

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

**Четырнадцатый Международный Уральский
Семинар**



**РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

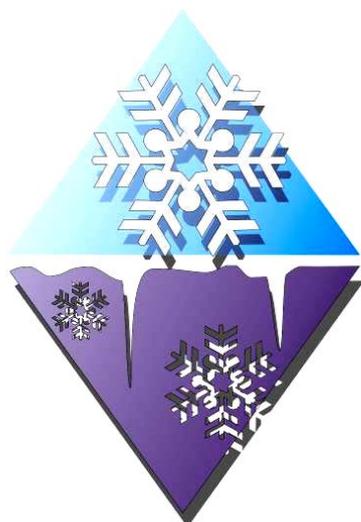
25 – 29 апреля

Тезисы докладов

Кыштым, Россия

2022

**Посвящается памяти академика РАН
Е.Н. Аврорина и член-корреспондента РАН
Б.Н. Гощицкого**



Четырнадцатый Международный Уральский Семинар

**РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА
МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

25 – 29 апреля

Тезисы докладов

**Кыштым, Россия
2022**

ОРГАНИЗАТОРЫ

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 Семинара
В.И. Бобровский, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
В.Н. Брудный, НИ ТГУ, Томск
П.В. Быков, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск
А.В. Двуреченский, ИФП СО РАН, Новосибирск
А.Г. Залужный, ИТЭФ, Москва
Ю.Н. Зуев, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
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.В. Плохой, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.П. Попов, ИФП СО РАН, Новосибирск
М.И. Похлебаев, ПО «Маяк», Озерск
В.Д. Рисованый, АО «Наука и инновации» ГК
Росатом, Москва
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, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.М. Чернов, ВНИИНМ, Москва

Международный консультативный комитет:

P.A. Alekseev, Moscow, Russia
F.A. Garner, Richland, USA
S.I. Golubov, Oak Ridge, USA
E.M. Ibragimova, Ulugbek, Uzbekistan
A.S. Ivanov, Grenoble, France
Yu.V. Konobeev, Obninsk, Russia
B.V. Robouch, Frascati, Italy
M.P. Short, Cambridge, USA
Z.W. Zhang, Harbin Engineering University, Harbin,
China

Программный комитет:

А.В. Козлов, ИРМ, Заречный, Председатель
П.В. Быков, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск
А.В. Двуреченский, ИФП СО РАН, Новосибирск
А.Г. Залужный, ИТЭФ, Москва
Ю.Н. Зуев, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
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
В.А. Печёнкин, ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск
С.В. Рогожкин, ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ, Москва
В.М. Чернов, ВНИИНМ, Москва

Секретариат:

Д.А. Перминов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург,
Учёный секретарь
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
Е.И. Лаврукова, ИФМ УрО РАН, Россия
М.В. Лапин, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.Н. Матвиенко, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
А.Б. Нечаева, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.Ф. Терещенко, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
Celia M. Elliott, University of Illinois at Urbana-
Champaign, USA

Комиссия по подведению итогов конкурса молодых докладчиков:

С.В. Рогожкин, Председатель
П.В. Быков
Ю.Н. Зуев
А.В. Козлов
В.В. Овчинников

Наши спонсоры:

Госкорпорация по атомной энергии «Росатом»,
Москва
РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск
ФГУП ПО «Маяк», Озерск
ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
АО «Спектрометрические системы», Москва

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
POINT DEFECTS AND SELF-DIFFUSION MECHANISMS IN TRANSITION METAL CARBIDES P.A. Korzhavyi, M. Nourazar and E.A. Smirnova	3
АНИЗОТРОПНАЯ ДИФФУЗИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОЦК (Fe, V) И ГЦК (Cu) КРИСТАЛЛАХ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ А.Б. Сивак, Д.Н. Демидов, П.А. Сивак	4
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КРАУДИОНА В ДЕФОРМИРУЕМОМ ГЦК-МЕТАЛЛЕ С.А. Стариков, А.Р. Кузнецов, В.В. Сагарадзе	5
ДИФФУЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛАСТЕРОВ СОБСТВЕННЫХ МЕЖУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ В ВАНАДИИ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ Д.Н. Демидов, А.Б. Сивак, П.А. Сивак	6
ИММОБИЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ФРЕНКЕЛЯ В СПЛАВЕ Fe-13Cr-2Si А.Л. Николаев, Д.А. Перминов	7
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ПАКЕТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ШПИЛЕК МАЛОЙ ПОВОРОТНОЙ ПРОБКИ БОР-60 Д.А. Соколовский, Е.И. Макаров, Д.Е. Маркелов, В.С. Неустроев, И.Ю. Жемков, Ю.М. Крашенинников, Ю.В. Набойщиков, Н.С. Погляд	7
К ВОПРОСУ ОБ ИМИТАЦИОННОЙ ОЦЕНКЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В.В. Овчинников	8
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ Н.В. Глушкова, К.М. Ладейщиков, И.А. Сафонов, А.В. Дуб, В.Л. Панченко, А.В. Козлов, А.А. Никитина	9
ПОВЕДЕНИЕ НИОБИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС Н.А. Епифанов, В.Н. Пименов, И.В. Боровицкая, А.С. Дёмин, С.В. Латышев, С.А. Масляев, Е.В. Морозов, И.П. Сасиновская, Г.Г. Бондаренко, А.И. Гайдар	10
ПРИРОДА «СТРАННОГО» ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ М.П. Кашенко, Н.М. Кашенко	11
РАСПУХАНИЕ МЕДИ, ОБЛУЧЕННОЙ ЭЛЕКТРОНАМИ, ПРОТОНАМИ И НЕЙТРОНАМИ А.М. Овчаренко	12
РЕГУЛИРОВАНИЕ КТР АУСТЕНИТНЫХ Fe-Ni СПЛАВОВ ПРИ РАДИАЦИОННОМ И ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В.В. Сагарадзе, С.Е. Данилов, В.А. Шабашов, В.А. Казанцев	13
ЭВОЛЮЦИЯ СОБСТВЕННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ НА СТОКАХ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ А.В. Козлов, К.А. Козлов, А.Р. Исинбаев, И.А. Портных	14
<u>II. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕ-РНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, НОВЫЕ ПОД-ХОДЫ К СОЗДАНИЮ РАДИ-АЦИОННО-СТОЙКИХ КОНСТ-РУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</u>	15
SILVER TRANSPORT THROUGH SiC LAYERS OF TRISO FUEL PARTICLES J.H. O'Connell, E.J. Olivier, J.H. Neethling	17

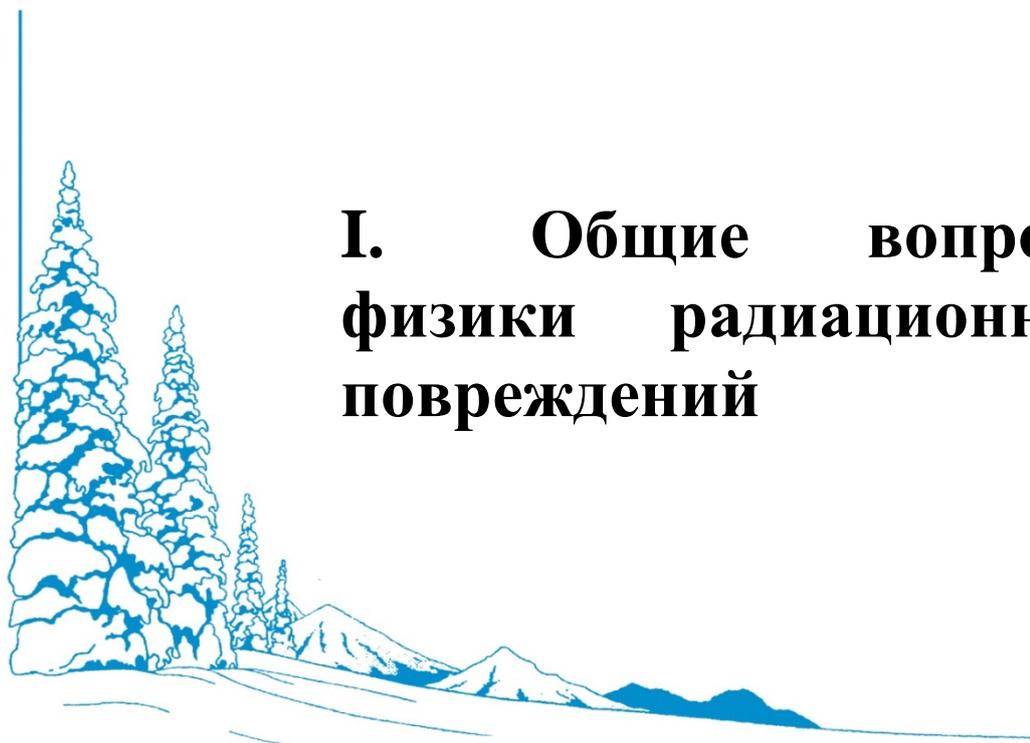
THEORETICAL STUDY THE EFFECT OF RESIDUAL GASES ON SWELLING ACCUMULATION IN STRUCTURE REACTOR MATERIALS AT HIGH NEUTRON DOSES	18
S.I. Golubov, A.V. Barashev	
ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ЖАРОПРОЧНОЙ МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181	19
Н.А. Полехина, В.В. Линник, К.В. Алмаева, И.Ю. Литовченко, В.М. Чернов, М.В. Леонтьева-Смирнова, Н.А. Дегтярев, К.А. Мороз	
ВЛИЯНИЕ ГИДРИДОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАЗРУШЕНИЕ ОБЛУЧЕННОГО СПЛАВА Zr-2.5%Nb	20
С.А. Аверин, В.Ю. Ярков, В.А. Цыгвинцев, М.В. Евсеев	
ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ	21
К.М. Ладейщиков, А.В. Козлов	
ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ИСХОДНЫХ РЕАКТИВОВ НА КАЧЕСТВО НАТРИЕТЕРМИЧЕСКОГО ПОРОШКА ЦИРКОНИЯ	22
Е.Ф. Искандарова, Е.Ю. Татауров, Т.С. Волкова, В.В. Рудских	
ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОБЛУЧЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ	23
Р.П. Карагерги, А.Г. Нежданов, В.Ю. Ярков, В.И. Пастухов, М.В. Евсеев, А.В. Козлов, И.А. Портных	
ГИДРИДЫ В СПЛАВЕ ZR-2,5%NB ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ	24
В.К. Самедов, С.А. Аверин, В.Ю. Ярков, А.Р. Исинбаев	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО РАСПУХАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОЛОЧЕК ИЗ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ БН	24
А.Р. Исинбаев, А.В. Козлов, И.А. Портных	
КОРРОЗИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ВО ФТОРИДНОМ РАСПЛАВЕ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ	26
В.А. Шелан, В.Г. Субботин, Д.В. Хмельницкий, Р.Р. Фазылов, М.Н. Белоногов, Е.А. Леви, П.А. Санникова, И.В. Санников	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ FE НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ ОКСИДАМИ СТАЛИ 10Cr ODS МЕТОДАМИ УЛЬТРАМИКРОСКОПИИ	27
А.В. Клауз, А.А. Хомич, А.Г. Залужный, С.В. Рогожкин	
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ 9-13% ХРОМИСТЫХ ДУО СТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ V, Ti И Al, ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ЖЕЛЕЗА	27
А.А. Хомич, С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, А.А. Богачев, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, А.С. Шутов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ Rh-Cu МЕТОДОМ ВАКУУМ-ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ	28
А.Н. Тарасенков, А.И. Савицкий, Д.В. Новиков, С.В. Дубков, Д.Г. Громов	
КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ	30
С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, А.А. Хомич, А.А. Богачев, А.В. Клауз, Н.А. Искандаров, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, А.С. Шутов, А.Г. Залужный, Ю.Е. Горшкова, Г.Д. Богучава	
МЕССБАУЭРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В СТАЛИ ЭП823 ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ БН600	31
К.А. Козлов, В.А. Шабашов, А.В. Козлов, В.В. Сагарадзе, В.Л. Панченко, А.Е. Заматовский, А.А. Никитина	

ОБРАЗОВАНИЕ ФЕРРИТА В СТРУКТУРЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ВЫСОКОДОЗНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ	31
Д.А. Мережко, М.С. Мережко, М.Н. Gussev, F.A. Garner	
ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ 12 %-НОЙ ХРОМИСТОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-823 С ПРОТОЧНЫМ СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА	32
Н.А. Полехина, С.А. Аккузин, К.В. Алмаева, И.Ю. Литовченко, В.В. Линник, В.М. Чернов, М.В. Леонтьева-Смирнова	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ РОССИЙСКИХ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ С ОЦК РЕШЕТКОЙ	34
В.А. Завалишин, Н.В. Катаева, В.В. Сагарадзе, М.В. Леонтьева-Смирнова, А.А. Никитина	
СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ	35
Е.А. Кулешова, Д.А. Мальцев, А.С. Фролов, Д.В. Сафонов, Н.В. Степанов, Б.З. Марголин	
СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЕННОЙ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ КРИПТОНА	36
В.В. Углов, В.М. Холод, П.С. Гринчук, М.В. Кияшко, С.В. Злоцкий, И.А. Иванов, А.Л. Козловский, М.В. Здоровец	
СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКВИАТОМНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ V-Nb-Ti-Ta, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ	37
В.В. Углов, М.М. Белов, С.В. Злоцкий, Д. Ке, А.Е. Рыскулов, Л.А. Козловский, М.В. Здоровец	
ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ $nc-ZrN/a-Si_3N_4$ И $nc-ZrN/a-ZrCu$ ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ	38
В.В. Углов, С.В. Злоцкий, Г. Абади, И.С. Веремей, А.Е. Рыскулов, Л.А. Козловский, М.В. Здоровец	
<u>III. ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО И ПРОБЛЕМЫ ЗАМКНУТОГО ЯДЕРНО-ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА</u>	<u>41</u>
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОВЕДЕНИЯ РЕАКЦИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НА КАЧЕСТВО МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА ЦИРКОНИЯ	43
Е.Ю. Татауров, Е.Ф. Искандарова, Т.С. Волкова, В.В. Рудских	
ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА НА СПЛАВЫ ХН45Ю И ХН70Ю	44
С.М. Шайдуллин, М.Б. Ремизов, П.В. Козлов, О.М. Панкратова	
НА ОСНОВЕ ЦЕРИЯ-144	45
В.А. Казаков, Н.П. Старовойтов, В.А. Дудкин	
ОБРАЩЕНИЕ С ПОТЕНЦИАЛЬНО ПИРОФОРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В ПРОЦЕССЕ ФРАГМЕНТАЦИИ И РАСТВОРЕНИЯ УРАН-ЦИРКОНИЕВОГО ОЯТ	46
Н.П. Старовойтов, В.А. Дудкин, В.А. Казаков, Р.Э. Абдулвагидов	
ПОВЕДЕНИЕ МОЛИБДЕНОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ ТИПА ЭП ПРИ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ	47
Е.Н. Дубровин, М.Б. Ремизов, П.В. Козлов, В.А. Дудкин, С.В. Корнев	
<u>IV. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИЛЬНОКОРРЕЛИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</u>	<u>49</u>
ATOMIC AND SPIN DYNAMICS IN CONDENSED MATTER BY NEUTRON SCATTERING WITH CRYSTAL SPECTROMETERS	51
Alexandre IVANOV	

ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНОКОРРЕЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ДИФFUЗНОГО РАССЕЙЯНИЯ НЕЙТРОНОВ С XYZ-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ АНАЛИЗОМ	51
К.С. Немковский	
ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ МАХ-ФАЗЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	52
И.К. Аверкиев, Э.Ф. Хаметова, О.Р. Бакиева, А.А. Колотов	
КООПЕРАТИВНЫЕ И ЛОКАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СПИНОВОЙ ЩЕЛИ В ИЗОЛЯТОРАХ КОНДО YbV_{12} И $CeFe_2Al_{10}$	53
П.А. Алексеев, В.Н. Лазуков, П.С. Савченков	
МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ИОНЫ	54
С.А. Скоробогатов, К.А. Шайхутдинов, Д.А. Балаев	
НЕЙТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АКТИНИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ	55
А.В. Мирмельштейн	
<u>V. РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ</u>	59
АНАЛИЗ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНOK НА СТЕКЛЕ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ	61
Т.С. Картапова, Ф.З. Гильмутдинов, М.А. Еремина, П.В. Быков	
ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ N^+ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И АТОМНУЮ СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И ТИТАНОВОГО СПЛАВА	61
В.Л. Воробьев, П.В. Быков, Ф.З. Гильмутдинов, В.Я. Баянкин	
ВОЗДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ Ar^+ И Xe^+ РАЗЛИЧНОЙ АТОМНОЙ МАССЫ НА МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ СВЕРХРЕШЕТОК $Co_{90}Fe_{10}/Cu$	62
К.В. Шаломов, Н.В. Гущина, В.В. Овчинников, Р.С. Заворницын, Н.С. Банникова, М.А. Миляев	
ВЫБОР РЕЖИМОВ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОТЖИГА ДЕФОРМИРОВАННОГО СПЛАВА $Ni - 13,9 \text{ мас. \% W}$ ПУЧКАМИ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ АРГОНА	63
К.В. Шаломов, Н.В. Гущина, В.И. Воронин, Н.В. Проскурнина, В.И. Бобровский, В.В. Овчинников	
ГИГАНТСКИЕ РАДИАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КОРПУСКУЛЯРНОМ ОБЛУЧЕНИИ	64
В.В. Овчинников	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ДУО-СТАЛИ: ПЭМ АНАЛИЗ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МИНИКОЛОНН	65
Е.А. Корнеева, А.С. Сохацкий, В.А. Скуратов, Е.С. Статник, П.А. Сомов, И.Н. Крупатин, А.И. Салимон, А.М. Корсунский	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФFUЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ	66
А.А. Колотов, В.Я. Баянкин, Д.И. Тетельбаум	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ $Ni-Al$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	67
А.В. Жихарев, С.Г. Быстров, Н.М. Созонова, В.Я. Баянкин	
ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНOK Ti/Al, ПОСЛЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ	69
П.В. Быков, В.Л. Воробьев, И.Н. Климова, Ю.Г. Шилаева, А.А. Шушков, А.Н. Тарасенков, А.А. Колотов, В.Я. Баянкин	

КОНЦЕПЦИЯ КВАЗИНЕЙТРОНОВ И ХАРАКТЕРНЫЕ СООТНОШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ СИНТЕЗИРУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	70
М.П. Кашенко, М.А. Коваленко, А.Я. Купряжкин, Н.М. Кашенко, М.Б. Смирнов, В.В. Илюшин, Ю.Л. Чепелев, В.И. Печорский, С.А. Краюхин	
МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ АРГОНА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА	71
Н.М. Созонова, О.Р. Бакиева	
ОБ ЭФФЕКТЕ ИОННО-ПУЧКОВОЙ МОДИФИКАЦИИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	72
Н.В. Гущина, В.В. Овчинников, К.В. Шаломов, Д.И. Вичужанин	
ОБРАЗОВАНИЕ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВОГО АУСТЕНИТА В СПЛАВЕ Fe–6.35 at. % MN ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 300-450°С В ОТСУТСТВИЕ ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ «РАДИАЦИОННОЙ ТРЯСКИ» ИОНАМИ Ar⁺ (E = 15 кэВ)	73
В.В. Овчинников, Е.В. Макаров, В.А. Семёнкин, Н.В. Гущина	
<u>VI. РАДИАЦИОННЫЕ ЯВ-ЛЕНИЯ В МАГНЕТИКАХ, СВЕРХПРОВОДНИКАХ, ПОЛУ-ПРОВОДНИКАХ И ИЗОЛЯТО-РАХ</u>	<u>75</u>
LATENT TRACKS IN NANOCRYSTALLINE Y₄Al₂O₉, IRRADIATED WITH HIGH ENERGY HEAVY IONS	77
A. Ibrayeva, A. Mutali, J. O'Connell, Arno Janse van Vuuren, Alexander Sohatsky, Vladimir Skuratov, Liudmila Alekseeva	
MECHANISMS RESPONSIBLE FOR THE DEPTH DEPENDENT CRYSTAL ROTATION OBSERVED IN NIO EXPOSED TO SWIFT HEAVY ION IRRADIATION.	78
D.A. Douglas-Henry, J.H. O'Connell	
MICROSTRUCTURAL RESPONSE OF SILICON NITRIDE TO FISSION FRAGMENTS	79
Arno Janse van Vuuren, Anel Ibraeva, Vladimir Skuratov, Maxim Zdorovets	
ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА КРИТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕНТОЧНЫХ ВТСП КОМПОЗИТАХ	80
И.А. Руднев, Д.А. Абин, С.В. Покровский, А.С. Стариковский, М.А. Осипов, И.В. Мартиросян	
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР n-InSb-i-GaAs	81
В.В. Углов, Е.А. Колесникова, А.К. Кулешов, Д.П. Русальский, Е.В. Тетеруков	
МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В Si₃N₄, ОБЛУЧЕННОМ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ	82
А.Т. Жумажанова, А.К. Мутали, А.Д. Ибраева, В.А. Скуратов, А.К. Даулетбекова, Е.А. Корнеева, А.Т. Акылбеков, М.В. Здоровец	
РАСЧЕТ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ЛЕНТОЧНЫХ ВТСП КОМПОЗИТАХ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ	83
И.В. Мартиросян, Д.А. Абин, А.И. Подливаев, И.А. Руднев	
<u>VII. ТЕХНИКА И МЕТОДИ-КА ЭКСПЕРИМЕНТА</u>	<u>85</u>
GLOVEBOXES AND GLOVEBOX LINES «SPECS GB»: MADE IN RUSSIA LABORATORY EQUIPMENT FOR LITHIUM BATTERY RESEARCH, DEVELOPMENT & PRODUCTION	87
Roman Petrov, Deputy Director; Alexey Baranov, General Manager	
REVEALING HIDDEN DEFECTS THROUGH STORED ENERGY MEASUREMENTS OF RADIATION DAMAGE	88
Charles A. Hirst, Fredric Granberg, Boopathy Kombaiah, Penghui Cao, Scott Middlemas, R. Scott Kemp, Ju Li, Kai Nordlund, Michael P. Short	

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В НЕЙТРОННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ИФМ УРО РАН	89
В.И. Бобровский, А.Ф. Губкин	
ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПЕРВОМ В МИРЕ СПУТНИКОВОМ ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ	90
Б.А. Логинов	
ПРОФИЛОМЕТРИЯ И КОНТУРОГРАФИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВОК АТОМНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	91
В.Б. Логинов	
УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ	93



I. Общие вопросы физики радиационных повреждений

Тематика секции посвящена наиболее актуальным в настоящее время проблемам в области радиационной физики металлов и сплавов. На секцию представлены доклады, посвящённые особенностям поведения точечных дефектов в различных сплавах и соединениях, в том числе, в Fe-Cr(Ni) системах, являющихся основой многих радиационно-стойких реакторных материалов. В Программу секции включены доклады, посвящённые изучению особенностей процессов взаимодействия точечных дефектов радиационного и деформационного происхождения и их комплексов между собой, с примесными атомами, дислокациями, межфазными и межзеренными границами современными методами исследований на всех этапах формирования сложной дефектной структуры в нано и субмикроструктурных металлических системах и влияния этих взаимодействий на деформационно- и радиационно-индуцированные процессы. Большое внимание будет уделено мультимасштабному моделированию радиационных процессов в облучаемых материалах, анализу структурно-фазовых превращений, а также поведению трансмутированных газовых примесей.

POINT DEFECTS AND SELF-DIFFUSION MECHANISMS IN TRANSITION METAL CARBIDES

P.A. Korzhavyi¹, M. Nourazar¹ and E.A. Smirnova²

¹*Department of Materials Science and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*

²*Materials Modeling and Development Laboratory, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia*

Ab initio calculations provide useful data on the energies of atomic defects and defect arrangements, as well as on the activation barriers of defect migration through the lattice [1-5]. This information is essential for modeling the structure and property evolution in materials during manufacturing and service. Systematic *ab initio* studies show that the formation energy of Schottky defects in cubic TM–X compounds decreases along the series $X = \text{C}, \text{N}, \text{O}$. For example, vacancies are stable defects in TiO, while in TiC the calculated formation energy of a Schottky pair is too high for Ti mono-vacancies to be mediators of Ti self-diffusion. We have considered several possible mediators of metal diffusion in TiC, including clusters of vacancies and interstitial atoms.

Different diffusion mechanisms in TiC will be revisited, in light of the recent finding that a symmetry-broken configuration of a Ti mono-vacancy is almost twice as low in energy as the usually considered symmetric configuration. We search through the configurational space of a Ti mono-vacancy to find several local energy minima. Among them, a planar symmetry-broken configuration with the optimal number, length, and angles of C—C bonds is the global energy minimum. In spite of its superior stability, the symmetry-broken configuration does not form spontaneously upon structural relaxation, because the symmetric configuration is still a local energy minimum. The formation of symmetry-broken configurations is essential for describing metal self-diffusion in transition-metal carbides by the mono-vacancy mechanism.

Acknowledgement. This study was conducted at the Vinnova Competence Centre "Hero-m 2i", funded jointly by the Swedish Governmental Agency for Innovation Systems (Vinnova, grant 2016-00668), Swedish industry, and KTH Royal Institute of Technology. The computations were enabled by resources provided by the Swedish National Infrastructure for Computing (SNIC), partially funded by the Swedish Research Council through grant agreement no. 2018-05973.

References

- [1] Andersson D.A., Korzhavyi P.A., Johansson B., *Phys. Rev. B* **71** (2005), art. no. 144101.
- [2] Razumovskiy V.I., Ruban A.V., Odqvist J., Korzhavyi P.A., *Phys. Rev. B* **87** (2013), art. no. 054203.
- [3] Razumovskiy V.I., Popov M.N., Ding H., Odqvist J., *Comput. Mater. Sci.* **104** (2015), pp. 147–154.
- [4] Sun W., Ehteshami H., Korzhavyi P., *Phys. Rev. B* **91** (2015), art. no. 134111.
- [5] Sun W., Ehteshami H., Kent P.R.C., Korzhavyi P., *Acta Mater.* **165** (2019), pp. 381–387.

АНИЗОТРОПНАЯ ДИФФУЗИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОЦК (Fe, V) И ГЦК (Cu) КРИСТАЛЛАХ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

А.Б. Сивак, Д.Н. Демидов, П.А. Сивак

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

Для построения физически-обоснованных моделей деформирования кристаллов под повреждающим облучением (например, радиационная ползучесть) необходимо определять влияние внешних и внутренних полей упругих деформаций на анизотропию диффузии радиационных дефектов (РД). Это влияние можно учесть, зная дипольный тензор седловой конфигурации диффундирующего РД. Дипольный тензор обычно рассчитывается методами компьютерного моделирования (молекулярная статика), т.к. его экспериментальное определение затруднено из-за недостаточной точности имеющихся экспериментальных методик. Однако, если РД обладает множеством метастабильных и седловых энергетически разных кристаллографических конфигураций, задача становится практически нерешаемой из-за необходимости использования многих физически необоснованных упрощений или предположений.

В настоящей работе используется другой подход к решению этой задачи. Методом молекулярной динамики (МД) рассчитываются деформационные зависимости тензора диффузии РД для различных типов деформированного состояния. С помощью этих зависимостей определяется упругодиффузионный тензор РД, компоненты которого являются коэффициентами при линейных членах разложений по степеням деформации рассчитанных деформационных зависимостей. Симметрия кристалла и механизм диффузии РД определяют симметрию этого тензора. В соответствие ему ставится дипольный тензор эффективной седловой конфигурации РД, который отражает вклады всех реальных седловых конфигураций.

Предложенный подход реализован для определения диффузионных характеристик радиационных дефектов типа димежузлий в ОЦК (Fe, V) и ГЦК (Cu) кристаллах. Димежузлия являются одним из наиболее часто образующихся под повреждающим облучением типов кластеров собственных межузельных атомов, и обладают большим числом различных метастабильных и седловых конфигураций, на котором удобно продемонстрировать физические преимущества используемого подхода. В расчётах использованы потенциалы межатомных взаимодействий, которые хорошо описывают известные из эксперимента объёмные свойства кристаллов и свойства собственных точечных дефектов. Симметрия рассчитанных дипольных тензоров эффективных седловых конфигураций является тригональной и орторомбической для рассмотренных ОЦК и ГЦК кристаллов соответственно. Для всех рассмотренных типов деформаций, кристаллических решеток, материалов влияние внешнего поля упругих деформаций на рассчитанный МД-методом нормированный тензор диффузии димежузлий (отношение тензора диффузии к его следу) полностью согласуется с теоретическими выражениями, параметрами которых являются компоненты дипольных тензоров, в том числе и за пределами области линейной зависимости тензора диффузии от деформаций. Полученные результаты позволяют моделировать анизотропную диффузию димежузлий во внешних и внутренних (например, дислокационных) полях упругих деформаций, учесть вклад димежузлий в радиационное деформирование кристаллов.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 2764 от 28.10.2021) с использованием оборудования Центра коллективного

пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса» НИЦ «Курчатовский институт» (<http://ckp.nrcki.ru/>).

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КРАУДИОНА В ДЕФОРМИРУЕМОМ ГЦК-МЕТАЛЛЕ

С.А. Стариков, А.Р. Кузнецов, В.В. Сагарадзе
ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия (a_kuznetsov@imp.uran.ru)

В данной работе [1] изучается поведение краудиона в ГЦК-металле, в качестве которого взяты никель и медь, в процессе интенсивной деформации. Моделирование проведено методом молекулярной динамики (МД) с использованием пакета LAMMPS. Используются межатомные потенциалы, построенные в рамках многочастичного метода погруженного атома. После предварительного релаксационного отжига кристаллит подвергали деформации сжатием при различных температурах и скоростях деформации. Рассчитывались поля атомных смещений краудиона и его средняя скорость. Расчет фононного спектра и плотности состояний проведен на основе МД-моделирования с использованием метода функций Грина (ФГМД).

