, Л.Н. Солодовников</i>	
УПРОЩЕННАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПУХАНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АТОМИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	25
<i>А.В. Янилкин</i>	
ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ЦИРКОНИЯ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ	26
<i>П.В. Чирков, Г.С. Ельцов, В.В. Дремов, А.В. Караваев, А.А. Мирзоев</i>	
<u>III. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ МАТЕРИАЛОВ</u>	27
ENHANCED IRRADIATION TOLERANCE OF A MEDIUM ENTROPY ALLOY VIA PRECIPITATION AND DISSOLUTION OF NANOPRECIPITATES	29
<i>Yang Zhang, Jihong Han, Zhongwu Zhang</i>	
IRRADIATION EFFECTS IN STEELS AND ALLOYS	29
<i>Z.W. Zhang, Y. Zhang, Jihong Han, Liyuan Liu, Jingwei Hao, C.T. Liu, X-L. Wang</i>	
АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОБЛУЧЕННОЙ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ ОБОЛОЧЕЧНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ СЖАТИЯ В РАДИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ	30
<i>Р.П. Карагерги, А.В. Козлов, В.Ю. Ярков, В.И. Пастухов, С.В. Барсанова</i>	
ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ В СТАЛИ ТИПА X16H15	31
<i>Н.В. Глушкова, В.А. Цыгвинцев, Д.Н. Вельмогин, С.В. Соловьёва</i>	

ДЕГРАДАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА СРОК СЛУЖБЫ	31
<u>А.А. Потехин, Е.А. Кулешова</u>	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В СТАЛЯХ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР	32
<u>С.В. Федотова, Е.А. Кулешова</u>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ И ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ	34
<u>А.В. Клауз, С.В. Рогожкин, А.А. Хомич, А.А. Богачев, А.Г. Залужный</u>	
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАДИАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ ЭП450 ДУО И ЭП823 ДУО В УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И УЛЬТРАМИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	35
<u>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</u>	
КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ	36
<u>С.В. Рогожкин, А.В. Клауз, А.А. Никитин, А.А. Хомич, А.А. Богачев, А.Г. Залужный, Ю.Е. Горшкова, Г.Д. Богучава, Yu. Ke, L. Almásy</u>	
ЛЕГИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫМ БОРОМ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ РАВНОМЕРНОСТИ	37
<u>Г.Н. Чурилов, Г.А. Глущенко, Н.С. Николаев, Н.Г. Внукова, В.И. Елесина</u>	
МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ И ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ – ВЫЗОВЫ И ПУТЬ ВПЕРЕД	38
<u>В.М. Чернов</u>	
МАСС-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИЗОТОПОВ ВОЛЬФРАМА С ПОВЫШЕННЫМИ МАССАМИ	39
<u>М.П. Кащенко, М.А. Коваленко, В.И. Печорский, А.Я. Купряжкин, Н.М. Кащенко</u>	
МЕССБАУЭРОВСКИЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ СТАЛЕЙ ЭП823 И ЭП823-ДУО ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕАКТОРЕ БН600	40
<u>К.А. Козлов, В.А. Шабашов, А.В. Козлов, В.В. Сагарадзе, В.Л. Панченко, А.Е. Заматовский, А.А. Никитина</u>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ И ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ	41
<u>К.М. Ладейщиков, А.В. Козлов</u>	
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ В КАЧЕСТВЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	42
<u>М.С. Слободян, Е.А. Пестерев, А.Б. Марков</u>	
ПОДБОР ЖАРОСТОЙКОГО СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛИВНОЙ ФИЛЬЕРЫ МАЛОГАБАРИТНОГО ПЛАВИТЕЛЯ ДИЗАЙНА	43
<u>Н.А. Стаканова, Л.О. Пичугина, Ю.А. Карзанов, Е.В. Поляков</u>	
СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЗУЧЕСТИ МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ ЧС-139 И ЭК-181	44
<u>Н.В. Катаева, В.В. Сагарадзе, В.А. Завалишин, В.А. Сирош, М.В. Леонтьева-Смирнова, А.А. Никитина</u>	
СТРУКТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ В ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОМ ДИОКСИДЕ ЦИРКОНИЯ.	45
<u>Н.С. Кирилкин, Т.Н. Вершинина, Ж. О’Коннелл, В.А. Скуратов, В.А. Болтуева, С.А. Гынгазов</u>	

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЛАЗМО-ХИМИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	46
Г.Н. Чурилов, Г.А. Глущенко, Н.С. Николаев, Н.Г. Внукова, <u>В.И. Елесина</u>	
ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ ТИПА X16-N19 ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ НА РАННЕЙ СТАДИИ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ	47
<u>И.А. Портных</u> , В.Л. Панченко, А.Е. Устинов, А.В. Козлов	
<u>IV. ТОПЛИВО ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: СТРУКТУРА, РАДИАЦИОННЫЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА</u>	49
ОЦЕНКА МОМЕНТНЫХ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИМЕСИ ЛАЙНЕРА В ТОПЛИВЕ УСТРОЙСТВ MAGLIF	51
<u>Ж.Б. Сексембаев</u>	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОРИЕНТАЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ОБЛУЧЕННОГО ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА	52
<u>В.Ю. Ярков</u> , В.И. Пастухов, С.А. Аверин, А.Е. Устинов	
ПОИСК ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРИСТОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ РЕЭКСТРАКЦИИ Pu И Np	53
<u>Е.Ю. Тагауров</u> , Т.С. Волкова, В.В. Рудских	
<u>V. СИЛЬНОКОРРЕЛИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</u>	55
АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ИЗ ДРУЖЕСТВЕННЫХ СТРАН, АДАПТИРОВАННОЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ	57
<u>М.Ф. Ахметов</u>	
НЕОБЫЧНЫЙ МАГНЕТИЗМ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С СИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ: ДАННЫЕ НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ	57
<u>П.С. Савченков</u> , П.А. Алексеев	
ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУТЕЙ МИГРАЦИИ КАТИОНОВ Li⁺ В ЛИТИЙ-ВАНАДИЕВОЙ БРОНZE Li_{1+x}V₃O₈ (X = 0.1, 0.2 И 0.3)	59
<u>Е.А. Шерстобитова</u> , Н.В. Проскурнина, В.И. Воронин, М.С. Щелканова, Г.Ш. Шехтман	
ЭФФЕКТ СПИНОВОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНОМ ИНТЕРМЕТАЛЛИДЕ Ho₃Co	60
<u>А.Ф. Губкин</u> , А.А. Ваулин, А.Ф. Прекул, Н.В. Баранов	
<u>VI. РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ</u>	63
ВЛИЯНИЕ ПООЧЕРЕДНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ O⁺ И N⁺ НА СОСТАВ, СТРУКТУРУ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6	65
<u>В.С. Гладышева</u> , В.Л. Воробьев, П.В. Быков, С.Г. Быстров, В.Я. Баянкин	
ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ	66
<u>В.И. Бобровский</u> , С.В. Афанасьев, В.И. Воронин, В.А. Казанцев, Н.В. Катаева, В.Д. Пархоменко, Н.В. Проскурнина, В.В. Сагарадзе	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ Ti-Al ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	67
<u>А.В. Жихарев</u> , С.Г. Быстров, В.Я. Баянкин	

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6 В УСЛОВИЯХ ОБРАБОТКИ ПЛАЗМОЙ ИОНОВ N⁺	68
<i>В.Л. Воробьев, В.С. Гладышева, С.Г. Быстров, П.В. Быков, В.Я. Баянкин</i>	
РАДИАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КОРПУСКУЛЯРНОМ ОБЛУЧЕНИИ. РАДИАЦИОННАЯ ТРЯСКА ВМЕСТО ТЕМПЕРАТУРЫ	69
<i>В.В. Овчинников</i>	
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК Ti/Al И Ni/Al ПОСЛЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ	70
<i>П.В. Быков, А.Н. Тарасенков, А.А. Колотов, А.А. Шушков, В.Л. Воробьев, В.Я. Баянкин</i>	
ФОРМИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Cu-Ni В УСЛОВИЯХ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ	71
<i>А.А. Колотов, А.Ю. Дроздов, В.Я. Баянкин, В.Е. Порсев</i>	
<u>VII. РАДИАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МАГНЕТИКАХ, СВЕРХПРОВОДНИКАХ, ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИЗОЛЯТОРАХ</u>	<u>73</u>
ДЕФЕКТЫ В КРЕМНИИ И HIGH-K ДИЭЛЕКТРИКАХ КНИ И КНС СТРУКТУР ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ Xe И Bi	75
<i>В.П. Попов, В.А. Антонов, А.П. Калугин, В.А. Володин, А.В. Мяконьких, К.В. Руденко, В.А. Скуратов</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КЕРАМИК ИТТРИЙ АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА, ПОДВЕРГНУТЫХ ОБЛУЧЕНИЮ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ КСЕНОНА	76
<i>А.А. Назаров, А.В. Нохрин, П.А. Юнин, П.В. Андреев</i>	
КОНФОКАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ MgAl₂O₄, ОБЛУЧЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ	77
<i>В.А. Скуратов, М. Маматова, О.В. Королик, Н.С. Кирилкин, А. Даулетбекова, А. Акилбеков</i>	
УВЕЛИЧЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ВТСП КОМПОЗИТОВ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ МАГНИТНЫХ ИОНОВ	78
<i>И.А. Руднев, Д.А. Абин, А.С. Стариковский, С.В. Покровский, И.В. Мартиросян, Р.Г. Батулин, П.А. Федин, К.Е. Прянишников, Т.В. Кулевой</i>	
ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ В ЛЕНТОЧНЫХ ВТСП КОМПОЗИТАХ	79
<i>И.В. Мартиросян, И.А. Руднев, Д.А. Абин, С.В. Покровский, М.С. Новиков</i>	
<u>VIII. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА</u>	<u>81</u>
GLOVEBOXES AND GLOVEBOX LINES «SPECS GB»: MADE IN RUSSIA LABORATORY EQUIPMENT FOR LITHIUM BATTERY RESEARCH, DEVELOPMENT & PRODUCTION	83
<i>Petrov Roman</i>	
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОДИНОЧНЫЕ СБОИ В МИКРОСХЕМАХ ПАМЯТИ	84
<i>А.С. Кустов, О.В. Ткачев, К.А. Талала, И.А. Илларионова</i>	
ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА	85
<i>А.А. Коновалов, В.О. Гизов, О.В. Ткачев, С.М. Дубровских</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ НА УСКОРИТЕЛЯХ ИОНОВ	86
<i>В.А. Печенкин</i>	
НОВЫЙ ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ - НА ПЕРВОМ В МИРЕ СПУТНИКОВОМ ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ	87
<i>Б.А. Логинов</i>	

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА СБОЕВ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	88
<u>М.В. Марчук</u> , О.В. Ткачев, А.С. Пилипенко, С.М. Дубровских, А.С. Кустов, Е.А. Шibaков, К.В. Сафронов, А.С. Тищенко, В.А. Флегентов, С.А. Горохов	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ МИГРАЦИИ ВАКАНСИЙ В МЕТАЛЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ	89
<u>Н.В. Глушкова</u> , А.В. Козлов, К.М. Ладейщиков, В.Л. Панченко, А.А. Зырянова, Е.В. Шабельников, В.А. Цывинцев, Д.Н. Вельмогин	
ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ОБЛУЧЕННОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ	90
<u>В.И. Пастухов</u> , В.Ю. Ярков, Р.П. Карагерги, И.А. Портных	
ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПЛУТОНИЯ В МОКС-ТОПЛИВЕ ПО ШЛИФУ ТАБЛЕТКИ	91
<u>Ю.А. Карзанов</u> , А.А. Мальцев	
ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМООТРАЖЕНИЯ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОБЛУЧЁННОМ ТЯЖЁЛЫМИ ИОНАМИ С ВЫСОКИМИ ЭНЕРГИЯМИ КРИСТАЛЛЕ АИГ	91
<u>Анна Шаматова</u> , Ербол Куттыбай, Азат Абдуллаев, Жандос Утегулов	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК И ИОННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ	93
<u>Т.С. Картапова</u> , П.В. Быков, Ф.З. Гильмутдинов	
ПРОЕКТ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ИОНАМИ Н, He, Me (Cr, Fe, Ni).	94
<u>С.В. Митрофанов</u> , В.А. Скуратов, Г.Г. Гульбекян	
УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ	96



**I. Общие вопросы
физики радиационных
повреждений**

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЗМА ДИФФУЗИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА СТОКОВЫЕ СИЛЫ ДИСЛОКАЦИЙ В ОЦК-МЕТАЛЛАХ Fe И V

Д.Н. Демидов¹, А.Б. Сивак¹

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (Demidov_DN@nrcki.ru)

Диффузия радиационных дефектов (РД) к стокам (дислокации, границы зёрен, субграницы, поверхности раздела фаз, и т.д.) и их поглощение приводят к эволюции микроструктуры конструкционных материалов термоядерных и ядерных реакторов и, как следствие, к изменению их физико-механических свойств (радиационно-ускоренная ползучесть, радиационное охрупчивание и радиационное вакансионное распухание материалов). Для построения физических моделей изменения свойств материалов под радиационными, механическими и термическими нагрузками необходимо знать характеристики РД, которые являются параметрами таких моделей. Важной характеристикой РД, оказывающей влияние на изменение свойств материалов, является его механизм диффузии.

Такие РД как кластеры собственных межузельных атомов (СМА) обладают смешанным 1D/3D механизмом диффузии: дефект движется вдоль одного кристаллографического направления с относительно редкими сменами направления движения. Известно [1, 2], что длина одномерного пробега РД может оказывать существенное влияние на силы стока различных элементов микроструктуры (дислокации, поры, границы зерен) для этих РД.

Наличие неоднородных упругих полей, создаваемых элементами микроструктуры (ЭМ), в случае 1D/3D механизма диффузии изменяет энергии образования седловых конфигураций РД для процессов его миграции или смены направления диффузии (реориентации). Это приводит к изменению частот диффузионных скачков и реориентаций РД и, соответственно, к изменению сил стока ЭМ.

В настоящей работе с помощью кинетического метода Монте-Карло рассчитаны стокосые силы дислокаций различных типов для димежузлий (кластеров СМА, состоящих из двух СМА) в температурном диапазоне 300—1000 К для ОЦК Fe. Проведено сравнение стокосых сил дислокаций для димежузлий, рассчитанных с учетом 1D/3D механизма диффузии и с помощью ранее разработанного подхода [3-5], в котором диффузия димежузлия сводилась к эффективному 3D-механизму.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-7201090, <https://rscf.ru/project/23-72-01090/>

Литература

- [1] Trinkaus H. et. at. *Physical Review B*. v. **66** (2002), №6, 060105(R)
- [2] Malerba L. et. at. *J. Nucl. Mater.* v. **360** (2007) p. 159
- [3] Сивак А.Б. и др. *ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы*. т.3 (2021), с. 30
- [4] Demidov D.N. et. al. *Symmetry*. v. **13** (2021) 1154
- [5] Demidov D.N. et. al. *Physics of Metals and Metallography*. v. **122** (2021), № 11, p. 1081

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ОКСИДА НИОБИЯ

С.В. Ремпель¹, В.Д. Пархоменко², И.Ф. Бергер^{1,2}, А.Н. Пирогов², М.А. Сёмкин²,
А.А. Валеева¹

¹Институт химии твёрдого тела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

²Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
(semkin@imp.uran.ru)

Монооксид ниобия (NbO) известен своей высокой металлической проводимостью [1], за счет которой нашел широкое применение в качестве пористого анодного материала в электролитических конденсаторах, он обладает лучшей в сравнении с чистыми металлами, танталом и ниобием, стойкостью к сжиганию и проявляет более эффективные свойства самовосстановления при той же морфологии [2]. Кристаллическая структура NbO упорядочивается в кубическую фазу Nb₃O₃ (пр. гр. *Pm-3m*), в которой ионы Nb занимают позицию *3c* с координатами (0, ½, ½) и ионы O – *3d*: (½, 0, 0), период кристаллической решетки равен $a = (0.4211 \pm 0.0005)$ нм [3]. В данной структуре NbO может наблюдаться упорядочение 25 % вакансий ниобия и кислорода в узлах *1a*: (0, 0, 0) и *1b*: (½, ½, ½), соответственно [4], заселение которых при высоких давлениях (свыше 70 ГПа) индуцирует переход в фазу Nb₄O₄ [2].

Нами проведено облучение поликристаллического образца NbO быстрыми нейтронами до флюенсов $1 \cdot 10^{18}$ н/см² и $1 \cdot 10^{20}$ н/см². Облучение монооксида ниобия проводилось в алюминиевом контейнере в вертикальном канале ИВВ-2М. Нейтронографические измерения NbO до и после облучений проводились с помощью метода упругого когерентного рассеяния нейтронов на дифрактометре высокого разрешения Д-7а установленного на горизонтальном канале ИВВ-2М (Обособленное подразделение «Отдел работ на атомном реакторе» ИФМ УрО РАН г. Заречный). Длина волны нейтронов составляла 0.15321 нм. Из расчета нейтронограмм следует, что кристаллическая структура исходного NbO соответствуют кубической структуре Nb₃O₃ с периодом кристаллической решетки (0.42110 ± 0.00002) нм. Облучение NbO быстрыми нейтронами до флюенса $1 \cdot 10^{18}$ н/см² не вызывает разупорядочения кристаллической структуры, наблюдается лишь рост параметра решетки до (0.42137 ± 0.00002) нм, тем не менее на нейтронограмме в больших углах просматривается значительный фон, который указывает на увеличение колебаний ионов в решетке. Облучение образца NbO быстрыми нейтронами до $1 \cdot 10^{20}$ н/см² индуцирует фазовый переход порядок-беспорядок (*Pm-3m* – *Fm-3m*) и вызывает значительное увеличение периода решетки (a) до (0.42665 ± 0.00002) нм. В фазе Nb₄O₄ (пр. гр. *Fm-3m*) ионы Nb занимают позицию *4a* с координатами (0, 0, 0) и ионы O – *4b*: (½, ½, ½).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №19-73-20012-П, <https://rscf.ru/project/19-73-20012/> в Институте химии твердого тела УрО РАН с использованием объекта инфраструктуры «Физико-технологический инфраструктурный комплекс» (Институт физики металлов им. М. Н. Михеева, УрО РАН).

Литература

- [1] Nico C., Soares M. R. N., Rodrigues J., et al., *J. Phys. Chem. C* **115** (2011) 4879.
- [2] Popov I. S., Shein I. R., Valeeva A. A., *J. Struct. Chem.* **63** (2022) 1639.
- [3] Pialoux A., Joyeux M.L., Cizeron G., *J. Less-Com. Met.* **87** (1982) 1.

[4] Efimenko A. K., Hollmann N., Hoefler K., et al., *Phys. Rev. B* **96** (2017) 195112.

ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

С.А. Аверин

Акционерное общество «Институт реакторных материалов» (irm@irmatom.ru)

Высоколегированные коррозионные стали, к которым относятся аустенитные нержавеющие стали (АНС), широко используются как конструкционный материал элементов активных зон ядерных энергетических установок, в том числе, оболочек твэлов. Продолжаются работы по совершенствованию и созданию новых материалов и способов их обработки, чтобы повысить их работоспособность и долговечность в условиях облучения. Для этого важно понимать реализующиеся механизмы деформации и возможного разрушения под действием нагрузок и нейтронного облучения.

На основе картограмм Форста и Эшби [1, 2] проанализированы существующие механизмы деформации и разрушения АНС, которые относятся к ГЦК материалам, в зависимости от напряжений и температуры.

Изучены особенности пластического течения в приповерхностных и во внутренних слоях, а также характер разрушения ряда АНС (X18H20, X16H15M3Б, X17H15M3). Установлено, что при температурах 400-700 °С в поверхностных слоях контролирующим механизмом деформации является зернограничное проскальзывание, а аккомодация идет за счет образования трещин по границам зерен. Внутренние слои материала остаются сплошными, а вклад в деформацию различных механизмов (внутризеренное скольжение, зернограничное проскальзывание, диффузионная ползучесть), различен и зависит от материала и условий испытаний. Разрушение смешанное преимущественно транскристаллитное чашечное с небольшой долей интеркристаллитного. Облучение облегчает образование поверхностных трещин, уменьшает деформацию до разрушения и увеличивает долю интеркристаллитного разрушения в изломе.

Оценены прочностные свойства границ зерен и матрицы стали X16H15M3Б в исходном состоянии и после облучения до флюенса нейтронов $2 \cdot 10^{21}$ см⁻². Установлено, что после облучения происходит упрочнение матрицы материала, а приграничные области при температурах выше 300 °С разупрочняются. При деформировании облученных образцов реализуется зернограничное проскальзывание с образованием интеркристаллитных трещин в поверхностных слоях.

На основе полученных результатов показана определяющая роль границ зерен в процессах деформации и разрушения АНС под действием нагрузок и нейтронного облучения.

Литература

[1] Форст Г. Дж., Эшби М.Ф. *Карты механизмов деформации* / Пер. с англ. - Изд.: Металлургия. Челябинск. 1989. - 328 с.

[2] M.F. Ashby, A Pirst. *Report on Deformation - Mechanism Maps – Acta Met.*, v **20**, № **7**, 1972, p.p. 887-897.

ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ В ПРОЦЕССЕ ПОСТРАДИАЦИОННЫХ ИЗОХРОННЫХ ОТЖИГОВ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ 12X18H10T И 08X16H11M3, ОБЛУЧЕННЫХ В РЕАКТОРАХ БН-350 И ВВР-К.

А.Ю. Тарапеева¹, Д.А. Мережко¹, М.С. Мережко¹, М.Р. Short²

¹Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан (tarapeyeva00@gmail.com)

²Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

В процессе эксплуатации метастабильных аустенитных сталей в нейтронных полях высокой интенсивности в структуре материала образуются дефекты радиационной природы, проявляется сегрегация химического состава, трансмутация химических элементов [1]. Все это приводит к таким негативным эффектам, как набухание, упрочнение и охрупчивание, радиационно-стимулированное образование новых фаз в аустенитной матрице, например, α -феррита, обогащенного Cr и Fe [2]. Перспективным решением данной проблемы является восстановительный отжиг, при котором корпус реактора и внутрикорпусные устройства подвергаются отжигу при высоких температурах в течение нескольких суток. В настоящей работе были исследованы изменения намагниченности аустенитных сталей, облученных в реакторах ВВР-К и БН-350 (максимальная повреждающая доза 57,6 сна), в процессе изохронных отжигов.

Образцы сталей 08X16H11M3 и 12X18H10T вырезали из необлученных и облученных чехловых шестигранных труб тепловыделяющих сборок реактора на быстрых нейтронах БН-350, подвергнутых предварительной механико-термической обработке – холодная деформация 20% с отпуском при 800°C в течение часа. Перед началом экспериментов образцы подвергали механической шлифовке и электролитической полировке с целью удаления продуктов коррозии. Пострадиационные изохронные отжики выполняли в печи Nabertherm В-130 в вакуумированной трубке (вакуум не хуже 1 Па) в диапазоне температур 150–850°C с шагом 50°C, время выдержки при температуре составляло 30 минут. Охлаждение образцов проводили в вакуумированной трубке в воде комнатной температуры. После каждого отжига электролитическую полировку повторяли для удаления поверхностного слоя, обедненного по легирующим элементам. Количество ферромагнитной α' -фазы в образцах измеряли с помощью феррозонда «Feritscope MP-30», предварительно откалиброванного по заводским эталонам. Итоговый результат получали усреднением 10–15 измерений.

В результате проведенных экспериментов были построены диаграммы изменения содержания ферромагнитной α' -фазы в координатах «Ферромагнитная α' -фаза, об. % – Температура отжига, °C». Установлено, что отжиг мартенситной α' -фазы начинается при температуре 450–500°C, в то время как α -феррита - при температуре 600°C. Определены особенности изменения намагниченности в зависимости от химического состава материала и параметров облучения. Эти результаты имеют значение для разработки методов восстановительного отжига реакторов и внутрикорпусных устройств.

Литература

[1] Garner, F.A. 3.02 - Radiation-Induced Damage in Austenitic Structural Steels Used in Nuclear Reactors // *Comprehensive Nuclear Materials (Second Edition)* / eds. R.J.M. Konings, R.E. Stoller. – Oxford: Elsevier, 2020. – **Vol. 3** – P. 57-168.

[2] Merezko, D.A. et al. Morphology and elemental composition of a new iron-rich ferrite phase in highly irradiated austenitic steel // *Scripta Materialia*. – 2022. – **Vol. 215** – P. 114690.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-450, ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ В РЕАКТОРЕ БН-350

Е.Р. Ким^{1,2}, М.С. Мережко¹, Д.А. Мережко¹, К.В. Цай¹, С.Б. Кислицин¹, М.Р. Short³

¹*Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан (yelenakimr@gmail.com)*

²*Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан*

³*Массачусетский технологический институт, Кэмбридж, США*

В качестве материалов активной зоны быстрых реакторов требуются стали и сплавы стойкие к потокам высокоэнергетических нейтронов и способные сохранять достаточную среднетемпературную прочность. Феррито-мартенситная сталь ЭП-450, содержащая 11–13,5% хрома используется в качестве приемлемого материала для оболочек и чехлов тепловыделяющих сборок (ТВС) реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Ее конкурентным преимуществом является высокая стойкость к набуханию и ползучести, особенно при повышенных температурах активной зоны. В то же время, одной из проблем феррито-мартенситных сталей является то, что с ростом дозы нейтронного облучения увеличивается температура хрупко-вязкого перехода, что приводит к резкому снижению пластичности при относительно невысоких температурах, характерных для эксплуатации.

В данной работе исследовали образцы из стали ЭП-450 (1X13M2БФР), вырезанные из шестигранных чехлов ТВС реактора БН-350 необлученных и облученных нейтронами до 50,4 сна, предварительно подвергнутых термической обработке — 1050°C в течение 30 минут с последующим отпуском при 720°C в течение 1 часа. Для проведения механических испытаний на одноосное растяжение использовали образцы в форме двойной лопатки с геометрическими размерами рабочей части 10×3,5×0,3 мм. Испытания проводили при комнатной температуре, скорость растяжения 0,5 мм/мин. Особенности структуры исследовали с помощью электронного растрового микроскопа Hitachi TM-4000 PLUS и просвечивающегося электронного микроскопа JEOL JEM-2100. Микротвердость по Виккерсу определяли на микротвердомере eVick-1A (нагрузка на индентор 50 г).

В результате материаловедческих исследований было выявлено, что облучение быстрыми нейтронами стали ЭП-450 приводит к снижению пластичности и увеличению прочности материала, при этом равномерная деформация сплава облученного до 50,4 сна уменьшается катастрофически — до 1–2% вследствие эффекта низкотемпературного радиационного охрупчивания. Деформация, в таком случае, ограничивается в пределах нескольких благоприятно ориентированных к оси нагружения зерен феррита. Согласно фрактографическим исследованиям зоны излома, в необлученной стали разрушение носит вязкий характер, а в облученной до 50,4 сна — хрупко-вязкий или хрупкий в зависимости от температуры облучения. В работе обсуждается влияние параметров облучения на прочность, пластичность и характер разрушения стали ЭП-450.

КИНЕТИКА ИНЖЕКЦИОННОГО ОТЖИГА ТОЧЕЧНЫХ И ГРУППОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В СВЕТОДИОДАХ GaN

В.С. Носовец, Е.Д. Хорошенина, О.В. Ткачев, С.М. Дубровских
РФЯЦ-ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия (dep5@vniitf.ru)

Инжекционный отжиг широко распространён в биполярных приборах и интересен, в частности, тем, что отжиг радиационных дефектов может происходить при температурах значительно меньших, чем при классическом температурном отжиге. Например, в GaAs температурный отжиг образцов, облучённых 1 МэВ электронами, активно протекает только при температуре около 200 °С. Если же проводить инжекционный отжиг этих образцов, то он может активно наблюдаться уже при температурах жидкого азота (77 К) [1]. Аналогичная ситуация наблюдается во многих других полупроводниковых материалах: SiC, InP и др., при этом одним из наименее изученных является GaN [2,3]. Практическое применение инжекционного отжига видится в качестве метода повышения радиационной стойкости биполярных приборов. С другой стороны данный эффект, усложняет методику оценки их радиационной стойкости. Насколько известно авторам, существующие на данный момент работы не придают большого значения различию в процессах отжига дефектов, созданных различными видами ионизирующего излучения. В связи с этим, целью настоящей работы является экспериментальное исследование различий инжекционного отжига радиационных дефектов в современных гетероструктурах на основе нитрида галлия.

Объектом исследования являлись GaN-светодиоды с пиковыми длинами волн электролюминесценции 365 нм и 450 нм. Активная область светодиодов содержит квантовые ямы, что позволяет существенно повысить КПД приборов. Как объекты исследования светодиоды обладают существенным преимуществом, так как регистрация оптических характеристик позволяет получать информацию непосредственно из активной области. Источниками ионизирующего излучения являлись: ядерный реактор, нейтронный генератор (14 МэВ нейтроны) и изотопный источник γ -квантов ^{60}Co . Так как пробеги быстрых нейтронов и гамма-квантов существенно больше размеров образцов, во всех трёх случаях создаваемые дефекты были распределены равномерно по объёму. Для изучения кинетики инжекционного отжига измеряли зависимость мощности электролюминесценции от времени. При этом через диоды пропускали постоянный ток с плотностью $1 - 20 \text{ A/cm}^2$. Светодиоды размещались на алюминиевом теплоотводе, что позволило практически исключить влияние температуры на инжекционный отжиг.

В ходе исследования было показано, что инжекционный отжиг гетероструктур, облучённых гамма-квантами и нейтронами, имеет существенные различия в кинетике: в первом случае удаётся достичь полного восстановления образцов, а во втором отжигаются только 35-50 % всех дефектов (при плотности тока $4 - 20 \text{ A/cm}^2$). Обнаружено, что кинетика инжекционного отжига во всех случаях имеет второй порядок реакции, а при отжиге нейтронных повреждений дополнительно наблюдается компонента, практически не подверженная отжигу. Обнаруженные различия, по всей видимости, связаны с присутствием групповых дефектов (радиационных кластеров) в образцах, облучённых нейтронами, которые не подвержены инжекционному отжигу. Полученные экспериментальные результаты описываются в рамках данной гипотезы с использованием модели Госсика.

Литература

[1] V.M. Lomako, A.M. Novoselov. *Phys. Stat. Sol. (a)*. **V. 60**, N. 557, pp. 557-564 (1980).

[2] M. Yamaguchi et. al. *Journal of Applied Physics*. **V. 58**, N. 1. pp. 568-574 (1985).