В работе использовано описание краудиона в модели Френкеля-Конторовой. Описывающие краудион дискретные уравнения движения могут быть приближенно представлены уравнением синус-Гордона, для которого известно солитонное (краудионное) решение, использованное в работе. Показано, что при деформации около 10% в условиях моделирования краудионная конфигурация типа $\langle 110 \rangle$ собственного междоузельного атома становится предпочтительной по сравнению с гантельной в широком диапазоне температур. Приведены поля атомных смещений движущегося краудиона, полученные в МД-моделировании и по формуле краудионного решения. Показано, что наблюдается удовлетворительное описание данных МД-моделирования при различных температурах и скоростях деформации. Найдено, что безразмерная ширина солитона N , определяющая поле атомных смещений движущегося краудиона, зависит от таких величин как модуль Юнга, скорость звука в металле. Расчет плотности состояний фононов в зависимости от температуры и деформации позволил оценить предельную скорость краудиона, соответствующую движению с радиационными потерями. Показано, что скорость движения краудиона в условиях моделирования существенно ниже и снижается при снижении скорости деформации, т.е. сопровождается радиационными потерями. Найдено, что при движении краудиона в широком диапазоне температур удовлетворяется условие самофокусировки, что позволяет перемещаться краудиону на значительные по сравнению с параметром решетки расстояния.

Полученные результаты выявляют важную роль краудионов в физических процессах, происходящих во время облучения и интенсивной пластической деформации ГЦК-металлов, особенно, при комнатной и более низких температурах. В частности, краудионный механизм может играть важную роль в процессе аномального растворения (в том числе, при криогенных температурах до 77 К) частиц интерметаллида Ni_3Al в матрице аустенитного сплава Fe-Ni-Al [2], наблюдаемом при изучении процесса низкотемпературного деформационно-индуцированного наноструктурирования методом сдвига под давлением.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура», № АААА-А18-118020190116-6). Расчеты проведены с использованием

суперкомпьютера «Уран» ИММ УрО РАН.

Литература

- [1] Стариков С.А., Кузнецов А.Р., Сагарадзе В.В. *ФММ* т.122 (2021), №12, с.1296
- [2] Sagaradze V.V., Shabashov V.A., Kataeva N.V., Zavalishin V.A., Kozlov K.A., Kuznetsov A.R., Litvinov A.V., Pilyugin V.P. *Phil. Mag.* V.96 (2016), №17, p.1724

ДИФфуЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛАСТЕРОВ СОБСТВЕННЫХ МЕЖУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ В ВАНАДИИ: МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Д.Н. Демидов, А.Б. Сивак, П.А. Сивак

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

Диффузия радиационных дефектов, возникающих под нейтронным повреждающим облучением, и их поглощение стоками приводит к эволюции микроструктуры материалов и, как следствие, к изменению их физико-механических свойств. Для построения феноменологических моделей изменения свойств материалов под облучением необходимо знать характеристики радиационных дефектов. В процессе облучения образуются не только собственные точечные дефекты, но и их кластеры. По результатам молекулярно-динамического (МД) моделирования каскадов атомных столкновений в ОЦК-металле V 68% выживших после окончания каскада собственных межузельных атомов (СМА) не образуют кластеров, при этом в кластерах размером от двух до пяти СМА содержится 31% СМА [1, 2].

В настоящей работе методом молекулярной динамики исследованы температурные зависимости диффузионных характеристик радиационных дефектов — кластеров, содержащих до пяти СМА — в температурном диапазоне 300—1000 К в V. Диффузионные характеристики включали в себя коэффициент диффузии, корреляционный множитель меченых атомов, среднюю длину диффузионного пробега до смены направления диффузии, частоту смен направлений диффузии, др. Определены значения энергии активации диффузии и энергии активации смен направлений диффузии для рассмотренных типов дефектов для разных температурных диапазонов. Обсуждаются зависимости механизма диффузии кластеров СМА (1D vs 3D) от температуры и размера кластеров и их возможные следствия для эволюции микроструктуры материала под облучением.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ № 2764 от 28.10.2021) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса» НИЦ «Курчатовский институт» (<http://ckp.nrcki.ru/>).

Литература

1. Сивак А.Б. и др., *ВАНТ, Сер. Материаловедение и новые материалы*, т.4 (100) (2019), с.25
2. Shpanskiy Yu.S. and the DEMO-FNS project team, *Nuclear Fusion*, т.59 (2019), 076014

ИММОБИЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ФРЕНКЕЛЯ В СПЛАВЕ Fe-13Cr-2Si

А.Л. Николаев, Д.А. Перминов

*Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
(nikolaev@imp.uran.ru)*

Исследовали возврат остаточного электросопротивления после низкотемпературного облучения электронами 5 МэВ, а также накопление дефектов при комнатной температуре после облучения электронами и их последующий отжиг методами остаточного электросопротивления и аннигиляции позитронов в сплаве Fe-13.6Cr-1.9Si. Проведено сравнение с нелегированными сплавами и сплавами легированными 0.2 ат. % Si и 0.3 ат.% Sb. Согласно данным по возврату остаточного электросопротивления начало дальней миграции дефектов Френкеля в сплаве Fe-13.6Cr-1.9Si сдвигается до 370 К (собственные междоузельные атомы) и 420 К (вакансии) по сравнению с 205 К (вакансии) и 220 К (собственные междоузельные атомы) в нелегированном сплаве. При комнатной температуре в Fe-13.6Cr-1.9Si наблюдается рост остаточного электросопротивления, в то время как во всех остальных сплавах наблюдается его спад, вызванный ближним упорядочением, ускоренным дальней миграцией радиационных дефектов. Аннигиляция позитронов показывает быстрое накопление вакансий при комнатной температуре с насыщением сигнала при повреждающей дозе ~0.01 смещений на атом. Эти данные подтверждают данные по возврату остаточного электросопротивления о том, что при комнатной температуре в Fe-13.6Cr-1.9Si дефекты Френкеля неподвижны.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ПАКЕТОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛА ШПИЛЕК МАЛОЙ ПОВОРОТНОЙ ПРОБКИ БОР-60

Д.А. Соколовский, Е.И. Макаров, Д.Е. Маркелов, В.С. Неустроев, И.Ю. Жемков, Ю.М. Крашенинников, Ю.В. Набойщиков, Н.С. Погляд
АО «Государственный научный центр — Научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Димитровград, Россия (sokdmitrii95@mail.ru)

Для оценки состояния материала после длительной эксплуатации необходимо проводить исследования элементов и конструкций, длительное время эксплуатировавшихся при различных температурах в реакторе БОР-60. Однако нельзя обойтись и без специально поставленных экспериментов на образцах различного вида с поддержанием достаточно стабильных температурных условий облучения, определяющих то или иное радиационное явление.

В настоящей работе представлены некоторые результаты последних исследований радиационных явлений, таких как радиационное распухание, низкотемпературное радиационное упрочнение и охрупчивание аустенитных сталей. Рассматриваются также вопросы влияния особенностей формирования микроструктуры на физико-механические свойства облученных нейтронами сталей.

Одними из наиболее критичных несменяемых элементов конструкции реактора БОР-60 по набранному флюенсу нейтронов, влияющими на безопасную работу реактора, являются шпильки и гайки малой поворотной пробки (МПП).

В ходе работы по обоснованию технического перевооружения реактора БОР-60 был проведен сбор и анализ расчётно-экспериментальных данных по эксплуатации реакторной установки, который позволил уточнить условия облучения (флюенс, повреждающую дозу и температуру облучения) шпилек МПП реактора.

Для проведения исследований в обоснование состояния шпилек МПП реактора БОР-60 были использованы направляющие трубы материаловедческих пакетов ТР-03 и ТР-05, из которых были вырезаны образцы с различных по высоте уровней.

Были проведены исследования микроструктуры и механических свойств элементов (направляющих труб) материаловедческих пакетов, облучавшихся при условиях близких к условиям эксплуатации шпилек МПП реактора БОР-60.

Для образцов из трубы ТР-05, облученных при условиях, близких к условиям эксплуатации шпилек МПП), при всех температурах испытания материал имеет запас пластичности (общее относительное удлинение при температурах испытания 520 и 560 °С выше 2,4 %) при достаточно высоком уровне прочностных свойств. Это позволяет говорить о существующем запасе по характеристикам механических свойств до повреждающих доз в 32 смещения на атом (сна).

Полученные данные могут быть использованы в ходе прочностных расчетов при обосновании дальнейшей эксплуатации шпилек с гайками МПП по крайней мере до максимальной расчетной повреждающей дозы в 29 сна, которая будет достигнута на шпильках малых поворотных пробок реактора БОР-60 в 2025 году.

К ВОПРОСУ ОБ ИМИТАЦИОННОЙ ОЦЕНКЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Овчинников

Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (viae05@rambler.ru)

Проанализированы теоретические и экспериментальные данные, определяющие сходство и различие процессов дефектообразования в условиях нейтронного и имитационного ионного облучения. Анализ включает такие факторы, как тип и энергия каскадообразующих частиц, состав и структура облучаемых материалов, а также температура облучения.

Пересмотрен ряд апробированных методик расчета концентрации радиационных дефектов и числа смещений на атом для каскадообразующих видов облучения.

Рассмотрены ключевые факторы, обеспечивающие подобие натуральных и имитационных экспериментов, при этом в качестве основных выделены два из них: скорость накопления повреждающей дозы (поток) и температура, определяющие протекание релаксационных процессов.

Предложены простые методы оценки количества первично выбитых атомов (ПВА) при нейтронном облучении и доли потерь упругой энергии, затрачиваемой на образование дефектов. Приведено обоснование единой фрактальной структуры каскадов атомных смещений в заданной мишени вне зависимости от природы и энергии каскадообразующих типов облучения.

Результаты обзора частично изложены в [1, 2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-20173).

Литература

[1] Овчинников В.В., в *Трудах XXX Международной конференции «Радиационная физика твердого тела»*, под ред. Бондаренко Г.Г., Москва: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2020, с.10

[2] Овчинников В.В., *Известия вузов. Физика* т.63 (2020), №12, с.37

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Н.В. Глушкова¹, К.М. Ладейщиков¹, И.А. Сафонов², А.В. Дуб², В.Л. Панченко¹,
А.В. Козлов¹, А.А. Никитина³

¹АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный Свердловской обл.

²АО «Наука и инновации», г. Москва

³АО «ВНИИНМ им. А.А.Бочвара», г. Москва

Для описания радиационно-индуцированных процессов, протекающих в реакторных материалах при нейтронном облучении важно знать кинетику образования в материалах точечных дефектов и их энергетические характеристики, в частности, энергии миграции и взаимодействия со стоками. 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 сплавов. Разработка и использование экспериментальных методов для определения характеристик генерируемых облучением точечных дефектов является актуальной задачей реакторного материаловедения.

В докладе представлена комплексная методика, сочетающая низкотемпературное нейтронное облучение, до реакторные и после реакторные дилатометрические измерения и просвечивающую электронную микроскопию, в том числе, высокого разрешения. Приведен анализ образования и накопления радиационных дефектов, как в виде одиночных пар Френкеля, количество которых составляет $G \cdot \theta$ (G – скорость генерации атомных смещений), так и в виде каскадов смещений, в которых после рекомбинации остается $G \cdot \alpha \cdot (1 - \theta)$ вакансий (α – каскадная эффективность). До и после нейтронного облучения при температуре, не превышающей 50 °С, на одних и тех же образцах проводятся измерения относительного удлинения при нагреве от 50 до 450 °С со скоростью 1°С/мин, после чего строится разностная дилатометрическая диаграмма

$\delta\varepsilon(T) = \left(\frac{dl}{L_0}\right)_{mir} - \left(\frac{dl}{L_0}\right)_{ir}$, в которой заключена информация о процессах генерации и

эволюции ТД при облучении и при после реакторном нагреве в дилатометре. Разработана методология анализа температурной зависимости $\delta\varepsilon(T)$. На примере оболочечной аустенитной стали ЧС68, показано, что температура, при которой начинается миграция различных компонент стали по вакансиям, для основных элементов замещения: Ni, Fe, Cr,- не одинакова. На базе сопоставления потоков вакансий при разных температурах,

разработан метод корректного определения средней энергии миграции вакансий и показано, что она зависит от температуры. В анализе проводится учет размерных изменений, связанных с диссоциацией при нагреве вакансионных кластеров.

Полученные результаты проиллюстрированы данными ПЭМ.

ПОВЕДЕНИЕ НИОБИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

Н.А. Епифанов¹, В.Н. Пименов², И.В. Боровицкая², А.С. Дёмин², С.В. Латышев^{2,3},
С.А. Масляев², Е.В. Морозов², И.П. Сасиновская², Г.Г. Бондаренко¹, А.И. Гайдар⁴

¹Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия (*mophix94@gmail.com*)

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия (*maslyaev@mail.ru*)

³Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия, (*latyshevsv@rambler.ru*)

⁴Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, Россия (*niipmt@mail.ru*)

Исследована повреждаемость ниобия импульсными потоками ионов гелия (*ИГ*) и гелиевой плазмы (*ГП*) в установке Плазменный фокус (*ПФ*) при плотности мощности потоков соответственно $q_i \sim 10^8$ Вт/см² и $q_p \sim 10^7$ Вт/см² и длительности импульсов $\tau_i \approx 30$ – 50 нс и $\tau_p \approx 100$ нс. [1]

В реализованном режиме облучения наблюдается эрозия материала, связанная с испарением поверхностного слоя (*ПС*), которое происходит несколько более интенсивно в центральной части зоны облучения под действием наиболее высокоэнергичных потоков *ИГ* и *ГП*.

Выявлены характерные факторы повреждаемости *ПС* ниобия в рассматриваемых условиях облучения. К ним относятся: плавление *ПС* с образованием волнообразного рельефа поверхности и большого количества блистеров двух видов – газонаполненных и с разрушенными оболочками, а также наличие микротрещин. Возникновение блистеров связано с формированием комплексов на основе соединения имплантированного гелия с вакансиями и атомами примесей внедрения (С, О, N и др.) и последующим их ростом и коагуляцией в жидкой фазе при импульсных воздействиях потоков энергии на облучаемую поверхность Nb. Часть микротрещин, образованных в *ПС* под действием термических напряжений, совпадает с линиями скольжения материала, возникающими под действием высокоскоростной пластической деформации.

В облученном поверхностном слое ниобия обнаружены зоны столбчатых кристаллов и ячеистая микроструктура поверхности, в которой средний размер ячеек составляет ~100 нм. Методом численного моделирования показано, что в указанных зонах процесс затвердевания *ПС* протекал посредством направленной кристаллизации с высокой скоростью, которая вблизи облученной поверхности достигала ~35 м/с. [2]

Работа выполнена по государственному заданию № 075-00328-21-00

Литература

[1] Грибков В.А., Боровицкая И.В., Демин А.С., Морозов Е.Н., Масляев С.А., Пименов В.Н., Голиков А.В., Дулатов А.К., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И. Установка «Вихрь» типа Плазменный фокус для диагностики радиационно-термической стойкости материалов перспективных для термоядерной энергетики и аэрокосмической техники. Приборы и техника эксперимента, 2020, №1, с.75-83.