[3] L. Storasta et. al. *Materials Science Forum Vols.* **V. 483-485**. pp.369-372 (2005).

КОМБИНИРОВАННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ ТАНТАЛА

Н.А. Епифанов¹, И.В. Боровицкая¹, В.Н. Пименов¹, Г.Г. Бондаренко², С.А. Масляев¹,
А.С. Демин¹, Е.В. Морозов¹

¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия
(mophix94@gmail.com)*

²*Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва,
Россия*

Исследовано комбинированное воздействие импульсных потоков ионов и плазмы на поверхностный слой листовых образцов из тантала с использованием двух установок Плазменный фокус, отличающихся запасенной энергией E : ПФ-1000 (E до ≈ 1 МДж) и ПФ Вихрь ($E \cong 5$ кДж), с использованием дейтерия или гелия в качестве рабочего газа. Плотность мощности ионов составляла $q \sim 10^{11}$ Вт/см² и $q \sim 10^9$ Вт/см² при длительности импульсов $\tau = 100$ и 20 нс соответственно. Интенсивность воздействия плазмы была примерно на порядок величины меньше, чем ионов, а длительность τ – в 2-3 раза больше.

Обнаружено, что в микроструктуре поверхностного слоя образцов, облученных в ПФ Вихрь, присутствует множество кратеров – следов выхода имплантированного газа, в то время как в структуре образцов, облученных в ПФ-1000 их количество незначительно. Наблюдаемые отличия связаны с разницей в величине испаренного слоя в сопоставляемых экспериментах. При облучении в более жестком режиме в установке ПФ-1000 слой с имплантированными ионами полностью испарялся. В менее жестком режиме облучения в ПФ Вихрь имплантированные в Та дейтерий или гелий способствовали кипению расплава поверхностного слоя и созданию в нем дополнительных напряжений после затвердевания.

Рентгеноструктурные исследования образцов показали изменения текстуры в приповерхностных слоях после облучения в ПФ. Основной чертой изменений является увеличение интенсивности рефлексов от семейства плоскостей $\{211\}$ в сравнении как с исходным холоднодеформированным, так и с эталонным отожженным образцами. Формирование текстуры связано с направленным теплоотводом при кристаллизации и охлаждении расплавленного слоя.

Установлено, что при облучении в более жестком режиме в установке ПФ-1000 микротвердость Та практически не меняется, а облучение в установке ПФ Вихрь в менее жестком режиме способствует ее возрастанию. Причиной наблюдаемых эффектов может служить преобладание в первом случае роли термического воздействия радиационных потоков, а во втором – доминирование процесса имплантации ионов рабочего газа и действие напряжений, возникающих при сверхбыстрой кристаллизации и охлаждении расплавленного поверхностного слоя.

Оценено влияние типа рабочего газа (дейтерия или гелия) на микроструктуру, текстуру и микротвердость поверхностного слоя в образцах тантала после облучения в ПФ Вихрь. Разницы в изменениях морфологии поверхности и текстуры при использовании дейтерия или гелия не обнаружено. В то же время, микротвердость поверхностного слоя

значительно больше повышается при использовании в качестве рабочего газа гелия, чем при использовании дейтерия. При этом с увеличением числа импульсных воздействий N в исследованном диапазоне (до $N=30$) эффект упрочнения переплавленного слоя растет, причем более существенно при использовании гелия.

Работа выполнена по государственному заданию № 075-01176-23-00

МНОГОУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ В МЕТАЛЛАХ

А.Б. Сивак

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (saidko@mail.ru)

Материалы ядерных, термоядерных и гибридных систем должны выдерживать в течение срока эксплуатации температурные, механические и радиационные нагрузки, не теряя своих функциональных свойств, и быть совместимыми со своим окружением (теплоноситель, пр.). Условия работы материалов термоядерных и гибридных систем частично имеют пересечение с условиями работы материалов ядерных реакторов (температуры, механические нагрузки, повреждающие дозы – сна), поэтому возникает стремление перенести уже имеющиеся обширные разработки в отношении материалов ядерных реакторов в термоядерные и гибридные приложения.

Несмотря на упомянутое пересечение части условий работы, в отношении другой части условий работы такое пересечение отсутствует (например, различия в нейтронных спектрах), что ограничивает возможность прямого переноса экспериментальных данных о поведении материалов под облучением в одном типе установок на установки другого типа. Возможный путь для преодоления разрыва между имеющимися и нужными данными о поведении материалов в разрабатываемых установках состоит в том, чтобы построить физически обоснованные модели материала, описывающие его реакцию на внешние воздействия (нейтронные, механические, термические, пр.). Такие модели обеспечат глубокое понимание физики протекающих в материалах радиационно-стимулированных процессов и будут обладать предсказательной силой в отличие от моделей со слабым или отсутствующим физическим обоснованием, которые в состоянии описать любые экспериментальные данные, но не в состоянии предсказать поведение материала при изменении условий работы материала.

Применение чисто теоретического подхода к описанию протекающих в материалах явлений ограничено структурной сложностью моделируемых объектов, поэтому на практике применяют методы вычислительного моделирования, опирающиеся на теоретические методы. Поскольку ни один из моделирующих методов не может охватить полностью пространственную и временную шкалы, развитие получил многоуровневый подход, в котором каждый из вычислительных методов применяется на определенном пространственном и/или временном уровне, используя в качестве входных параметров данные, предоставляемые другими вычислительными моделями более низкого уровня. Выходные данные модели рассматриваемого уровня в свою очередь являются входными параметрами модели более высокого уровня.

Только совместное использование многоуровневого моделирующего подхода и всесторонних экспериментальных исследований даст возможность полного осмысления

физики, лежащей в основе изменения свойств материалов в процессе эксплуатации: модели обеспечивают рационалистическое объяснение экспериментальных наблюдений, основываясь на фундаментальных физических законах и возможных механизмах, а экспериментальные данные позволяют валидировать и калибровать модели.

В настоящей работе в рамках описанного подхода предлагается многоуровневая модель радиационного формоизменения металлов, проводится ее валидация и калибровка на основе сравнения ее результатов с рядом экспериментальных данных в отношении таких радиационных явлений как радиационная ползучесть и радиационное распухание в ОЦК (Fe, V) и ГЦК (Cu) металлах.

ОБРАЗОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

А.В. Козлов¹, Н.В. Глушкова¹, К.А. Козлов², К.М. Ладейщиков¹, В.Л. Панченко¹,
А.А. Зырянова¹, Е.В. Шабельников¹

¹АО «Институт реакторных материалов», Заречный, Россия (kozlov_alv@irmatom.ru)

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

При исследовании процессов, происходящих в материалах при нейтронном облучении, в качестве характеристики его воздействия, обычно, используются скорость радиационных повреждений и повреждающая доза. Для описания эволюции микроструктуры часто этого бывает недостаточно, поскольку она зависит не только от количества генерируемых точечных дефектов, но и от их взаимной конфигурации. Расчеты повреждающей дозы проводятся повсеместно по стандартизированной схеме, что позволяет сравнивать между собой действие облучения на материалы в различных реакторах. Однако, верификации этих расчетов на экспериментальном материале практически не проводится, поскольку после динамической стадии (образование каскада, которая протекает за $10^{-16} \div 10^{-15}$ с) происходит его эволюция в области его образования на кинетической стадии (в течение $10^{-10} \div 10^{-9}$ с) и затем на термодинамической стадии – взаимодействия с точечными дефектами, вышедшими в матрицу из разных каскадных областей (в течение всего остального времени облучения). Только после этого объект становится доступен для экспериментальных исследований. В то же время, на эволюцию микроструктуры и, как следствие, свойств облучаемых материалов существенное влияние оказывают начальные условия. Проблема корректного описания действия нейтронного облучения на динамической и кинетической стадиях остается актуальной.

На термодинамической стадии система наименее подвержена изменениям в случае криогенного нейтронного облучения, когда и вакансии и междоузлия не обладают термической подвижностью. Такие работы проводились на реакторе ИВВ-2М в период 1987 – 1998 г.г., однако позже технология оказалась временно невостребованной и была утрачена. В настоящее время на реакторе ИВВ-2М имеется возможность проведения низкотемпературного нейтронного облучения, при котором междоузлия подвижны, а вакансии практически не имеют возможности мигрировать по кристаллу.

Основная цель представленной работы заключалась в проведении низкотемпературного нейтронного облучения Cr, как представителя ОЦК структуры, описании эволюции в нем радиационных дефектов, с использованием разработанного аппарата, и верификации рассчитанных характеристик точечных дефектов и их комплексов, накопленных за время облучения, на экспериментальных результатах

послереакторных исследований.

В работе в модели упругого взаимодействия рассчитаны передача нейтронами энергии ПВА и при взаимодействии между собой соударяющихся ионов. Получены: энергетический спектр ПВА, количество каскадных областей, их распределение по размерам и количеству содержащихся в них ТД. При этом использованы не молекулярно-динамические расчеты, а аппарат статистической термодинамики. В рамках использованного подхода рассчитаны скорость накопления одиночных ТД, а также их двойных и тройных комплексов к концу кинетической стадии.

Рассчитанные характеристики сопоставлены с результатами дилатометрических изменений, связанных с выходом из облученного образца вакансий, а также с результатами микроструктурных исследований методами просвечивающей электронной микроскопии.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура», № 122021000033-2)

ПОСТРОЕНИЕ НАБОРА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ЕДИНИЧНОЙ И НУЛЕВОЙ РАЗМЕРНОСТИ

В.В. Овчинников^{1,2}

¹*Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (viae05@mail.ru)*

²*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия*

Предложен и использован метод получения исчерпывающего набора мультипликативных уравнений связи между элементами произвольного множества тестируемых физических констант C_j , в виде их произведений в целочисленных степенях m_j , пробегающих значения от $-N$ до N (выполнены расчеты для $N = 2$ и 4). Формальное применение предложенной процедуры в основном и модифицированном вариантах выявляет минимальные кванты заряда, массы, времени и расстояния, а также ряд соотношений, описывающих наиболее общие физические законы. Показана возможность построения системы фундаментальных физических констант l_e , t_e , e_e , m_e , α и β (α – константа тонкой структуры), с простейшими (м, с, кг и Кл) и нулевыми размерностями для описания электромагнитных и гравитационных взаимодействий, а также при добавлении константы Больцмана (k) законов теплового излучения. Постоянная Планка (h), скорость света в вакууме (c), электрическая (ϵ_0), магнитная (μ_0) и гравитационная (G) постоянные выражены через выявленные минимальные кванты длины, времени, заряда, массы и безразмерные постоянные.

СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ С ДОБАВКОЙ ОКСИДА ИТТРИЯ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ИОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ

Е.А. Корнеева¹, Динь Фьонг Доанг², Ван Тьеп Нгуен^{1,3}, Бао Чунг Чан², Ван Тоан Нгуен²,
Чи Линь Динь², А.С. Сохацкий¹, В.А. Скуратов^{1,4,5}, Т.Н. Вершинина¹

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

²Институт материаловедения, Вьетнамская академия Науки и Технологии, Ханой, Вьетнам

³Институт физики, Вьетнамская академия Науки и Технологии, Ханой, Вьетнам

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

⁵Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) рассматриваются как перспективные конструкционные материалы для атомной энергетики и активно исследуются на предмет стабильности структуры и изменения механических свойств под действием облучения, моделирующего условия работы реактора [1,2].

В настоящей работе объектом исследований был выбран ВЭС на основе *Fe-Cr-Co-Ni*, полученный методом искрового плазменного (ИП) спекания при температуре 980°C с дополнительным легированием частицами оксида иттрия. Для моделирования воздействия осколков деления материал был облучен 150 МэВ ионами ксенона в диапазоне флюенсов до 10^{14} см⁻² на ускорителе ИЦ-100.

Методами просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции показано, что при ИП спекании формируется сплав *FeCrCoNi* с ГЦК-решеткой и с размером зерен до 1 микрона. В структуре также содержатся наноразмерные частицы различного типа, содержащие иттрий. Показано, что облучение ионами ксенона приводит к аморфизации частиц и образованию в структуре сплава дефектов упаковки. Получены зависимости нанотвердости от величины флюенса. Обсуждается вклад радиационно-индуцированных изменений структуры в изменение механических характеристик.

References

[1] Kumar N. A., *Acta Mater.*, v.**113** (2016), p. 230-244.

[2] Lin Y., *Acta Mater.*, v.**196** (2020). p. 133-143.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПУХАНИЯ МЕДИ, ВАНАДИЯ И АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ

А.М. Овчаренко

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Российская
Федерация (*ovcharenko@obninsk.com*)

К настоящему времени известны две наиболее развитые теории распухания. Одна из них, была предложена сразу после открытия явления вакансионного распухания. Она полностью определяется дислокационным предпочтением, т.е. явлением

преимущественного поглощения дислокациями собственных междоузельных атомов (СМА). Дислокационный фактор предпочтения действительно является важным физическим механизмом распухания; более того, он полностью определяет развитие распухания при облучении электронами с энергией ~ 1 МэВ. Однако такой подход не позволяет объяснить рост распухания при нейтронном облучении, поскольку образование дефектов в этом случае качественно иное: помимо одиночных вакансий и СМА, мигрирующих в трех направлениях, образуются также СМА петли небольшого размера, мигрирующие вдоль одного направления, что учитывается в модели т.н. каскадного фактора предпочтения [1, 2].

Качественное различие роста распухания при электронном и нейтронном облучениях была продемонстрирована в работе [3]. Она посвящена изучению накопления распухания в меди, облученной электронами, протонами и нейтронами при малых дозах облучения (до 0,01 сна). В настоящей презентации данные, представленные в работе [3], анализируются с использованием численной модели, учитывающей оба механизма: дислокационный и каскадный. Результаты, полученные на основе численных расчетов, показали хорошее согласие с экспериментом из работы [3].

Сплавы ванадия рассматриваются как перспективные материалы для изготовления оболочек твэлов ядерных реакторов на быстрых нейтронах и бланкетов термоядерных установок. В данной презентации результаты численного моделирования сравнивались с известными данными экспериментальных исследований [4], проведенных в чистом ванадии, облученном при температуре 370°C до дозы облучения 1,3 сна.

Экспериментальные данные распухания, измеренные в нержавеющей стали (316) для элементов конструкции ядерных реакторов на быстрых нейтронах [5], также сравнивались с результатами кинетического моделирования для доз облучения около 100 сна. Полученные результаты расчетов продемонстрировали удовлетворительное согласие с экспериментальными данными.

Литература

[1] Woo C., Singh B. The concept of production bias and its possible role in defect accumulation under cascade damage conditions, *Phys. Stat. Sol. B*, **159** (1990) 609–616

[2] Singh B.N., Golubov S.I., Trinkaus H., Serra A., Osetsky Yu.N., and Barashev A.V., ASPECTS of microstructure evolution under cascade damage conditions. *J. Nucl. Mater.*, **251** (1997) 107–122

[3] Singh B.N., Eldrup M., Horsewell A., Ehrhart P. and Dworschak F., On recoil energy dependent void swelling in pure copper Part I. Experimental results, *Phil. Mag. A*, **80:11** (2000) 2629–2650

[4] Поролло С. И., Дворяшин А.М., Конобеев Ю. В., Радиационные повреждения в облученных нейтронами сплавах V–Fe. *Физ. мет. и металловед.*, 123 (8) (2022) 837–843

[5] Garner F., Gelles D.S., Neutron-induced Swelling of Commercial Alloys at Very High Exposures, ed. by N.H.N. Packan, R.E. Stoller, A.S. Kumar. *Effects of irradiation on materials: 14th International Symposium (V. II) ASTM STP 1046*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, (1990) 673–683



II. Цифровые инструменты компьютерного материаловедения

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ И ДЕФЕКТОВ НА ДИНАМИКУ ФОНОНОВ ПО ДАННЫМ ПЕРВОПРИНЦИПНЫХ РАСЧЕТОВ

П.В. Чирков¹, Г.С. Ельцов¹, А.В. Караваев¹, В.В. Дремов¹, А.А. Мирзоев²¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И.Забабихина», г. Снежинск, Российская Федерация

(chirkovpv@vniitf.ru)

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

Рассеяние нейтронов используется в том числе и для получения фононных спектров материалов. При этом, недостаточно изученным остается вопрос о чувствительности фононных спектров к различного рода дефектам кристаллической решетки и примесям. Целью данной работы является расчетно-теоретическое исследование степени влияния легирующих добавок и наноразмерных дефектов на дисперсионные кривые фононов, что представляет интерес с точки зрения определения «разрешающей способности» экспериментальных спектров (используемых детекторов) в плане реагирования на изменения микроструктуры.

Теоретическое изучение фононов в неупорядоченных сплавах замещения, несмотря на бурное развитие квантово-химических методов моделирования «из первых принципов», до последнего времени было весьма ограниченным, поскольку большинство подходов рассматривало достаточно грубые приближения. Одним из таких примеров является приближение когерентного потенциала (Coherent Potential Approximation, CPA) [1], такой среднепольный подход учитывает только распределение массы, без учета зависимости компонент матрицы силовых констант от типа взаимодействующих элементов. В последнее время были предложены более точные теоретические подходы к изучению фононных состояний неупорядоченных сплавов [2], позволяющие получать данные о спектральных характеристиках фононов с учетом симметрии кристаллической решетки.

В данной работе неупорядоченные сплавы исследовались на примере системы Fe-Cr с объемно-центрированной кубической кристаллической решеткой, данный материал служит основой многих марок ферритно-мартенситных сталей. Первопринципные расчеты в рамках теории функционала плотности, реализованного в программном пакете VASP [3]. Для получения так называемых «развернутых» дисперсионных кривых с учетом симметрии кристаллической решетки для неупорядоченного сплава FeCr был использован метод, предложенный в работе [2]. Из результатов видно, что ширина спектров в области низких частот до 2 ТГц относительно невелика, однако в области частот выше 8 ТГц в окрестности точек H и N первой зоны Бриллюэна наблюдается значительное уширение спектра, вызванное примесными атомами хрома. Также в работе были рассмотрены различные варианты распределения примесей и их концентрация.

Литература

- [1] D. W. Taylor, Phys. Rev. **156**, 1017 (1967)
- [2] Y. Ikeda, A. Carerras, A. Seko, Phys. Rev. B **95**, 024305 (2017)
- [3] G. Kresse, J. Furthmuller, Comput. Mater. Sci. **6**, 15 (1996)

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЕЛИЧИНЫ СЕТКИ НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ

М.В. Лапин, С.Э. Карпенко, В.Н. Матвиенко, Л.Р. Хлабыстина, Ю.Н. Шелан
РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия (MVLapin@uraldiv.ru)

Одним из важнейших аспектов разработки конкурентоспособных технологий в современном мире является применения CAD/CAM/CAE систем при подготовке производства и выпуске продукции. CAE-системы (computer-aided engineering) позволяют решать расчетные задачи по прочности конструкций, моделирование потоков тепломассопереноса, аэро- и гидродинамики и т.д. В данной работе рассматривается одна из основных проблем точности моделирования с точки зрения задания граничных условий и размера расчетных элементов.

В рамках работы проведен анализ влияния размера расчетных элементов и термодинамических характеристик моделируемого расплава на скорость выполнения расчетов и достоверность результатов на примере расчета методом конечных элементов операции литья сплава 17CrNiMo6 (аналог легированной конструкционной стали 20ХН2М). Приведены этапы подготовки расчета, анализ зависимости результатов от варьируемых расчетных параметров, продемонстрированы размеры и локализация возможных литейных дефектов, а также возможные пути оптимизации литейной оснастки для их предотвращения.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

В.Р. Пеленицын

ФГУП «ВНИИА им. Л.Н. Духова», Москва, Российская Федерация (VRPelenitsyn@vniia.ru)

Дефекты в полупроводниках, в частности в кремнии, образующиеся вследствие облучения материала, могут являться причиной возникновения уровней энергии в запрещенной зоне. При достаточной концентрации такие дефекты активно влияют на транспорт носителей заряда, в частности посредством генерации и рекомбинации носителей с участием уровней в запрещенной зоне. Среди обширного количества известных дефектов в кремнии существуют экспериментальные данные, подтверждающие, что не все дефекты одинаково эффективно ухудшают работу электронных устройств [1]. По этой причине для моделирования кремниевых устройств интересуют возможность рекомбинации носителей заряда через уровни дефектов, а точнее вероятность захвата и эмиссии носителей, которая характеризуется сечением захвата. Экспериментальное определение значений сечений затруднено множествами факторов, поэтому, теоретический расчет сечений из первых принципов является актуальной задачей [2].

В настоящей работе представлены результаты первопринципного моделирования некоторых основных радиационных дефектов в кремнии: вакансия, двойная вакансия, тройная вакансия. Моделирование проводилось в рамках теории функционала плотности с

использованием гибридного функционала обменно-корреляционной энергии HSE06. Были проанализированы локальные атомные структуры дефектов, представлено описание их изменения в процессе захвата носителя. Для тройной вакансии показана возможность наличия двух атомных структур в зависимости от зарядового состояния дефекта. Рассчитаны энергия образования и положение уровней энергии дефектов в запрещенной зоне.

Для расчета сечений захвата в работе было использовано статическое приближение [3]. Фононные матричные элементы были рассчитаны в одномерном приближении с учетом ангармонизма колебаний. В результате были рассчитаны значения сечений захвата как основных, так и неосновных носителей на уровни дефектов. Проведено сопоставление расчётных и имеющихся экспериментальных величин, показавшее хорошее согласие.

Литература

[1] Pichler P., *Intrinsic Point Defects, Impurities, and Their Diffusion in Silicon*, Computational Microelectronics. Springer Vienna, Vienna, 2012

[2] Herrero S. G., *Defects in silicon: revisiting theoretical frameworks to guide ab initio characterization*. Theses: Université Paul Sabatier, 2020

[3] Mark E. T., Audrius A., Manuel E. и др., *Computer Physics Communications*, т. 267 (2021), с. 108056

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ, ТЕРМООБРАБОТКИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

М.В. Лапин, С.Э. Карпенко, В.Н. Матвиенко, Л.Р. Хлабыстина, Ю.Н. Шелан
РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия (MVLapin@uraldiv.ru)

В современном мире, где технологии развиваются с невероятной скоростью, а наука и техника тесно переплетены, становится все более важным использование эффективных методов моделирования. Одним из таких методов является конечно-элементное моделирование (КЭМ), которое находит свое применение в самых разных отраслях. Стоит отметить, что КЭМ является одним из наиболее точных и универсальных методов моделирования, позволяющий исследовать сложные физическо-химические процессы и явления. Метод КЭМ основан на разбиении исследуемой области на множество конечных элементов, для каждого из которых решается система уравнений, описывающих исследуемый процесс. Благодаря своей универсальности, КЭМ позволяет моделировать самые разные объекты и процессы, начиная от конструкций зданий и заканчивая работой двигателей космических аппаратов.

В работе рассматривается важность КЭМ и его роль в оптимизации технологических процессов, применяемых как в лабораторных условиях для изготовления образцов, так и в крупнотоннажном поточном металлургическом производстве. Описываются алгоритм подготовки моделей в современных САД-системах, стадии подготовки расчетных сеток и построение массива элементов, а также необходимые граничные условия и анализ полученных данных.

Проведены исследования по оценке влияния параметров расчета и термодинамических характеристик моделируемого материала на возможные литейные дефекты в готовой

отливке и продемонстрированы основные подходы к оптимизации литейной оснастки и технологических параметров процесса литья и термообработки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ФАЗ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

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 вторичных фаз в многокомпонентных системах с учётом радиационного воздействия методами атомистического моделирования с использованием малоранговых потенциалов взаимодействия (LRP) [1] и термодинамического моделирования с использованием программного кода Thermo-Calc [2]. Объектами исследования при атомистическом моделировании с использованием LRP являются системы Fe-Cu, Fe-Cr и Fe-Cr-Si-Ni-Mn, в расчётах с использованием программы Thermo-Calc рассматривались модельные системы Fe-Cu и Fe-Cr-Si-Ni-Mn, а также системы, близкие по химическому составу к сталям ЧС139 и ЭП823. В расчётах обоими методами 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 результатов расчётов кинетики выделения фаз в системах, полученных с помощью LRP.

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] Shapeev, A., *Computational Materials Science*, т. **139** (2017), с. 26.
[2] Andersson, J.O., Helander, T., Hoglund, L., Shi, P.F., Sundman, B., *Calphad*, т. **26** (2002), с. 273

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО НИЗКОЭНЕРГИТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, ВЫБИТЫХ ИОНАМИ УМЕРЕННОЙ ЭНЕРГИИ В КРЕМНИЕВЫХ УСТРОЙСТВАХ

А.А. Грачков¹, К.П. Мигдал¹, А.В. Янилкин^{1,2}

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова» (*migdal@vniia.ru*)

ФГАОУВО «Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет)»

Рассматривается воздействие ионов кремния умеренных энергий, возникающих при нейтронном облучении, как на объёмные образцы кремния и его оксида, так и на интерфейсы «металл-кремний» и «металл-оксид-кремний». Методом Монте-Карло [1] проведено моделирование пролёта рассматриваемых ионов с определением спектров выбитых первичных и отдельно вторичных электронов внутри слоёв разных материалов. Для интерфейсов также исследовались влияние толщины оксидного слоя и распределения электрического поля, определяемого поданным напряжением, на количество пересекших оксидный слой электронов. В рамках моделирования полностью учитывались пространственные и временные масштабы описываемого явления, недостижимые для специализированных вариантов классической (eFF) и квантовой молекулярной динамики (TDDFT). Учтены процессы упругого электрон-электронного рассеяния, ионизации, электронного захвата, возбуждения фононов в рамках физических моделей, принятых к использованию в пакете Geant4/MicroElec [2]. Данный пакет был модифицирован авторами с целью уточнения модели потерь энергии ионами кремния, внедрения возможности использования областей, заполненных разными материалами в детекторе и возможности отслеживания перемещения частиц между этими областями, а также задания локальных электрических полей внутри таких областей.

Кроме непосредственного моделирования пролёта иона в кремнии и SiO₂ также дополнительно проведено исследование роли энергии первичных электронов на среднее значение электрон-дырочных пар, соответствующее такой энергии. Показана немонотонность этой зависимости, ранее наблюдаемая при облучении рентгеновскими фотонами [3], с выходом на постоянное значение, близкое к известному в литературе 3.62 эВ/пара [4].

Литература

- [1] Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J. et al, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **835** (2016), p. 186.
- [2] Gibaru, Q, Inguibert, C., Caron, P. et al, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, **487** (2021), p. 66.
- [3] Ramanathan, K., Kurinsky, N. *Phys. Rev. D*, **102** (2020), p. 063026.
- [4] Fang, J., Reaz, S., Weeden-Wright et al, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **66** (2019), p. 444.

МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПУХАНИЯ С ЯВНЫМ УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СТОКОВ

А.С. Рохманенков, А.В. Янилкин

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

Микроструктура материала играет ключевую роль на распухание. Поверхность, границы зерен, дислокации, дислокационные петли, пузыри, поры являются стоками для подвижных дефектов и примесных атомов, в частности для междоузлий, вакансий и атомов гелия. При расчете распухания в рамках теории среднего поля микроструктура материала рассматривается как слагаемое в кинетических уравнениях с некоторой константой скорости, которая определяется величиной силы стока и коэффициентами диффузии дефектов. Тем самым весь объем материала описывается в среднем некоторой величиной. При анализе распухания с помощью теории среднего поля для согласования функции распределения пор по размерам иногда приходится вводить распределение сил стока [1], эффективно отражающее неоднородность распределения. Реальная микроструктура материалов представляет из себя существенно неоднородную среду, в которой плотность стоков от места к месту может существенно варьироваться. Теория среднего поля позволяет учесть распределение стоков только в среднем, что накладывает ограничения на рассчитываемые зависимости.

Также могут не воспроизводиться и средние величины, например, величина распухания. Поскольку функция распухания от силы стока нелинейна, то величина распухания от среднего не равна среднему от величин распухания. В результате этого принципиально невозможно воспроизвести зависимость. Примером является область высоких температур, когда размеры критического зародыша велики. При рассмотрении средних сил стоков пузыри могут не достигнуть критического размера и поры не возникнут. Если имеется распределение сил стоков, то в некоторых местах критический размер будет меньше, и часть пор образуется. В результате этого распухание в зависимости от температуры будет иметь менее резкий спад.

Также в качестве примера экспериментально наблюдаемого влияния неоднородности на распухание стоит привести результаты ионного облучения. При ионном облучении из-за влияния поверхности как стока образуется зона около поверхности без пор. Границы этой зоны подбираются эмпирически, характерная область составляет от 100 до 300 нм.

Для корректного определения концентрации дефектов вдали от стока необходимо проводить расчет на основе решения диффузионных уравнений. При этом стоки могут динамически меняться из-за появления пузырей и пор. С этой целью проведена разработка модели расчета влияния неоднородного распределения микроструктурных дефектов на распухание в конструкционных материалах.

На начальном этапе определяется пространственное распределение стоков: поверхности, дислокаций, а также задаются условия облучения. Далее пространственное распределение стоков используется для расчета стока в каждой точке пространства. Проводится диффузионный расчет для подвижных дефектов. В данном случае: междоузлия, вакансии, атомы гелия. Далее концентрации дефектов используются для расчета кинетики зарождения пузырей, роста пузырей, перехода их в поры и роста пор. После этого происходит обновления распределения стоков с учетом изменения.

Литература

[1] Yanilkin A.V., *J. Nucl. Mater.* v.586 (2023), p. 154640.

МУЛЬТИМАСШАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Р.А. Рымжанов^{1,2}, Н. Медведев^{3,4}, J.H. O'Connell⁵, M. Čosić⁶, А.Е. Волков^{1,7},
В.А. Скуратов^{1,8,9}, А. Janse van Vuuren³

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

²Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

³Институт физики Чешской академии наук, Прага, Чехия

⁴Институт физики плазмы Чешской академии наук, Прага, Чехия

⁵Университет Нельсона Манделы, Порт-Элизабет, ЮАР

⁶Институт ядерной науки Винчи, Белград, Сербия

⁷Физический институт им. Лебедева РАН, Москва, Россия

⁸Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

⁹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе комбинированный подход Монте-Карло и молекулярной динамики применялся для детального изучения различных стадий формирования треков быстрых тяжелых ионов (БТИ) в твердых телах. Монте-Карло модель TREKIS [1] описывает возбуждение электронной системы и передачу энергии в решетку мишени, обеспечивая начальные условия для моделирования последующей релаксации атомной подсистемы методом молекулярной динамики. В работе обсуждается кинетика образования отдельных треков, перекрытие треков и модификации поверхности в некоторых аморфизуемых (YAG, Mg₂SiO₄) и неаморфизуемых (Al₂O₃, MgO, CaF₂, CeO₂, ZrO₂) материалах, облученных БТИ. Результаты моделирования сравнивались с данными просвечивающей электронной микроскопии образцов, облученных тяжелыми ионами высоких энергий, для верификации разработанной модели и выявления связи между основными свойствами исследуемых материалов и кинетикой структурных изменений. В работе было показано, что:

1) На размер и морфологию отдельных треков и треков, перекрывающихся при высоких флюенсах, определяющее влияние оказывает рекристаллизация разупорядоченной на начальных временах области [2].

2) Выброс расплавленного материала и морфология поверхностных структур, вызванных облучением, определяются подвижностью атомов мишени, поверхностным натяжением и рекристаллизацией материала во время релаксации [3].

3) Исследована зависимость поверхностных дефектов при облучении БТИ от толщины мишени: самые тонкие слои образуют сквозное отверстие, полусферические и сферические бугорки создаются в слоях средней толщины, тогда как эмиссия наночастиц может наблюдаться в пленках толщиной более 30 нм [4].

4) Воздействие БТИ при скользящем падении приводит к образованию бороздчатой структуры либо цепочки нанобугорков в зависимости от материала и свойств облучения.

5) Облучение нанокристаллических неаморфизующихся материалов существенно влияет на морфологию границ зерен, что приводит к агрегации и укрупнению нанозерен [5].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №23-72-01017, <https://rscf.ru/project/23-72-01017/>

Литература

[1] N.A. Medvedev, *J.Phys. D.* т.48 (2015), с.355303

[2] R.A. Rymzhanov et al. *Sci. Rep.* т.9 (2019), с.3837

[3] R.A. Rymzhanov et al. *J. Appl. Phys.* т.127 (2020), с.015901

[4] R.A. Rymzhanov et al. *Appl. Surf. Sci.* т.566 (2021), с.150640

[5] R.A. Rymzhanov et al. *Com. Mat. Sci.*, т.221 (2023) с.112078

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗЛОМОВ ПРИ ФРАКТОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ: ДОСТОИНСТВА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Д.А. Беляев¹, С.А. Лекомцев¹, Ю.Н. Зуев¹, И.Л. Святлов¹, Л.Н. Солодовников²

¹ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия (bad1331@vniitf)

²АО «ВНИИНМ» имени академика А.А. Бочвара, Москва, Россия

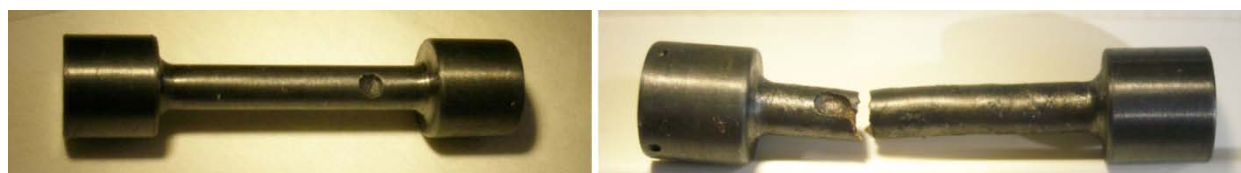
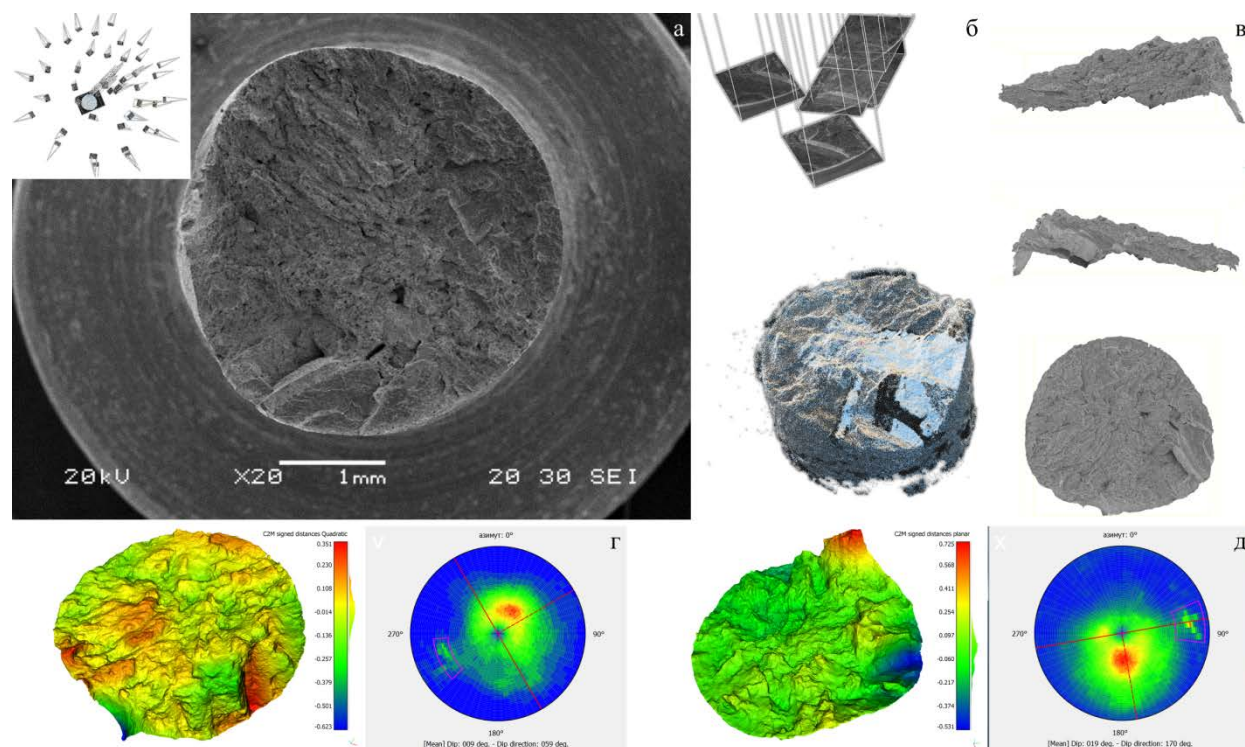


Рисунок 1 — Образец обедненного урана до и после проведения механических испытаний на разрыв



а — одна из исходных фотографий и схема фотографирования; б — «сырая» цифровая модель одной из поверхностей; в — некоторые проекции цифровой модели; г — карты высот и нормалей излома на первой части образца; д — карты высот и нормалей излома на второй части образца

Рисунок 2 — Фотограмметрическое моделирование поверхности разрушения

Представлены результаты фрактографического исследования стандартного образца из обедненного урана после механических испытаний на растяжение (рисунок 1). В исследованиях применялся метод фотограмметрической реконструкции поверхностей

изломов образцов при большом увеличении с последующем получением и анализом количественных характеристик изломов (рисунок 2).

Использование предложенного методического подхода развивается и совершенствуется в интересах дополнения традиционной фрактографии количественным анализом и востребовано при исследованиях изломов образцов из быстроокисляющихся материалов.

УПРОЩЕННАЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПУХАНИЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АТОМИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Янилкин

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

Одним из основных материалов для существующих реакторов и материалов-кандидатов для реакторов следующего поколения являются аустенитные стали [1]. В аустенитных сталях одной из ключевых проблем является распухание, которое может достигать величины 5% при дозах 30-40 сна, что существенно ограничивает срок их службы как в качестве материалов оболочек твэлов, так и внутрикорпусных устройств. Явление распухания наблюдается также в сталях ферритного и ферритно-мартенситного классов, но при более высоких дозах.

Чтобы понять ключевые свойства материала, определяющие распухания, важно разработать различные теоретические и экспериментальные методы прогнозирования. Нейтронное облучение остается дорогим и трудоемким, но оно необходимо для обоснования безопасности используемых материалов. Ускоренные испытания на основе ионного облучения в настоящее время активно используются для исследования материалов-кандидатов [2–4]. В то же время соответствие между ионным и нейтронным облучением остается до конца не изученным [2–4]. В связи с этим актуальна разработка моделей и программ прогнозирования распухания [5], сравнительного анализа ионного и нейтронного облучения, аппроксимации и экстраполяции экспериментальных данных и анализа механизмов распухания материалов.

В этой работе для прогнозирования распухания предлагается упрощенная кинетическая модель [6]. Она основана на теории среднего поля и результатах атомистическом моделировании, при этом основное внимание уделяется описанию экспериментально наблюдаемой эволюции пузырьков и пор. Предлагается несколько моделей. К ним относятся самосогласованный учет коэффициента диффузии вакансий и энергии образования, модели зарождения гетерогенных пузырьков, стока на межузельные кластеры и пространственной неоднородности стоков. Параметризованная модель показывает хорошее согласие с экспериментальными данными по стали AISI CW 316, облученной при различных температурах и дозах в быстром реакторе EBR-II. Обсуждается влияние стока на межузельные кластеры и отжига дислокаций на температурную зависимость распухания.

Литература

- [1] Was G.S. et al., *J. Nucl. Mater.* v.527 (2019), p. 151837.
- [2] Taller S. et al., *J. Nucl. Mater.* v.527 (2019), p. 151831.
- [3] Taller S., Was G.S. *Acta Mater.* v.198 (2020), p. 47–60.

- [4] Taller S. et al. *Sci. Rep.* v.**11** (2021), p. 2949.
[5] Gilbert M.R. et al., *J. Nucl. Mater.* v.**554** (2021), p. 153113.
[6] Yanilkin A.V., *J. Nucl. Mater.* v.**586** (2023), p. 154640.

ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА ЦИРКОНИЯ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

П.В. Чирков¹, Г.С. Ельцов¹, В.В. Дремов¹, А.В. Караваев¹, А.А. Мирзоев²

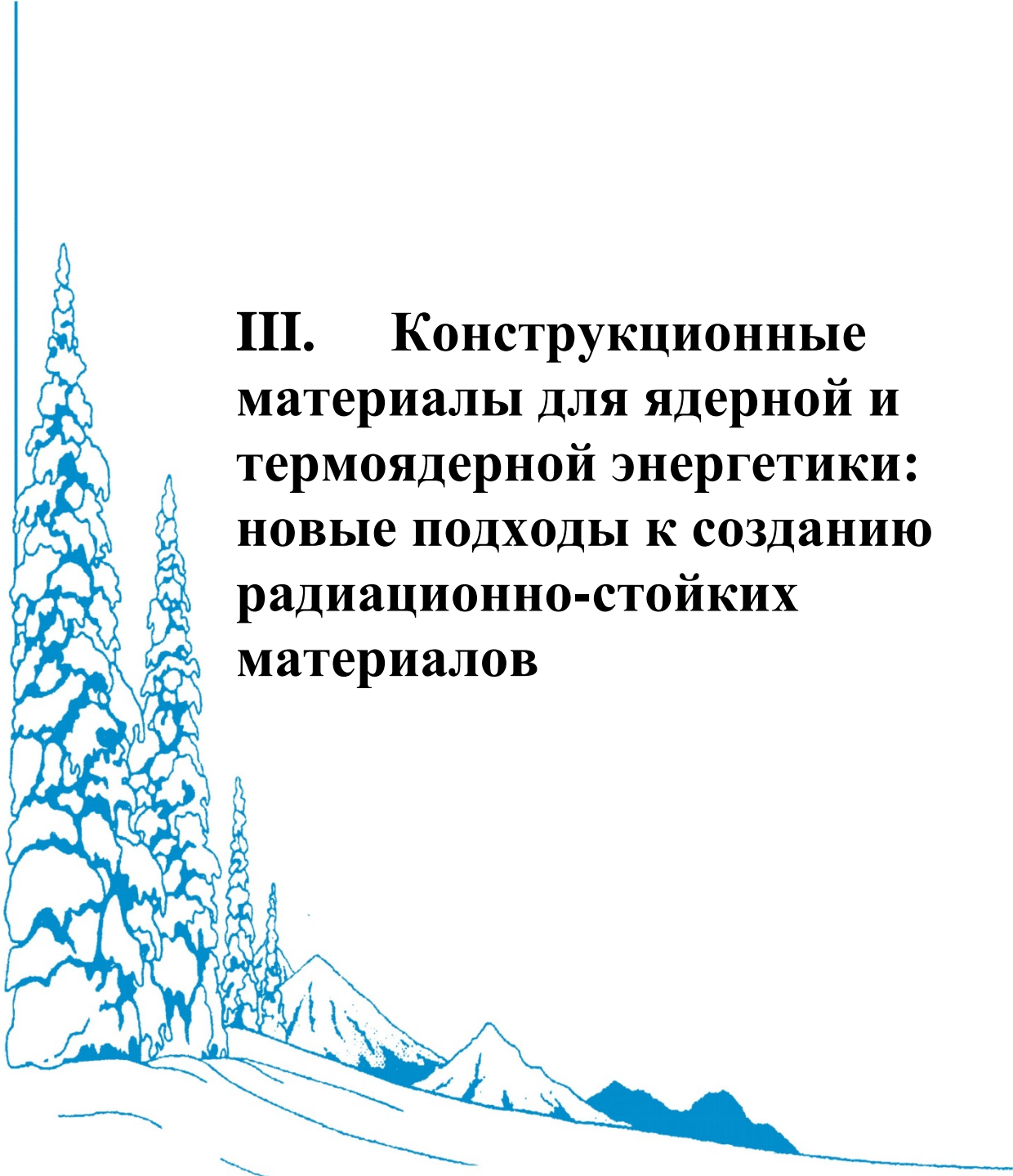
¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Российская Федерация
(chirkovpv@vniitf.ru)

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация

В данной работе представлен анализ точности метода расчета свободной энергии на основе фононов (метода температурно-зависимого эффективного потенциала)[1] в сравнении с методом термодинамического интегрирования в рамках классической молекулярной динамики. Показано, что использование силовых констант второго и третьего порядка недостаточно для точных расчетов свободной энергии при повышенных температурах из-за заметных ангармонических вкладов в колебания решетки. Кроме того, надежные расчеты линий фазового равновесия требуют точности определения свободной энергии выше 1-3 мэВ на атом. Основываясь на полученных результатах, метод температурно-зависимого эффективного потенциала применен для детального исследования фазовой диаграммы Zr *ab-initio* молекулярной динамикой с учетом силовых констант до четвертого порядка включительно. Рассчитанная фазовая диаграмма циркония хорошо согласуется с экспериментом, тройная точка α , β , ω определена при $P \approx 8.3$ ГПа, $T \approx 790$ К.

Литература

- [1] O. Hellman et al., *Phys. Rev. B* **84**, 180301 (2011)



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

ENHANCED IRRADIATION TOLERANCE OF A MEDIUM ENTROPY ALLOY VIA PRECIPITATION AND DISSOLUTION OF NANOPRECIPITATES

Yang Zhang, Jihong Han, Zhongwu Zhang

Key Laboratory of Superlight Materials and Surface Technology, Ministry of Education, College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China (zhangyang0115@hrbeu.edu.cn)

High/medium entropy alloys (HEAs/MEAs) are good candidates for nuclear applications due to the excellent mechanical properties, good corrosion resistance and radiation resistance. In this work, a novel cobalt-free MEA was developed by introducing L1₂ nanoprecipitates. The microstructure evolution and radiation tolerance were evaluated after bombarded using 3 MeV Fe¹¹⁺ ions at 500 °C. The evolution of nanoprecipitates was closely related to the irradiation dose, and dominated by irradiation-enhanced diffusion and ballistic dissolution mechanism. For the solid-solution MEA (without L1₂ nanoprecipitates), irradiation hardening occurred due to the irradiation-induced formation of precipitates, voids and dislocation loops. However, in MEA with L1₂ nanoprecipitates after aging, irradiation induced dissolution and reprecipitation of nanoprecipitates were observed. Different from the solid-solution MEA, the hardness kept almost unchanged in the aging sample after irradiation. The swelling rate of the solid-solution sample after irradiation is 9.4×10^{-6} %/dpa, while no swelling occurs in the aging sample under the same irradiation condition. Besides, the average size and number density of dislocation loops in the aging sample decreased by ~ 40% and ~ 28%, compared with the solid solution sample. The precipitation and dissolution of nanoprecipitates substantially improved the radiation tolerance of the cobalt-free MEA.

IRRADIATION EFFECTS IN STEELS AND ALLOYS

Z.W. Zhang¹, Y. Zhang¹, Jihong Han¹, Liyuan Liu¹, Jingwei Hao¹, C.T. Liu², X-L. Wang²

¹ Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

² City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong

Pre-existing precipitates, twin boundaries, and grain boundaries all can act as defect traps, enhancing the irradiation tolerance, such as reducing the swelling rate/hardening and preventing radiation-induced precipitation. In recent years, our group mainly focuses on the effects of pre-existing precipitates and twin boundaries on the irradiation tolerance in the newly-developed precipitate-strengthened ferritic steels and high entropy alloys. Various kinds of ions, including Ne²⁰⁺, Au²⁺, Fe¹¹⁺, He²⁺, protons and electron, were used to irradiate the steels and alloys. The microstructure evolution and mechanical properties were subsequently examined by transmission electron microscope (TEM), atom probe tomography (APT), nanoindentation and micro-tensile test. In steels, irradiation-enhanced precipitation and coarsening of pre-existing nanoscale precipitates were observed, depending on the irradiation dose. The precipitation and coarsening of nanoscale precipitates are responsible for the changes in hardness. In high entropy alloys, a rather low swelling rates were observed after irradiation due to the existence of pre-existing precipitates and twin boundaries. The irradiation-induced segregation level is obviously suppressed in the HEAs due to the sluggish atom diffusion. In the meantime, the high-density nanoprecipitates have dual functions: (I) They can increase the surface area of particles capable

of adsorbing defects, and improve the ability of the alloy to suppress the coarsening of He bubbles. (II) The reduction of matrix SFE caused by precipitation inhibits the transition from a faulty loop to a perfect dislocation loop, prolongs the latency of the dislocation loop and delays its growth.

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОБЛУЧЕННОЙ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ ОБОЛОЧЕЧНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ СЖАТИЯ В РАДИАЛЬНОМ НАПРАВЛЕНИИ

Р.П. Карагерги, А.В. Козлов, В.Ю. Ярков, В.И. Пастухов, С.В. Барсанова
Акционерное общество «Институт реакторных материалов», Заречный, Россия
(karagergi_rp@irmatom.ru)

Разрушение образцов различных материалов связано с условиями и схемой механического нагружения. При этом реализуется напряженно-деформированное состояние, создающее в локальных областях условия, при которых происходит разрушение, причем в зависимости от структурного состояния оно может протекать по разным механизмам. Анализ поверхности разрушения образца после механических испытаний позволяет получить информацию о характере и механизме разрушения, а также проанализировать вклад различных дефектов в процессы упрочнения и разрушения материала.

Одной из частных задач является определение комплекса механических характеристик материала оболочек твэлов после облучения в ядерных энергетических установках. Это необходимо для оценки состояния материала, содержащего радиационные повреждения, а также для прогнозирования остаточного ресурса твэлов после эксплуатации. Целью работы является исследование влияния схемы напряженно-деформированного состояния при испытаниях кольцевых образцов на сжатие в радиальном направлении на характер разрушения и микроструктуру поверхностей изломов облученной нейтронами аустенитной стали.

Объектом исследования является участок оболочки твэла, который облучался в центре активной зоны реактора БН-600 со скоростью набора повреждающей дозы $1,64 \cdot 10^6$ сна/с при температуре ~ 520 °С. Материалом оболочки служила усовершенствованная аустенитная сталь типа Х16Н19. Были проведены кратковременные механические испытания кольцевых образцов, изготовленных из этого участка оболочки. Образцы сжимали в радиальном направлении при разной температуре и записывали диаграммы испытания. Испытания сопровождали анализом напряженно-деформированного состояния. После испытания образцов исследовали характер разрушения и микроструктуру поверхности изломов.

Результаты испытаний показали, что разрушение образцов имеет смешанный характер: наблюдаются участки вязкого транскристаллитного разрушения, преимущественно по радиационным порам, а также участки с хрупким характером разрушения по карбидным выделениям и двойникам деформации. В общем, разрушение происходит по участкам локализации напряжений, сформировавшихся на различных видах дефектов.

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ В СТАЛИ ТИПА X16H15

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

Сталь аустенитного класса типа X16H15 применяется в качестве оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах.

Основной проблемой, ограничивающей использование материалов данного класса при больших выгораниях, является распухание.

Факторами, сдерживающими распухание, являются [1]: повышение стабильности твердого раствора, фазовой стабильности выделяющихся частиц MeC и стабильности дислокационной структуры; увеличение содержания бора в твердом растворе, а также холодная деформация на 20-25%, формирующая ячеистую структуру с наличием микродвойников деформации.

Перечисленные факторы являются основными причинами возникновения в материале микронапряжений, вызывающих микродеформацию кристаллической решетки.

Рентгенографически такие напряжения проявляются в изменении межплоскостных расстояний и в уширении интерференционных максимумов.

Интегральный контроль факторов, сдерживающих распухание при облучении, возможен путем определения влияния на микродеформацию условий облучения, таких как температура и доза облучения.

В работе приведены результаты рентгеноструктурных исследований влияния нейтронного облучения в реакторе БН-600 на напряжения 2 рода в стали типа X16H15.

Литература

[1] 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.

ДЕГРАДАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА СРОК СЛУЖБЫ

А.А. Потехин¹, Е.А. Кулешова^{1,2}

¹НИЦ «Курчатовский институт» (e-mail: alexbiver@mail.ru)

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Рассмотрены изменения в структурно-фазовом составе материалов (сталей) корпусов реакторов (КР) ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации в течение штатного срока службы (до 40 лет), а также при продлённом сроке службы (60 лет и более). Продление срока службы КР возможно только при условии тщательного изучения эволюции структуры сталей КР в условиях облучения при рабочих температурах реактора. Необходимо понимать, как изменяются объёмная плотность и средние размеры радиационных дефектов и радиационно-индуцированных элементов структуры, знать механизмы радиационного охрупчивания.

В данной работе был проведён анализ литературных данных и результатов экспериментов НИЦ «Курчатовский институт» об эволюции структуры сталей КР в течение службы реактора. Построены графики расширенных на продлённый срок службы дозовых зависимостей изменения параметров структуры сталей КР. Приведены тенденции изменения зернограницной сегрегации фосфора, прочностных характеристик и критической температуры хрупкости материалов КР под действием облучения.

На основании анализа тенденций изменения структурно-фазового состояния материалов КР ВВЭР-1000 на сроках эксплуатации в течение 60-ти и более лет можно сделать следующие выводы:

- На сроках эксплуатации в течение 60-ти и более лет темп роста зернограницной сегрегации фосфора значительно замедляется, приближаясь к уровню равновесной сегрегации. Это приводит к уменьшению вклада неупрочняющего механизма в радиационное охрупчивание;
- Темп роста среднего размера и объёмной плотности радиационно-индуцированных преципитатов замедляется, тогда как объёмная плотность дислокационных петель продолжает расти. Это может привести к тому, что предел текучести продолжит расти, хотя темп его увеличения снизится;
- Таким образом, следует ожидать, что вклад упрочняющего механизма в радиационное охрупчивание на сроках эксплуатации более 60-ти лет будет преобладать;
- Следует ожидать, что темп роста сдвига критической температуры хрупкости (ΔT_k) на долгих сроках эксплуатации также замедляется;
- Расчётно-экспериментальным методом показано, что для КР ВВЭР-1000 возможно продление их срока эксплуатации свыше 60 лет как за счет доаттестации, так и, в ряде случаев, за счет восстановительного отжига;
- - Решение о продлении срока службы каждого конкретного КР должно приниматься индивидуально.

Литература:

[1] Е.А. Кулешова и др. *Радиационно-индуцированная деградация структуры конструкционных материалов водо-водяных реакторов*. М.: НИЦ “Курчатовский институт,” 2022. 462 с.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ В СТАЛЯХ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

С.В. Федотова¹, Е.А. Кулешова^{1,2}

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

²НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Одним из механизмов деградации свойств корпусов ядерных реакторов (КР) в процессе эксплуатации является радиационное упрочнение за счет образования радиационно-индуцированных преципитатов. В этой связи исследованы особенности фазообразования в зависимости от эксплуатационных факторов (флюенс и флакс быстрых нейтронов, состав стали, температура облучения) в различных сталях корпусов действующих

реакторов, а также разрабатываемых сталях российского производства на основании анализа результатов исследований, полученных за последнее десятилетие в НИЦ «Курчатовский институт» методом атомно-зондовой томографии.

Показано, что в материалах с низким содержанием меди (стали КР ВВЭР-1000) при облучении при 300°C происходит образование преципитатов на основе Ni-Si-Mn по радиационно-индуцированному механизму, поскольку основными местами зарождения являются кластеры точечных дефектов, образованные в каскадах. Эти каскадные кластеры выступают как стоки для радиационно-индуцированной сегрегации (РИС) атомов Ni, Mn, Si и, при достаточном уровне РИС, образуют зародыш преципитата, а дальнейший рост определяется диффузионной подвижностью атомов. Все это определяется как составом стали, так и эксплуатационными параметрами (флюенс, флакс, температура облучения).

Так, увеличение концентрации Ni и Mn в стали (металлы сварных швов по сравнению с основными металлами КР ВВЭР-1000) приводит к увеличению плотности преципитатов вследствие более высокого уровня РИС в них, требуемого для зарождения преципитата на каскадных кластерах точечных дефектов. При этом для материалов с более низкими концентрациями Ni и Mn зарождение преципитатов на начальной стадии облучения происходит гетерогенно преимущественно на стоках (дислокациях) со снижением их доли по мере увеличения флюенса, приводящего к увеличению уровня РИС. В стали с повышенным содержанием Ni до 5 масс.%, но со сверхнизким содержанием Mn $\leq 0,03$ масс.%, возможно подавление образования под облучением Ni-Si-Mn преципитатов.

Увеличение флюенса быстрых нейтронов (и времени облучения) приводит как к увеличению мест зарождения, так и к увеличению уровня РИС, что приводит к увеличению плотности и размеров преципитатов, состав которых коррелирует с составом сплава.

Увеличение флакса быстрых нейтронов приводит к увеличению мест зарождения (увеличению числа кластеров точечных дефектов при близком уровне РИС), что определяет более высокую плотность преципитатов при меньших размерах вследствие меньшего времени для протекания диффузионных процессов.

При низких температурах облучения (50-130)°C преципитаты не образуются, что связано с низким уровнем РИС и низкой диффузионной подвижностью атомов, при увеличении количества мест для зарождения преципитатов. При высоких температурах облучения (400°C) каскадные кластеры точечных дефектов практически не образуются и образование преципитатов наблюдается на стоках – дислокациях и границах зерен. Движущей силой при этом является термодинамический стимул наряду с радиационно-ускоренной диффузией, а состав преципитатов соответствует равновесным фазам.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ И ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

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

¹Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
(uni.klauz@gmail.com)

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 (смещений на атом). Перспективными материалами, способными удовлетворить эти требования, являются дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали, содержащие в своей матрице однородно распределенные термически стабильные наноразмерные оксиды [1-2].

В данной работе рассматривались три ДУО стали 10Cr ODS, KP-3 ODS и Eurofer ODS в исходном состоянии и после облучения ионами Fe²⁺ с энергией 5,6 МэВ при температуре 500°С и повреждающих дозах до 100 сна. Исследование проводилось с использованием современных методов просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии [3].

В исходном состоянии сталей обнаружены оксидные включения и кластеры. Средний размер оксидов варьировался от 3 до 6 нм, их объёмная плотность составляла от $2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ до $13 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Объёмная плотность кластеров варьировалась от $16 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ до $32 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$, их средний размер от 2 до 4 нм [4].

Исследование, облучённых до 100 сна при 500°С образцов, показало существенное уменьшение объёмной плотности оксидных частиц в сталях 10Cr ODS (в ~ 5 раз) и KP-3 ODS (в ~ 4 раза) [5]. При этом в Eurofer ODS объёмная плотность оксидных частиц сохранилась в пределах разброса. Объёмная плотность кластеров резко уменьшилась только в Eurofer ODS, а в 10Cr ODS и KP-3 ODS наоборот выросла.

Комплекс исследований показал, что сталь Eurofer ODS также имеет стабильные оксидные частицы в области промежуточных температур эксплуатации за счёт взаимодействия подсистем кластеров и оксидов.

Литература

[1] B. Mouawad, X. Boulnat, D. Fabrègue, M. Perez, Y. de Carlan // *Journal of Nuclear Materials*, **465** (2015) 54-62

[2] Xu S., Zhou Z., Jia H., Yao Z. // *Steel research int.* 2018. V. 90. P. 1800594.

[3] Michael K. Miller. // "Atom probe tomography", *Review of Scientific Instruments* **78**, 031101 (2007).

[4] С.В. Рогожкин, А.А. Хомич, А.А. Богачев, и.д. // *Ядерная физика и инжиниринг*, 2020, **11**, № 1, с. 22–31.

[5] S. V. Rogozhkin, A. V. Klauz, A. A. Bogachev, e.t.c. // *Physics of Atomic Nuclei*, 2022, Vol. 85, **12**, pp. 1998-2006.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАДИАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ ЭП450 ДУО И ЭП823 ДУО В УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И УЛЬТРАМИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

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

¹Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики (artem.khomich@gmail.com)

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

Дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали (ODS steels - oxide dispersion strengthened steels) обладают заметно более высокой жаропрочностью, чем традиционные ферритно-мартенситные стали за счет значительного числа равномерно распределенных оксидов. Такие материалы разрабатываются для ряда ядерных приложений: первой стенки будущих термоядерных реакторов, материалов оболочек топливных элементов в реакторах на быстрых нейтронах и для применения в других реакторных установках IV поколения [1-2]. Эти материалы могут выдерживать температуры до 700 °С, и ожидается их устойчивость к радиационному набуханию до 200 сна [3]. Механические свойства ДУО сталей существенно зависят от характеристик наноструктуры: размера и пространственного распределения дисперсных включений. В свою очередь выбор легирующих добавок и режимов термомеханической обработки оказывают прямое влияние на данные характеристики. Количественный анализ оксидных включений в ДУО сталях требует применения нескольких дополняющих друг друга методов микроскопического анализа, таких как просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и атомно-зондовая томография (АЗТ).