[2] Грибков В.А., Латышев С.В., Масляев С.А., Пименов В.Н. Численное моделирование взаимодействия импульсных потоков энергии с материалом в установках Плазменный фокус. Физика и химия обработки материалов, 2011, №6, 16-22

ПРИРОДА «СТРАННОГО» ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

М.П. Кащенко^{1,2}, Н.М. Кащенко¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия (mpk46@mail.ru)

²Уральский государственный лесотехнический университет

При взрывах титановых фольг [1] с помощью импульсов электрического тока в камерах, заполненных водой, зафиксировано возникновение химических элементов (отсутствовавших в исходных образцах), а также «странное» излучение (СИ). Традиционные виды излучения (α , β , γ , n) не наблюдались. СИ фиксировалось с помощью фотодетекторов, в эмульсии которых возникали необычные треки (не только по форме, но и по размерам – ширина треков может быть порядка 10 мкм). Важно, что СИ наблюдалось и после взрыва от остатков фольги. Согласно экспериментальным данным (символом * отмечены наши уточнения), носители СИ: электронейтральны (по крайней мере, до взаимодействия с фотодетектором*); обладают магнитным моментом; имеют до взаимодействия с фотодетектором размеры $\leq 10^{-10}$ м (меньше или порядка размера атома), что позволяет им покидать объем металлической фольги*; могут инициироваться ядерными процессами распада; способны при взаимодействии с материалом детектора резко (на пять порядков!) увеличить свой размер*; обладают способностью распространяться параллельно плоским границам раздела сред с разной диэлектрической проницаемостью. В [1] наблюдаемые особенности СИ предположительно связывали с магнитными монополями Лошака, масса которых существенно меньше монополей Дирака.

Использование выводов адронной механики [2] позволяет предложить модель промежуточного квазимолекулярного состояния (ПКС), в которой слияние исходных ядер инициируется контактно связанными в компактные (ee) - пары электронами, расположенными на круговой орбите [3]. Переход к реалистической модели ПКС с массивными (ee) – парами позволяет осуществлять низкотемпературный синтез при наличии относительно небольшого числа (ee) – пар. При этом кольцевая орбита с (ee) – парами выполняет катализирующие функции в общем случае слияния сложных ядер, подобно тому, как участие мюона катализирует одну из простейших ядерных реакций синтеза. В связи с этим катализирующая кольцевая орбита с (ee) – парами названа КК - активатором. Исходному состоянию носителя СИ (с высокой проникающей способностью) соответствует электрически нейтральный комплекс, включающий КК – активатор (либо два КК – активатора) и «ионную» составляющую из пары сблизившихся ядер (или уже слившихся ядер) с искаженными и не полностью заполненными

электронными оболочками. В процессе столкновения с детектором комплекс распадается на положительно заряженную ионную составляющую, остающуюся в материале детектора, и свободный КК - активатор, который быстро расширяется за счет расталкивания (е_e) - пар. За формирование треков СИ отвечает распространение именно КК - активаторов.

Литература

- [1] Уруцкоев Л.И., Ликсонов В.И., Циноев В.Г. *Прикладная физика*. (2000), № 4. с. 83.
- [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., Балакирев В.Ф., *Письма о материалах*. т.8 (2018), №2, с.152

РАСПУХАНИЕ МЕДИ, ОБЛУЧЕННОЙ ЭЛЕКТРОНАМИ, ПРОТОНАМИ И НЕЙТРОНАМИ

А.М. Овчаренко

*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова,
Москва, Российская Федерация (ovcharenko@obninsk.com)*

Облучение меняет микроструктуру конструкционных материалов ядерных реакторов, вызывая их размерную нестабильность. Распухание – одно из явлений, приводящих к такой нестабильности, которое представляет наибольшую опасность. Предельное технологически допустимое распухание для сталей составляет всего 5% на дозах, как правило, до 50 сна. Основные усилия прилагаются к тому, чтобы увеличить стойкость материалов на дозах до 100 сна и выше. Однако экспериментальные исследования распухания слишком затратны по времени, поэтому теоретическое изучение очень востребовано. В теории известны два подхода к описанию накопления распухания. Один из них – модель в рамках «стандартной теории», «standard rate theory» (SRT), физически соответствующая случаю облучения ~1МэВ электронами, когда дислокационный фактор предпочтения – единственный механизм, определяющий распухание. Однако этот подход не позволяет объяснить накопление распухания при нейтронном облучении, поскольку генерация дефектов качественно отличается от случая облучения электронами. Поэтому был разработан другой подход: т.н. «модель каскадного фактора предпочтения», «production bias model» (PBM) [1, 2]. В этом подходе учитывается, что кроме генерации вакансий и междоузлий, мигрирующих трехмерно, продуцируются одномерно мигрирующие междоузельные кластеры. В работе Б. Сингха [3] экспериментально были показаны ключевые различия в накоплении пор для электронного и нейтронного облучения. В настоящей презентации будут представлены результаты численного анализа экспериментальных данных накопления распухания [3], полученных при облучении меди электронами, протонами и нейтронами. Расчеты проводились с использованием разработанного нового кода, который учитывает оба механизма распухания: дислокационный и каскадный фактор предпочтения. Результаты расчетов находятся в хорошем согласии 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

РЕГУЛИРОВАНИЕ КТР АУСТЕНИТНЫХ Fe-Ni СПЛАВОВ ПРИ РАДИАЦИОННОМ И ТЕРМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В.В. Сагарадзе, С.Е. Данилов, В.А. Шабашов, В.А. Казанцев

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

(vsagaradze@imp.uran.ru)

В составных конструкциях часто требуется соединять материалы с разными значениями коэффициента термического расширения (КТР). Для этих целей обычно используются различные металлы и сплавы с различающимися значениями КТР. Значительный интерес представляет возможность существенного изменения КТР на одном и том же сплаве с помощью термической обработки. Возможность регулирования КТР в определенном интервале температур с помощью радиационного или термического воздействий была проанализирована на аустенитных Fe-Ni сплавах инварного диапазона. Как следует из равновесной диаграммы Fe-Ni, инварные аустенитные сплавы железа с 31-36 мас.% Ni, имеющие низкие значения КТР (менее $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), должны распадаться на малоникелевую и высоконикелевую составляющие с существенно более высокими характеристиками КТР. В настоящей работе концентрационные изменения по Ni надежно фиксировались по температуре Кюри, полю на ядре ^{57}Fe (метод ЯГР) и электросопротивлению. Однако процесс подобного расслоения по никелю при пониженных температурах идет чрезвычайно медленно (сотни часов), но он может быть ускорен введением точечных дефектов при облучении высокоэнергетическими частицами. Образование высоконикелевой составляющей при электронном облучении инваров впервые было обнаружено Chamberod A. et al (*Journal of Magnetism and Materials*, 1979. V. 10, № 2-3. P. 139-144. Нами же было показано, что увеличение флюенса 5 МэВ электронов до $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ при 27 °С приводит к расслоению сплава Fe-35Ni по никелю и росту КТР от 1×10^{-6} до $6.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в интервале температур 20-100 °С. Увеличение температуры облучения до 150 °С приводит к еще большему расслоению с увеличением КТР до $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Недостатком радиационного воздействия электронами и ионами является небольшая глубина проникновения частиц и следовательно небольшие объемы модифицированных образцов с повышенными значениями КТР. Облучение нейтронами устраняет этот эффект, но модифицированные образцы будут радиоактивными. Поэтому регулирование КТР с помощью термообработки представляло наибольший интерес. Увеличение объема обогащенных никелем кристаллов γ -фазы можно обеспечить не только в результате ускорения диффузии, но и вследствие измельчения этих кристаллов до наноразмеров, сопоставимых с диффузионными путями никеля. Это наблюдается при образовании нанокристаллического аустенита в процессе обратного α - γ превращения при медленном нагреве в инварных Fe-Ni сплавах. При этом имеет место значительным перераспределение никеля между образующейся наноразмерной γ -фазой и остаточным α -мартенситом в соответствии с диаграммой равновесия Fe-Ni. По максимальному повышению поля на ядре ^{57}Fe и температуры Кюри аустенита (от 130 до 500 °С) найдены

условия обработки для реализации наибольшего расслоения по никелю в сплавах типа Fe-(31-32) Ni в процессе $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, заключающиеся в медленном нагреве до 470-490°C с последующим быстрым повышением температуры до 600°C. С помощью различных термических обработок массивных образцов метастабильного аустенитного сплава Fe-31Ni, вызывающих перераспределение никеля в процессе $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, показана возможность регулирования КТР аустенита в достаточно широких пределах (от $3,7 \times 10^{-6}$ до $12,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) в интервале температур от -50 до 20°C

ЭВОЛЮЦИЯ СОБСТВЕННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ НА СТОКАХ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ

А.В. Козлов¹, К.А. Козлов², А.Р. Исинбаев¹, И.А. Портных¹

¹АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный Свердловской обл.

²«Институт физики металлов» УрО РАН, г. Екатеринбург

При нейронном облучении в материале генерируется большое количество точечных дефектов, дальнейшая эволюция которых зависит от их подвижности, определяемой температурой. В данной работе рассматривается среднетемпературное нейтронное облучение, когда оба вида точечных дефектов обладают термической подвижностью. Мигрируя по кристаллу, ТД попадают на стоки, и там происходят радиационно-индуцированные процессы: наращивание плоскостей краевых дислокаций (переползание), приграничная рекристаллизация, формирование сегрегационных областей, образования фаз и пр. Интенсивность этих изменений зависит от потоков на сток вакансий и междоузлий, которые, в свою очередь, зависят от концентрации ТД в матрице, являющейся результатом баланса их генерации и ухода на стоки. Возвратом ТД со стоков в матрицу обычно пренебрегают.

Целью работы является описание эволюции ТД на стоках, с учетом испускаемых с них обратных потоков в матрицу, а также оценка влияния происходящих на стоках процессов на характеристики радиационно-индуцированных изменений микроструктуры.

В работе представлена модель эволюции точечных дефектов на стоках и разработанный на ее основе аппарат расчета концентраций вакансий и междоузлий на дислокациях, границах зерен и двойников. Показано, что эти процессы приводят к сдвигу дислокационных границ, приграничной рекристаллизации, изменению величины критического диаметра зародышей пор. В качестве примера, проведен расчет этих характеристик для образцов оболочки твэла из аустенитной стали твэла, прошедшего эксплуатацию в реакторе БН-600, результаты которого сопоставлены с экспериментальными данными.



II. Материалы для ядерной и термоядерной энергетики, новые подходы к созданию радиационно-стойких конструкционных материалов

В настоящее время наиболее важной является проблема создания новых металлических материалов для реакторов деления и синтеза. На секции будет заслушано большое число материаловедческих сообщений по радиационно-индуцированному изменению физико-механических свойств различных (использующихся в настоящее время и перспективных для использования) реакторных материалов. Рассматриваются материаловедческие проблемы высокотемпературной ползучести, распухания ГЦК и ОЦК сталей, радиационного воздействия на аустенитные реакторные стали. Результаты, полученные на реальных реакторных материалах, анализируются, исходя из общих принципов радиационной физики твёрдого тела. Также здесь будут представлены доклады российских и зарубежных учёных, посвящённые результатам исследования влияния оксидного и интерметаллидного старения на структуру и механические свойства высоколегированных конструкционных сталей. Основное внимание будет уделено создаваемым в последнее время сталям, упрочняемым термостойкими оксидами (иттрия, титана, тория).

SILVER TRANSPORT THROUGH SiC LAYERS OF TRISO FUEL PARTICLES

J.H. O'Connell, E.J. Olivier, J.H. Neethling

CHRTEM, Nelson Mandela University, Port Elizabeth, South Africa (joconnell@mandela.ac.za)

Gas-cooled reactors are considered not only for electricity generation but also for the supply of process heat and steam and the management of CO₂ induced climate change. The tristructural-isotropic (TRISO) fuel particle is the heart of a number of past and current high temperature gas-cooled reactors (HTGRs) and consists of a fissionable kernel which is coated with various layers in a fluidized bed CVD reactor. A key design feature of these particles is the ability to contain all radioactive fission products (FPs) inside the fuel structure to avoid contamination of the coolant. It has been reported by [1] that certain metallic fission products such as ^{110m}Ag are released by seemingly intact particles at high temperatures. The exact mechanism of Ag release from TRISO fuel particles has eluded researchers over the past thirty years and has largely been attributed to grain boundary diffusion leading to a requirement of small crystal size in the SiC coatings. Previous work [1-3] has shown that Ag alone is not mobile in SiC even along grain boundaries, while [4] proposed that Ag migration in SiC is only possible in the presence of Pd or similar fission products.

In this work, various out of reactor experiments were performed in order to investigate the Pd assisted transport mechanism of Ag in SiC. Results were compared to recently irradiated TRISO particles from the AGR1 experiment. For out of reactor experiments, both 3C and 6H SiC from NovaSiC (France), 3C SiC from Rohm and Haas (USA), as well as surrogate TRISO particles with ZrC kernels (PBMR South Africa) were subjected to various heat treatments in the presence of Pd and Ag. Specimens were then examined by SEM using a JEOL 7001F equipped with an Oxford instruments EDS detector as well as TEM using a JEOL 2100 and ARM 200F both equipped with Oxford Instruments EDS detectors.

Results showed clear evidence of Pd induces SiC decomposition with subsequent epitaxial reformation. Ag dissolves into liberated Si forming mobile nodules that migrate along Pd corroded paths. At the same time C is transported through the nodule and new SiC is epitaxially precipitated at the back of the nodule.

References

- [1] Pearson R.L., Lauf R.J., Lindemer T.B., *ORNL/TM-8059*, Oak Ridge National Laboratory, 1982
- [2] Nabielek H., Brown P.E., Offermann P., *Nucl. Eng.* **35** (1977) p.483
- [3] MacLean H.J., Ballinger R.G., Kolaya L.E., Simonson S.A., Lewis N, Hanson M.E., *J. Nucl. Mater.* **357** (2006) p.31
- [4] Neethling J.H., O'Connell J.H., Olivier E.J., *Nucl. Eng. Des.* **251** (2012) p.230

THEORETICAL STUDY THE EFFECT OF RESIDUAL GASES ON SWELLING ACCUMULATION IN STRUCTURE REACTOR MATERIALS AT HIGH NEUTRON DOSES

S.I. Golubov¹, A.V. Barashev²

¹*Materials Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831- 6138, USA (6gs@ornl.gov)*

²*Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA*

The effect of residual gases on void nucleation has already been reported in the literature, see e.g. [1-3], although it has never been considered as a way for increasing swelling resistance. However, there is a common belief that, e.g., in austenitic stainless steels, He atoms from ⁵⁹Ni (n, α) reactions are mainly responsible for stabilization of void nucleus, so He accumulation soon or later will provide high void nucleation regardless of a residual gas concentration. However, such a view is in contradiction with the observations that the terminal void density in the case of neutron irradiation is established at doses of the order ~ 1 dpa, or even less, i.e., when the concentration of He may be rather small. Hence, residual gas may play a certain role in void nucleation hence may also affect swelling accumulation as well. However, experimental study of the effect of residual gas on swelling accumulation at practically important doses, i.e., of the order of tens of dpa, is not possible since it would require an extremely large time. Fortunately, it could be done via calculations by using code RIME (Radiation-Induced Macrostructure Evolution) [4], which is based on Production Bias Model (PBM) [5,6]. Calculation results on swelling accumulation in 316 stainless steels irradiated with neutrons to doses 150 dpa in temperature interval 400-650°C at different residual gas concentrations are discussed.

References

- [1] Yamakawa K., Mukouda I., Shimomura Y., Void formation in neutron irradiated Cu and Cu alloys, *J. Nucl. Mater.* **191-194**, Part A (1992) 396-400.
- [2] Shimomura Y., Mukoda H., Kiritani M., Kojima S., Garner F. A., Experiments to examine the contribution of gaseous atoms on void formation in irradiated metals, *J. Nucl. Mater.* **212-215** (1994) 352-357.
- [3] Zinkle, S. J. F. A. Garner, Effect of initial oxygen content on the void swelling behavior of fast neutron irradiated copper, *J. Nucl. Mater.* **329-333** (2004) 938-941.
- [4] Barashev A.V., Golubov S.I., Stoller R.E., A Model of radiation-induced microstructural evolution, Oak Ridge National Laboratory, *ORNL Report ORNL/LTR-2014/487*.
- [5] Singh B.N., Golubov S.I., Trinkaus H. Serra, A., Osetsky Yu.N. and Barashev A.V., **251** Aspects of microstructure evolution under cascade damage conditions, *J. Nucl. Mater.* (1997) 107-122.
- [6] A.V. Barashev, S.I. Golubov, Unlimited damage accumulation in metallic materials under cascade-damage conditions, *Phil. Mag.* **89** (2009) 2833-2860.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ЖАРОПРОЧНОЙ МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181

Н.А. Полехина¹, В.В. Линник¹, К.В. Алмаева¹, И.Ю. Литовченко¹, В.М. Чернов²,
М.В. Леонтьева-Смирнова², Н.А. Дегтярев², К.А. Мороз²

¹ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
(nadejda89tsk@yandex.ru)

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

Малоактивируемые 9-12 %-ные хромистые ферритно-мартенситные стали в настоящее время рассматриваются как перспективные конструкционные материалы для активных зон и внутрикорпусных устройств реакторов деления и синтеза. Одной из основных проблем ферритно-мартенситных сталей является склонность к низкотемпературному охрупчиванию – переход в хрупкое состояние при понижении температуры. Кроме того, радиационное облучение может приводить к существенному повышению температуры их вязко-хрупкого перехода.

В настоящей работе исследовано влияние высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) с деформацией в аустенитной области на закономерности низкотемпературного охрупчивания малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 при испытаниях на растяжение и ударный изгиб в интервале температур от -196 до 100 °С, по сравнению с ее традиционной термической обработкой (ТТО: закалка + высокий отпуск).

ВТМО изменяет вид и положение кривых напряжение-деформация стали ЭК-181. Она обеспечивает повышение (на $\approx 20\%$), по сравнению с традиционной термической обработкой, предела текучести стали во всем исследуемом интервале температур при сохранении удовлетворительного уровня пластичности; увеличивает степень ее деформационного упрочнения на начальной стадии деформации.

Снижение температуры испытаний на растяжение в интервале от 20 до -196 °С приводит к возрастанию прочностных свойств стали ЭК-181 после обеих исследуемых обработок. Существенное падение пластичности (до $\approx 2-3\%$) обнаружено лишь при -196 °С.

Испытания на ударный изгиб образцов типа Шарпи стали ЭК-181 показали, что ВТМО обеспечивает увеличение, относительно ТТО, ее ударной вязкости практически при всех исследуемых температурах (от 20 до -100 °С). Температура вязко-хрупкого перехода стали после ТТО составляет $T_{хв} \approx -7\text{ °С}$, после ВТМО $T_{хв} \approx -15\text{ °С}$, чему соответствуют величины ударной вязкости $KCV \approx 28\text{ Дж/см}^2$ и $KCV \approx 33\text{ Дж/см}^2$.

При фрактографическом исследовании изломов образцов после ударных испытаний обнаружены существенные различия характера разрушения в зависимости от режима обработки стали. Отличительной особенностью изломов образцов после ВТМО, разрушенных в температурной области вязко-хрупкого перехода, является формирование расщеплений в плоскостях, параллельных плоскости прокатки.

Таким образом, высокотемпературная термомеханическая обработка стали ЭК-181 приводит как к повышению прочностных свойств, так и увеличению вязкости разрушения, не оказывая существенного влияния на положение температуры ее вязко-хрупкого перехода. Основные факторы упрочнения стали после ВТМО – измельчение отпущенной мартенситной структуры в результате пластической деформации в аустенитной области и последующей закалки, увеличение плотности дислокаций, объемной доли и дисперсности наноразмерных частиц карбонитрида ванадия, закрепляющих дефектную субструктуру материала. Эти факторы, наряду с эффектом

расщепления образцов в процессе разрушения при испытаниях по Шарпи, оказывают благоприятное влияние на ее ударную вязкость.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00231, <https://rscf.ru/project/21-79-00231/>.

ВЛИЯНИЕ ГИДРИДОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАЗРУШЕНИЕ ОБЛУЧЕННОГО СПЛАВА Zr-2.5%Nb

С.А. Аверин¹, В.Ю. Ярков^{1,2}, В.А. Цыгвинцев¹, М.В. Евсеев¹

¹Акционерное общество «Институт реакторных материалов» (averin@irmatom.ru)

²«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
г. Екатеринбург

Обоснование работоспособности каналов СУЗ реакторов РБМК-1000, которые работают за пределами проектного срока службы, является одной из составных задач для продления срока эксплуатации энергоблоков.

В соответствии с требованиями регламентного контроля проводятся периодические послереакторные исследования участков каналов в защитных камерах. В наших работах [1-4] приведены основные результаты, полученные по послереакторным исследованиям каналов СУЗ, которые изготовлены из сплава Zr-2.5%Nb. Выявлен факт повышения содержания водорода в материале труб и ниппелей переходников каналов СУЗ после эксплуатации. Повышенное содержание водорода сопровождается появлением на внутренней поверхности локальных областей скопления гидридов типа блистеров.

Проведены исследования влияния времени эксплуатации, набранного повреждающего флюенса нейтронов, структуры циркониевого сплава и размеров блистеров на кратковременные механические свойства. Установлено, что наиболее сильное наводороживание происходит в зонах канала СУЗ с отожженной структурой. Наводороживание приводит к образованию гидридов, которые образуют локальные поверхностных скопления в виде блистеров. Разрушение по блистерам происходит хрупко сколом, с формированием речного рельефа, обусловленного разрушением по иголкам гидридов. Степень охрупчивания и падения прочностных свойств зависит от размеров блистеров и цепочек гидридов, структуры циркониевого сплава и повреждающего флюенса быстрых нейтронов.

Литература

[1] Аверин С.А., Синельников Л.П., Цыгвинцев В.А. и др. Состояние каналов СУЗ РБМК по результатам послереакторных исследований. – *Атомная энергия*, 2016, т.121, вып. 4, с. 201-205.

[2] Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Евсеев М.В. и др. Результаты исследований дефектного канала СУЗ РБМК после 32 лет эксплуатации. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2018, вып. 5(96), с. 49-58.

[3] Цыгвинцев В.А., Аверин С.А., Пастухов В.И., Старицын С. В. Низкотемпературная абсорбция водорода сплавом Zr-2,5%Nb в условиях реакторного облучения. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2018, вып. 5(96), с. 23-29.

[4] S.A. Averin, V.L. Panchenko, V.A. Tsygvintsev, V.I. Pastukhov. Structural Evolution of a

Zr-2.5%Nb Alloy during Long-Term Long-Temperature Neutron Irradiation. *Russian Metallurgy (Metally)*, Vol. 2021, № 5, pp. 75-80.

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ

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 высокий уровень радиационных повреждений конструкционных материалов, в частности, оболочек твэлов реактора.

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).

С увеличением продолжительности облучения для аустенитных сталей на первый план выходит проблема распухания, которая приводит к резкому снижению физико-механических свойств (потеря прочности и пластичности, формоизменение).

В настоящее время актуальной задачей является повышение срока эксплуатации твэлов в реакторах на быстрых нейтронах, для решения которой необходимо выявить влияние радиационно-индуцированных изменений микроструктуры на физико-механические свойства реакторных сталей, такие как модуль Юнга, модуль сдвига и коэффициент Пуассона.

В работе представлены экспериментальные результаты исследования материалов оболочек твэлов после облучения в реакторе БН-600, в том числе, полученные при определении характеристик упругости ультразвуковыми динамическими резонансными методами. Проведён анализ влияния распухания и других микроструктурных изменений исследуемых образцов на величину характеристик упругости реакторных сталей. Показано, что для оболочек из аустенитных сталей доминирующее влияние на изменение физико-механических свойств оказывает распухание.

ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ИСХОДНЫХ РЕАКТИВОВ НА КАЧЕСТВО НАТРИЕТЕРМИЧЕСКОГО ПОРОШКА ЦИРКОНИЯ

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

Порошок циркония получают путем натриетермического восстановления комплексной соли циркония – гексафторцирконата калия (ГФЦК) в соответствии с уравнением реакции

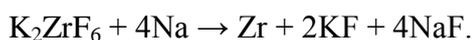


Схема технологического процесса получения порошка включает в себя: подготовку исходных реагентов, компоновку шихты, восстановление, выщелачивание реакционной массы, рассев и сушку готового продукта.

Требованиями, предъявляемыми к порошку циркония, являются заданные в узких интервалах пиррофорность (температура вспышки), гранулометрический состав, содержание основного вещества и ряда примесей.

Качество готового продукта во многом определяется свойствами исходных реагентов. В частности, возможной причиной бракования порошка циркония по показателям массовая доля водорода и массовая доля углерода является среда хранения исходного металлического натрия – керосин. Керосин, обладая большой проникающей способностью, глубоко внедряется в структуру слитка металлического натрия (в трещины и поры слитка; в натрий, а также в расплаве металлического натрия, керосин не растворяется) и не может быть удален на стадии подготовки реакционной шихты.

Известен способ [1] очистки металлического натрия от органических компонентов путем его переплавки под слоем жидкости, с которой натрий не взаимодействует, например, керосина или вазелинового масла.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния процесса очистки натрия металлического путем переплавки под слоем вазелинового масла на качество нарабатываемого мелкодисперсного порошка циркония.

В ходе плавления натрия под слоем масла, в силу лучшей смачиваемости маслом присутствующих в натрии твердых органических загрязнений, способности органических загрязнений (керосина) растворяться в масле, а также разности плотностей расплава натрия и загрязнений, происходило вытеснение последних в масло после разрушения оксидной пленки на поверхности расплава натрия.

В результате работы:

– с использованием предварительно переплавленного натрия изготовлены партии порошка циркония. По результатам лабораторного анализа для всех наработанных партий не отмечено превышение содержания водорода и углерода выше установленных требований;

– выполнена оценка влияние дополнительной очистки натрия на свойства нарабатываемого порошка циркония;

– рекомендована последовательность операций для проведения процесса предварительной очистки металлического натрия при изготовлении целевого продукта в производственных условиях.

Литература

[1] Воскресенский П.И. *Техника лабораторных работ*. Химия, Москва, 1973, С. 717.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОБЛУЧЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ

Р.П. Карагерги, А.Г. Нежданов, В.Ю. Ярков, В.И. Пастухов, М.В. Евсеев, А.В. Козлов, И.А. Портных

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

Основными причинами, ограничивающими ресурс эксплуатации твэлов в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах, являются радиационное распухание и охрупчиванию материала оболочки твэла. В процессе работы материал накапливает большое количество различных радиационных дефектов, которые приводят к изменению физико-механических свойств. В частности, происходит радиационное упрочнение и снижение пластичности. В некоторых случаях пластичность материала оболочки твэла может достигать очень низких значений, вплоть до «нулевых». Традиционный способ растяжения кольцевых образцов для оценки остаточной пластичности имеет ограниченную применимость, связанную с особенностями методики испытания. Перспективным способом нагружения кольцевых образцов для оценки механических характеристик материалов оболочек с «нулевой» пластичностью, является радиальное сжатие кольцевого образца между двумя плоскими штампами. Например, данный способ нагружения образца нашёл применение при оценке остаточной пластичности оболочек твэлов из циркониевых сплавов реакторов PWR в аварийных условиях, а именно при высокотемпературном окислении циркониевой оболочки твэла из-за потери теплоносителя (авария типа LOCA), приводящее к охрупчиванию материала оболочки твэла [1, 2].

В настоящее время актуальной задачей является повышение срока эксплуатации твэлов в реакторах на быстрых нейтронах за счёт использования в качестве материала оболочек твэлов усовершенствованной аустенитной стали, а также жаропрочных сталей ферритно-мартенситного класса. Для обоснования работоспособности кандидатных материалов проводятся исследования твэлов после опытной эксплуатации или облучения оболочек в материаловедческих сборках БН-600 до достижения больших доз (вплоть до 140 сна), включающие механические испытания на радиальное сжатие.

В работе представлены некоторые экспериментальные результаты исследования материалов оболочек твэлов после облучения в реакторе БН-600, полученные с помощью комплексной методики механических испытаний кольцевых образцов, сочетающий овализацию кольцевых образцов при радиальном сжатии с их последующим растяжением. При этом проведён анализ напряженно-деформированного состояния кольцевых образцов в процессе испытаний, учитывающий изменения характеристик НДС (в частности, уровня поврежденности), вызванные образованием радиационных дефектов.

Литература

[1] Joachim Herb, Jürgen Sievers, and Heinz-Günther Sonnenburg A new cladding embrittlement criterion derived from ring compression tests, *Nuclear Engineering and Design*, **273** (2014), P. 615 – 630.

[2] J. Desquines and S. Guilbert Effect of an oxide layer on the result of a ring compression test on a fuel cladding sample after a simulated LOCA transient, in *Top fuel 2018, Pargue, Czech Republic*, 2018.

ГИДРИДЫ В СПЛАВЕ Zr-2,5%Nb ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В.К. Самедов^{1,2}, С.А. Аверин¹, В.Ю. Ярков^{1,2}, А.Р. Исинбаев^{1,2}

¹АО "ИРМ", г. Заречный, Россия (v.k.samedov@irmatom.ru)

²«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

Основной причиной повреждения каналов СУЗ реакторов РБМК, которые изготовлены из сплава Zr-2.5%Nb, в процессе эксплуатации является наводороживание [1,2]. Водород образует гидриды, которые распространяются на всю толщину стенки канала, а так же приводит к формированию на внутренней поверхности областей с высокой плотностью гидридов – блистеров [1,2].

Проведены послереакторные исследования морфологии блистеров и гидридов, их фазового состава на разных участках канала СУЗ после 32 лет эксплуатации.

Исследования проводили с использованием оптической и электронной микроскопии: металлография, рентгеноструктурный анализ, сканирующая электронная микроскопия с применением детекторов SE (вторичные электроны), BSE (отраженные электроны), EBSD (дифракция отражённых электронов) [3].

Выявлено влияние структуры циркониевого сплава на размеры блистеров и морфологию гидридов, оценена структура и фазовый состав блистеров и гидридных цепочек.

Литература

[1] Аверин С.А., Синельников Л.П., Цыгвинцев В.А. и др. *Состояние каналов СУЗ РБМК по результатам послереакторных исследований.* – *Атомная энергия*, 2016, т.121, Вып. 4, с. 201-205.

[2] Аверин С.А., Цыгвинцев В.А., Евсеев М.В. и др. *Результаты исследований дефектного канала СУЗ РБМК после 32 лет эксплуатации.* – *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*, 2018, Вып. 5(96), с. 49-58.