Поскольку повышенные эксплуатационные свойства ДУО сталей существенно зависят от оксидных нано-включений (частиц и кластеров), равномерно распределенных в матрице, изучению стабильности наноструктуры ДУО сталей в том числе и под облучением уделяется пристальное внимание [3, 4].

Целью настоящей работы является систематическое комплексное исследование радиационно-индуцированных изменений Российских ДУО сталей ЭП-450 ДУО и ЭП-823 ДУО в области низкотемпературного радиационного охрупчивания от 350°С до 500°С в диапазоне доз от 30 до 100 сна. Сталь ЭП450 ДУО в исходном состоянии имеет большее количество оксидных частиц и кластеров меньшего размера. После облучения до 30 сна в стали ЭП823 ДУО наблюдается формирование большого числа радиационно-индуцированных кластеров Si-Ni-Mn. В стали ЭП450 ДУО подобного эффекта нет. Произведенные измерения нанотвердости, показывают, что основные отличия поведения сталей происходят при высоких температурах облучения и доз до 60 сна. При дозе 100 сна обе стали демонстрируют тенденцию к разупрочнению.

Литература

- [1] Carlan Y., Bechade J.-L., Dubuisson P. // *J. Nucl. Mater.* 2009. V. 386–388. P. 430.
- [2] Jeong Y.H., Kim W.J., Kim D.J. // *Proc. Eng.* 2014. V. 86. P. 1.
- [3] Wharry J.P., Swenson M.J., Yano K.H. // *J. Nucl. Mater.* 2017. V. 486. P. 11.
- [4] Liu X., Miao Y., Wu Y., Maloy S.A., Stubbins J.F. // *Scripta Mater.* 2017. V. 138. P. 57.

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ

С.В. Рогожкин^{1,2}, А.В. Клауз^{1,2}, А.А. Никитин^{1,2}, А.А. Хомич^{1,2}, А.А. Богачев^{1,2}, А.Г. Залужный^{1,2}, Ю.Е. Горшкова³, Г.Д. Богучава³, Yu. Ke⁴, L. Almásy⁵

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия
(SVRogozhkin@mephi.ru; Sergey.Rogozhkin@itep.ru)

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

³Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

⁴Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan, China

⁵Institute for Energy Security and Environmental Safety, HUN-REN Centre for Energy Research, Budapest, Hungary

Характеризация наноструктуры дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) сталей, требует всестороннего анализа с использованием дополняющих методов. В этой работе методы просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), атомно-зондовой томографии (АЗТ), малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) и малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (МУРР) были применены к нескольким сталям ODS. Исследуемые стали имеют различные системы легирования, отличающиеся содержанием Cr, V, W, Al и Zr, произведенные в Японии, Республике Корея и Европе. Ранее было показано, что ДУО-стали содержат высокую плотность наноразмерных оксидов и кластеров, обнаруженных с помощью ПЭМ и АЗТ. Возникает вопрос о разделении оксидов и кластеров различными микроскопическими методами. Локальные методы, такие как ПЭМ и АЗТ, не обеспечивают высокой точности определения плотности числа включений из-за их неоднородного распределения.

Показано, что большинство исследованных сталей содержат оксидные включения и наноразмерные кластеры, обогащенные по O и Y, а также V, Ti, Al и Zr, в зависимости от исходного состава стали. ПЭМ и АЗТ предоставляют подробную информацию о типах включений и их распределении по размерам, в то время как МУРН и МУРР позволяют с высочайшей точностью измерять среднюю плотность включений в больших объемах материала. Показана важность правильного определения типов включений для расчетов упрочнения. Результаты этих расчетов сравниваются с измерениями микротвердости. Расчетные значения твердости для исследуемых сталей находятся в диапазоне 2,7– 4,3 ГПа, что хорошо подтверждается измерениями микротвердости.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1352).

ЛЕГИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫМ БОРОМ С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ РАВНОМЕРНОСТИ

Г.Н. Чурилов^{1,2}, Г.А. Глущенко¹, Н.С. Николаев¹, Н.Г. Внукова^{1,2}, В.И. Елесина^{1,2}

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

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

В работе показана возможность совмещения процесса перевода порошка бора в наноразмерное состояние с его одновременным введением в расплав алюминия. Показано, что метод обработки микронных порошков бора плазмой дугового разряда позволяет получить частицы со средним размером 4–11 нм. Таким образом, многие процессы с использованием нанодispersных порошков можно совместить с процессом их получения, что позволяет избежать трудностей связанных с хранением таких высокореакционных материалов. Представлены результаты плазменного легирования алюминия в расплаве наноразмерными частицами бора. Осуществление генерации потока дуговой аргоновой плазмы над расплавом алюминия с введёнными в него порошками фуллеренов и бора микронного размера позволило получать сплав, содержащий равномерно распределенный в объёме бор. Для введения бора использовался двухструйный плазмотрон на основе [1] с плазмообразующим и, одновременно, транспортным газом – аргоном. Через одну струю подавались фуллерены, которые были использованы в качестве наиболее эффективного восстановителя алюминия в оксидной пленке, а через другую – бор. Количественный рентгенофлуоресцентный анализ образца площадью диаметром 20 мкм показал, что бор в алюминий распределен со степенью равномерности составляющей: $19 \pm 5,6$ вес.% – для стандартного образца (рис. 1а) и $7,8 (\pm 2,5)$ вес.% для образца полученного нами по указанной выше технологии (рис. 1б).

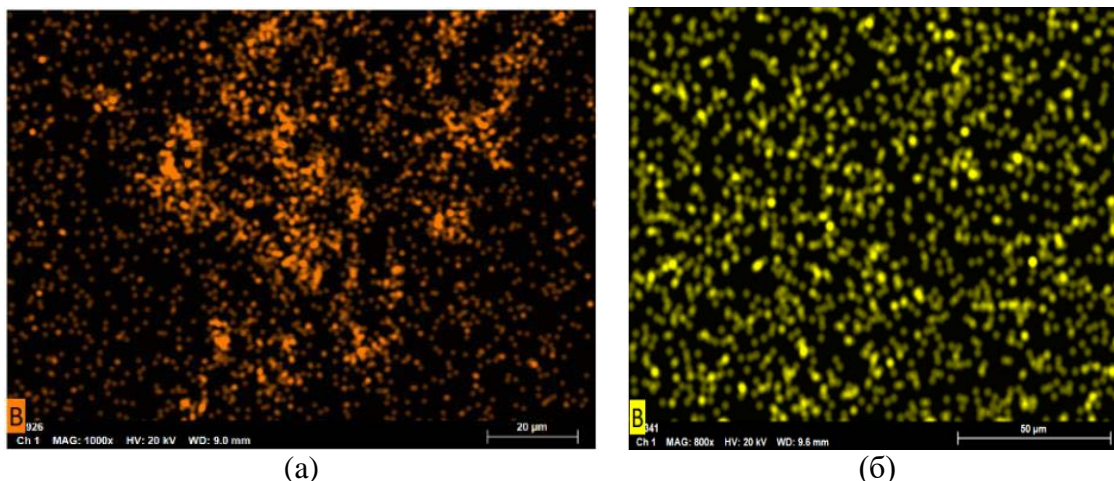


Рисунок 1. Фотографии (увеличение 1000x в режиме картирования): образца стандартной лигатуры (а); образца алюминий–бор (б)

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института физики им. Киренского ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр СО РАН". Авторы благодарят А.М. Жижяева, А.М. Токмина, В.А. Лопатина, М.Р. Кастюк за проведение аналитических исследований, в т.ч. с использованием оборудования Центра коллективного пользования Красноярского научного центра СО РАН.

Литература

[1] Churilov G.N., *International Journal of Hydrogen Energy*. **V.47** (2022), №11, p.7299

МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ И ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ – ВЫЗОВЫ И ПУТЬ ВПЕРЁД

В.М. Чернов^{1,2}

¹*Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А.Бочвара (АО «ВНИИНМ»), Москва, Россия
(VMChernov@bochvar.ru)*

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

Рассмотрены созданные и разрабатываемые в России (АО «ВНИИНМ») малоактивируемые конструкционные материалы (МАКМ) для термоядерных и ядерных (быстрых) реакторов. Перспективность применения МАКМ (относительно обычных КМ, сильно и длительно радиоактивных) определяется их хорошими функциональными свойствами (не уступающими свойствам обычных КМ), существенным повышением эффективности работы реакторов (более малое паразитное поглощение нейтронов), уменьшение радиационного влияния реакторов на окружающую среду и возможность повторного использования (рециклирования) после облучения за исторически короткое время (до 100 годов). Требования малой активируемости также определяют длительности топливных кампаний реакторов.

Для быстрых реакторов Поколения-III (БН-600, БН-800) и демонстрационных ТЯР (ДЕМО-ТЯР) с длительностью топливных кампаний до 3 годов (радиационная повреждаемость КМ до 100+ сна) созданы МАКМ-III типа ферритно-мартенситной стали ЭК-181 (Fe-12Cr-2W-V-Ta) и сплава ванадия V-4Ti-4Cr (ВМ-ДПЧ-9) и разрабатывается малоактивируемая аустенитная хромо-марганцевая сталь (Fe-Cr-Mn-W-V-Ti-B).

Для быстрых реакторов следующего Поколения-IV (БРЕСТ, БН-1200, БР-1200) и ТЯР с более длительными топливными кампаниями (до 5+ годов, радиационная повреждаемость КМ до 200+ сна) и высокими экономическими (коммерческими) требованиями необходимы КМ-IV нового поколения с более высокими функциональными свойствами (относительно МАКМ-III и КМ-III). Для КМ-IV (изделий) определяющими являются более высокие длительные механические свойства (более длительные топливные кампании, более широкие температурные интервалы эксплуатации, приемлемые механические нагрузки и формоизменения). МАКМ-IV разрабатываются на основе дальнейшей модификации МАКМ-III и разработки МАКМ-IV на основе сплавов ванадия новой системы V-Cr-W(Ta)-Zr.

Радиационную структуру и свойства КМ-III (до 100+ сна) определяют исходные составы и структуры, создаваемые исходными термо-механическими обработками (ТМО). При реакторных облучениях КМ-III их исходные структуры и состояния релаксируют (переходные инкубационные стадии с длительностью в зависимости от режимов облучения) и формируются другие специфические высокодозные структуры (в значительной мере упорядоченные и устойчивые, образование динамически устойчивых решеток дефектов). Высокодозные (более 100 сна) структуры практически не зависят от исходных структур, их дефектности и состояний и определяют эволюцию свойств МАКМ-IV (длительности топливных кампаний). Формирование высокодозных структур

определяется элементными составами КМ-IV и условиями реакторного облучения (температура, нейтронные и гамма спектры, интенсивность). Важное значение имеет гамма-облучение в формировании и эволюции структур, состояний и свойств КМ. Состояния (уровень равновесности), структуры и свойства КМ в условиях «до-после» (квазиравновесные состояния) и «в процессе» (динамические неравновесные состояния) реакторного облучения существенно различны. Соответствующие исследования структур и свойств КМ (экспериментальные, теоретические, моделирующие) в условиях «до-после» облучения мало информативны для определения их значений «в процессе» облучения.

Рассмотрены составы, состояния, структуры и свойства (физико-механические, теплофизические, ядерно-физические) МАКМ-III-IV в условиях (состояниях) «до-в процессе-после» реакторных облучений. Отмечена ограниченность (малая информативность) использования ускорительных облучений для обоснования работоспособности КМ в реакторах. Отмечена ограниченность результатов испытаний КМ в быстрых реакторах для обоснования работоспособности КМ в ТЯР. Наиболее перспективными для МАКМ-IV (для ТЯР, БН, БР) являются многокомпонентные сплавы на основе тугоплавких материалов (ванадия, др.).

Создание МАКМ-IV является обоснованной и развивающейся мировой перспективой в создании энергетических термоядерных и ядерных реакторов. «Такой прогресс неизбежен».

МАСС-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИЗОТОПОВ ВОЛЬФРАМА С ПОВЫШЕННЫМИ МАССАМИ

М.П. Кащенко^{1,2}, М.А. Коваленко¹, В.И. Печорский², А.Я. Купряжкин¹, Н.М. Кащенко¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия (mрк46@mail.ru)

²Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

Согласно [1], процессы холодного синтеза и распада ядер могут быть реализованы при участии компактных массивных электронных (ee) - пар, имеющих противоположные спины и связанных контактным взаимодействием, описываемым адронной механикой [2]. В пользу существования таких пар свидетельствуют эксперименты [3], установившие существование атомов с повышенными массами для всех изотопов титана.

В данной работе проведен масс - спектрометрический анализ поверхностного слоя титанового анода после дугового разряда в воздушной среде при использовании вольфрамового катода. Наиболее интересный результат состоит в обнаружении на аноде только модифицированных атомов вольфрама, обладающих повышенной массой. Ниже в таблице указаны (в единицах аем с точностью до сотых долей) массы пяти модифицированных m^* и обычных m атомов стабильных изотопов вольфрама, причем m^* соответствуют максимальным значениям достаточно широких пиков спектра масс.

Таблица. Значения обычных и модифицированных масс атомов для пяти стабильных изотопов вольфрама

m^* (аем)	180.20	182.07	183.07	184.10	186.12
m (аем)	179.95	181.95	182.95	183.95	185.95
$\Delta m = m^* - m$ (аем)	0.25	0.12	0.12	0.15	0.17

Отметим, что приращение массы Δm , в соответствии с оценками [1], укладывается в ожидаемый диапазон значений m_{ee} масс (ee) - пар $0.04 \text{ аем} \leq m_{ee} \leq 0.04 \text{ аем}$. Отсутствие на аноде атомов вольфрама с обычными массами интерпретируется как следствие уменьшения энергии связи с материалом катода для модифицированных атомов вольфрама. Такое изменение энергии связи представляется естественным, поскольку захват массивных электронных пар (занимающих глубинные электронные состояния вблизи ядер и частично экранирующих их заряд) эквивалентен в химическом отношении переходу к атомам с меньшим зарядовым числом. Поскольку оценка нижней границы массы (ee) - пары $(m_{ee})_{\min} \approx 0.04 \text{ аем}$, не исключено, что модифицированные атомы захватили несколько (ee) - пар (не более четырех для основных изотопов W). Тогда в химическом отношении атомы основных изотопов вольфрама могут быть близки к атомам Hf, Yb, Er, Dy . Судя по молярной теплоте испарения, энергия связи для атомов указанных элементов меньше, чем у W .

Литература

[1] Кащенко М.П., Кащенко Н.М., *Низкотемпературный ядерный синтез: введение в проблему и ее концептуальное решение*, УГЛТУ, Екатеринбург, 2022, 180 с.

[2] Santilli R. M., *Foundations of Hadronic Chemistry. With Applications to New Clean Energies and Fuels*, Kluwer Academic Publishers, Boston-Dordrecht-London, 2001, 554 p.

[3] Кащенко М.П., Коваленко М.А., Печорский В.И., Купряжкин А.И., Кащенко Н.М., *Материалы 27 Российской конференции «Проблемы холодной трансмутации ядер химических элементов и шаровой молнии»*, ред. Пархомов А.Г., ИНЛИС, Москва, 2023, с. 159

МЕССБАУЭРОВСКИЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ СТАЛЕЙ ЭП823 И ЭП823-ДУО ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ В УСЛОВИЯХ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕАКТОРЕ БН600

К.А. Козлов¹, В.А. Шабашов¹, А.В. Козлов², В.В. Сагарадзе¹, В.Л. Панченко²,
А.Е. Заматовский¹, А.А. Никитина³

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

²Институт реакторных материалов, Заречный, Россия

³Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара, Москва, Россия

Методами мессбауэровской спектроскопии с резонансным детектированием и электронной микроскопии выполнено исследование влияния механических напряжений на эволюцию структуры при нейтронном облучении в ферритно-мартенситной стали ЭП823 и ее дисперсно-упрочненной оксидами иттрия и титана модификации ЭП823-ДУО. Облучение образцов в виде твэльных трубок осуществлялось в реакторе на быстрых нейтронах БН600 при температуре 505 °С с дозой ~ 85 сна. Механические напряжения создавались за счет помещенных внутрь твэльных трубок заполнителей, выполненных в виде стержней из аустенитных сталей с различной степенью радиационного набухания. В процессе облучения происходило набухание аустенитных сталей, которое приводило к и изменению размеров, как самих заполнителей, так и трубки, в которую они были помещены.

Ранее [1] было показано, что при облучении стали ЭП823 происходит распад твердого раствора, сопровождающийся уменьшением эффективной концентрации хрома в α матрице, образованием карбидов и интерметаллидной χ -фазы. В настоящей работе установлено, что дополнительные механические напряжения, создаваемые при облучении сталей ЭП823 и ЭП823-ДУО, существенно ускоряют эти процессы, а изменение степени распада и параметров магнитной текстуры $A^{2.5} : A^{1.6}$ имеют скоррелированный характер. Ускорение процессов распада, также как и увеличение параметра магнитной текстуры, определяется величиной механических напряжений и их анизотропией, характеризуемой различием значений относительной пластической деформации образца вдоль и поперек поверхности твэльной трубки.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура», № 122021000033-2)

Литература

[1] Kozlov K., Shabashov V., Kozlov A., Sagaradze V., Semyonkin V., Panchenko V., Zamatovskii A., Kataeva N., Nikitina A., *J. Nucl. Mater.* v. **558** (2022), art. 153384

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ И ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ

К.М. Ладейщиков, А.В. Козлов

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

Практически во всех энергетических ядерных реакторах в качестве конструкционных материалов используются аустенитные стали. Проблемой эксплуатации установок на быстрых нейтронах является изменение физико-механических свойств материалов оболочек твэлов.

В металлах и сплавах, находящихся под действием нейтронного облучения, устанавливается повышенная концентрация точечных дефектов (вакансий и междоузлий). Продолжительное действие нейтронного облучения приводит к эволюции данной системы, которая проявляется в перераспределении элементов (диффузия, образование обедненных зон, фазовые превращения, ползучесть под облучением), изменении химического состава из-за трансмутации элементов (ядерные превращения вследствие захвата нейтронов) и конгломерации вакансий (кластеры, газонаполненные пузырьки, вакансионные поры). Изменение микроструктуры приводит к изменению физико-механических свойств.

Решение задачи повышения срока эксплуатации твэлов в реакторах на быстрых нейтронах приводит к актуальности прогнозирования изменений физико-механических свойств, в частности, модулей Юнга и сдвига и реакторных сталей, для чего необходимо определить влияние условий эксплуатации на физико-механические свойства материала.

В работе представлены экспериментальные результаты исследований материалов оболочек твэлов до и после облучения в реакторе БН-600. Характеристики материала получены при определении характеристик упругости ультразвуковым динамическим резонансным методом в диапазоне температур от 25 до 700°C. Проведён анализ влияния условий эксплуатации и вызванных ими структурных изменений на изменение физико-

механических свойств стали типа X16H19.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ В КАЧЕСТВЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.С. Слободян, Е.А. Пестерев, А.Б. Марков

Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук

(sms.msc@yandex.ru)

В настоящее время высокоэнтропийные сплавы (ВЭА) рассматриваются в качестве конструкционных материалов для применения в ядерных реакторах нового поколения. Одной из основных проблем при их разработке, проектировании, изготовлении и эксплуатации является отсутствие радиационно-стойких сталей и/или сплавов для сосудов, работающих под давлением, промежуточных теплообменников и основных устройств. Кроме того, большая часть активных зон состоит в экспериментальных установках как из графита, так и из керамического топлива, что существенно ограничивает использование металлических конструкций для систем управления и сосудов под давлением. С учетом условий эксплуатации, выбор материалов для перспективных ядерных реакторов должен одновременно удовлетворять нескольким критическим характеристикам, включая стойкость к радиации (более 200 сна), высокотемпературной коррозии, водородному и жидкометаллическому охрупчиванию, ползучести, распуханию и термической усталости. Также они должны обладать высокотемпературной прочностью и стабильностью размеров. Для таких материалов требуется более полная оценка механических свойств, включая динамику ползучести, радиационное упрочнение и поведение при коррозионном растрескивании под напряжением. Термическая стабильность, особенно микроструктурная, имеет жизненно важное значение при длительной эксплуатации при высоких температурах. Также необходимо учитывать изменение температуры во время работы реактора. Таким образом, механические характеристики ВЭС необходимо оценивать после длительного старения, чтобы определить их стабильность при повышенных температурах.

По мнению некоторых исследователей, ВЭС демонстрируют «отличную» устойчивость к радиационному распуханию и повреждениям на различных структурных уровнях. Кроме того, они могут подвергаться воздействию высоких доз ионного облучения, примерно до 100 сна в год. Ключевой причиной этого явления названа «вялая» диффузия. В результате, движение атомов, имплантированных облучением, сдерживается. Более того, более высокие напряжения на атомном уровне способствуют механизму «самовосстановления». Соответственно, ВЭС характеризуются улучшенной радиационной стойкостью благодаря структурным особенностям, особенно химическому беспорядку, и уникальному межузловому искажению решетки. Они сохраняют большую фазовую структурную стабильность при электронном или ионном облучении. С увеличением количества компонентов увеличивается вероятность ближней рекомбинации радиационных дефектов в многокомпонентном сплаве, что позволяет эффективно противостоять образованию пустот большим количеством вакансий. Однако, проведенный авторами сравнительный анализ требований к конструкционным материалам перспективных ядерных реакторов и результатов достигнутых для ВЭС выявили ряд проблем, затрудняющих их использование для этих целей в ближайшем будущем [1].

Литература

[1] Slobodyan M., Pesterev E., Markov A., *Materials Today Communications* **36** (2023), 106422.

ПОДБОР ЖАРОСТОЙКОГО СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛИВНОЙ ФИЛЬЕРЫ МАЛОГАБАРИТНОГО ПЛАВИТЕЛЯ ДИЗАЙНА

Н.А. Стаканова, Л.О. Пичугина, Ю.А. Карзанов, Е.В. Поляков

Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение
«Маяк» (mayak@po-mayak.ru)

В начале 2024 года планируются испытания третьей версии малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» для отверждения высокоактивных ЖРО в боросиликатное стекло.

Ранее проведенные испытания, первой и второй версии плавителя показали, что критическим узлом для обеспечения нормальной эксплуатации малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» в течении требуемого срока является индукционно нагреваемая сливная фильера.

Фильера и донный электрод изготавливаются из сплава ХН70Ю и при эксплуатации они подвергаются локальным воздействиям, критических (до 1250 °С), для данного сплава, температур, а также коррозионному и эрозионному воздействию со стороны расплава боросиликатного стекла. При испытаниях экспериментальной печи наблюдалась закупорка сливного канала фильеры за счет частичного расплавления донного электрода.

Для зарубежных плавителей не отмечено случаев выхода из строя электродов и сливного устройства, что, возможно, связано с наличием в сплаве Inconel 690 (отечественным аналогом которого, наиболее близким по составу, является сплав ХН70Ю) микроколичеств легирующих добавок, существенно повышающих коррозионную и термическую стойкость.

Таким образом, для надежной продолжительной эксплуатации плавителя дизайна ФГУП «ПО «Маяк» сохраняет свою актуальность проблема поиска жаростойкого сплава для изготовления сливной фильеры, превосходящего по характеристикам сплав ХН70Ю.

Для подбора подходящих сплавов доступных на Российском рынке, был проведен обзор существующих материалов, используемых в промышленности в качестве жаропрочных и жаростойких.

По результатам поисковой работы выделены три категории материалов, подходящих по своим эксплуатационным свойствам к условиям работы фильеры и донного электрода:

- 1) Классические жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы (ХН60Ю, 10ХН45Ю, Х23Ю5Т);
- 2) Керамико-металлические композиты (Ni-Cr-C);
- 3) Жаропрочные сплавы из платины (СКМ, ДУ Pt, ДУПС ПлРд10, ПлРд10).

По результатам оценки коррозионной стойкости каждого из типов материалов в расплавах стекла будет дана оценка их применимости в качестве конструкционного материала фильеры и донного электрода малогабаритного плавителя дизайна ФГУП «ПО

«Маяк».

СТРУКТУРА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЗУЧЕСТИ МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ ЧС-139 И ЭК-181

Н.В. Катаева¹, В.В. Сагарадзе¹, В.А. Завалишин¹, В.А. Сирош¹,
М.В. Леонтьева-Смирнова², А.А. Никитина²

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

²Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических
материалов имени академика А.А. Бочвара, Москва, Россия

В работе были выполнены длительные высокотемпературные испытания под нагрузкой российских перспективных реакторных мартенситных сталей ЧС-139 и ЭК-181. Образцы для испытаний на ползучесть были изготовлены из оболочек ТВЭЛ диаметром 6,9, 9,3 и 10,5 мм с толщиной стенки трубки 0,4 и 0,5 мм соответственно. В работе проведено сравнение характеристик ползучести для поперечных и продольных образцов. Определены характеристики длительной прочности, пластичности и скорости ползучести при 650, 670 и 700 °С и напряжениях 60, 80, 100 и 140 МПа.

В сталях ЧС-139 и ЭК-181 в исходном состоянии преобладает полигонизованная реечная мартенситная структура с высокой плотностью дислокаций (до 10^{11} см⁻²). По границам мартенситных реек и внутри них располагаются карбиды типа $Me_{23}C_6$ размером 50...200 нм. Имеются также дисперсные карбиды типа VC (размером ~5 нм) внутри мартенситных реек.

После высокотемпературного воздействия (испытаний на ползучесть) в структуре всех сталей произошло разрушение части реечных границ и увеличение ширины реек, уменьшение плотности дислокаций, формирование блочной и субзеренной структуры, зарождение новых зерен. В составе стали ЧС-139, как наиболее легированной по углероду и другим карбидообразующим элементам, границы всякого рода (рейки, блоки, субзерна, зерна) стабилизированы карбидами, образующимися во время отпуска. Поэтому сталь ЧС-139 показывает наилучшие результаты при испытании на ползучесть по сравнению со сталью ЭК-181.

В работе было показано, что продольные образцы из стали ЧС-139, изготовленные из трубки диаметром \varnothing 9,2 мм с толщиной стенки 0,55 мм, обладают более высоким сопротивлением ползучести по сравнению с продольными образцами, изготовленными из трубки диаметром \varnothing 6,9 мм с толщиной стенки 0,4 мм. Поперечные образцы из стали ЧС-139, изготовленные из трубки диаметром \varnothing 6,9 мм с толщиной стенки 0,4 мм, обладают более высокой длительной прочностью при высокотемпературных испытаниях при 700 °С. А при испытаниях при 670 °С более высокие значения длительной прочности у поперечных образцов, изготовленных из трубки диаметром \varnothing 10,5 мм с толщиной стенки 0,5 мм.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура», № 122021000033-2)

СТРУКТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ В ЧАСТИЧНО СТАБИЛИЗИРОВАННОМ ДИОКСИДЕ ЦИРКОНИЯ.

Н.С. Кирилкин¹, Т.Н. Вершинина¹, Ж. О'Коннелл², В.А. Скуратов¹, В.А. Болтуева³,
С.А. Гынгазов³

¹Объединенный Институт Ядерных Исследований, г. Дубна, Россия (kirilkin@jinr.ru)

²Центр просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, Университет
им. Н.Манделы. Порт-Элизабет, Южно-Африканская Республика

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск,
Россия

Материалы на основе ZrO_2 находят широкое применение во многих областях науки и техники. Характерными особенностями этих керамиков являются высокая радиационная стойкость, тугоплавкость, низкая теплопроводность, высокая химическая стойкость и механическая прочность. Одним из возможных применений диоксида циркония является использование его в качестве инертной матрицы для ядерного топлива [1,2], а также в качестве матрицы, подходящей для долговременного хранения высокоактивных отходов и их трансмутаций [3]. Помимо этого, предлагается использовать частично стабилизированный диоксид циркония в качестве добавки в матрицу ядерного топлива устойчивого к аварийным ситуациям от англ. accident tolerant fuel) [4].

В рамках данной работы рассматривается влияние облучения высокоэнергетичными ионами Хе с энергией 167 МэВ и ионами Вi с энергией 710 МэВ на поликристаллы ZrO_2 –3мол.% Y_2O_3 . В исходном состоянии фазовый состав представлен тетрагональной t-фазой с параметрами кристаллической решетки $a = 3.607\text{\AA}$ и $c = 5.175\text{\AA}$. При облучении быстрыми тяжелыми ионами происходит образование метастабильной тетрагональной фазы t'' ($c/a_f = 1$, где $a_f = a/\sqrt{2}$), доля которой растет по мере увеличения дозы облучения. При этом, аморфизация не наблюдается даже при самых высоких флюенсах. Электронно-микроскопические исследования показали, что воздействие быстрых тяжелых ионов приводит к образованию специфических радиационных повреждений - латентных треков. Установлено, что метастабильная тетрагональная фаза t'' обладает большей радиационной стойкостью по сравнению с t фазой.

Литература

1. Gong W.L., Lutze W., Ewing R.C., *Journal of Nuclear Materials*. 2000. № 2–3(277). С. 239–249.
2. Pöml P., Konings R.J.M., Somers J., Wiss T., de Haas G.J.L.M., Klaassen F.C., *Comprehensive Nuclear Materials*. 2012. (3). С. 237–256.
3. Heimann R.B., Vandergraaf T.T., *Journal of Materials Science Letters*. 1988. № 6(7). С. 583–586.
4. Mohamad A., Gong B., Yao T., Wagner A.R., Benson M.T., *Journal of Nuclear Materials*. 2021. (544). С. 152691.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЛАЗМО-ХИМИЧЕСКОГО ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

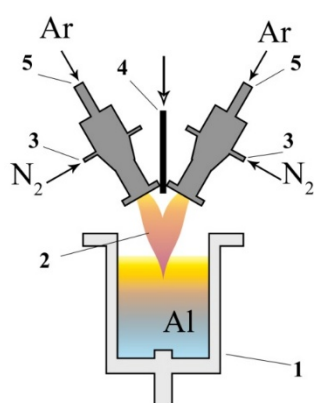
Г.Н. Чурилов^{1,2}, Г.А. Глушченко¹, Н.С. Николаев¹, Н.Г. Внукова^{1,2}, В.И. Елесина^{1,2}

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

В работе представлено устройство на основе двухструйного плазматрона. Одна струя используется для введения вещества, восстанавливающего металл в оксидной пленке, а другая – для введения композитной составляющей.