[3] Синельников Л.П., Аверин С.А., Козлов А.В. и др. *Оборудование и методики послереакторных исследований материалов в комплексе защитных камер АО «ИРМ»* – *Атомная энергия*, 2016, т.121, Вып. 4, с. 187-194.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО РАСПУХАНИЯ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОЛОЧЕК ИЗ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ БН

А.Р. Исинбаев^{1,2}, А.В. Козлов¹, И.А. Портных¹

¹АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия (isinbaev.artur@urfu.ru)

²Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия

Распухание оболочек твэлов проходящих эксплуатацию в реакторах на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем является одним из главных негативных факторов,

ограничивающих выгорание топлива тепловыделяющей сборки (ТВС). Оболочки твэлов, в частности, из аустенитной стали, под воздействием нейтронного облучения получают повреждение кристаллической решетки, что приводит к появлению избыточного количества точечных дефектов, что приводит к радиационному набуханию [1]. Традиционно, при описании процесса радиационного набухания выделяют 3 стадии. Инкубационная стадия, стадия нестационарного и стадия стационарного набухания. Особенность завершающего этапа стадии нестационарного роста заключается в том, что из-за сдвига значения критического диаметра в сторону больших размеров зародыши пор не могут перейти в класс пор и их количество в сформированном ансамбле не увеличивается, а только уменьшается за счет коалесценции. Подрост пор ведет к увеличению интегральной площади их поверхности, а коалесценция к уменьшению. До тех пор, пока подрост действует на интегральную площадь сильнее коалесценции, скорость набухания будет расти. Когда действие обоих факторов уравниваются, скорость набухания станет постоянной [2].

Модель завершающего этапа стадии нестационарного набухания [3] оболочек твэлов из аустенитной стали включает себя изменения следующих характеристик пористости: среднего диаметра и концентрации пор, пористости и повреждающей дозы. Каждое изменение характеристик пористости, в свою очередь влияет на квазистационарное значение концентрации ТД в матрице, которая основана на модели миграции ТД, представленной в работе [4]. В свою очередь изменение концентрации ТД в матрице и их распределение на стоках влияет на потоки ТД в стоки и со стоков, в том числе поток ТД в поры.

Экспериментальные данные для использования в качестве начальных значений в модели расчета были получены на образцах оболочек твэлов из аустенитной стали прошедших эксплуатацию в реакторе БН-600. Методами ПЭМ и СЭМ была проанализирована структура материала, распределение пор по размерам и их концентрация. По полученным данным высчитывались характеристики пористости, которые использовались в качестве начальных параметров для расчетов.

Чтобы избежать многошаговой громоздкой процедуры расчета в работе [3] в модели, в качестве приближения, использовались полуэмпирические зависимости изменения диаметра пор от интегральной площади пор, что негативно влияло на точность получения результатов.

Целью данной работы является расчет с использованием программных средств всего цикла изменений в материале, как характеристик пористости, так и квазистационарные концентрации точечных дефектов в матрице и на стоках (дислокации, границы зерен, границы двойников, поры). На этой основе рассчитывается временная зависимость набухания на завершающем этапе стадии нестационарного набухания для исследуемых материалов. Выполненные расчеты прогнозирования остаточного ресурса ТВС использованы для обоснования безопасности продления опытной эксплуатации.

Литература

- [1] Griffiths, M., *Materials*, т.14 (2021), №10, с.1-47.
- [2] Kozlov A.V., Portnykh I.A., *Physics of metals and metallography*, т.117 (2016), №4, с.399-406.
- [3] Kozlov A.V., Portnykh I.A., Isinbaev A.R., *Physics of metals and metallography*, т.121 (2020), №7, с.611-617.
- [4] Kozlov A.V., *Physics of metals and metallography*, т.107 (2009), №6, с.534-541.

КОРРОЗИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ВО ФТОРИДНОМ РАСПЛАВЕ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В.А. Шелан, В.Г. Субботин, Д.В. Хмельницкий, Р.Р. Фазылов, М.Н. Белоногов, Е.А. Леви, П.А. Санникова, И.В. Санников
*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», Снежинск, Россия
(shelan1987@gmail.com)*

Ключевой задачей для обоснования концепции жидкосолевого реактора-сжигателя минорных актинидов является выбор состава топливного растворителя и конструкционных материалов, удовлетворяющих условиям и режимам работы реактора. В настоящее время начаты работы по созданию исследовательского реактора в целях отработки расплавно-солевых технологий для трансмутации минорных актинидов. В этом реакторе в качестве растворителя топливных добавок предполагается использовать фторидный расплав состава $73\text{LiF}-27\text{BeF}_2$ (% мол.), а в качестве конструкционных материалов – сплавы на основе никеля.

В 2021 году в РФЯЦ-ВНИИТФ проведены коррозионные испытания образцов из хром-молибден-никелевых сплавов ХН80МТ, ХН80МТЮ и ХН80МТЮБ в расплаве молярного состава $99,5(73\text{LiF}-27\text{BeF}_2)-0,5(\text{UF}_4+\text{UF}_3)$ (% мол.) с добавкой 0,1 % масс. Те. Образцы экспонировались в расплаве, циркулирующем со скоростью ~ 5 см/с, при максимальной температуре расплава 690 °С и градиентом температуры по контуру циркуляции ~ 70 °С в течение 200 и 600 часов под контролем окислительно-восстановительного потенциала расплава в режиме *in situ*. Получены данные о поведении расплава в процессе испытаний, о характере и масштабах коррозионного поражения исследуемых конструкционных материалов.

Коррозионные испытания проводились на коррозионном стенде, созданном на основе термомоноконвекционной установки, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт». Контроль окислительно-восстановительного потенциала расплава в процессе коррозионных испытаний осуществлялся с использованием устройства, разработанного в УрО РАН ИВТЭ.

Работа выполнялась по техническому заданию и финансовой поддержке АО «ГНЦ НИИАР в соответствии с ЕОТП НИОКР Госкорпорации Росатом «Выбор и обоснование материалов для создания жидкосолевого ядерного реактора с целью замыкания ЯТЦ по МА по переработки отходов ОЯТ тепловых реакторов. Этап 2019-2021 г.».

Выражаем благодарность Юмашевой Наталье Дмитриевне, Сухоруковой Ольге Львовне, Беляеву Дмитрию Анатольевичу, Торопову Илье Владимировичу, Лекомцеву Сергею Анатольевичу, Александрову Алексею Сергеевичу, Горохову Сергею Владимировичу за участие в коррозионных испытаниях, проведение аналитических и структурных исследований, и механических испытаний.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ FE НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ ОКСИДАМИ СТАЛИ 10Cr ODS МЕТОДАМИ УЛЬТРАМИКРОСКОПИИ

А.В. Клауз, А.А. Хомич, А.Г. Залужный, С.В. Рогожкин

*Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова НИЦ
«Курчатовский институт» (Artem.klauz@gmail.com)*

Дисперсно-упрочненные оксидами стали являются потенциальными конструкционными материалами активной зоны следующего поколения реакторов на быстрых нейтронах. Предполагается, что они должны выдерживать радиационную нагрузку до повреждающих доз облучения порядка 200 сна при температурах 400-700 °С. Такая нагрузка может быть выдержана материалом, в структуру которого входят оксидные частиц. Известно, что присутствие в материале большого числа малоразмерных оксидных частиц приводит к улучшению механических характеристик, ДУО стали.

Для анализа эволюции распределения оксидных включений в материале в процессе облучения, были проведены имитационные эксперименты по облучению образцов ДУО стали 10Cr ODS ионами Fe^{2+} – с энергией 5.6 МэВ до повреждающих доз 3, 6 и 30 сна при температуре 350 °С. Исследование проводилось с использованием современных методов ультрамикроскопии: просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и атомно-зондовой томографии (АЗТ).

Методом АЗТ определена зависимость изменения размеров и плотности кластеров Ti-Y-O-V-Cr от дозы облучения. Так, средний диаметр кластера с (4 ± 1) нм в исходном состоянии уменьшается до (2 ± 1) нм при облучении до максимальной дозы в 30 сна. При этом плотность кластеров уменьшилась в ~ 2 раза с $(9\pm 1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3})$ до $(4\pm 2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3})$. Методом ПЭМ обнаружены оксидные частицы со стехиометрией $Y_2Ti_2O_7$ или Y_2TiO_5 . При облучении средний размер оксидных частиц фактически не менялся, плотность частиц уменьшилась с $(13\pm 2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3})$ до $(4\pm 1 \times 10^{22} \text{ м}^{-3})$ при достижении максимальной дозы 30 сна.

Обнаружено, что при ионном облучении происходит частичное растворение кластеров и уход элементов в матрицу. Анализ химического состава кластеров показал, что с увеличением дозы облучения существенно уменьшается содержание Cr и V в кластерах, при этом концентрация Ti, Y, O сохраняется в пределах погрешности, что говорит о стабильности кластеров типа Ti-Y-O.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ 9-13% ХРОМИСТЫХ ДУО СТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ V, Ti И Al, ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ЖЕЛЕЗА

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

*Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 117218 Москва,
Россия, ул. Большая Черемушкинская, 25 (artem.khomich@gmail.com)*

Создание новых реакторов деления и синтеза, во многом зависит от разработки

материалов активной зоны, к которым предъявляются высокие требования по радиационной стойкости и жаропрочности. Требования к новым конструкционным материалам приближаются к технологическим пределам их изготовления, и усилия разработчиков таких материалов направлены на дальнейшую оптимизацию элементных составов (включая дальнейшую минимизацию примесных элементов), микроструктур, структурно-фазовых состояний, режимов термомеханических обработок материалов и изделий для применения в инновационных реакторах деления и синтеза. Эксплуатационные свойства новых материалов должны быть лучше по сравнению с уже имеющимися. Например, радиационная стойкость до 200 сна (смещений на атом), сохранение механических свойств при температурах больше 700 °С и прочее. Одним из кандидатов способных удовлетворить данным требованиям является дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали. Механические свойства ДУО сталей в значительной степени зависят от наноструктуры материала: размера и пространственного распределения дисперсных включений (оксидные частицы и кластеры). Известно, что такие элементы как Ti, V, Zr влияют на образование наноразмерных частиц, уменьшая их размер и увеличивая их плотность [1,2]. С данной точки зрения важно изучать модельные ДУО стали с различными системами легирования. Данный подход может позволить углубиться в понимание процессов формирования наноструктуры ДУО материалов, в зависимости от их изначального состава. Более того, изучение поведения стабильности включений при облучении, в том числе с применением различных моделирующих воздействий, таких как облучение тяжелыми ионами, является важным вопросом, из-за применения ДУО сталей в ядерных реакторах.

В настоящей работе методами просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии проведены комплексные исследования исходного состояния дисперсно-упрочненных оксидами сталей с разными системами легирования, с использованием таких элементов как Zr, Ti, Al и V. Помимо этого, проведены имитационные эксперименты по облучению нескольких ДУО сталей ионами железа до нескольких доз в диапазоне до 30 сна при температуре 350°С с последующим анализом изменений структурно-фазового состояния.

Литература

- [1] Williams C.A., Marquis E.A., Cerezo A., Smith G.D.W. // J. Nucl. Mater. 2010. V. 400. P. 37.
- [2] Aleev A.A, Iskandarov N.A., Klimenkov M., Lindau R., Möslang A., Nikitin A.A., Rogozhkin S.V., Vladimirov P., Zaluzhnyi A.G. // J. Nucl. Mater. 2011. V. 409. P. 65.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ Rh-Cu МЕТОДОМ ВАКУУМ-ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ

А.Н. Тарасенков¹, А.И. Савицкий^{1,2}, Д.В. Новиков², С.В. Дубков², Д.Г. Громов²

¹ НПК «Технологический центр», г. Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация
(A.Tarasenkov@tcen.ru)

² Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, г. Зеленоград,
Российская Федерация

В августе 2021 года Климатическая группа ООН представила доклад о глобальном потеплении и изменении климата Земли. Согласно мнению экспертов климат

претерпевает ускоренные изменения, причины которых заключаются в значительных выбросах CO_2 и загрязнением окружающей среды ввиду использования ископаемых топлив промышленностью и человеком. Ожидается, что работа по сокращению эмиссии CO_2 странами-участницами Парижского соглашения (2020 г.), будет содействовать дополнительному развитию мировой атомной промышленности, считающихся одной из наиболее «чистых» по выбросам CO_2 на душу населения. Развитие отрасли способствует разработке новых типов реакторов, совершенствованию технологических процессов, а также стимулирует поиск новых радиационно-стойких конструкционных материалов, способных повысить энергоэффективность и безопасность на всех этапах ядерного топливного цикла, от получения ядерного горючего до хранения радиоактивных отходов.

Одним из наиболее химически-стойких материалов является родий. Данный металл обладает уникальным комплексом свойств: высокая коррозионная стойкость и температура плавления, хорошие каталитические, механические свойства и др. Благодаря этому Rh и сплавы на его основе нашли широкое применение в таких областях как автомобилестроение, стекольная и химическая промышленности. В ядерных реакторах родий используется в составе термопар и в качестве эмиттеров датчиков обнаружения потока нейтронов [1]. Большое значение сечения захвата нейтронов для Rh дает высокую чувствительность таких датчиков, однако приводит к более быстрому выгоранию эмиттеров. В совокупности с высокой стоимостью металла это, в некоторой степени, ограничивают применения Rh в ядерной энергетике. Применение сплавов на основе Rh может стать потенциальным решением проблемы. Например, пластичная и более дешевая медь, обладающая низким активационным барьером диффузии, способна повысить эффективность заживления радиационных дефектов. Rh и Cu при смешивании образуют непрерывный ряд твердых растворов, что исключает образование второй фазы, тем самым позволяя ожидать высокую устойчивость кристаллической решетки. Таким образом, наличие Cu способно наделить сплав необходимыми механическими свойствами для повышения радиационной стойкости.

В данной работе представлен подход к формированию тонкопленочных покрытий сплава $\text{Rh}_x\text{Cu}_{1-x}$. Наночастицы Rh-Cu с различным соотношением компонентов (25/75, 50/50, 75/25 ат.%) были сформированы вакуум-термическим методом в результате поочередного осаждения Cu и Rh и вакуумного отжига при 350 °C. Структура и состав наночастиц исследовались методами просвечивающей и высокоразрешающей электронной микроскопии (JEOL JEM-2100 Plus).

Результаты работы использовались при выполнении проекта в рамках государственного задания 2020-2022 гг. соглашение FSMR-2020-0018.

Литература

[1] Zhang Q., et al. *Annals of Nuclear Energy*. V.23 (2018), pp.519-525.

КОМПЛЕМЕНТАРНЫЙ АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ

С.В. Рогожкин^{1,2}, А.А. Никитин^{1,2}, А.А. Хомич^{1,2}, А.А. Богачев^{1,2}, А.В. Клауз^{1,2},
Н.А. Искандаров¹, А.А. Лукьянчук¹, О.А. Разницын¹, А.С. Шутов¹, А.Г. Залужный^{1,2},
Ю.Е. Горшкова³, Г.Д. Богучава³

¹ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
(Sergey.Rogozhkin@itep.ru)

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

³Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

Прогнозирование радиационной стойкости конструкционных материалов в радиационных полях неразрывно связано с пониманием процессов эволюции микроструктуры (формирования радиационных дефектов, предвыделений и выделений фаз, перераспределения примесей и легирующих элементов). Хорошо известно, что существенные макроскопические проявления, такие как набухание, охрупчивание и т.д., непосредственно связаны с процессами, протекающими на атомно-либо нано-масштабном уровне. В тоже время экспериментальное изучение процессов на таких масштабах в сталях и других многокомпонентных материалах затруднительно. Изучение структурных перестроек таких материалов требует применения ряда экспериментальных методик.