(а)



(б)

Рисунок. Схематическое изображение двухструйного плазматрона (а): 1 – графитовый тигель, 2 – дуговой разряд, 3 – тангенциальный ввод изолирующего газа, 4 – капилляр для подачи вещества, 5 – ввод плазмообразующего газа; фотография плазматрона в работе (б)

Работа устройства продемонстрирована на примере введения бора в алюминий. Как известно, сплавы и композиты на основе бора используются в атомной энергетике для ослабления потока тепловых нейтронов (сечение поглощения тепловых нейтронов бором 3600 барн). С помощью устройства получен композитный материал (алюминиевый сплав с равномерно распределенным в нем бором). Плазменное введение бора в алюминий осуществили, используя два последовательно включенных плазменных генератора, разработанных нами ранее [1]. В качестве плазмообразующего газа, являющегося одновременно и транспортным, для введения бора использовался аргон. В качестве буферного и транспортного газа для введения вещества восстанавливающего алюминий в оксидной пленке (фуллерены) использовался гелий. Показано, что вводимые частицы бора, обработанные плазмой, имеют средний размер 4–11 нм, в то время, когда средний размер исходных частиц 100–1000 нм.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института физики им. Киренского ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр СО РАН". Авторы благодарят А.М. Жижаева, А.М. Токмина, В.А. Лопатина, М.Р. Кастюк за проведение аналитических исследований, в т.ч. с использованием оборудования Центра коллективного пользования Красноярского научного центра СО РАН.

Литература

[1] Churilov G.N., *International Journal of Hydrogen Energy*. V.47 (2022), №11, p.7299

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ ТИПА X16-N19 ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ НА РАННЕЙ СТАДИИ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ

И.А. Портных¹, В.Л. Панченко¹, А.Е. Устинов¹, А.В. Козлов¹
¹АО «ИРМ», г. Заречный Свердловской обл., Россия (Portnyh_IA@irmatom.ru)

Исследования оболочек твэлов проводятся, в основном, по программам обоснования безопасности при штатной или опытной эксплуатации ТВС реакторов, поэтому выбираются образцы с максимальными параметрами эксплуатации. Разработка моделей предполагает описание процессов с начальной стадии. Материалов для верификации этой стадии не хватает. Целью экспериментальных исследований эволюции микроструктуры при нейтронном облучении стали типа X16-N19 х.д., используемой в настоящее время в качестве основного материала оболочек твэлов реакторов БН, было получение результатов в широком диапазоне условий для верификации разрабатываемых моделей на различных стадиях эксплуатации твэлов.

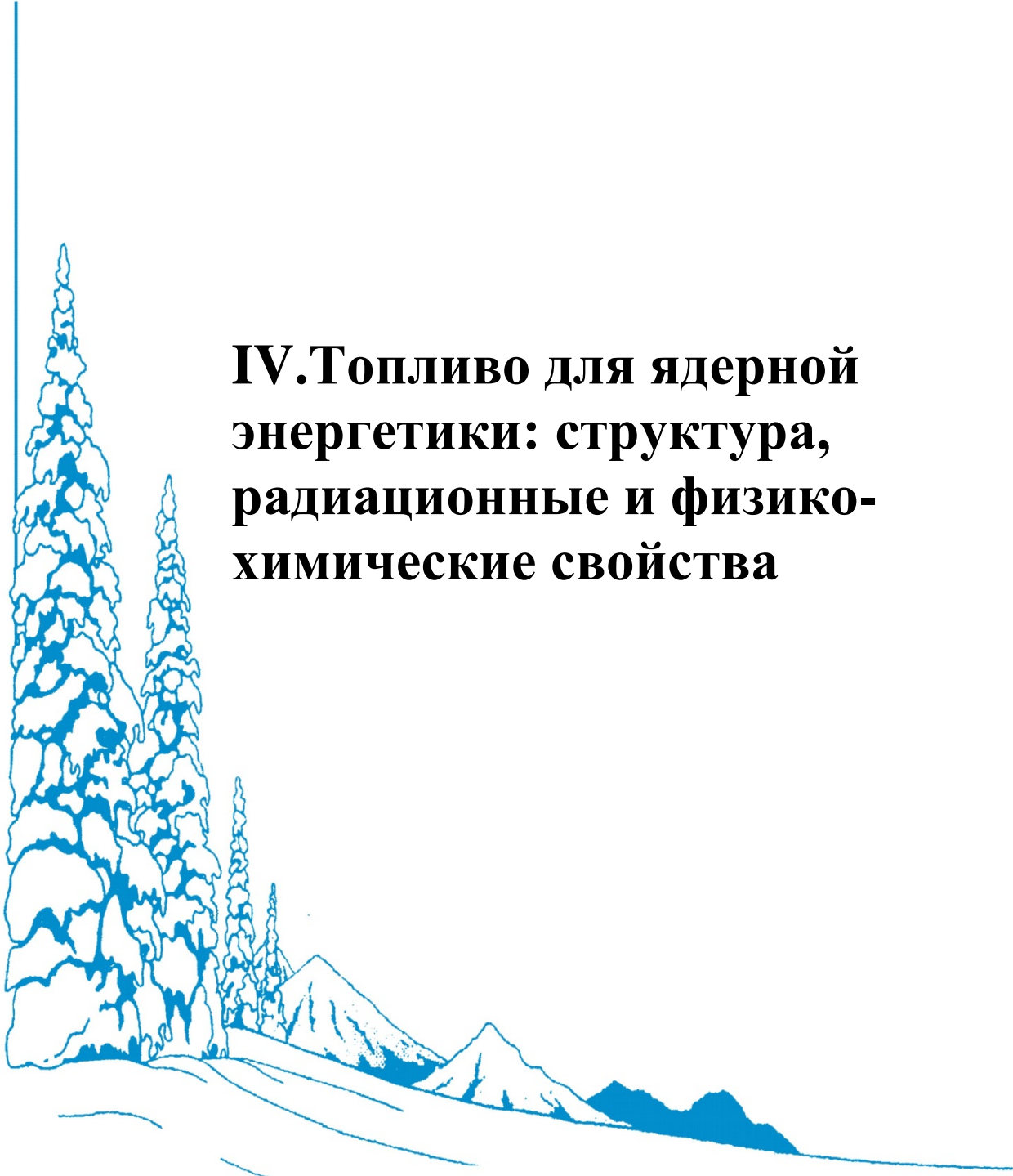
Исследования проводились на образцах оболочки одного твэла, чтобы максимально снизить возможность влияния исходной неоднородности материала, после эксплуатации в реакторе БН-600. Скорость смещений варьировалась в пределах двух порядков при максимально возможно близкой температуре, было исследовано шесть образцов. Также была исследована микроструктура необлученного образца стали типа X16-N19 х.д., полученного по той же технологии, что и облученный материал.

В качестве основных исследуемых элементов микроструктуры, предназначенных для верификации модели использовались: дислокационная структура – ее качественное описание и количественное (плотность дислокаций, где это возможно); характеристики пористости (качественно – связь с другими элементами, количественно – гистограмма); выделения вторых фаз – качественно (тип, состав, решетка, связь с другими элементами).

Показано, что облучение при температуре $\sim 370^\circ\text{C}$ со скоростью смещений $G=0,05 \times 10^{-7}$ сна/с приводит к трансформации исходной ячеистой дислокационной структуры в сетку отдельно расположенных дислокаций, при этом частично сохраняются признаки ячеистой структуры в виде слабо упорядоченных скоплений взаимодействующих дислокаций. В структуре наблюдаются радиационно-индуцированные дислокационные петли с дефектом упаковки размером от 5 до 50 нм. В материале происходит расслоение твердого раствора: никель и кремний сегрегируют на дислокации, границы зерен. Из сегрегирующих на дислокации элементов образуется радиационно-индуцированная γ' -фаза. Наблюдаются мелкие газо-вакансионные пузырьки, образующиеся преимущественно на дислокациях и дислокационных петлях, размер пузырьков не превышает 3 нм.

Увеличение скорости генерации атомных смещений от $0,77 \times 10^{-7}$ сна/с до $7,48 \times 10^{-7}$ сна/с качественно не меняет структурную картину. Наряду с мелкими порами появляются более крупные поры, выделяющиеся в две системы пор «среднего» и «крупного» типоразмеров. Помимо γ' -фазы наблюдаются выделения G – фазы и сложных ГЦК карбидов как в матрице, так и по границам зерен.

В работе было принято приближение, что температура облучения в исследованном диапазоне ($370 \dots 410$) $^\circ\text{C}$ одинакова, и построены зависимости характеристик различного типа пор (средний размер, концентрация) от скорости генерации атомных смещений. Получена зависимость интегральной пористости материала от скорости генерации атомных смещений. С ростом скорости набора дозы наблюдается рост значений пористости от сотых долей процентов до $\sim 0,6$ % при скорости набора дозы $7,48 \times 10^{-7}$ сна/с.



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

ОЦЕНКА МОМЕНТНЫХ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИМЕСИ ЛАЙНЕРА В ТОПЛИВЕ УСТРОЙСТВ MAGLIF

Ж.Б. Сексембаев

Астана, Казахстан, (jandos_s90@mail.ru)

Одной из проблем термоядерных устройств является рациональный подбор материала стенок «реактора». Эти поверхности реактора расположены на «передовой». В экстремальных условиях горения в самой топливной смеси может присутствовать примесь материала стенок, влияющая на характер горения. При этом, электронная составляющая примеси создает дополнительные радиационные потери, и поэтому использование материала с низким Z позволяет их уменьшить. Однако ионная составляющая может активно участвовать в производстве энергии взаимодействуя с частицами топлива. Это влияет на эффективность горения в зависимости от температуры области горения топлива.

В данной работе рассматривается частный вид реактора – устройство MagLIF, который детально описывается в [1, 2]. Здесь металлический лайнер с топливом внутри подвергается сильноточковому разряду, вследствие чего система расплавляется и за счет магнитного обжатия, вызванным током, превращается в плазменный шнур, на который с торца лайнера направляется строго синхронизированный по времени лазерный импульс. За счет этого в системе плазменного шнура происходит дополнительное обжатие и запускается волна (область) термоядерного горения. В этой сжатой области, плотность и температура которой достигает порядка значений в 10^{23} *частиц/см³* и десятки *кэВ*, кроме частиц топлива будут присутствовать частицы материала стенок металлического лайнера. Полностью ионизированная примесь будет активно вовлечена в процесс горения сжатой области.

В этой работе на основе картины горения, представленной в работе [3] проводится оценка моментных допустимых (пороговых) значений примеси лайнера для эффективного горения в экстремальных условиях устройств MagLIF. Этот моментный показатель показывает какую максимальную долю в топливе может составить примесь лайнера в определенный момент времени для сохранения роста температуры области горения с «загрязненным» топливом. На примере расчетов горения традиционных видов топлива в устройстве MagLIF установлено, что наиболее энергоэффективный вид топлива DT допускает присутствие примесей бериллиевого лайнера в топливе до значений в несколько десятков процентов. Также рассмотрены и другие виды топлива DD и D³He.

Литература

- [1] Ворончев В.Т., Кукулин В.И., *Ядерная физика*. т.73 (2010), №1, с.41-61
- [2] Кукулин В.И., Ворончев В.Т., *Ядерная физика*. т.73 (2010), №8, с.1418-1426
- [3] Seksembayev Zh., Kukulini V., Sakhiyev S., *Phys. Scr.* vol.93 (2018), 12 p

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОРИЕНТАЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ОБЛУЧЕННОГО ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА

В.Ю. Ярков^{1,2}, В.И. Пастухов^{1,2}, С.А. Аверин¹, А.Е. Устинов^{1,2}

¹АО Институт реакторных материалов, г. Заречный, Россия

²ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

До настоящего времени сплавы на основе циркония являются актуальным материалом в различных областях промышленности, в частности атомной. Уникальные физико-механические, коррозионные свойства позволяют применять сплавы циркония в агрессивных условиях активной зоны тепловых ядерных реакторов [1...2].

Одной из основных проблем сплавов на основе циркония, применяемых в атомной энергетике является высокая склонность материала к наводороживанию. Вследствие низкой растворимости водорода в кристаллической решетке α -Zr (0,034 ppm при 293 K), его проникновение в изделие приводит к выделению гидридов, что может привести к серьезной деградации механических свойств и, соответственно, к возможности повреждения и разрушения изделий во время эксплуатации в ядерном реакторе [3].

Данная работа посвящена возможности применения метода EBSD (ДОЭ) к анализу изменения структурно-фазового состояния изделий из сплава Zr-2,5% Nb после эксплуатации в реакторах на тепловых нейтронах [4].

В качестве материала исследования использовались образцы из сплава Zr-2,5%Nb после эксплуатации в ядерном реакторе на тепловых нейтронах (теплоноситель – вода). Исследования были выполнены на сканирующем электронном микроскопе MIRA3 FEG-SEM, оснащенный детектором обратно отраженных электронов (EBSD) Oxford Instruments Nordlys Nano и программой для обработки полученных результатов.

В результате проведенных исследований с помощью сканирующей электронной микроскопии и ориентационной микроскопии (EBSD) показана возможность определения параметров структуры (размер зерна, доля рекристаллизации сплава) и текстуры, а также выявление фазового состава материала (α -Zr, β -Zr, β -Nb, ZrH и ZrH_{1,66}) в зависимости от участка изделия (деформированная труба или зона сварного соединения).

Литература

- [1] Dobromyslov A.V. *Structure of zirconium and its alloys*, Ekaterinburg, 1997, p. 230
- [2] Douglas D. *Metallurgy of zirconium*, M. Atomizdat, 1975, p. 250
- [3] Zaimovsky A.S. *Zirconium alloys in nuclear energy*, M. Energoatomizdat, 1994, p. 256
- [4] Lobanov M.L. *Methods for studying textures in materials: textbook*, Ekaterinburg, 2014, p. 115

ПОИСК ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРИСТОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОДОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ РЕАКЦИИ Pu И Np

Е.Ю. Татауров, Т.С. Волкова, В.В. Рудских
ФГУП «ПО «Маяк», г. Озерск, РФ, *clp@po-mayak.ru*

Одним из направлений деятельности ФГУП «ПО «Маяк» является переработка отработавшего ядерного топлива (далее – ОЯТ). Переработка ОЯТ основана на использовании Пурекс-процесса, состоящего в растворении ОЯТ в азотной кислоте, совместной экстракции U и Pu 30 % раствором трибутилфосфата в насыщенных синтетических углеводородах с последующей восстановительной экстракцией Pu в водную фазу. В качестве восстановителя Pu опробовано большое количество реагентов: гидразин, гидросиламин-нитрат, сульфамат $Fe(II)$, азотистая кислота, $U(IV)$, аскорбиновая кислота, водород и др. Из промышленно применяемых восстановителей выгодно отличается $U(IV)$ тем, что может быть получен непосредственно в процессе переработки ОЯТ.

$U(IV)$ на ФГУП «ПО «Маяк» нарабатывают электрохимическим методом, основанном на пропускании постоянного электрического тока через пары электродов (анод-катод), смонтированных в виде электродных блоков. Катод выполнен из титана и имеет жалюзийную конструкцию. Анод является сборной конструкцией (анодная сборка), состоящей из анодной рамки, в которую установлены цилиндрические титановые электроды. Электрод представляет собой титановый стержень, на котором сформирован слой пористого титана (титановая заготовка). Для придания коррозионной стойкости на пористый слой наносится покрытие на основе оксидов сурьмы и олова.

Для вновь разрабатываемых анодных сборок требовалось подобрать технологию формирования пористого титанового слоя, обеспечивающую серийный выпуск титановых заготовок. С этой целью были рассмотрены три технологии:

- селективное лазерное плавление (далее – SLM);
- прямое лазерное осаждение металлов (далее – LMD);
- горячее изостатическое прессование (далее – ГИП).

Анодное сурьмянисто-оловянное покрытие формировали по штатной технологии, разработанной на ФГУП «ПО «Маяк».

Качество сформированного пористого слоя и толщину анодного покрытия исследовали с применением микроскопических методов анализа, для этого титановую заготовку с нанесенным покрытием фрагментировали и анализировали торцевой спил.

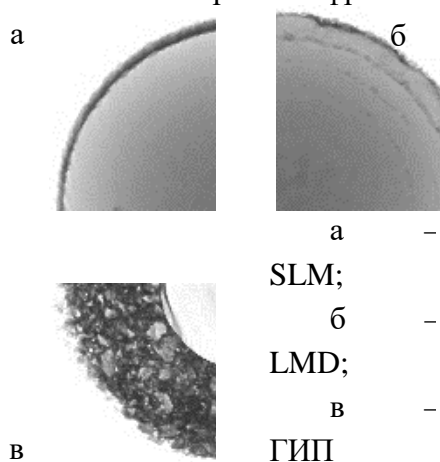
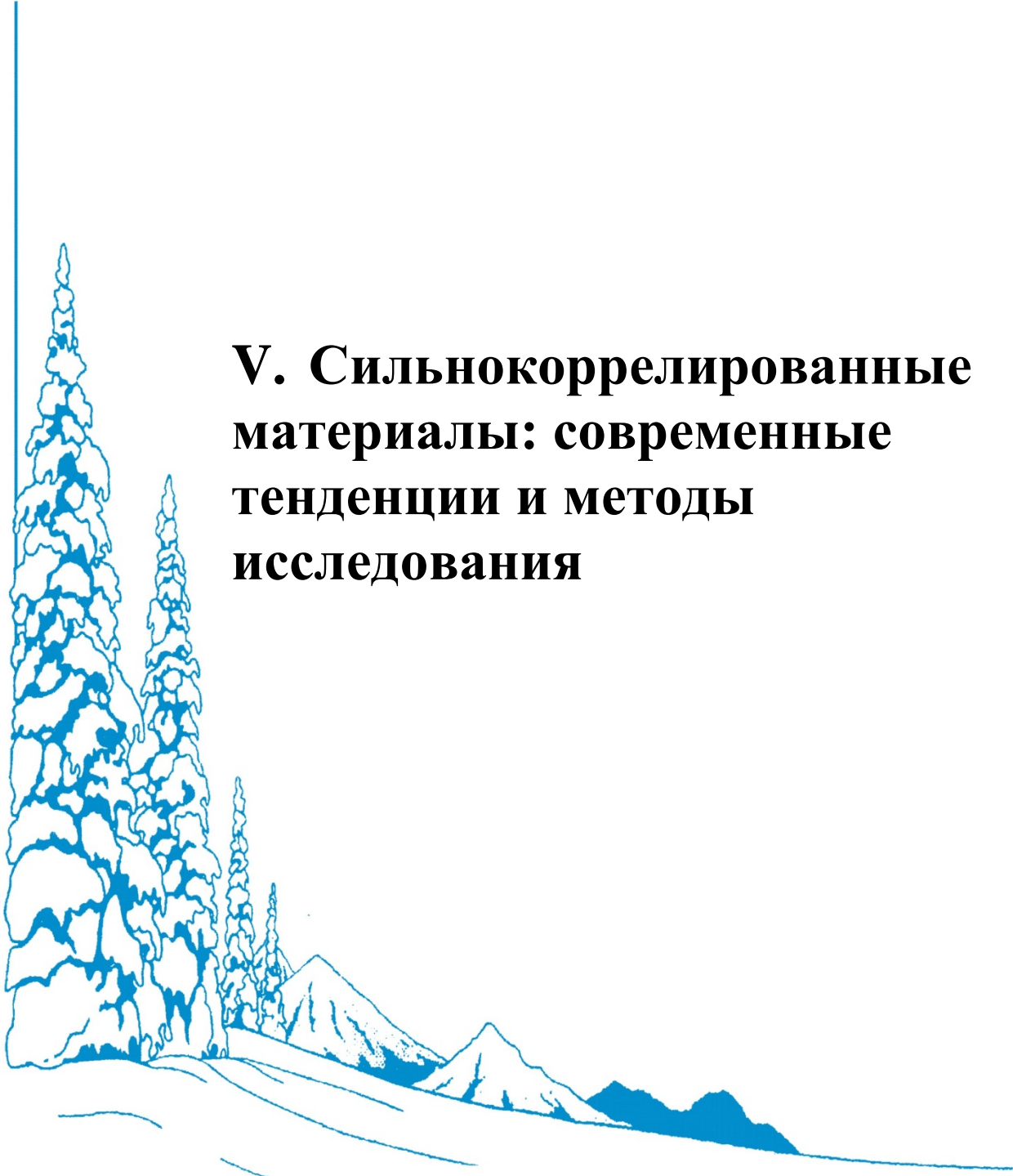


Рисунок 1 – Торцевые спилы исследуемых титановых заготовок

По результатам микроскопических исследований было установлено, что рабочий пористый слой у титановых заготовок, выполненных по SLM и LMD (рис. 1 а, 1 б) технологиям не превышает 50 мкм, тогда как основа изготовленная с использованием ГИП имеет полностью пористый рабочий слой (рис. 1в) толщиной примерно 3 мм.

На каждой титановой заготовке удалось сформировать анодное покрытие толщиной более 100 мкм. Однако, у заготовок, изготовленных по SLM и LMD технологиям, анодное покрытие сформировалось только на поверхности пористого слоя. В свою очередь, анодное покрытие, нанесенное на пористый слой, изготовленный методом ГИП, сформировалось во всем объеме пористого слоя.

Таким образом, технология ГИП наиболее пригодна для изготовления пористой части электродов. В настоящий момент, партия данных электродов проходит испытания в составе модельного аппарата электрохимического восстановления урановых растворов.



V. Сильнокоррелированные материалы: современные тенденции и методы исследования

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ИЗ ДРУЖЕСТВЕННЫХ СТРАН, АДАПТИРОВАННОЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ

М.Ф. Ахметов

ООО «Мелитэк» (*marat.akhmetov@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 применения 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.

Часть аналитического оборудования, которое прошло соответствующую доработку и адаптацию к требованиям заказчиков, поставляется под маркой «MELYTEC». В частности, под этой маркой поставляются волнодисперсионные рентгенофлуоресцентные спектрометры, испытательные машины, электронные микроскопы, оптико-эмиссионные и масс-спектрометры с индуктивно-связанной плазмой, анализаторы газообразующих примесей в металлах и керамике, системы компьютерной томографии.

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

НЕОБЫЧНЫЙ МАГНЕТИЗМ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С СИЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ КОРРЕЛЯЦИЯМИ: ДАННЫЕ НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И СОВРЕМЕННЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

П.С. Савченков, П.А. Алексеев

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия (e-mail: savch92@gmail.com)

Для редкоземельных соединений характерно наличие дальнего магнитного порядка, обусловленного взаимодействием периодически расположенных в кристаллической решетке локальных магнитных моментов редкоземельных ионов, обусловленных f-электронами. В докладе рассматриваются возможности формирования упорядоченного состояния в тех случаях, когда не приходится говорить о локальном моменте f-оболочки в

таким традиционным смысле.

Подобный случай реализуется в системах с синглетным основным состоянием редкоземельного иона. В таких системах при определённом соотношении между дипольным матричным элементом, связывающим синглет с вышележащим состоянием, и величиной межйонного взаимодействия на каждом узле кристаллической решётки может сформироваться наведённый магнитный момент и произойти одновременное упорядочение таких моментов. Подобное явление, называемое «наведённым» магнетизмом, рассмотрено в работе на примере интерметаллида PrNi. Приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований наведённого магнетизма в PrNi и систем на его основе. Прежде всего, анализируется информация, которая может быть извлечена из спектров магнитного неупругого рассеяния нейтронов, обсуждаются развитые теоретические и модельные представления.

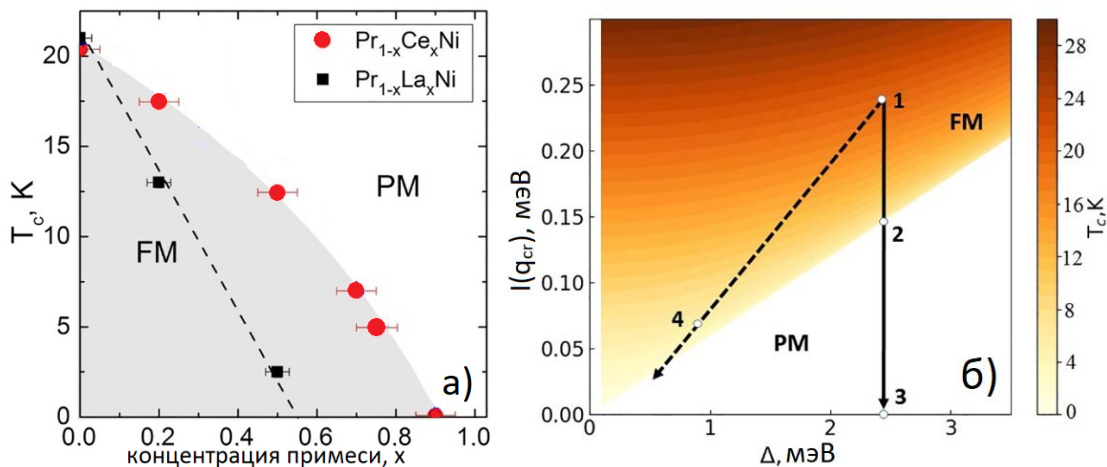


Рис.1. а) Зависимость температуры магнитного упорядочения (T_C) от концентрации примеси x в системах $Pr_{1-x}La_xNi$ (черные квадраты) и $Pr_{1-x}Ce_xNi$ (красные кружки) [1]. Серым цветом обозначена область ферромагнитного состояния системы $Pr_{1-x}Ce_xNi$, которая значительно больше, чем в случае $Pr_{1-x}La_xNi$

б) Диаграмма магнитных состояний систем на основе PrNi [1]. Представлена взаимосвязь между T_C , параметром обменного взаимодействия $J(q)$ и величиной расщепления в кристаллическом поле (Δ). Сплошной линией отмечено изменение T_C с увеличением концентрации La в $Pr_{1-x}La_xNi$, пунктирной - изменение T_C с увеличением концентрации Ce в $Pr_{1-x}Ce_xNi$. Точки соответствуют соединениям: 1. PrNi, 2. $Pr_{0.5}La_{0.5}Ni$, 3. LaNi, 4. $Pr_{0.25}Ce_{0.75}Ni$.

Особое внимание уделено объяснению влияния дефектов различной природы в редкоземельной подрешетке (немагнитная примесь La - $Pr_{1-x}La_xNi$ и промежуточно-валентная (ПВ) Ce - $Pr_{1-x}Ce_xNi$) на условия возникновения дальнего магнитного порядка (см. Рис.1).

Еще одним типом «необычного» магнетизма, рассмотренным в докладе, является наблюдаемое в ряде интерметаллических соединений Eu, на первый взгляд, аномальное сосуществование магнитного порядка и быстрых спиновых флуктуаций, обусловленных промежуточно-валентным состоянием редкоземельного иона (см Рис.2). Представлены результаты экспериментов по изучению влияния высоких гидростатических давлений (до 15 ГПа) на дальний магнитный порядок в $EuCu_2Si_2$ и приводятся свидетельства однородности промежуточно-валентного состояния Eu в $EuCu_2(Si_xGe_{1-x})_2$ [1,2]. Опираясь на комплексный анализ результатов совокупности нейтронных экспериментов [1,2] и расчёты в рамках теории наведённого магнетизма, для $EuCu_2(Si_xGe_{1-x})_2$ предлагается реалистичное описание механизмов формирования упорядоченного антиферромагнитного состояния на фоне однородной промежуточной валентности.

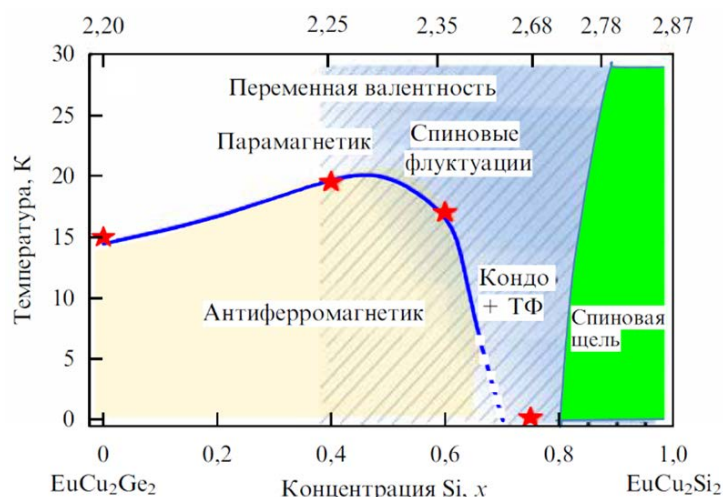


Рис.2. Магнитная фазовая диаграмма $\text{EuCu}_2(\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x})_2$. Звезды соответствуют значения T_N , полученным из экспериментов по дифракции нейтронов, сплошная линия, соответствует фазовой границе между АФМ и парамагнитным состоянием. Область синего цвета соответствует спин-флуктуационному режиму, область зеленого цвета — режиму спиновой щели. Штриховкой обозначена область с экспериментально обнаруженными спиновыми флуктуациями — наблюдается квазиупругий сигнал в нейтронном спектре. На верхней шкале отмечены значения валентности Eu.

Литература

[1] Savchenkov, P. S., Alekseev, P. A. (2023). Uncommon Magnetism in Rare-Earth Intermetallic Compounds with Strong Electronic Correlations. *Crystals*, 13(8), 1238.

[2] Savchenkov, P. S., Alekseev, P. A., Podlesnyak, A., Kolesnikov, A. I., & Nemkovski, K. S. (2018). Intermediate-valence state of the Sm and Eu in SmB_6 and EuCu_2Si_2 : neutron spectroscopy data and analysis. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 30(5), 055801.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУТЕЙ МИГРАЦИИ КАТИОНОВ Li^+ В ЛИТИЙ-ВАНАДИЕВОЙ БРОНЗЕ $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ И 0.3)

Е.А. Шерстобитова¹, Н.В. Проскурнина¹, В.И. Воронин¹, М.С. Щелканова²,
Г.Ш. Шехтман²

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

²Институт Высокотемпературной Электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Одним из наиболее интенсивно изучаемых в последнее время катодных материалов является литий-ванадиевая бронза $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$. Высокие емкостные показатели $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8 \sim 374$ мАч/г [1] связаны с возможностью вместить не менее трех дополнительных ионов Li^+ на формульную единицу [2]. Тем не менее, механизм ионного переноса в $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ до сих пор неизвестен, несмотря на его ключевую роль в формировании электрохимических свойств. Известно, что структурные исследования $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ осложнены малой чувствительностью рентгеновских лучей к легким элементам — кислороду и литию. С другой стороны, ванадий, обладая малым сечением когерентного рассеяния нейтронов, практически не виден в дифракционных экспериментах на нейтронных пучках. В данной работе кристаллическая структура $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ и 0.3) изучалась в рамках комплексного подхода с использованием рентгеноструктурного и

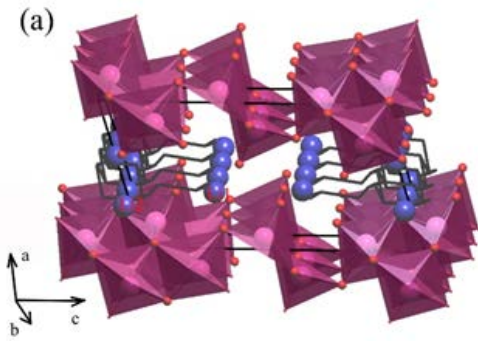


Рис.1. Элементарная ячейка и карта проводимости в кристаллической структуре $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2, 0.3$).

нейтронографического анализа. Комбинированная обработка данных дифракции рентгеновских лучей и нейтронов по методу Ритвельда на исследуемых образцах позволила уточнить структуру соединения и определить распределение атомов лития по кристаллографическим позициям. Методом разбиения Вороного-Дирихле при помощи комплекса структурно-топологических программ TOPOS [3] проведен анализ путей миграции катионов лития в структуре $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ и 0.3). Получена карта систем пустот и каналов. На рис. 1 приведена возможная карта проводимости для катионов Li^+ . Показано, что проводимость в $\text{Li}_{1+x}\text{V}_3\text{O}_8$ ($x = 0.1, 0.2$ и 0.3) является одномерной вдоль кристаллографического направления $[010]$ и обусловлена прямым перескоком катионов Li^+ , что

согласуется с теоретическими расчетами (рис.1 b).

Результаты исследований получены с использованием УНУ «Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ» в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «ПОТОК», №122021000031-8).

Литература

- [1] S. Panero, M. Pasquali, G. Pistoia, J. Electrochem. Soc.: Accelerated Brief Communication. **130**(1983), p.1225.
- [2] A. Pan, J. Liu, J.-G. Zhang, G. Cao, W. Xu, Z. Nie, X. Jie, D. Choi, B.W. Arey, C. Wang, S. Liang, *J. Mater. Chem.*, **21**(2011), p.1153.
- [3] V.A. Blatov, A.P. Shevchenko, D.M. Proserpio, *Cryst. Growth Des.*, **14**(2014), p.3576.

ЭФФЕКТ СПИНОВОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНОМ ИНТЕРМЕТАЛЛИДЕ Ho_3Co

А.Ф. Губкин^{1,2}, А.А. Ваулин¹, А.Ф. Прекул¹, Н.В. Баранов^{1,2}

¹Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

²УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Соединение Ho_3Co кристаллизуется в орторомбическую структуру с пространственной группой $R\bar{m}2a$ и демонстрирует два последовательных магнитных фазовых перехода при температуре Нееля $T_N = 22$ К и при температуре $T_t = 9$ К [1]. В области температур ниже $T_t = 9$ К в антиферромагнетике Ho_3Co наблюдается слабая спонтанная намагниченность неизвестной природы. В настоящей работе проведено полное количественное описание сложной несоизмеримой магнитной структуры соединения Ho_3Co при помощи формализма магнитных суперпространственных групп и установлен механизм возникновения слабого ферромагнетизма в области низких температур.

Из данных нейтронной дифракции показано, что при охлаждении ниже температуры Нееля в Ho_3Co возникает несоизмеримая магнитная структура, которая представляет собой набор скошенных поперечных волн спиновой плотности, описываемых волновыми векторами $\mathbf{k}_C = 0$ и $\mathbf{k}_{IC} = \mu\mathbf{b}_1$, $\mu = 0.133$ и магнитной суперпространственной группой

$Pm'cn(00g)000$. При охлаждении ниже $T_t \approx 11$ К гармоническая волна спиновой плотности эволюционирует по направлению к магнитной структуре типа «антифазных доменов». Развитие меандра приводит к появлению параллельных спиновых пар в антиферромагнитной цепочке, чей период несоизмерим с периодом кристаллохимической ячейки. Минимизация энергии несоизмеримой антиферромагнитной цепочки с параллельными спиновыми парами при понижении температуры происходит путем формирования промежуточного состояния между несоизмеримой и соизмеримой фазами за счет периодического переворота одного спина из пары на одном периоде волны магнитной структуры. Данный процесс приводит к раскомпенсации антиферромагнитной цепочки и известен в литературе под термином «*discommensuration*», а соответствующая магнитная фаза называется фазой спинового проскальзывания [2].

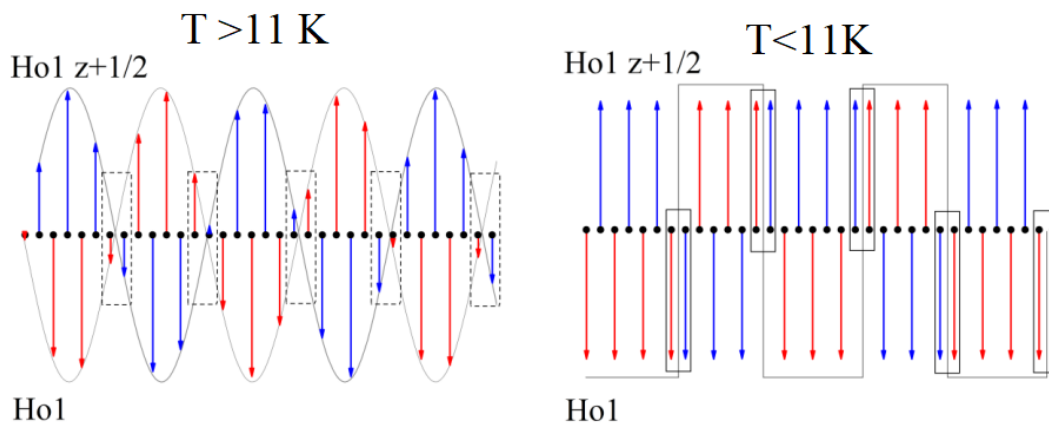
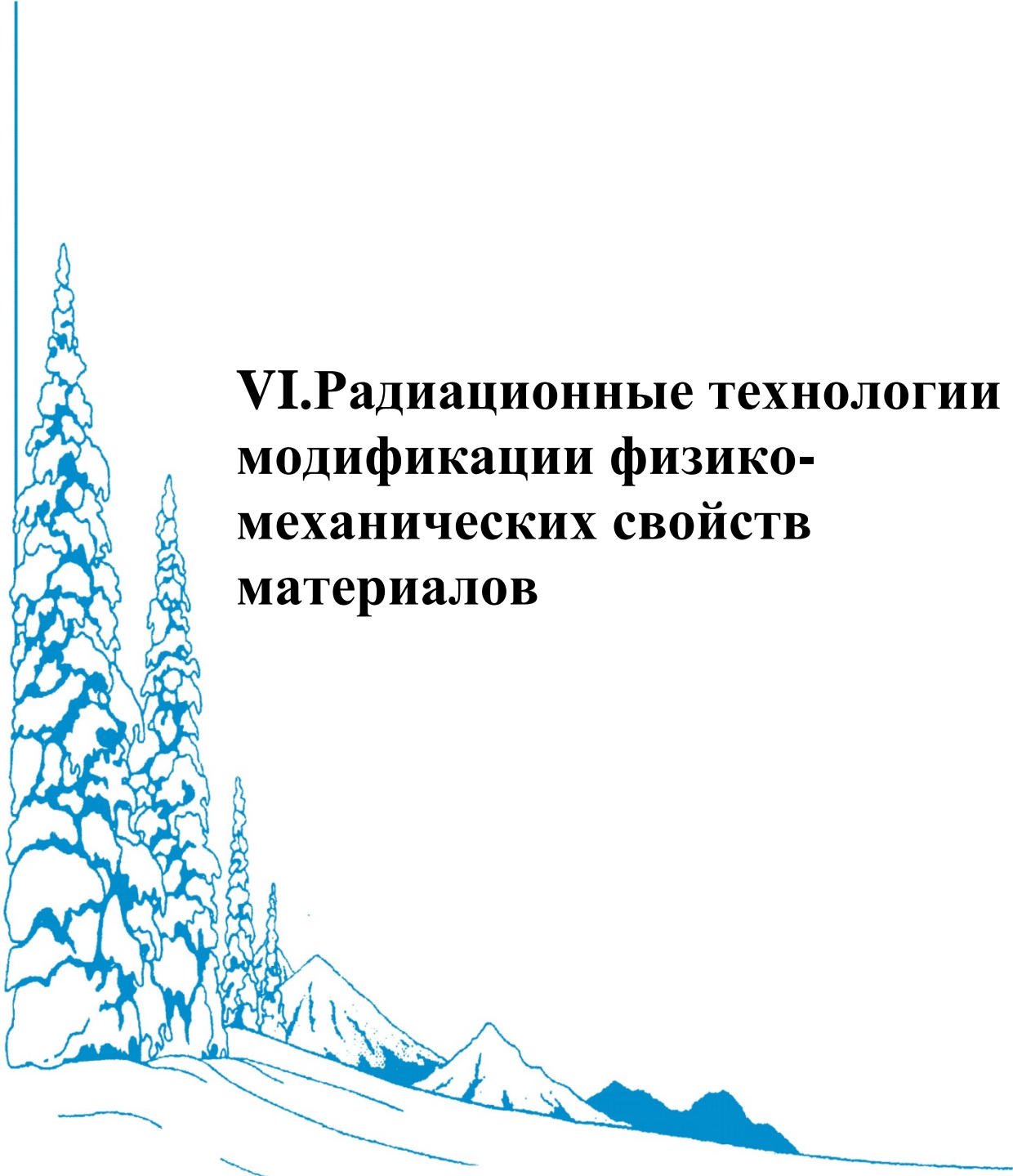


Рисунок 1. Визуализация несоизмеримой волны спиновой плотности при температурах выше и ниже $T_t \approx 11$ К .

Литература:

- [1] Baranov N.V. et al, *Journal of Physics: Condensed Matter* т.**17** (2005), №. 21, с.3445.
 [2] Choi S. M. et al. *Physical review letters* т.**87** (2001), №.10, с.107001



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

ВЛИЯНИЕ ПООЧЕРЕДНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ O^+ И N^+ НА СОСТАВ, СТРУКТУРУ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6

В.С. Гладышева, В.Л. Воробьев, П.В. Быков, С.Г. Быстров, В.Я. Баянкин
УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Россия (rrytery@mail.ru)

Ионная имплантация представляет собой сложные взаимосвязанные физико-химические процессы. На сегодняшний день роль процессов физической и химической природы изучена недостаточно. В ранее нами проведенных исследованиях было показано, что накопление азота до концентраций 30-40 ат.% в поверхностных слоях титанового сплава ВТ6 при имплантации ионов N^+ определяется атомами титана [1]. Накопление азота сопровождается образованием нитрида титана TiN и его выделением в виде фазовых включений по всей поверхности. Проведенные сравнительные исследования позволили предположить о преобладающем влиянии процессов химической природы в формировании поверхностных слоев, в частности, химической активности атомов титана к имплантируемому азоту [1, 2]. Для подтверждения данного предположения в настоящей работе предлагается провести облучение титанового сплава ВТ6 поочередно вначале ионами O^+ , а затем ионами N^+ . Предварительное облучение ионами O^+ из-за более высокой химической активности кислорода к атомам титана должно привести к изменениям в процессах накопления имплантируемого элемента и формирования фазовых составляющих поверхностных слоев при последующем облучении ионами N^+ . В частности, атомы титана, связанные кислородом в оксиды в результате предварительного облучения ионами O^+ , будут в меньшей степени определять накопление азота и образование нитридных фаз, подтверждая роль процессов химической природы в формировании поверхностных слоев.

В данной работе проведено исследование химического состава, морфологии поверхности и электрохимических свойств титанового сплава ВТ6 в исходном состоянии, после облучения ионами O^+ и после поочередного облучения ионами O^+ и N^+ с дозами облучения 10^{18} и $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² ионов N^+ . Показано, что в условиях облучения ионами O^+ происходит интенсивное окисление атомов титана, сопровождающееся образованием оксидов и гидроксидов титана с размерами частиц от 100 до 200 нм. Установлено, что при последующем облучении ионами N^+ накопление азота и образование нитрида титана TiN осуществляется до меньших концентраций, чем без предобработки облучением ионами O^+ . Показано, что при электрохимических испытаниях в диапазоне от потенциала разомкнутой цепи до 500 мВ наблюдается снижение на порядок скорости окисления модифицированных образцов. При больших потенциалах испытаний токи анодного окисления модифицированных образцов превышают исходные значения, что может быть обусловлено окислением фаз нитрида и оксинитрида титана и ускорением анодного выделения кислорода и хлора вследствие повышенной электрокаталитической активности модифицированной поверхности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ ГЗ N 121030100002-0.

Литература

[1] Vorob'ev V. L., Bykov P. V., Kolotov A. A., Gilmutdinov F. Z., Averkiev I. K., Bayankin V. Ya. *Physics of Metals and Metallography*. V. **122** (2021), №. 12, P. 1213.

[2] Vorobyev V. L., Bykov P. V., Bystrov S. G., Kolotov A. A., Bayankin V. Ya. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures* (2023), Iss. 3, P. 29.

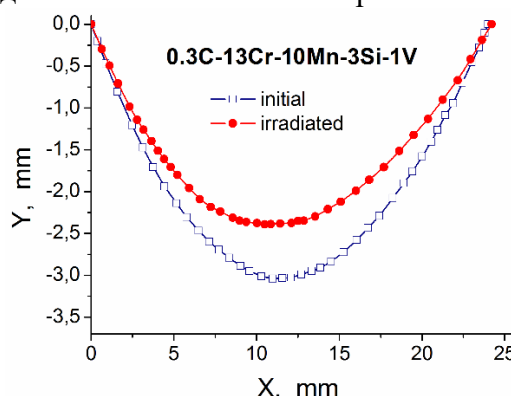
ИНИЦИИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ С ПОМОЩЬЮ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ

В.И. Бобровский, С.В. Афанасьев, В.И. Воронин, В.А. Казанцев, Н.В. Катаева,
В.Д. Пархоменко, Н.В. Проскурнина, В.В. Сагарадзе

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

В исследованиях воздействия облучения быстрыми нейтронами на никелид титана [1] ранее было показано, что такое облучение подавляет существующий в данном сплаве эффект памяти формы (ЭПФ), проявляясь помимо этого в аморфизации материала.

Известно, что в марганцевых аустенитных сталях, которым также присущ ЭПФ, его возникновение связано с формированием ε -мартенсита деформации или деформационным двойникованием и образованием кристаллов мартенсита новых ориентационных вариантов. При этом масштаб проявления ЭПФ существенно зависит от микроструктуры материала, а именно от наличия выделений нанокарбидов ванадия [2,3], возникающих в процессе искусственного старения сталей, сопровождающегося уходом углерода из матрицы. С другой стороны, было установлено, что нейтронное облучение может оказывать существенное воздействие на такие подсистемы нанокарбидов, что позволяло ожидать и в них влияния нейтронного облучения на ЭПФ.



Средняя линия боковой проекции образца в исходном состоянии и после облучения флюенсом быстрых нейтронов $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$.

Предварительно деформированный в форме дуги окружности со стрелой прогиба 3 мм образец из ленты аустенитно-мартенситной стали 0.3C-13Cr-10Mn-3Si-1V был подвергнут облучению быстрыми нейтронами флюенсом $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ в мокром вертикальном канале реактора ИВВ-2М при температуре 80 °С. Данный материал относится к классу нержавеющей марганцевых аустенитных сталей с эффектом памяти формы. Изначально ожидалось, что облучение уменьшит величину ЭПФ при последующем нагреве в сравнении с эталонным образцом.

Однако вместо этого было выявлено проявление ЭПФ непосредственно под воздействием облучения с уменьшением стрелы прогиба примерно на 21%. Контрольные эксперименты подтвердили, что нижняя температурная граница проявления ЭПФ в данном материале лежит при 120 °С, а при 80 °С он отсутствует. Это позволяет сделать вывод, что наблюдавшийся эффект является результатом именно нейтронного облучения.

Результаты исследования получены с использованием УНУ «Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ» в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «ПОТОК № 122021000031-8).

Литература

[1] V.D. Parkhomenko, S.F. Dubinin, in *Physics of Metals and Metallography*. V.113 (2012), No. 7, P. 641–662.

[2] В.В. Сагарадзе, А.И. Уваров, *Упрочнение и свойства аустенитных сталей*, РИО

УрО РАН, Екатеринбург, 2013, 720 с., ISBN 978-5-7691-2334-4.

[3] V.V. Sagaradze, V.I. Voronin, Yu.I. Filippov и др. in *Physics of Metals and Metallography*, V.106 (2008). No.6, P. 630–640.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ Ti-Al ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Жихарев, С.Г. Быстров, В.Я. Баянкин

Физико-технический институт Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН, г. Ижевск, Россия (ZhikharevAV@udman.ru)

В работе рассматриваются результаты исследования влияния сфокусированного импульсного лазерного излучения на процессы формирования соединений Ti-Al в многослойных пленках в зависимости от выбранных параметров лазерного излучения.

Цель работы в изучении процессов происходящих в исследуемом материале в результате облучения и обеспечения необходимых режимов лазерного воздействия на систему Ti-Al для целенаправленной модификации поверхностных слоев интерметаллидами.

Исследования проводились на металлических пластинах из чистого титана “BT 1-0”, на поверхности которых в результате напыления был сформирован многослойный пакет из чередующихся трех алюминиевых и трех титановых слоев (1-ый слой Al – 100 нм; последующие Ti – 10 нм; Al – 10 нм; Ti – 10 нм; Al – 10 нм; Ti – 10 нм). Перед напылением поверхность пластин подвергались механической и ионной очистке. Объектами исследования служили образцы габаритными размером 10×10 мм с толщиной в 2 мм.

Лазерное воздействие на напыленные слои образцов осуществлялось сфокусированным лучом лазера в атмосфере аргона. Обработка поверхности происходила в одноимпульсном режиме, но с различной плотностью мощности лазерного излучения. Облучение велось методом сканирования – перемещением лазерного луча на выбранном участке образца. Зона лазерной обработки составляла площадь размерами 10 × 10 мм.

В качестве источников облучения использовался оптоволоконный иттербиевый лазер “Ldesigner FI”.

Анализ состояния поверхностных слоев образцов до и после лазерного воздействия проведен с помощью методов атомной силовой микроскопии (“*Solver-47 PRO*”), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (“*ЭС-2401*”) и измерений микротвердости (“*ПМТ-3*”).

В результате проведенных исследований обнаружены изменения рельефа и топографии поверхности образцов, а также изменения значений микротвердости от исходного состояния. При этом установлено, что после лазерного воздействия в образцах происходит перераспределение элементов в поверхностных слоях.

Предложены возможные механизмы, позволяющие объяснить наблюдаемые изменения в сплаве после лазерного воздействия.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 121030100002-0. В части проведения исследований методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии работа выполнена при поддержке

Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-15-2021-1351. 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.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 В УСЛОВИЯХ ОБРАБОТКИ ПЛАЗМОЙ ИОНОВ N⁺

В.Л. Воробьёв, В.С. Гладышева, С.Г. Быстров, П.В. Быков, В.Я. Баянкин
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 проблема разработки технологий модификации поверхности титановых сплавов для повышения их твердости, износостойкости, коррозионной стойкости и биосовместимости [1]. Одним из широко применяемых методов модификации титановых сплавов является ионно-плазменная обработка их поверхности. В частности, используются методы диффузионного насыщения азотом в плазме тлеющего и дугового разрядов [2, 3], а так же облучение потоками ионов [4]. В большинстве случаев азотирование осуществляется при высоких (800 – 900 °С) температурах в течение многих часов. Однако при высоких температурах (превышающих температуру полиморфного $\alpha \rightarrow \beta$ превращения) азотирование низколегированных сплавов титана приводит к росту кристаллитов, изменению микроструктуры и, как следствие, снижению эксплуатационных свойств материала [5].

Поэтому необходимо производить поиск решений, позволяющих проводить азотирование сплавов титана в мягких условиях (тлеющий разряд, малое время обработки, относительно низкие температуры), чтобы обеспечить сохранение структурно-фазового состояния и свойств материала в объеме изделий. Также важна конструктивная простота установки для азотирования, чтобы в дальнейшем разработанную технологию можно было применить на производстве. Для понимания механизмов процесса азотирования и его целенаправленного регулирования в данной работе произведены сравнительные комплексные исследования морфологии поверхности, состава, структурно-фазового состояния и механических свойств (микротвердости) поверхностных слоев титанового сплава при азотировании в плазме тлеющего разряда в зависимости от температуры воздействия. Разогрев образцов осуществлялся до температур 300, 500 и 700°С.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 121030100002-0 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., L. Zhong, L. Kang, J. Liu, W. Zhuang, Z. Lv, Y. Xu. *J. Alloys Compd.* V. **882** (2021), P. 160645
- [2] Li Ya., Wang Z., Shao M., Zhang Z., Wang C., Yan J., Lu J., Zhang L., Xie B., He Y., Qiu J.X. *Vacuum.* V. **208** (2023), Iss. 111737, P. 1.
- [3] X.J. Jiang, S.Z. Wang, Z.H. Feng, H.B. Qi, H. Fu, R.P. Liu. *Vacuum.* V. **197** (2022),

Iss. 110860, P.1.

[4] Vorobyev V.L., Bykov P.V., Bystrov S.G., Kolotov A.A., Bayankin V. Ya. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. (2023), № 3, P. 29.

[5] Ахмадеев Ю.Х., Гончаренко И.М., Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Щанин П.М. *Письма в ЖТФ*. Т. 31 (2005), Вып. 13, С. 24.

РАДИАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КОРПУСКУЛЯРНОМ ОБЛУЧЕНИИ. РАДИАЦИОННАЯ ТРЯСКА ВМЕСТО ТЕМПЕРАТУРЫ

В.В. Овчинников

¹*Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (viae05@mail.ru)*

Рассмотрены наномасштабные динамические эффекты и процессы, происходящие при каскадообразующих видах облучения конденсированных сред тяжелыми ионами, нейтронами и осколками деления. Роль этих процессов выходит за рамки классической радиационной физики конденсированного состояния. Впервые они были рассмотрены в публикациях автора и его коллег, а затем изучены и подтверждены, в том числе совместными работами с коллегами из Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Германия (см. [1]). Источниками зарегистрированных эффектов являются области прохождения плотных каскадов атомных смещений, термализованных за времена порядка одной триллионной доли секунды (Thermal Spikes), с гигантскими температурами и давлениями ($T = 3000-6000$ К, $P = 5-40$ ГПа [1, 2]), которые являются источниками мощных посткаскадных упругих и/или ударных волн.

Разработана теория самораспространяющихся (теоретически на неограниченные расстояния) структурно-фазовых превращений в метастабильных средах [1-3], инициируемых ионной бомбардировкой (за счет «радиационной тряски» посткаскадными волнами). На практике это обеспечивает [1, 2, 4, 5] увеличение не менее чем на 3-5 порядков линейного масштаба воздействия ионизирующего излучения на материалы (в том числе глубины воздействия ионов); 2) снижение температуры радиационно-инициированных превращений на десятки и сотни градусов по сравнению с аналогичными термоактивационными процессами; 3) увеличение их скорости на несколько порядков по сравнению с термически и радиационно-стимулированными миграционными процессами. Следует отметить, что механизм радиационного сотрясения не связан с радиационно-стимулированной диффузией.

Рассмотрены примеры радиационно-динамических (РД) процессов в металлах и сплавах (внутрифазовые и фазовые превращения). Конкретные применения касаются модификации резистивных, магнитных, механических, ресурсных и других свойств функциональных материалов пучками ускоренных ионов [1, 2, 4, 5] Проведены имитационные исследования радиационной стойкости различных материалов.

Обнаружены быстрые (в течение нескольких секунд) процессы образования в сплавах обедненных и многократно обогащенных фаз по химическим элементам [1, 3, 4, 5] при ионной бомбардировке при температурах существенно ниже порога активации термодиффузии. Это представляет фундаментальный интерес. Возникающие состояния, близкие к равновесным [5], не могут быть получены другими способами. Это позволяет обнаруживать теоретически предсказанные, а также неизвестные низкотемпературные

фазы (которые являются «вещами в себе») с неизвестными свойствами.

Литература

- [1] Ovchinnikov V.V., *Surf. Coatings Technol.* v.355 (2018), p.65.
 [2] Ovchinnikov V.V., *Physics-Uspexhi* v.51 (2008), №9, p.955.
 [3] Ovchinnikov V.V., *Journal of Physics: Conference Series* v.1115 (2018), 032046.
 [4] Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V., Mozharovsky S.M., Kaigorodova L.I., *Surf. Coatings Technol.* v.389 (2020), 125504.
 [5] Ovchinnikov V.V., Makarov E.V., Semionkin V.A., Gushchina N.V., *Vacuum.* v.201 (2022), 111040.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК Ti/Al И Ni/Al ПОСЛЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

П.В. БЫКОВ¹, А.Н. Тарасенков², А.А. Колотов¹, А.А. Шушков¹, В.Л. Воробьёв¹,
 В.Я. Баянкин¹

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

²НПК «Технологический центр» МИЭТ, Зеленоград-Москва, 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 [4-6].

В данной работе, методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, атомной силовой микроскопии и измерения нанотвердости проведено исследование морфологии поверхности, формирования химического состава и изменения физико-механических характеристик поверхностных слоев многослойных плёнок Ti/Al и Ni/Al на поверхности титана ВТ1-00 в зависимости от дозы облучения ионами аргона ($5 \cdot 10^{15}$ - 10^{17} ион/см²).

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 121030100002-0. В части проведения исследований методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-15-2021-1351. 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.50–55

[5] Bykov P.V., Vorob'ev V.L., Klimova I.N., Kolotov A.A., Drozdov A.Yu., Bayankin V.Ya., Alexandrova S.S. *Journal of Physics: Conference Series*. **1713** (2020), p.012012

[6] Воробьев В.Л., Гильмутдинов Ф.З., Сюгаев А.В., Быков П.В., Баянкин В.Я. *Физика металлов и металловедение*. **121** (2020), № 5, с.509-515

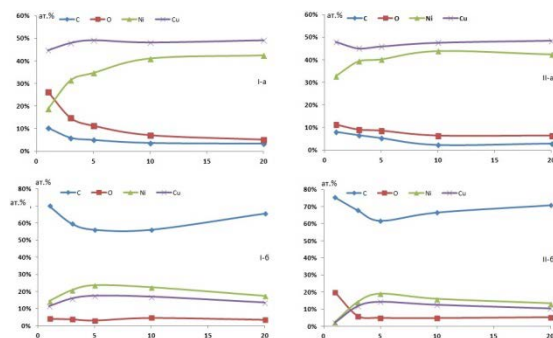
ФОРМИРОВАНИЕ УГЛЕРОДНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Cu-Ni В УСЛОВИЯХ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.А. Колотов, А.Ю. Дроздов, В.Я. Баянкин, В.Е. Порсев

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

В данной работе исследуются особенности сегрегационных процессов в поверхностных слоях образцов сплава системы Cu-Ni, исходно находящихся в сильнодеформированном состоянии (после прокатки), а так же образцов, подвергнутых предварительному отжигу в вакуумной печи при температуре 600 град С. Проведен сравнительный анализ образцов сплава Cu-Ni, облученных ионами C⁺, а так же последовательно обработанных ионами O⁺ и C⁺. Основной целью данной работы было определение условий формирования углеродного слоя в результате высокоэнергетического облучения образцов ионами углерода. Облучение образцов проводилось в одинаковых условиях. Была проведена имплантация ионов углерода с энергией 30 кэВ и дозой 10¹⁸ ион/см². Для определения влияния поверхностного загрязнения, часть образцов была предварительно обработана ионами кислорода до дозы 1.3×10¹⁷ ион/см². Из данных рентгеноструктурного анализа видно, что в результате отжига исходных прокатанных образцов происходит сужение дифракционных пиков, что свидетельствует об увеличении размеров кристаллитов в образце и уменьшении микродеформаций. Кроме того, отжиг приводит к существенному перераспределению интенсивностей пиков фазы Cu-Ni, что говорит о наличии текстуры как в исходно прокатанном, так и в отожженном образце. На дифрактограммах всех образцов, помимо линий от твердого раствора Cu-Ni, можно видеть также пики от других фаз, возможно оксидов или карбидов никеля или меди. Поверхностные слои образцов до облучения содержат около 50 ат% - Cu и 40% ат% Ni. В результате облучения атомами углерода, в поверхностных слоях формируется обогащенный углеродом слой (до 80 ат%), химически не связанными с атомами матрицы, что говорит о диффузии атомов углерода в радиационном поле, как элементе с меньшим радиусом. Последовательное облучение ионами кислорода и углерода оттоженных образцов сформировало на поверхности образцов двухслойную структуру – слой обогащенный кислородом, содержащий большое

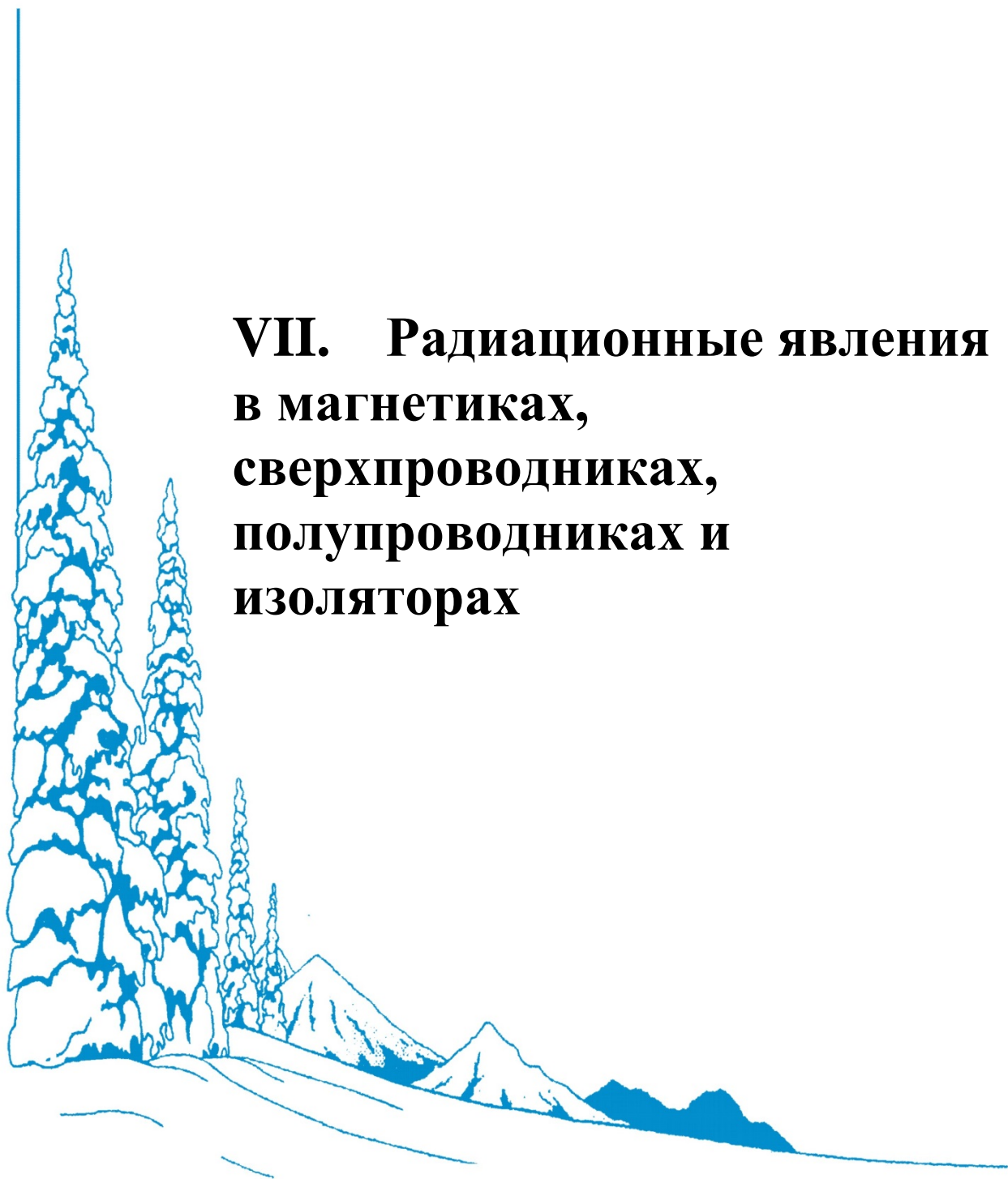
количество оксидов меди и никеля, и последующий слой обогащенный атомами углерода.