Универсальным методом анализа микроструктуры материалов является просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), позволяющая анализировать зёрненную структуру, фазовое состояние и различные включения. Мельчайшие включения и кластеры можно обнаружить с помощью малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН) или с помощью атомно-зондовой томографии (АЗТ). МУРН позволяет определить с высокой точностью объемную плотность включений и нанокластеров, а также получить их распределение по размерам. Химический состав и пространственное распределение этих кластеров могут быть детально изучены с помощью атомно-зондовой томографии. АЗТ исследования показывают, что состав наноразмерных включений зачастую отличается от состава больших стехиометрических включений фаз.

В настоящей работе представлены результаты анализа наноструктуры различных реакторных сталей. Значительное внимание уделено дисперсно-упрочненным оксидами сталям, содержащим высокую плотность оксидных включений и нанокластеров, обогащенных Y, O и другими легирующими элементами. Представлены результаты комплексного анализа с применением методов просвечивающей электронной микроскопии, атомно-зондовой томографии, малоуглового рентгеновского рассеяния и малоуглового рассеяния нейтронов.

МЕССБАУЭРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНО ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В СТАЛИ ЭП823 ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ 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 трансмиссионной мессбауэровской спектроскопии с резонансным детектированием выполнено исследование радиационно-индуцированных структурно-фазовых переходов в индустриальной стали ЭП823 при высокодозном облучении в реакторе на быстрых нейтронах БН-600. Показано, что в ферритно-мартенситной стали после облучения с дозами выше 50 сна при температурах 570–660 °С происходит распад твердого раствора с ОЦК структурой и выходом элементов легирования – хрома, молибдена и углерода из металлической матрицы. Это приводит к уменьшению эффективной концентрации хрома в ферритной матрице и образованию интерметаллидной χ -фазы и карбидов типа $Me_{23}C_6$. Установлено, что степень выхода элементов легирования хрома из металлической матрицы стали и объем формирующейся интерметаллидной χ -фазы определяются величиной дозовой нагрузки при облучении.

Сопоставление результатов облучения в реакторе на быстрых нейтронах и длительного термического отжига стали ЭП823 свидетельствует о существенно более интенсивных радиационно-индуцированных процессах распада твердого раствора.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура» № АААА-А18-118020190116-6).

ОБРАЗОВАНИЕ ФЕРРИТА В СТРУКТУРЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ВЫСОКОДОЗНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Д.А. Мережко¹, М.С. Мережко¹, М.Н. Gussev², F.A. Garner^{3,4}

¹Институт ядерной физики, Алматы, Республика Казахстан (merezko@inp.kz)

²Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA

³Radiation Effects Consulting, USA

⁴НИЯУ «Московский инженерно-физический институт», Российская Федерация

Аустенитные нержавеющие стали широко используются в качестве основного конструкционного материала внутрикорпусных устройств водо-водяных реакторов (ВВР) и реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН). Их основные конкурентные преимущества - комбинация высокой прочности и пластичности, коррозионная стойкость в сочетании с относительно низкой склонностью к радиационному набуханию. Облучение высокоэнергетическими частицами аустенитных сталей способствуют образованию радиационных дефектов, таких как дислокационные петли и поры, а также выделению вторичных фаз.

В ряде работ последних десятилетий сообщалось о наблюдаемой в аустенитных сталях радиационно-индуцированной фазовой трансформации ГЦК-аустенита в ОЦК-феррит (мартенсит). До недавнего времени образование феррита в процессе длительного нейтронного облучения рассматривалось как проблема второго порядка важности при эксплуатации ядерной установки. Однако планируемое увеличение срока службы существующих ВВР с 40 до 80 лет вызывает определенные опасения, что некоторые процессы деградации материалов второго порядка, такие, как образование ОЦК фаз, могут стать первоочередными по важности. Радиационно-индуцированный феррит, возникая на границах зерен, снижает стойкость материала к растрескиванию и коррозии в водяном теплоносителе. Все это негативно влияет на механические и коррозионные свойства облученной стали, что может привести к ограничению срока службы всей реакторной установки.

В настоящей работе приводятся результаты исследования образцов стали 12X18H10T, вырезанных из чехловых труб тепловыделяющих сборок реактора БН-350. За время штатной эксплуатации материал был облучен до максимальной повреждающей дозы 60 сна при температурах от 280 до 420°C и скоростях набора дозы 0,25-60,2 сна/год. Наличие магнитной ОЦК-фазы (феррит), образованной в результате нейтронного облучения, было подтверждено магнитометрическим и рентгенографическим анализами. Методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией было обнаружено, что новый радиационно-индуцированный феррит образовался в материале в результате перераспределения легирующих элементов в процессе длительного нейтронного облучения и имеет сложный интерметаллидный состав. Показано, что выделения феррита формируют специфическую структуру, располагаясь по границам зерен и обладают высокой коррозионной повреждаемостью.

Для сравнения представлены результаты имитационных экспериментов образцов стали 12X18H10T после ионного облучения (Fe^{2+} , 2,3МэВ, температура облучения 40-450°C), где также было зафиксировано образование ОЦК-фазы.

Полученные данные могут быть актуальны для обоснования продления срока службы действующих реакторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08052488).

ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ 12 %-НОЙ ХРОМИСТОЙ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-823 С ПРОТОЧНЫМ СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА

Н.А. Полехина¹, С.А. Аккузин¹, К.В. Алмаева¹, И.Ю. Литовченко¹, В.В. Линник¹,
В.М. Чернов², М.В. Леонтьева-Смирнова²

¹ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия
(nadejda89tsk@yandex.ru)

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

В настоящей работе методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа проведено детальное исследование микроструктуры и фазового состава российской 12 % Cr ферритно-мартенситной стали ЭП-823 (Fe-12Cr-Mo-

W-Si-V-W-Nb) после воздействия (в течение 2500 ч.) проточного кислородосодержащего свинцового теплоносителя при 540 °С (в интервале рабочих температур оболочек ТВЭЛлов) в условиях отклонения от нормального кислородного режима реактора БРЕСТ-ОД-300 – при пониженной концентрации О в Рb ($c_o = (4-8) \times 10^{-7}$ масс. %).

Методами растровой электронной микроскопии на поверхности образцов обнаружены светло-серые «островки» с неровными краями. Элементный микроанализ показал, что они представляют собой налипшие остатки свинцового теплоносителя. В областях, свободных от видимого свинцового слоя, поверхность стали имеет развитый рельеф. Методом энергодисперсионного анализа в этих областях определяется повышенное, по сравнению с исходным состоянием, содержание О и некоторых элементов стали, таких как Cr, Si, Mn и др. Содержание Fe, напротив, понижено относительно номинального состава стали. Это является свидетельством формирования на поверхности стали оксидных слоев, обогащенных ее основными легирующими элементами.

При исследовании поперечных шлифов на поверхности образцов обнаружено наличие оксидной окалины, неравномерно покрывающей материал. В некоторых участках поверхности ее толщина составляет всего несколько десятков нанометров, в других местах обнаруживаются очаги коррозии глубиной $\approx 7-10$ мкм. Окалина состоит из двух слоев – внешний слой обогащен по железу, внутренний – по хрому и марганцу. В них наблюдается повышенное, по сравнению с матрицей, содержание кислорода. При этом в приповерхностном матричном слое (толщиной около 10 мкм) происходит обеднение по хрому за счет его интенсивной диффузии к границе раздела «образец-кислородосодержащий свинцовый расплав» с формированием оксидов хрома. Методом рентгеноструктурного анализа на поверхности образцов также обнаруживаются следы свинцового теплоносителя, пики от оксидных фаз, соответствующие магнетиту (Fe_3O_4).

Анализ карт распределения элементов по площади и по линии вблизи поверхности образцов, вырезанных фокусированным ионным пучком, выявил неоднородное по глубине изменение содержания таких элементов как О, Fe, Cr, Mn и Si, также подтверждающее наличие двухслойной оксидной окалины на поверхности образцов. Электронографический анализ показал, что она состоит из оксидов Cr_2O_3 и Fe_3O_4 .

По-видимому, рассматриваемая концентрация кислорода в Рb при 540 °С (в проточных условиях), недостаточна для формирования сплошных защитных оксидных слоев на поверхности стали ЭП-823. Таким образом, не смотря на отсутствие следов интенсивного растворения поверхности стали, формирования плюмбоферритов или проникновения жидкого свинца в коррозионные слои после 2500 ч. испытаний, реализуемый режим коррозионного взаимодействия может быть опасен после более продолжительных выдержек.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН № FWRW-2021-0008 и при поддержке гранта РФФИ №19-48-700020 р_а и Администрации Томской области.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ РОССИЙСКИХ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ С ОЦК РЕШЕТКОЙ

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

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

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

В работе были выполнены длительные высокотемпературные испытания под нагрузкой российских перспективных реакторных сталей с ОЦК решеткой. Определены характеристики длительной прочности, пластичности и скорости ползучести при 650, 670 и 700 °С и напряжениях 60, 80, 100 и 140 МПа.

Анализ полученных данных позволяет расположить исследованные реакторные стали по увеличению значений длительной прочности (долговечности) в следующем порядке: Х5Ю5СМБ, Х14Ю4В2СТ, (ЭП-823 и ЭП-900), ЭК-181, Х14Ю4В2СТ-ДУО, (ЭП-450 и ЧС-139), ЭП-450-ДУО. Причиной более высокой термической устойчивости «безоксидных» сталей при испытании на ползучесть является большее содержание углерода, карбидообразующих и тугоплавких элементов.

Показано, что дисперсно-упрочненная оксидами нержавеющей сталь Х14Ю4В2СТ-ДУО по длительной прочности существенно превосходит матричную сталь Х14Ю4В2СТ. Структура стали Х14Ю4В2СТ-ДУО представляет равноосные малодислокационные зерна рекристаллизованного феррита, содержащего как не растворившиеся при механическом легировании крупные оксидные частицы размером 50...150 нм, так и упрочняющие наноксиды (Y,Zr,Ti)-О с преобладающим размером до 3-5 нм. Упрочнение наноксидами позволило увеличить длительную прочность стали Х14Ю4В2СТ-ДУО заметно больше, чем в реакторных сталях ЭП-823 и ЭП-900, обладающих существенно меньшей коррозионной стойкостью. Следует отметить, что сталь Х14Ю4В2СТ-ДУО пока не обладает оптимальной структурой и уступает по пластичности и сопротивлению ползучести не содержащей Al стали ЭП 450-ДУО. При 700 °С и напряжении 100 МПа образцы стали ЭП-450-ДУО выдерживают без разрушения более 28000 ч, что на 2 порядка больше, чем время до разрушения всех «безоксидных» сталей с ОЦК решеткой.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Структура» № АААА-А18-118020190116-6).

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Е.А. Кулешова^{1,2}, Д.А. Мальцев¹, А.С. Фролов¹, Д.В. Сафонов¹, Н.В. Степанов¹,
Б.З. Марголин³

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва (nikita_stepanov_1994@bk.ru)

²НИЯУ МИФИ, г. Москва

³НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей»

Аустенитные коррозионно-стойкие стали являются основным материалом, применяемым для изготовления элементов активной зоны реакторов типа ВВЭР. В процессе эксплуатации элементы активной зоны подвергаются значительному нейтронному облучению, в связи с чем, изучение взаимосвязей радиационно-индуцированного изменения структуры и механических свойств аустенитных сталей в процессе эксплуатации играют важную роль при обосновании проектного ресурса элементов активных зон и выборе материалов для них. Деградация структуры аустенитных сталей под действием нейтронного облучения в значительной степени зависит от концентрации никеля.

Никель, наряду с влиянием на распухание сталей также является основным элементом образующихся в аустенитных сталях радиационно-индуцированных фаз: G - и γ' -фазы. В этой связи изменение концентрации никеля в стали может приводить к значительным изменениям в плотности и объемной доле образующихся при облучении фаз и, как следствие, оказывает существенное влияние на механические свойства материала.

В работе высокоразрешающими методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии, а также атомно-зондовой томографии проведены комплексные микроструктурные исследования. Показано, что при прочих равных параметрах облучения увеличение концентрации никеля приводит к:

- снижению склонности к образованию радиационно-стимулированных карбидов титана под облучением и значительному увеличению плотности и объемной доли радиационно-индуцированной G-фазы;

- значительному увеличению уровня радиационно-индуцированных сегрегаций никеля с некоторым снижением хрома по границам зерен и радиационных дефектов с образованием цепочек выделений G-фазы по этим дефектам;

- зависимость распухания от содержания Ni в исследованных образцах носит сложный характер. Однако наблюдается тенденция к снижению уровня распухания при неоднородном ее распределении.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ, ОБЛУЧЕННОЙ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ КРИПТОНА

В.В. Углов¹, В.М. Холод¹, П.С. Гринчук², М.В. Кияшко², С.В. Злоцкий¹, И.А. Иванов^{3,4},
А.Л. Козловский⁴, М.В. Здоровец^{3,4}

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь (uglov@bsu.by,
valentinakholad@mail.ru)

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Беларусь

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

⁴Институт ядерной физики, Нур-Султан, Казахстан

Благодаря своей превосходной высокотемпературной прочности, высокой теплопроводности, химической инертности и малому поперечному сечению захвата нейтронов карбид кремния (SiC) подходит для использования в качестве конструктивных элементов в термоядерных реакторах или в качестве герметизирующего материала для ядерного топлива в легкой воде, реакторах деления и газоохлаждаемых реакторах деления, а также в захоронениях радиоактивных ядерных отходов.

Образцы SiC были получены в ИТМО НАН РБ путём связывания двух фракций порошков SiC M5 и M50 (размер зёрен 5 мкм и 50 мкм соответственно) с помощью термопластичного связующего на основе парафина Р-2 [1].

Облучение образцов проводилось низкоэнергетическими ионами криптона (280 кэВ) на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 (Институт ядерной физики, Нур-Султан, Казахстан). Облучения ионами криптона проводились при флюенсах $1 \cdot 10^{13}$, $1 \cdot 10^{14}$, $5 \cdot 10^{15}$ см⁻². Исследование структурно-фазового состояния исходных и облучённых образцов карбида кремния проводилось методами рентгеноструктурного анализа (РСА) и методом рамановской спектроскопии.

По данным РСА можно сделать вывод, что исходные образцы представляют собой композит: SiC-6H – гексагональная (P63mc) сингония, Si – кубическая (Fd-3m) сингония и SiC-15R – тригональная (R3m) сингония. Основной фазой является SiC-6H (около 80 %), содержание фазы SiC-15R – около 20 %, Si – менее 5 %.

На рамановском спектре наблюдаются четыре пика первого порядка колебаний связей Si-C ($700 \div 1000$ см⁻¹), соответствующих оптическим модам E₂ (TO), E₂ (TO), E₁ (TO) и A₁ (LO). При облучении дозами $1 \cdot 10^{13}$ и $1 \cdot 10^{14}$ см⁻² уменьшается интенсивность и происходит уширение пиков с увеличением дозы, обусловленное разупорядочением кристаллической структуры, формированием и накоплением радиационных дефектов в SiC. При дозе $5 \cdot 10^{15}$ см⁻² отсутствуют пики первого порядка колебаний, что связано с аморфизацией поверхностного слоя SiC, которая также подтверждается электрономикроскопическими исследованиями.