Распределение компонентов сплава: I – прокатные образцы, II – оттоженные образцы; а) до облучения, б) после последовательного облучения ионами кислорода и углерода

По результатам работы выявлено, что облучение ионами углерода, формирует на поверхности неразрывный от атомов матрицы слой, обогащенный атомами углерода, находящимися как в химически не связанном виде, так и в виде карбидов (крайне малой концентрации), толщина слоя превышает глубину пробега ионов углерода, что, возможно обусловлено большой дозой облучения.

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



ДЕФЕКТЫ В КРЕМНИИ И HIGH-K ДИЭЛЕКТРИКАХ КНИ И КНС СТРУКТУР ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ Хе И Вi

В.П. Попов¹, В.А. Антонов¹, А.П. Калугин¹, В.А. Володин¹, А.В. Мяконьких², К.В.
Руденко², В.А. Скуратов³

¹ *Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, Новосибирск, Россия
(porov@isp.nsc.ru)*

² *Физико-технологический институт Академии наук РАН им. К.А. Валиева, Москва,
Россия*

³ *Объединенный Институт Ядерных Исследований, г. Дубна, Московская обл., Россия*

Целью работы было определение механизмов деградации структурных и электрических свойств КНИ и КНС псевдо-МОП (Ψ -МОП) транзисторов после их облучения быстрыми ионами Хе⁺²⁶ (150 МэВ) и Вi⁺⁵¹ (670 МэВ) до флюенса 2×10^{11} см⁻², когда ещё не происходит перекрытие трековых областей отдельных частиц в изоляторах. КНИ и КНС гетероструктуры формировались прямым сращиванием и водородным переносом 500 нм пленок кремния с предварительно нанесенными нанослоями на сапфир. Электрофизические параметры определялись из сток-затворных характеристик ($I_{ds}-V_g$) Ψ -МОП-транзисторов с 100 нм электродами W, нанесенными через литографическую маску.

Неполное обеднение канала Ψ -МОП транзисторов в 500-нм слое кремния позволило оценить изменения плотности приведенного к гетерогранице эффективного заряда после облучения БТИ с пленкой НАО, как $\Delta Q_{ox} = -\Delta V_{p,th} C_{sa}/q$, где q – заряд электрона, C_{sa} – ёмкость сапфира, равная $C_{sa} = 84,8$ пФ/см² для 120 мкм сапфира (диэлектрическая проницаемость ϵ для поля вдоль оси $C \epsilon_{||} = 11.5$), Величины сдвигов пороговых напряжений для дырок в инверсии $\Delta V_{p,th}$ составили -1310 и -150 В после БТИ Вi и Хе, соответственно. Эти сдвиги определяются изменением эффективных зарядов $\Delta Q_{eff}(Vi) = 6,9 \times 10^{11}$ см⁻² для ионов висмута и $\Delta Q_{eff}(Xe) = 7,9 \times 10^{10}$ см⁻² для ионов ксенона.

Их отношение для БТИ Вi и Хе составляет $\Delta Q_{eff}(Vi) / \Delta Q_{eff}(Xe) = 8.7$, что не соответствует как отношению тормозных потерь на электронные возбуждения ~ 1.7 , так и квадрату отношения диаметров треков в сапфире $(\varnothing_{Vi}/\varnothing_{Xe})^2 \sim 4$ [1]. Это означает, что хотя генерация эффективного положительного заряда происходит в основном в области трека ионов, где существенен эффект высоких температуры и давления на окружающий материал, она ещё и усилена процессом рекомбинации электронно-дырочной плазмы вне областей треков ионов. $I_{ds}-V_g$ характеристики КНС Ψ -МОП транзисторов подтверждают доминирующий вклад рекомбинации в формирование заряженных дефектов вне треков ионов.

Относительные изменения накопления механических напряжений и зарядов в сегнетоэлектрических слоях НА, НЗА, а также проводимости слоев Ψ -МОП транзисторов свидетельствуют, что ухудшение проводимости в приборных слоях Si после облучения БТИ происходит из-за точечных дефектов во всем объеме этого слоя, но формирование состояний на гетерогранице обеспечивают дефекты внутри треков в изоляторе. Рост отрицательного заряда и окна памяти от орторомбической фазы (o-) в НАО слое с исходной квазикубической (c-) структурой после воздействия БТИ Вi и 300-кратного циклирования означает c-o фазовый переход, как и при переходе из тетрагональной фазы (t-o) [2].

Работа по КНС выполнена за счет гранта РНФ № 22-29-01063, а по КНИ - ГЗ № FWGW-2021-0003 и FFNN-2022-0019 Минобрнауки РФ.

Литература

- [1] Medvedev et al. *J. Appl. Phys.* **133** (2023) 100701
 [2] Lederer et al. *J. Appl. Phys.* **132** (2022) 064102.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ КЕРАМИК ИТТРИЙ АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА, ПОДВЕРГНУТЫХ ОБЛУЧЕНИЮ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫМИ ИОНАМИ КСЕНОНА

А.А. Назаров^{1,2}, А.В. Нохрин¹, П.А. Юнин², П.В. Андреев¹
¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия,
²Институт физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород, Россия.

Исследована серия керамик иттрий-алюминиевого граната (YAG) с добавлением Nd, полученных методом электроимпульсного спекания. Такие керамики являются перспективным материалом для консолидации радиоактивных отходов, в частности минор-актиноидов (Np, Cm, Am) [1, 2].

Исследование радиационной стойкости материалов происходит путем облучения высокоэнергетическими тяжелыми ионами. В работе исследована серия керамических образцов состава $Y_{2.5}Nd_{0.5}Al_5O_{12}$, изготовленных методом электроимпульсного плазменного спекания и подвергнутых облучению высокоэнергетическими тяжелыми ионами Xe (146 МэВ) с дозой в интервале 10^{12} – 10^{13} см⁻² на циклотроне ИЦ-100 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, г. Дубна. Исследование поверхности образцов, подвергнутой радиационному воздействию, проведено методом рентгеновской дифрактометрии на приборе Bruker D8 Discover в геометрии скользящего падения [3].

Качественный фазовый анализ показал, что исходные образцы содержат кристаллические фазы YAG. На дифрактограммах облученных образцов помимо $YAlO_3$ (YAP) наблюдаются дифракционные максимумы двух изоструктурных YAG кристаллических фаз, одна из которых имеет параметр элементарной ячейки близкий к фазе исходного YAG (initial YAG). Вторая фаза, названная нами деформированный YAG (strained YAG), имеет на 1-5% больший параметр элементарной ячейки. Эксперименты в геометрии скользящего падения (от 1° до 30°) первичного пучка позволили установить преимущественную локализацию деформированной фазы в приповерхностном слое толщиной несколько микрон. Также показано увеличение деформации и степени аморфизации в приповерхностном слое с ростом флюенса ионов.

В работе приведена модель расчета глубины нарушенного слоя. Метод расчета построен на математическом описании экспериментальных зависимостей интенсивности брэгговских пиков от угла падения α . Приведено сравнение рассчитанных значений с результатами моделирования процесса имплантирования ионов Xe в фазу YAG в программном комплексе SRIM (метод Монте-Карло) и LAMMPS (метод молекулярной динамики). Приведена визуализация аморфных треков.

Рентгенодифракционные исследования образцов выполнялись в ИФМ РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (г/з № 0030-2021-0030). Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-21-00145_Росатом.

Литература

- [1] Koushik Bhandari, V. Grover, Anushree Roy, Manjulata Sahu, R. Shukla, Joydipta Banerjee. Nd₃₊-Y₃Al₅O₁₂ system: Iso-valent substitution driven structural phase evolution and thermo-physical behavior, *Journal of Molecular Structure*, Volume 1264, 2022, 133206;
- [2] Jantzen C.M., Lee W.E., Ojovan M.I., *Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-Up. Processes, Technologies and International Experience*". Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, Woodhead Published Limited, Chapter 6, P. 171, 2013;
- [3] P.A Yunin, A.A. Nazarov, E.A. Potanina, Application of the GIXRD Technique to Investigation of Damaged Layers in NaNd(WO₄)₂ and NaNd(MoO₄)₂ Ceramics Irradiated with High-Energy Ions, *Technical Physics*, 92 (8) P. 956, 2022.

**КОНФОКАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ MgAl₂O₄,
ОБЛУЧЕННЫХ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

В.А. Скуратов^{1,2,3}, М. Маматова¹, О.В. Королик⁴, Н.С. Кирилкин¹, А. Даулетбекова⁵,
А. Акилбеков⁵

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

⁴Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

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

Радиационно-индуцированные изменения микроструктуры и оптических свойств алюмомагниевого шпинели MgAl₂O₄ являются предметом постоянных исследований в течение последних нескольких десятилетий. Ее стойкость к облучению нейтронами, по сравнению с оксидом алюминия, было оценено, в некоторой степени, как превосходное, что не является обычным для оксидной керамики. В тоже время, демонстрируя исключительную стабильность при накоплении дефектов, возникающих в упругих столкновениях, MgAl₂O₄ довольно чувствительна к радиационным повреждениям, образующихся в результате релаксации электронных возбуждений высокой плотности, имея относительно низкий порог образования латентных треков, около 7,5 кэВ/нм [1,2].

Основной целью этой работы является изучение оптически стимулированной люминесценции в монокристаллах MgAl₂O₄ в присутствии латентных треков, образованных быстрыми тяжелыми ионами, с использованием лазерной конфокальной микроскопии. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) из приповерхностного слоя образцов, облученных ионами Bi (670 МэВ), Xe (156 МэВ), Kr (100 МэВ) и Ar (44 МэВ), регистрировались при возбуждении при 355 нм, 472 нм и 532 нм. Было обнаружено, что спектры ФЛ во всех случаях состоят из широких перекрывающихся полос, расположенных во всему спектральном диапазоне от длин волн возбуждения до 800 нм. Предполагается, что такой спектральный состав может быть обусловлен возбуждением анти-сайт дефектов в разупорядоченных областях, окружающих центральную часть ионных треков, с последующим переносом энергии к центрам люминесценции и излучательной рекомбинацией. В качестве возможных центров люминесценции рассматриваются также агрегатные центры окраски и комплексы дефект плюс примесь. Экспериментальные результаты показали, что структурное состояние ядра трека

(аморфное или неаморфное) не влияет на процессы люминесценции в кристаллах $MgAl_2O_4$, облученных тяжелыми ионами высоких энергий.

Литература

[1] Zinkle S.J, Skuratov V.A. Track formation and dislocation loop interaction in spinel irradiated with swift heavy ions // *Nucl. Instr. and Meth. B.* - 1998.-v. **141** – pp. 737-746.

[2] Yasuda K. et al. Production and stability of radiation-induced defects in $MgAl_2O_4$ under electronic excitation // *Nucl. Instr. and Meth. B.* - 2008.-v. **266** – pp. 2834-2841.

УВЕЛИЧЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА ВТСП КОМПОЗИТОВ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ МАГНИТНЫХ ИОНОВ

И.А. Руднев^{1,2}, Д.А. Абин¹, А.С. Стариковский¹, С.В. Покровский^{1,2}, И.В. Мартиросян^{1,2},
Р.Г. Батулин², П.А. Федин³, К.Е. Прянишников³, Т.В. Кулевой³

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

²Институт физики, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

Современные высокотемпературные сверхпроводящие ленточные композиты имеют достаточно сложную композитную структуру, которая состоит из подложки на основе сплава Хастеллой толщиной порядка 60 мкм, нескольких тонких буферных оксидных слоев и слоя в 2 мкм непосредственно высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) $REBa_2Cu_3O_{7-x}$ (RE – редкоземельный элемент, например, Y или Gd)). Вся структура закрыта защитными слоями из серебра и меди. Такие сверхпроводящие материалы демонстрируют огромные плотности критического тока (несколько единиц МА на кв. см сечения) даже при температуре кипения жидкого азота. Вместе с тем для многих практических применений проблема увеличения критического тока ВТСП лент как в нулевом поле, так и в магнитных полях и различных температурах остается актуальной и требующей решения.

Хорошо известно, что увеличение критического тока достигается за счет создания в ВТСП материале центров пиннинга магнитного потока – структурных дефектов. Для этого применяются различные методы от формирования дефектов на этапе синтеза до радиационных воздействий, приводящих к появлению радиационных дефектов различного типа. Вместе с тем, пиннинг можно усилить, добавив к структурным дефектам магнитные, которые за счет дополнительного магнитного взаимодействия приведут к увеличению силы пиннинга. Так, ранее нами было показано, что имплантация магнитных ионов Fe^+ может приводить к увеличению критического тока ВТСП композитов.

В настоящем докладе мы приводим

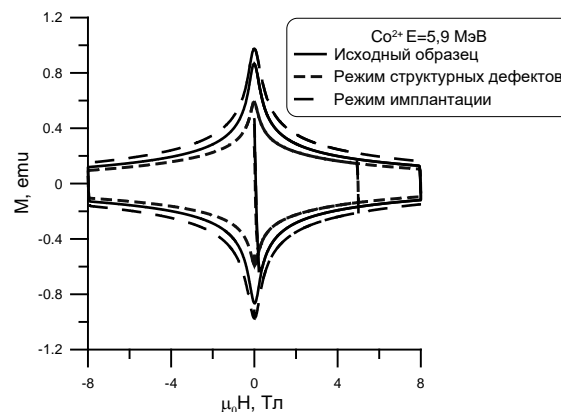


Рис. Увеличение намагниченности ВТСП композитов при имплантации Co^{2+}

подробные данные по влиянию облучения магнитными ионами Co^{2+} на намагниченность и критический ток ВТСП композитов. Облучение образцов проводилось несколькими флюенсами для 4х различных режимов создания дефектов при которых последовательно имплантация ионов отсутствовала, а затем концентрация магнитных ионов в ВТСП слое повышалась вплоть до режима полной остановки ионов в сверхпроводящей матрице (брэгговский пик находился в середине ВТСП слоя). Различные режимы имплантации были реализованы за счет вариации толщин слоя Ag, что приводило к различным проективным пробегам ионов, которые были предварительно рассчитаны с помощью пакета SRIM. До облучения удалялись все защитные слои, кроме слоя Ag. Было показано, что при определенных условиях облучения и режимов имплантации магнитных ионов Co^{2+} наблюдается повышение намагниченности и критического тока как в нулевом поле, так и в полях до 8 Тл (см. Рис.). В докладе будут проанализированы полученные результаты, предложена физическая модель, объясняющая экспериментальные данные.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, <https://rscf.ru/project/23-19-00394/>.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ В ЛЕНТОЧНЫХ ВТСП КОМПОЗИТАХ

И.В. Мартиросян¹, И.А. Руднев¹, Д.А. Абин¹, С.В. Покровский¹, М.С. Новиков²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

²*Объединенный университет ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия*

Под действием ионизирующего излучения в сверхпроводнике образуются дефекты различного типа, которые могут являться центрами пиннинга магнитных вихрей. Ионное облучение при малых флюенсах может приводить как к повышению, так и к понижению критического тока высокотемпературных сверхпроводящих лент на основе соединения $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (далее YBCO), при этом повышение криттока связано с образованием новых центров пиннинга; понижение - может быть связано со снижением критической температуры при росте концентрации дефектов и перекрытием их потенциальных ям. При высоких флюенсах объемный пиннинг вихрей Абрикосова определяется только радиационными дефектами. Во многих случаях экспериментальное исследование ионного воздействия на материал сдерживается достаточно высокой стоимостью процесса. Также важно отметить, что большинство методов подобных исследований являются деструктивными по отношению к мишени, так как для исследования получившихся слоев с примесью или дефектами структуры необходимо мишень послойно разрушить. Компьютерное моделирование позволяет значительно ускорить процесс исследования радиационных дефектов (РД) в веществе, увеличить радиационную стойкость материалов и предложить эффективные методы восстановления их эксплуатационных свойств.

В рамках настоящего исследования были разработаны алгоритмы определения параметров радиационных дефектов, формируемых в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ мощным ионным пучком. В качестве отправной точки рассматривается следующая система: бездефектный слой YBCO толщины h , подверженный воздействию потока ионов $^{132}\text{Xe}^{27+}$ с начальной энергией E_{Xe} и флюенсом F_0 , направленных под углом α к поверхности мишени при температуре T_0 . Моделирование описанной системы выполняется с использованием многомасштабного подхода, при котором результаты расчетов на нижнем уровне применяются для расчетов уровнем выше и далее. Моделирование каскадов атомных

смещений в YBCO выполняется методом молекулярной динамики. Моделирование эволюции возникших дефектов и их взаимодействия выполнено с использованием кинетического метода Монте-Карло. Представлено математическое описание модели, а также результаты расчетов процессов дефектообразования и анализ кинетики дефектов при облучении мишени YBCO ионами $^{132}\text{Xe}^{27+}$ с энергией 167 МэВ под углом 90° к поверхности мишени в диапазоне температур 1-100 К. Расчетная энергия смещения кислорода в YBCO составила ~ 10 эВ, что согласуется с данными литературных источников. С использованием разработанного подхода установлено, что основная часть дефектов аннигилирует в течение первых пикосекунд, на стадии формирования каскада первичных дефектов. Другие радиационные дефекты приводят к изменению кристаллической структуры мишени и ее свойств. Кластеризация и кинетика дефектов исследована на миллисекундном временном масштабе. Представлены температурные зависимости концентрации радиационных дефектов, пороговых энергий миграции радиационных дефектов, проведена оценка продолжительности необходимого термического отжига образцов.

Разработка расчетной модели выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ

Расчеты динамики радиационно-индуцированных дефектов в ленточных ВТСП композитах выполнены при финансировании ОИЯИ по программе поддержки в рамках коллаборации "Ариадна"



VIII. Техника и методика эксперимента

GLOVEBOXES AND GLOVEBOX LINES «SPECS GB»: MADE IN RUSSIA LABORATORY EQUIPMENT FOR LITHIUM BATTERY RESEARCH, DEVELOPMENT & PRODUCTION

Petrov Roman

*JSC «Spectroscopic systems», 31, Leninsky av., Moscow, Russia, 119071,
(spectro-systems@mail.ru)*

Spectroscopic system's highly qualified, experienced and certified engineers deliver complex and diverse inertgas system solutions. Our combined process experience and proven solution capabilities enable our Russian customer base to meet the demands of today's emerging technologies.

Most commonly the presence of moisture and oxygen are the principal air components which shall be excluded from the process environment for lithium battery research, development & production. Therefore technologies are required which allow running processes under oxygen and moisture free conditions. Two predominant techniques have been established to address this specific problem – vacuum technology and inertgas technology. Whilst vacuum bases on the principle of creating nearly gas free environments by evacuating rigid structures to pressures less than 10⁻⁹ mbar, the inertgas technology selectively removes harmful components from the air resulting in a completely oxygen and moisture free working environment at ambient pressure. The main benefit between both approaches is that inertgas technology is compatible with all kinds of equipment, processes, and system enclosure sizes offering full auto and manual access at a fraction of the costs of normal vacuum systems. In case of the vacuum technology many tools are not vacuum proof, solvent containing materials cannot be processed.

Since its foundation in 2004 JSC «Spectroscopic systems» has been able to offer its comprehensive product portfolio of interdisciplinary systems which combine vacuum technology as well as inertgas technology. The core element of a well-designed inertgas-system is the «SPECS GB» gas purifier. This unit is a closed-loop system with integrated, fully regenerable scrubber units which selectively remove moisture, oxygen and solvents from an inertgas stream. Most commonly nitrogen, argon or helium is used as the process gas.

Specs GB systems are primarily used for the standard research and development of lithium ion battery technologies and our custom enclosures are used for critical dry production environments necessary for battery manufacturing. Boxes can help in maintaining a minimum-humidity atmosphere that will neither harm operators nor be disrupted by them. Our glovebox systems and custom enclosures also allow the ability to record and trace the production environment for enhanced quality control. Connected to the purifier is a gas-tight, hermetically sealed enclosure called a glovebox. These system come either in standardized sizes mainly used for research and development or in customized designs for industrial use.



ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ОДИНОЧНЫЕ СБОИ В МИКРОСХЕМАХ ПАМЯТИ

А.С. Кустов, О.В. Ткачев, К.А. Талала, И.А. Илларионова

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., Россия

Многочисленные исследования, выполненные как отечественными, так и иностранными специалистами, показывают, что в современной электронной компонентной базе имеют место одиночные радиационные эффекты (ОРЭ), обусловленные воздействием отдельных нейтронов.

Известно, что чувствительность к ОРЭ, главным образом, зависит как от технологии производства СБИС, так и от энергии нейтронов. В настоящее время достаточно много работ, посвященных определению чувствительности микросхем к ОРЭ, обусловленных воздействием быстрых нейтронов. Следует отметить, что имеются работы [1, 2], в которых показано, что ОРЭ могут быть вызваны не только быстрыми, но и тепловыми нейтронами. Чувствительность микросхем к тепловым нейтронам может вносить значимый вклад в сечение ОРЭ. Так, в работе [3] сечение одиночных сбоев (ОС) от нейтронов низких энергий по величине сопоставимо с сечением от быстрых нейтронов.

Чувствительность микросхем к тепловым нейтронам связывают с ядерными реакциями, протекающими при взаимодействии нейтронов с B^{10} . Данная проблема особенно актуальна для регистрирующей аппаратуры ядерных энергетических и исследовательских установок. Для проверки влияния тепловых нейтронов на чувствительность микросхем проводятся эксперименты с использованием нейтронных источников, в спектре которых содержится значимая доля нейтронов с энергией менее 0,1 МэВ.

Авторами был проведен эксперимент на нейтронном генераторе с энергией нейтронов 14 МэВ. Для получения тепловых нейтронов в качестве замедлителя использовали полиэтилен. В ряде экспериментов для оценки влияния тепловых нейтронов на чувствительность микросхемы к ОС использовался кадмий толщиной 0,5-1 мм. Сечение взаимодействия нейтронов с Cd в области энергий менее 1 эВ составляет ~ кбарн. Объектом исследования являлось статическое ОЗУ (IS62WV1288BLL).

Методом Монте-Карло в программе ПРИЗМА были выполнены расчеты спектрального распределения нейтронов, прошедших слои полиэтилена и кадмия. Результаты расчета показывают, что схема эксперимента удовлетворяет поставленной задаче: полиэтилен эффективно конвертирует нейтроны с энергией 14 МэВ в область тепловых энергий, а кадмий поглощает тепловые нейтроны.

Исследования показали, что при воздействии нейтронного излучения в ячейках памяти микросхемы проявляются ОС. При этом чувствительность этой же микросхемы к ОС при использовании кадмиевой фольги уменьшается примерно в 5 раз.

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод, что электронная компонентная база (ЭКБ) может быть чувствительна к нейтронам низких энергий, что необходимо учитывать при оценке нейтронной стойкости приборов.

Литература

[1] M. Cecchetto et al. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **65**(8), pp. 1800-1806 (2018).

[2] A. Coronetti et al. in *Proc. IEEE Nucl. Space Radiat. Effects Conf.*, Jul. 2021, pp. 32-36.

[3] H. Iwashita et al. *IEEE Trans.Nucl. Sci.*, **70**(3), pp. 216–221 (2023).

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

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

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

В настоящее время в области регистрации ионизирующего излучения (ИИ) имеется ряд проблем, связанных с отсутствием быстрых детекторов (время разрешения < 1 нс), регистрацией электронов и сверхжесткого рентгеновского излучения [1]. Для решения данных проблем можно использовать набирающие популярность волоконно-оптические датчики. Такие датчики имеют следующие преимущества с точки зрения регистрации ИИ: помехоустойчивость, чувствительность к высокоэнергетическим частицам, возможность работы в условиях высоких потоков ИИ, высокая разрешающая способность.

Для использования волоконно-оптических датчиков в качестве детекторов ИИ необходимо иметь представления о спектрально-временных характеристиках радиационно-наведенного излучения (РНИ) и природе этого излучения. Стоит отметить также, что в настоящее время уделяется недостаточно внимания вопросам совместного проявления свечения и радиационно-наведенного поглощения (РНП), что наиболее характерно для импульсного воздействия ИИ. Исследование радиационных эффектов в оптоволокне в данном ключе наиболее актуально для оптических гироскопов, длина волоконных световодов в которых составляет порядка 1-5 км, для телекоммуникационных оптоволоконных линий связи, волоконных оптических детекторов ИИ [1-2].

Таким образом, целью настоящей работы является исследование природы РНИ, его спектральных характеристик, а также разработка модели, позволяющей определить реакцию волоконно-оптического детектора с учётом совместного проявления РНИ и РНП.

В настоящей работе были экспериментально исследованы многомодовые кварцевые и полиметилметакрилатные оптические волокна с диаметрами сердцевины 50 и 125 мкм. Данные волокна подвергались импульсному воздействию электронов с энергией 0,2, 1 и 6 МэВ. На выходе оптического волокна измеряли спектрально-временные характеристики радиационно-наведенного излучения. При этом помимо энергии электронов варьировали угол падения пучка. В ходе работы также было рассмотрено применение математической модели, основанной на конечно-разностном методе, для оценки формы импульса радиационно-наведенного излучения на выходе оптического волокна.

В результате экспериментального исследования обнаружено, что световой отклик волокна зависит от угла падения пучка электронов. Показано, что излучения Вавилова-Черенкова значительно преобладает в световом отклике исследованных волокон. Повышение энергии электронов приводит к росту интенсивности коротковолновой части спектра, связанной с излучением Вавилова-Черенкова. Разработанная модель согласуется с экспериментом. Она может быть использована с целью оценки работоспособности систем, содержащих в своём составе волоконные линии, в условиях воздействия импульсного ИИ с произвольным распределением поглощённой дозы по длине линии.

Литература

[1] Optical Fiber Sensors. Advanced Techniques and Applications / G. Rajan. – Boca Raton,

US : CRC Press, 2015. – 544 p.

[2] И.С. Азанова, А.Д. Шевцова, А.С. Вахрушев и др. // *Прикладная фотоника*, Т. 8, № 1, (2021).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ НА УСКОРИТЕЛЯХ ИОНОВ

В.А. Печенкин

АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», Обнинск, Россия (vap@ipre.ru)

Рассмотрены проблемы выбора перспективных реакторных материалов на основе реакторного и ускорительного облучения, связанные с различием в скоростях набора повреждающей дозы и накопления He и H. Представлены современные тенденции в развитии имитационных исследований на ускорителях. С использованием методов ядерного микроанализа разработаны методики ионного облучения конструкционных реакторных материалов (КМ) на ускорителе «Тандем-3М» в АО «ГНЦ РФ – ФЭИ». Методом конечных элементов проведены расчеты напряжений в образце, вызванных температурными градиентами и накоплением имплантированных ионов, для типичных условий облучения. Проведены расчеты спектров нейтронов в реакторах БОР-60, МБИР, БН-800, БРЕСТ, а также скоростей наработки гелия и водорода в КМ при облучении в этих реакторах, для их учета при циклическом последовательном ускорительном облучении ионами металла, He и H.

Рассмотрены радиационные явления в КМ при реакторном и ускорительном облучении, основное внимание уделено радиационно-индуцированной сегрегации и набуханию.

Исследована зависимость набухания от состава аустенитных нержавеющей сталей – конструкционных материалов ВКУ ВВЭР ТОИ – при ионном облучении. Для последующих реакторных испытаний выбрана композиция, наиболее устойчивая к набуханию. На примере стали 08X18H10T проведены исследования влияния гелия и водорода на набухание КМ. Показано, что при тройном циклическом последовательном облучении (Ni+He+H) набухание существенно выше, чем при двойном облучении (Ni+He/H) этой стали, т.е. наблюдается синергический эффект гелия и водорода в набухании стали для условий их имплантации, соответствующих наработке в быстром реакторе.

Литература

[1] Грудзевич О.Т., Печенкин В.А., Кобец У.А. и др. Исследования радиационной стойкости конструкционных материалов на ускорителях ионов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы*, 2022, № 3, с. 127–145.

[2] Грудзевич О.Т., Печенкин В.А., Шагинян Р.А. Расчеты производства водорода и гелия в конструкционных материалах ядерных реакторов на быстрых нейтронах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы*, 2022, № 3, с. 146–177.

[3] Кулешова Е. А., Мальцев Д. А., Фролов А. С. и др. Оценка профиля набухания аустенитной нержавеющей стали с различным содержанием никеля под действием

ионного облучения // *Вопросы материаловедения*, 2022, № 2 (110), с. 171—184.

[4] V.A. Pechenkin, A.D. Chernova, V. L. Molodtsov, F.A. Garner. Effect of internal sink strength on diffusion mass transport in alloys under high dose ion irradiation // *Proceedings of the 12th International Topical Meeting on Nuclear Applications of Accelerators (November 10 – 13, 2015, Washington, USA)*, 2016, p. 103-109.

[5] Печенкин В.А., Чернова А.Д., Молодцов В.Л. и др. Радиационно- индуцированная сегрегация и свойства конструкционных материалов под облучением // *Ядерная физика и инжиниринг*, 2013, т. 4, № 5, с. 443-461.

НОВЫЙ ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ - НА ПЕРВОМ В МИРЕ СПУТНИКОВОМ ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ

Б.А. Логинов^{1,2}

¹АО «Завод ПРОТОН», Зеленоград, Москва, Россия (b-loginov@mail.ru)

²Национальный исследовательский университет МИЭТ, Зеленоград, Москва, Россия

Присутствие вокруг Земли так называемого «протонного пояса» на высоте выше 500 км над уровнем моря в настоящее время начало давать нам возможность проводить новые эксперименты по радиационному материаловедению ввиду открытия и успешного апробирования нового метода, явившегося развитием традиционных экспериментов в ядерных и термоядерных установках [1]. Сам «протонный пояс» известно, что содержит протоны со скоростями до 200 км/с, а вот доставка до него исследуемых образцов вместе с аналитическим оборудованием стала новостью - не только из-за появления принципиальной возможности, но и из-за относительно доступной стоимости на уровне 10 миллионов рублей (2023г). Современный сканирующий зондовый микроскоп «СММ-2000» с разрешением до 1 нм, был реализован в виде спутника Земли «Нанозонд-1» размером всего 300x100x100 мм (рис.1), и 27 июня 2023 года успешно запущен в космос на высоту 560 км в начало «протонного пояса». Правообладателем международного патента [2] на этот тип космических аппаратов является российское предприятие «Завод ПРОТОН», г. Зеленоград, изготовитель этих аппаратов.

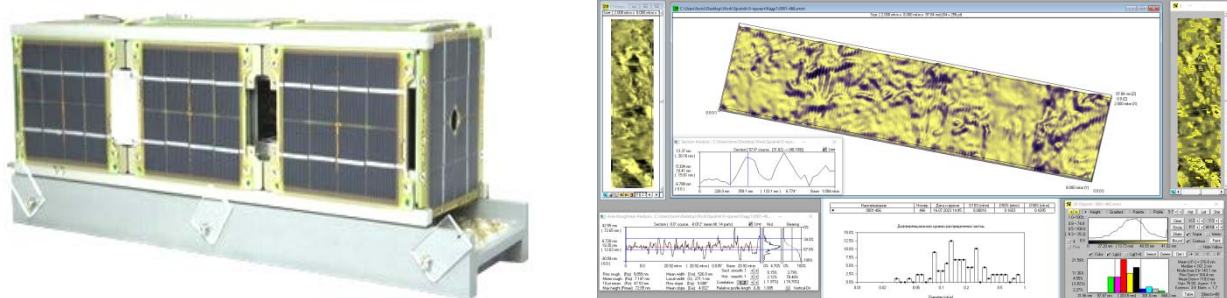


Рис.1. Первый в мире зондовый микроскоп-спутник Земли (слева) и полученный в нём кадр размером 8 мкм x 2 мкм поверхности золотого зеркала после его экспонирования в открытом космосе на высоте 560 км над уровнем моря в «протонном поясе» Земли.

Этот космический аппарат рассчитан более чем на два года полетов, при этом в день он может делать более сотни высокоразрешающих кадров поверхности образца, передавая эти кадры на Землю по радиоволнам, доступным для принятия обычными антеннами. В реализуемом в настоящее время эксперименте предстоит принять и анализировать ещё

много данных, но даже на первом кадре отчётливо видно серьёзное изменение поверхности образца: на гладкой поверхности золотого зеркала с шероховатостью Ra не более 1 нм появились множественные рытвины глубиной до 30 нм. Запуск аналогичных космических аппаратов с образцами начал приобретать регулярный характер [3], с возможным расширением количества и типов аналитических приборов на борту.

Литература:

[1] Суворов А.Л., Логинов Б.А., Макеев О.Н., «Способ и устройство контроля и исследования поверхности внутри ядерных и термоядерных установок», Патент на изобретение № RU 2169954 С1, 27.07.2000г

[2] Логинов Б.А., «Комплекс зондовой микроскопии для работы в космическом пространстве и атмосфере», Патент на изобретение № RU 2778278 С1, 17.08.2022г

[3] Логинов Б.А., «Первый в мире сканирующий зондовый микроскоп в виде спутника – как старт этапа научных спутников-лабораторий», Наноиндустрия, 2021, №5, с.22-26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОМИНИРУЮЩЕГО МЕХАНИЗМА СБОЕВ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М.В. Марчук^{1,2}, О.В. Ткачев², А.С. Пилипенко², С.М. Дубровских², А.С. Кустов²,
Е.А. Шibaков², К.В. Сафронов², А.С. Тищенко², В.А. Флегентов², С.А. Горохов²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, Свердловская обл., Россия (Maria.Vakulina@urfu.me)

²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл.,
Россия

В настоящее время порядка 40-50% от всего объема радиационных испытаний, проводимых в интересах предприятий космической отрасли, приходится на тематику одиночных радиационных эффектов (ОРЭ). Одним из проявлений ОРЭ является нарушение логического состояния элемента памяти под воздействием отдельных частиц, так называемые одиночные сбои (ОС).

Сбои из-за прямой ионизации протонами были впервые предсказаны в 1982 году [1] и впоследствии экспериментально подтверждены в 2007 году [2] для протонов низкой энергии, генерируемых на статическом ускорителе. В дальнейшем в работах различных авторов было подтверждено, что прямая ионизация протонами обуславливает одиночные сбои. При этом в данных исследованиях сечение сбоев под действием низкоэнергетических протонов на несколько порядков превышало значение для протонов высоких энергий.

Особенностью постановки эксперимента в настоящей работе является использование импульсного источника протонов на основе лазер-плазменного источника. Несмотря на то, что идея лазерного ускорения частиц не нова, авторам не известны работы, в которых бы подобный источник применялся для исследований реакции микроэлектронных устройств на воздействие отдельных ядерных частиц. На наш взгляд, такой источник является перспективным, однако существует вопрос, связанный с относительной большой плотностью потока протонов лазер-плазменного источника (порядка 10^{13} – 10^{16} см⁻²·с⁻¹),

вследствие чего возможно возникновение эффектов объемной ионизации. Требовалось оценить корректность моделирования протонного излучения (низкоэнергетического) космического пространства на лазер-плазменной установке.

В связи с этим цель данной работы заключалась в определении посредством анализа экспериментальных данных доминирующего механизма сбоев исследуемого образца при воздействии импульса низкоэнергетических протонов.

Литература

[1] E.L. Petersen, et. al. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-29(6), pp. 2055-2063 (1982).

[2] K. P. Rodbell, et.al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 54(6), pp. 2474–2479(2007).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ МИГРАЦИИ ВАКАНСИЙ В МЕТАЛЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Н.В. Глушкова¹, А.В. Козлов¹, К.М. Ладейщиков^{1,2}, В.Л. Панченко¹, А.А. Зырянова¹,
Е.В. Шабельников¹, В.А. Цывинцев¹, Д.Н. Вельмогин¹

¹ АО «Институт реакторных материалов», 624250, г.Заречный Свердловской обл., а/я 29

² Уральский федеральный университет, 620002, Екатеринбург, ул.Мира 28

Кинетика образования в материалах точечных дефектов и их энергетические характеристики, в частности, энергии миграции и взаимодействия со стоками, необходимы для описания радиационно-индуцированных процессов, протекающих в реакторных материалах при нейтронном облучении. Для их определения проводятся расчеты с использованием методов молекулярной динамики и различных видов межатомных потенциалов. Результаты, полученные разными авторами различаются, ситуация значительно усложняется, когда их пытаются получить для реальных многокомпонентных реакторных сталей и сплавов. Разработка и использование экспериментальных методов определения характеристик точечных дефектов, генерируемых облучением, является актуальной задачей реакторного материаловедения.

Одним из методов, применяемых для регистрации температуры, при которой вакансии обретают подвижность, является сопоставление диаграмм дилатометрического нагрева образцов с концентрацией вакансий, близкой к термически равновесной с образцом с их повышенной концентрацией. Эффективным методом накопления в образце большого количества вакансий является низкотемпературное нейтронное облучение, когда генерируемые межузельные атомы мигрируют и уходят на стоки, в частности из тела, а вакансии практически лишены термической подвижности и накапливаются в образце.

В работе приведены результаты экспериментального определения энергии миграции вакансий в образцах никеля и хрома после проведения низкотемпературного облучения в реакторе ИВВ-2М в течение 179 часов при температуре порядка 40÷45 °С. Наряду с получением разностной дилатограммы – температурной зависимости разности относительных удлинений необлученного и облученного образцов, приведены результаты просвечивающей электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа образцов в исходном состоянии и после низкотемпературного нейтронного облучения.

ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ОБЛУЧЕННОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.И. Пастухов^{1,2}, В.Ю. Ярков^{1,2}, Р.П. Карагерги¹, И.А. Портных¹

¹АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия (pastuhov_vi@irmatom.ru)

²ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

Реактор на быстрых нейтронах является ключевым звеном в создании замкнутого топливного цикла ядерной энергетики. Прогресс и успешная эксплуатация реакторов данного типа обусловлена выбором конструкционных материалов и поэтапным анализом и улучшением функциональных характеристик данных материалов [1,2]. Результатом накопленного опыта эксплуатации и совершенствования явились аустенитная сталь с базовой основой Cr/Ni (16:15), а также её следующее поколение с увеличенным содержанием Ni до 19,5 %. Данные стали успешно эксплуатировались и эксплуатируются в качестве оболочек тепловыделяющих элементов.

Повышение выгорания ядерного топлива существующих реакторов на быстрых нейтронах решается путем увеличения длительности топливной кампании [3], что в свою очередь зависит от сохранения работоспособности оболочек твэлов. Повышение длительности топливной кампании приводит к увеличению накопленной повреждающей дозы, изменению структурного состояния, локального химического и фазового состава во время облучения при повышенных температурах. Протекающие процессы оказывают прямое влияние на прочностные (механические) характеристики аустенитных сталей и характер разрушения.

Применение сканирующей электронной микроскопии в исследовании поверхности излома облученных образцов может показывать особенности протекающих процессов деформации во время разрушения [4].

Проведено исследование особенностей изломов аустенитной оболочечной стали после эксплуатации и механических испытаний при температурах от 24 до 650 °С. Определены особенности поверхности разрушения при различных температурах.

Литература

- [1] Mitrofanova N.M., News of universities. Nuclear Energy, № 1 (2011), p. 211
- [2] Bakanov M.V., News of universities. Nuclear Energy, № 1 (2011), p. 187
- [3] Chuev V.V., News of universities. Nuclear Energy, № 2 (2011), p. 171
- [4] Margolin B.Z. Journal of Nuclear Materials, V. 549 (2021), 152911

ОТРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ПЛУТОНИЯ В МОКС-ТОПЛИВЕ ПО ШЛИФУ ТАБЛЕТКИ

Ю.А. Карзанов, А.А. Мальцев

Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк», Россия, Челябинская область, г. Озерск (mayak@ro-mayak.ru)

В период с 2018 года по 2022 на опытной установке, расположенной на ФГУП «ПО «Маяк» велось изготовление образцов таблеток смешанного оксидного уран-плутониевого топлива (далее - МОКС- топливо), в соответствии с ТУ, разработанным в ОАО «ВНИИНМ», используемые в дальнейшем при загрузке активной зоны Белоярской АЭС.

В следствие отсутствия методик и рекомендаций по контролю отдельных параметров таблеток таких, как: максимальный линейный размер участка с повышенным содержанием плутония от номинального значения (массовой доли плутония к сумме изотопов урана и плутония) в два раза, площадь участков с повышенным содержанием плутония от номинального значения в два раза от площади сечения шлифа, специалистами ФГУП «ПО «Маяк» была разработана методика по контролю данных параметров с использованием сканирующего электронного микроскопа (далее - СЭМ) и энергодисперсионной приставки.

Суть метода заключалась в картировании поверхности подготовленного шлифа таблетки МОКС-топлива с использованием ЭДС-детектора и дальнейшем анализе полученных данных при помощи программного обеспечения, встроенного в СЭМ.

Методика была валидирована сотрудниками ОАО «ВНИИНМ» и использовалась для контроля МОКС-топлива, поступающего в дальнейшем на Белоярскую АЭС в период с 2018 по 2022 год, а также для проверки ее применимости в части контроля экспериментальных таблеток с измененными физическими характеристиками.

На основе полученного опыта были сделаны выводы по возможности применения методики не только к таблеткам известного состава, но и к экспериментальным, с измененными характеристиками, а также запланированы работы по усовершенствованию подходов к реализации разработанного метода контроля топливных композиций различного состава.

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМООТРАЖЕНИЯ ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ОБЛУЧЁННОМ ТЯЖЁЛЫМИ ИОНАМИ С ВЫСОКИМИ ЭНЕРГИЯМИ КРИСТАЛЛЕ АИГ

Анна Шаматова¹, Ербол Куттыбай², Азат Абдуллаев¹, Жандос Утегулов¹

¹*Департамент физики, Школа естественных, социальных и гуманитарных наук, Назарбаев Университет, Астана, 010000, Казахстан (anna.shamatova@nu.edu.kz)*

²*Департамент электротехники и компьютерной инженерии, Школа инженерии и цифровых наук, Назарбаев Университет, Астана, 010000, Казахстан*

Одно из перспективных направлений разработки ядерного топлива следующего поколения основана на инертном матричном топливе (ИМТ), содержащем матрицу с

низкой активацией (т.е. прозрачную для нейтронов) в качестве носителя для расщепляющегося материала. Керамические композиты на основе алюмоиттриевого граната (АИГ) $Y_3Al_5O_{12}$ могут выступать в качестве ИМТ [1]. Материалы ИМТ проверяют на радиационную стойкость быстрыми тяжелыми ионами (БТИ), имитирующих воздействие продуктов деления (ПД). БТИ с энергиями > 100 МэВ повреждают приповерхностную область на величину до десятков микрон, распространяя электронную ионизацию и ядерную разупорядоченность. Керамика ИМТ, помимо радиационной стойкости к ПД, должна также обладать высокой устойчивостью к снижению теплопроводности из-за соответствующих радиационных дефектов [2,3]. Теплофизические свойства облученных материалов-кандидатов в ИМТ необходимо оценивать с соответствующим пространственным разрешением по глубине в микромасштабе.

Для оценки приповерхностной теплопроводности мы собрали и протестировали в нашей лаборатории установку термоотражения накачки-зондирования на основе непрерывных лазеров, работающую в двух режимах: термоотражение в частотной шкале (ТОЧШ) и термоотражение в пространственной шкале (ТОПШ) [4]. В первом случае лазерные луч накачки и зондирующий луч фокусируются в одно и то же пятно микронного размера на поверхности образца. Частота модуляции нагревающего лазерного луча изменяется в диапазоне частот $0,3 - 100$ кГц, что позволяет измерять теплопроводность в поперечной плоскости образца путем термического разрешения как поврежденных ионами, так и лежащих дальше неповрежденных областей в диапазоне глубин порядка микрометров. Во втором случае зондирующий луч сканирует поверхность образца в радиальной плоскости с постоянной скоростью модуляции, что позволяет оценить тепловую анизотропию, т.е. радиальную теплопроводность [5].

Мы изучили свойства теплопереноса монокристалла АИГ при комнатной температуре с микронным разрешением по глубине, облученного ионами ксенона с энергией 167 МэВ с дозами облучения $f = 2 \times 10^{11} - 6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Этот диапазон доз облучения был выбран для получения как одиночных ионных треков, так и частичного перекрытия треков в кристаллической решетке АИГ.

Уравнение теплопроводности для многослойного образца используется для определения теплопроводности поврежденного слоя АИГ. Полуаналитическая модель, основанная на приближении Клеменса-Дебая [7], используется для моделирования различных механизмов рассеяния фононов в чистом и облученном АИГ, которые являются основными теплоносителями в этом диэлектрике.

Результаты этого исследования показали, что теплопроводность облученного АИГ существенно падает при самой высокой дозе облучения, и, как и ожидалось, наблюдалось влияние от перекрытия треков. Мы предполагаем, что образование аморфных треков при облучении БТИ потенциально может привести к анизотропии теплопереноса в кристалле АИГ. Дальнейшее изучение этого эффекта с использованием ТОПШ метода предоставит новые возможности регулирования теплопереноса при облучении ионным пучком в диэлектриках и будет способствовать разработке нового метода контроля свойств материалов.

Проект поддержан грантами MSHE AP19679332, NU 20122022CRP1608, NU 20122022FD4130, NU 11022021CRP1504.

Литература

- [1] L.S. Golovkina *et al.*, *J. Nucl. Mat.*, **511**, p. 109-121 (2018).
- [2] C. Ronchi, M. Sheindlin, D. Staicu, M. Kinoshita, *J. Nucl. Mat.* **327**, p. 58-76 (2004).
- [3] C. Ronchi, *High Temperature*, **45** (4), p. 552-571 (2007).

- [4] David H. Hurley *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 123901 (2015).
[5] Vinay S. Chauchan *et al.*, *AIP Advances.* **10**, 015304 (2020).
[6] Azat Abdullaev *et al.*, *J. Nucl. Mat.*, **561**, 153563 (2022).
[7] P.G. Klemens, *Phys. Rev.* **119**, p.507 (1960).

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК И ИОННО- МОДИФИЦИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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)

Еще в ранних работах, например, [1], было показано, что сателлитная структура, сопровождающая РФЭС пик C1s, несет в себе важную информацию о материале. В частности, это было показано при исследовании фуллеренов C60. Учитывая связь энергии плазмона и массовой плотности вещества в г/см³, было определено, что плотность фуллерена составляет 2,03 г/см³, что существенно отличалось от ранее полученных рентгеноструктурными методами значений [2]. В обзорной работе [3] в 6 главе было также подробно показано, что из анализа энергий плазмонных потерь возможно определить как массовую, так и атомную плотность углеродных материалов, в частности тонких пленок аморфного углерода.

Целью данной работы явилось определение массовой плотности магнетронно напыленных углеродных пленок, а также углеродных пленок, подвергнутых последующей импульсной имплантации ионов аргона и азота. На основе обзорной работы [3] проверена возможность использования кратких аналитических выражений для определения массовой плотности известных форм углерода ранее аттестованных образцов.

Получены значения массовой плотности этих материалов, что показало удовлетворительное согласие со справочными данными значений массовой плотности углеродных материалов, определенных методом РФЭС. В дальнейшем эти методические результаты были использованы для характеристики тонких ионно-модифицированных магнетронных пленок на поверхности стекла или железа. Показано, что магнетронно напыленные пленки, во-первых, являются сильно разупорядоченными, а во-вторых, пленки имели существенно меньшую массовую плотность (в среднем 1,88 г/см³), по сравнению с известной плотностью массивного графита (2,26 г/см³), мишень из которого была использована при магнетронном напылении. Эта же методика позволила в дальнейшем показать изменения массовой плотности магнетронно напыленной тонкой углеродной пленки при импульсном облучении ионами разной массы и химической активности.

Литература

- [1] Шульга Ю.М., Моравский А.П., Лобач А.С., Рубцов В.И. *Письма в ЖЭТФ*, т. **55** (1992), вып.2. С. 137-140.
[2] Kratshmer W., Lamb L.D., Fostiropoulos K., Huffman D.R. *Nature*, Vol. **347**(1990), P. 354.
[3] Schultrich B. Tetrahedrally Bonded Amorphous Carbon Films I. *Part of the book series:*

ПРОЕКТ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ОБЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ИОНАМИ H, He, Me (Cr, Fe, Ni).

С.В. Митрофанов, В.А. Скуратов, Г.Г. Гульбежян

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

Анализ литературных данных последних лет наглядно свидетельствует о «ренессансе» работ, связанных с моделированием воздействия высокодозного нейтронного облучения с использованием одновременного облучения ускоренными пучками водорода, гелия и одного из металлических ионов. Одновременное облучение ионами водорода, гелия и железа (хрома, никеля) является необходимым условием современных экспериментов по моделированию структурных нарушений, вызываемых нейтронами в материалах ядерно-энергетических установок. В мировой практике подобные работы проводятся на ускорителях с энергиями частиц, обеспечивающих толщину облученного слоя не менее 2-х микрон (для исключения эффекта поверхности) и позволяющими получать дозы радиационных повреждений до 150 смещений на атом (сна, dpa) и концентрацию гелия и водорода до 1000 ppm.

В России единственным ускорителем, в полной мере отвечающим современным требованиям отрасли и позволяющим проводить последовательное облучение перечисленными выше типами ионов, является 3MV Tandetron 4130 MC+(HC) (ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск). Обзор существующих иностранных установок показывает, что в мире отсутствуют прецеденты создания специализированного ускорительного комплекса для решения задачи одновременного облучения мишеней тремя пучками (оптимизация соотношения скоростей дефектообразования к скоростям накопления гелия и водорода). Подобные комплексы строились постепенно, как следствие, существующие установки (JANNuS – Франция; TIARA - Япония; HZDR - Германия), имеющие в своей базе электростатические ускорители и созданные для задач ядерного анализа (RBS, PIXE, NRA), не оптимизированы для задач радиационного материаловедения.

В настоящее время в рамках комплексной программы ГК Росатом (Развитие техники, технологий и научных исследований атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года) реализуется федеральный проект «Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем». Одним из предложений к реализации в его рамках был запрос на создание в Российской Федерации специализированного центра имитационных исследований конструкционных материалов на базе ускорительного комплекса электростатических ускорителей. Доукомплектование ускорительного парка ГНЦ РФ ФЭИ машинами Singletron 2MV и Tandetron 5MV позволило бы создать в России уникальный по своим характеристикам центр. Но вследствие изменения геополитической обстановки в 2022 году, данное предложение не было реализовано.

В силу специфики данного типа ускорителей и сложившейся обстановки изоляции Российской Федерации от поставок высокотехнологичного научного оборудования, учитывая многолетний профессиональный опыт ЛЯР ОИЯИ в области создания прикладных ускорительных комплексов и, принимая во внимание мировой уровень экспертизы ЛЯР в радиационном материаловедении, представляется возможной

альтернативная идея для базовых ускорителей центра.

Альтернативой комплексу из электростатических ускорителей может быть разработка в ЛЯР ОИЯИ установки одновременного тройного облучения на базе трех компактных циклотронов с энергиями протонов 0,5 МэВ, гелия 2 МэВ и железа/хрома/никеля 21 МэВ, что полностью удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к параметрам пучков в имитационных экспериментах. Прикладной комплекс с данными параметрами позволит получать высокие уровни дозы радиационных повреждений с регулируемым в процессе облучения соотношением скоростей дефектообразования и скоростей накопления гелия и водорода.

Специалистами научно технологического отдела ускорителей ЛЯР ОИЯИ разработана и предлагается к рассмотрению общая концепция центра имитационных исследований конструкционных материалов на базе трех компактных циклотронов (ЦИМИС-Цикло).

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

A
Almásy L. 36

C
Ćosić M. 23

H
Han Jihong 29
Hao Jingwei 29

J
Janse van Vuuren A. 23

K
Ke Yu. 36

L
Liu C.T. 29
Liu Liyuan 29

O
O'Connell J.H. 23

P
Petrov Roman 83

S
Short M.P. 6, 7

W
Wang X-L. 29

Z
Zhang Y. 29
Zhang Yang 29
Zhang Z.W. 29
Zhang Zhongwu 29

A
Абдуллаев Азат 91
Абин Д.А. 78, 79
Аверин С.А. 5, 52
Акилбеков А. 77
Алексеев П.А. 57
Андреев П.В. 76
Антонов В.А. 75
Афанасьев С.В. 66
Ахметов М.Ф. 57

Б
Баранов Н.В. 60
Барсанова С.В. 30

Батулин Р.Г. 78
Баянкин В.Я. 65, 67, 68, 70, 71
Беляев Д.А. 24
Бергер И.Ф. 4
Бобровский В.И. 66
Богачев А.А. 34, 35, 36
Богучава Г.Д. 36
Болтуева В.А. 45
Бондаренко Г.Г. 9
Боровицкая И.В. 9
Быков П.В. 65, 68, 70, 93
Быстров С.Г. 65, 67, 68

В
Валеева А.А. 4
Ваулин А.А. 60
Вельмогин Д.Н. 31, 89
Вершинина Т.Н. 13, 45
Внукова Н.Г. 37, 46
Волков А.Е. 23
Волкова Т.С. 53
Володин В.А. 75
Воробьев В.Л. 65, 68, 70
Воронин В.И. 59, 66

Г
Гизов В.О. 85
Гильмутдинов Ф.З. 93
Гладышева В.С. 65, 68
Глушкова Н.В. 11, 31, 89
Глущенко Г.А. 37, 46
Горохов С.А. 88
Горшкова Ю.Е. 36
Грачков А.А. 21
Губкин А.Ф. 60
Гульбекян Г.Г. 94
Гынгазов С.А. 45

Д
Даулетбекова А. 77
Демидов Д.Н. 3
Демин А.С. 9
Динь Чи Линь 13
Доанг Динь Фьонг 13
Дремов В.В. 17, 26
Дроздов А.Ю. 71
Дубровских С.М. 8, 85, 88

Е
Елесина В.И. 37, 46
Ельцов Г.С. 17, 26
Епифанов Н.А. 9

Ж
Жихарев А.В. 67

З
Завалишин В.А. 44
Залужный А.Г. 34, 36

Заматовский А.Е. 40
Зуев Ю.Н. 24
Зырянова А.А. 11, 89

И
Илларионова И.А. 84
Искандаров Н.А. 35

К
Казанцев В.А. 66
Калугин А.П. 75
Караваев А.В. 17, 26
Карагерги Р.П. 30, 90
Карзанов Ю.А. 43, 91
Карпенко С.Э. 18, 19
Картапова Т.С. 93
Катаева Н.В. 44, 66
Кащенко М.П. 39
Кащенко Н.М. 39
Ким Е.Р. 7
Кирилкин Н.С. 45, 77
Кислицин С.Б. 7
Клауз А.В. 34, 35, 36
Коваленко М.А. 39
Козлов А.В. 11, 30, 40, 41, 47, 89
Козлов К.А. 11, 40
Колотов А.А. 70, 71
Коновалов А.А. 85
Корнеева Е.А. 13
Королик О.В. 77
Кулевой Т.В. 78
Кулешова Е.А. 31, 32
Купряжкин А.Я. 39
Кустов А.С. 84, 88
Куттыбай Ербол 91

Л
Ладейщиков К.М. 11, 41, 89
Лапин М.В. 18, 19
Лекомцев С.А. 24
Леонтьева Смирнова М.В. 44
Логинов Б.А. 87
Лукьянчук А.А. 35

М
Мальцев А.А. 91
Маматова М. 77
Марков А.Б. 42
Мартиросян И.В. 78, 79
Марчук М.В. 88
Масляев С.А. 9
Матвиенко В.Н. 18, 19
Медведев Н. 23
Мережко Д.А. 6, 7
Мережко М.С. 6, 7
Мешков Е.А. 20
Мигдал К.П. 21
Мирзоев А.А. 17, 26
Митрофанов С.В. 94
Морозов Е.В. 9
Мяконьких А.В. 75

Н		
Назаров А.А.	76	
Нгуен Ван Тоан	13	
Нгуен Ван Тъеп	13	
Никитин А.А.	35, 36	
Никитина А.А.	40, 44	
Николаев Н.С.	37, 46	
Новиков М.С.	79	
Носовец В.С.	8	
Нохрин А.В.	76	
О		
О'Коннелл Ж.	45	
Овчаренко А.М.	13	
Овчинников В.В.	12, 69	
П		
Панченко В.Л.	11, 40, 47, 89	
Пархоменко В.Д.	66	
Пархоменко В.Д.	4	
Пастухов В.И.	30, 52, 90	
Пеленицын В.Р.	18	
Пестерев Е.А.	42	
Печенкин В.А.	86	
Печорский В.И.	39	
Пилипенко А.С.	88	
Пименов В.Н.	9	
Пирогов А.Н.	4	
Пичугина Л.О.	43	
Покровский С.В.	78, 79	
Поляков Е.В.	43	
Попов В.П.	75	
Порсев В.Е.	71	
Портных И.А.	47, 90	
Потехин А.А.	31	
Прекул А.Ф.	60	
Проскурнина Н.В.	59, 66	
Прянишников К.Е.	78	
Р		
Разницын О.А.	35	
С		
Савченков П.С.	57	
Сагарадзе В.В.	40, 44, 66	
Сафронов К.В.	88	
Святов И.Л.	24	
Сексембаев Ж.Б.	51	
Сёмкин М.А.	4	
Сивак А.Б.	3, 10	
Сирош В.А.	44	
Скуратов В.А.	13, 23, 45, 75, 77, 94	
Слободян М.С.	42	
Соловьёва С.В.	31	
Солодовников Л.Н.	24	
Сохацкий А.С.	13	
Стаканова Н.А.	43	
Стариковский А.С.	78	
Т		
Талала К.А.	84	
Тарапеева А.Ю.	6	
Тарасенков А.Н.	70	
Татауров Е.Ю.	53	
Тищенко А.С.	88	
Ткачев О.В.	8, 84, 85, 88	
У		
Устинов А.Е.	47, 52	
Утегулов Жандос	91	
Ф		
Федин П.А.	78	
Федотова С.В.	32	
Флегентов В.А.		
	88	
Х		
Хлабыстина Л.Р.	18, 19	
Хомич А.А.	34, 35, 36	
Хорошенина Е.Д.	8	
Ц		
Цай К.В.	7	
Цывинцев В.А.	89	
Цыгвинцев В.А.	31	
Ч		
Чан Бао Чунг	13	
Чернов В.М.	38	
Чирков П.В.	17, 26	
Чурилов Г.Н.	37, 46	
Ш		
Шабашов В.А.	40	
Шабельников Е.В.	11, 89	
Шаматова Анна	91	
Шелан Ю.Н.	18, 19	
Шерстобитова Е.А.	59	
Шехтман Г.Ш.	59	
Шибиков Е.А.	88	
Шутов А.С.	35	
Шушков А.А.	70	
Щ		
Щелканова М.С.	59	
Ю		
Юнин П.А.	76	
Я		
Янилкин А.В.	20, 21, 22, 25	
Ярков В.Ю.	30, 52, 90	

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