Литература

[1] P.S. Grinchuk, M.V. Kiyashko, H.M. Abuhimd et al., *Journal of the European Ceramic Society*, V. **38** (2018), p. 4815.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ ЭКВИАТОМНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ V-Nb-Ti-Ta, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

В.В. Углов¹, М.М. Белов¹, С.В. Злоцкий¹, Д. Ке², А.Е. Рыскулов³, Л.А. Козловский⁴,
М.В. Здоровец^{3,4}

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь (uglov@bsu.by,
mb17023@gmail.com)

²Пекинский технологический институт, Пекин, Китай

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

⁴Институт ядерной физики, Нур-Султан, Казахстан

Одно из обещающих областей исследования науки о новых материалах это изучения свойств и методов получения высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) [1]. Считается, что максимизация конфигурационной энтропии ВЭСов способствует формированию однофазного разупорядоченного твердого раствора вместо формирования сложных интерметаллидных или вторых фаз, в результате чего сплав имеет простую микроструктуру с улучшенными свойствами по сравнению с традиционными сплавами. Многочисленные исследования показали, что ВЭСы обладают высокими значениями предела упругости, износостойкости, а также повышенной термической и радиационной стойкостью [2].

Многокомпонентные твердые растворы на основе V-Ti-Nb-Ta были синтезированы с использованием металлов высокой чистоты (>99,9%) методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией. Далее проводился отжиг на протяжении 24 ч и 72 ч при температуре 1150°C с промежуточной холодной прокаткой до 85 % сокращения толщины.

Проведенный рентгеноструктурный анализ показал, что в независимости от числа элементов в сплаве, во всех исходных образцах формируется однофазный твердый раствор с ОЦК-решеткой. Параметр решетки для образцов V, VNb, VNbTa, VNbTaTi составил 0,3027 нм, 0,3177 нм, 0,3227 нм, 0,3234 нм соответственно. Значения дисторсии с ростом числа элементов уменьшается и составили 4,48%, 4,17%, 3,80%. Размер областей когерентного рассеяния и величина микродеформации, рассчитанные методом Холдера-Вагнера, составили 21–23 нм, 0,15–0,19%; 16–29 нм, 0,38–0,54%; 20–34 нм, 0,58–0,68%; 14–17 нм, 0,22–0,33%. Релаксация напряжений в сплаве VNbTiTa в основном связана с меньшим размером атомов и разностью температур плавления Ti по сравнению с Nb и Ta. Результаты сканирующей электронной микроскопии подтверждают формирование однородных эквивалентных многокомпонентных твердых растворов, размер зерен в сплаве VNbTiTa составил 100-200 нм.

При облучении ионами гелия с энергией 40 кэВ и флюенсом $2 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ однородность распределения элементов и фазовый состав многокомпонентного твердого раствора на основе V-Nb-Ti-Ta не изменились, что подтверждается результатами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноструктурным анализом. Значения макронапряжений для системы V-Nb-Ta-Ti составили 0,162 ГПа, 0,392 ГПа, 1,80 ГПа, 2,42 ГПа соответственно.

В работе обсуждаются механизмы радиационной стойкости системы V-Nb-Ti-Ta.

Литература

[1] E.P. George, D. Raabe, R.O. Ritchie, *Nat. Rev. Mater.* V. 4 (2019), p. 515

[2] W. Zhang, P.K. Liaw, Y. Zhang, *Sci. China Mater.* V. 61 (2018), p.2-22

ЭРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНКАХ $\text{nc-ZrN/a-Si}_3\text{N}_4$ И nc-ZrN/a-ZrCu ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

В.В. Углов¹, С.В. Злоцкий¹, Г. Абади², И.С. Веремей¹, А.Е. Рыскулов³, Л.А. Козловский⁴,
М.В. Здоровец^{3,4}

¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь (uglov@bsu.by)

²Университет Пуатье, Пуатье, Франция

³Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

⁴Институт ядерной физики, Нур-Султан, Казахстан

В настоящее время разработка новых радиационно-стойких материалов является важной проблемой, которая особенно актуальна для ядерной/термоядерной промышленности, аэрокосмической промышленности и т. д., где объекты подвергаются сильному облучению ионами, нейтронами, электронами. Для этого необходимо создавать материалы с большим количеством стоков для точечных дефектов, таких как дислокации, границы зерен и межфазные границы [1]. Многослойные системы перспективны для исследований, поскольку межслоевые границы могут влиять на устранение радиационных дефектов [2]. У них есть значительные межфазные области, которые могут действовать как стабильные поглотители дефектов.

Многослойные пленки $\text{nc-ZrN/a-Si}_3\text{N}_4$ и nc-ZrN/a-ZrCu были сформированы при 500°C методом реактивного магнетронного напыления в камере высокого вакуума (базовое давление $<10^{-5}$ Па), оснащенной тремя конфокальными мишенями и криогенным насосом (макс. 500 л/с). Ионная имплантация многослойных пленок проводилась ионами He^{2+} с энергией 40 кэВ на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 при флюенсах от $3,0 \times 10^{17}$ до $1,1 \times 10^{18}$ см^{-2} .

Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии многослойных пленок после осаждения показали, что пленки состоят из чередующихся слоев нанокристаллического ZrN и аморфного $\text{a-Si}_3\text{N}_4$ или a-ZrCu . Выявлены горизонтальные сплошные слои с плоскими и резкими границами раздела.

Микроскопические (СЭМ, АСМ) исследования многослойных пленок, облученных ионами He, показали, что радиационная эрозия поверхности в нанослоистых системах $\text{ZrN/a-Si}_3\text{N}_4$ значительно ниже по сравнению с монослоистым ZrN. Установлено, что степень радиационной эрозии многослойных пленок сильно зависит от соотношения толщин кристаллического и аморфного слоев (f_{ZrN}) и минимальна при f_{ZrN} равной 0,29. Наиболее устойчивы к радиационной эрозии многослойные системы с толщиной аморфного слоя, большей, чем у кристаллического слоя.

Было выявлено, что основным механизмом радиационной эрозии многослойных пленок nc-ZrN/a-ZrCu является флекинг. Комплексы гелий-вакансия и их кластеры диффундируют в аморфные слои и растворяются в них с образованием пузырьков гелия. Это приводит к разбуханию многослойной пленки без поверхностной эрозии. С увеличением концентрации меди и увеличением толщины аморфного слоя растет критическая доза флекинга. Фазовый состав показал, что при облучении происходит разрушение аморфного слоя с образованием металлической меди. Для образцов $\text{nc-ZrN/a-Zr}_{26.2}\text{Cu}_{73.8}$ кристаллизация меди происходит при дозе $9 \cdot 10^{17}$ см^{-2} . Остальные же остаются стабильными при всех флюенсах облучения.

Литература

[1] Xinghang Zhang, Khalid Hattar, Youxing Chen et al., Progress in Materials Science. V. 96 (2018), p. 217

[2] D. Chen, N. Li, D. Yuryev et al., Sci. Adv. V. 3 (2017), № 11, p. eaao2710



III. Ядерное топливо и проблемы замкнутого ядерно-топливного цикла

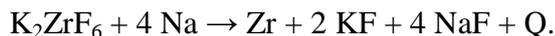
Универсальными процессами переработки ОЯТ различных типов являются гидрометаллургический и газофторидный, позволяющие получать рефабрицированное топливо с высоким коэффициентом очистки от продуктов деления. Для перспективных видов топлива (металлического, нитридного, карбидного) разработаны альтернативные пирохимические процессы переработки ОЯТ в солевых расплавах: электрохимические (электролиз, электрорафинирование), восстановительная экстракция, осаждение оксидов и другие.

Областью применения пирохимических методов является переработка ОЯТ с коротким временем выдержки, когда не требуются высокие коэффициенты очистки рефабрицированного топлива от ПД. Эти разработки еще не вышли из стадии опытных установок, однако, интерес к их промышленной реализации по-прежнему высок в связи с актуальностью создания широкомасштабной атомной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОВЕДЕНИЯ РЕАКЦИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НА КАЧЕСТВО МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА ЦИРКОНИЯ

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

Натриетермический порошок циркония получают восстановлением комплексной соли циркония – гексафтороцирконата калия (ГФЦК) металлическим натрием. Реакция описывается уравнением



Реакцию проводят при послойной загрузке ГФЦК и кусков металлического натрия. Поскольку выделяющегося тепла (1100 кДж на килограмм шихты [1]) недостаточно для обеспечения полного протекания реакции, шихту дополнительно подогревают. Реакцию проводят в контролируемой азотно-кислородной атмосфере. За ходом процесса восстановления следят по показаниям термопары, рабочий конец которой находится в реакционной массе (РМ). Когда изменение температуры РМ не превышает 10 °С за 1 мин, реакцию восстановления считают завершённой.

Известно [2, 3], что на свойства нарабатываемого порошка (массовая доля основного вещества, температура воспламенения, гранулометрический состав), кроме прочего, может оказать влияние присутствие в составе шихты сравнительно малых количеств инертной (флюсующей) добавки.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния:

– флюсующей добавки хлорида натрия (NaCl), взятой в массовом отношении к ГФЦК как 1 : 0,05;

– времени дополнительной высокотемпературной выдержки РМ по окончании реакции восстановления.

Введение флюсующей добавки NaCl:

– увеличило время протекания реакции восстановления, что может быть связано с частичным расходом тепловой энергии на плавление NaCl;

– привело к уменьшению массовой доли мелкой фракции и увеличению доли крупной фракции по сравнению с загрузками порошка циркония, полученными без добавления NaCl в ГФЦК. Повышение дисперсности готового порошка циркония может быть объяснено увеличением продолжительности нахождения РМ при повышенной температуре (из-за увеличения времени протекания реакции) и вызванной им агрегации частиц.

Увеличение времени протекания реакции восстановления привело к:

– уменьшению массовой доли общего циркония, что может быть объяснено более продолжительным контактом реакционной массы с азотно-кислородной смесью;

– снижению температуры воспламенения (не смотря на, уменьшение дисперсности и массовой доли циркония в порошке), что может быть связано с растворением оксидной пленки, образовавшейся на поверхности частиц порошка, в объеме металла.

Литература

[1] Зеликман А.Н. *Металлургия редких металлов*. Metallurgia, Москва, 1973, С. 608.

[2] Орлов М.В., Федорова Л.А. *Химическая технология*. – Т.5 (2004). - № 7. - С. 26-29.

[3] Искандарова Е.Ф., Капитонов В.И., Рудских В.В. *Четвертая молодежная научно-практическая конференция «Ядерно-промышленный комплекс Урала: проблемы и перспективы»*: Тезисы докладов, Озерск: ФГУП «ПО «Маяк». – 2007. – С. 29-30.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА НА СПЛАВЫ ХН45Ю И ХН70Ю

С.М. Шайдуллин, М.Б. Ремизов, П.В. Козлов, О.М. Панкратова
ФГУП «ПО «Маяк», г. Озерск, Россия (spl@po-mayak.ru)

Метод остекловывания обеспечивает перевод жидких ВАО в стеклообразное состояние для последующего безопасного длительного хранения. В настоящее время промышленные установки по остекловыванию ВАО работают в России, США, Франции, Великобритании, Германии и Японии. Функционируют они с применением двух технологий остекловывания – в электропечах прямого электрического нагрева и в индукционных печах. Наиболее распространенной, отработанной и производительной является первая технология.

Ориентировочно в 2027 г. на ФГУП «ПО «Маяк» должен быть запущен новый комплекс остекловывания, универсальный по составу отверждаемых ЖРО. Согласно разработанной концепции нового комплекса остекловывания в его составе предполагается использование двух эвакуируемых плавителей прямого электрического нагрева на алюмофосфатном стекле и эвакуируемого малогабаритного плавителя прямого электрического нагрева на боросиликатном [1].

Боросиликатное стекло характеризуется рядом преимуществ: с одной стороны – большей емкостью по отношению к продуктам деления, химической и радиационной стойкостью, с другой стороны – более высокой температурой варки. Оно обладает высокой коррозионной активностью. Срок службы печей, как правило, лимитируется не общим неудовлетворительным состоянием всей огнеупорной кладки, а разрушением (часто аварийным) ограниченного числа конструктивных элементов варочного бассейна и газового пространства в зонах варки и максимальных температур. Помимо огнеупоров кладки прямому контакту с расплавом подвергаются и другие конструкционные материалы: металл электродов, материалы вспомогательных систем (карманов для термпар, перемешивающих устройств и т.п.).

В данной работе приведены результаты убыли массы и материаловедческие исследования металлических образцов из сортового проката после динамических испытаний при проведении окислительно-восстановительной плавки боросиликатного стекла. Продолжительность испытаний составляла 100 часов при температуре 960 °С, скорость вращения прутков составляла 60 об/мин., вязкость стекломассы – 15 дПа.

В ходе проведения материаловедческих исследований были проанализированы образцы из стали и сплавов следующих марок: 12Х18Н10Т – как образец сравнения, ХН45Ю, ХН70Ю. Исследования представленных выше образцов проводили с применением оптического микроскопа OLYMPUS SZX-16 и сканирующего электронного микроскопа Phenom XL с опционально интегрированной системой энергодисперсионной спектроскопии.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что в нижней части образцов, находящихся при испытании в расплаве стекломассы, наибольшие коррозионные разрушения выявлены на образцах из стали 12Х18Н10Т и сплава ХН45Ю. Наиболее коррозионностойким материалом при данных условиях испытаний является образец из сплава ХН70Ю.

Литература

[1] Shaydullin S.M., Belanova E.A., Kozlov P.V., Remizov M.B., Dvoryanchikova E.M. Investigation of Borosilicate Glasses with Simulated Hlw Components and Determination of Their Chemical Durability. *Chimica Techno Acta*. т.8 (2021), №1, с.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА АКТИВНОЙ ЧАСТИ ИСТОЧНИКА НА ОСНОВЕ ЦЕРИЯ-144

В.А. Казаков, Н.П. Старовойтов, В.А. Дудкин
ФГУП «ПО «Маяк», г. Озерск, РФ, *cp1@po-mayak.ru*

На ФГУП «ПО «Маяк» выполнен комплекс расчетно-экспериментальных и научно-исследовательских работ по возможности использования оксида церия-144 для создания источника бета-частиц большой мощности. Одним из основных критериев обеспечения безопасности конструкции такого источника является установление максимального допустимого значения температуры конструктивных элементов и радиоактивного материала.

Цель работы:

Исследование теплофизических характеристик диоксида церия при высоких температурах для установления безопасных технологических параметров конструкции источника.

Основные задачи:

Получение расчетных и экспериментальных значений теплопроводности диоксида церия. Теплопроводность численно равна произведению коэффициента температуропроводности вещества на его удельную теплоёмкость (при постоянном давлении) и плотность. Таким образом, для определения теплопроводности диоксида церия необходимо было уточнить изменение удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности диоксида церия при высоких температурах.

Экспериментальная часть:

Для определения изменения теплоемкости порошка диоксида церия, полученного на ФГУП «ПО «Маяк», в диапазоне температур от 50 °С до 550 °С использовали метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). ДСК измеряет тепловой поток, связанный с изменениями в структуре материалов как функции от времени и температуры при контролируемой атмосфере, сопровождающимися поглощением или выделением тепла. Метод определения теплоемкости заключался в сравнении тепловых потоков анализируемого и стандартного образца (в наших экспериментах использовался сапфир). Используемое оборудование: термоанализатор STA 449 F3 Jupiter.

Удельная теплоемкость диоксида церия при нормальных условиях составляет 0,358 Дж/г·К. Однако, в исследуемом диапазоне температур значение удельной теплоемкости изменялось от 0,35 до 0,47 Дж/г·К. Результаты расчетов теплопроводности диоксида церия при высоких температурах и различной плотности в спрессованном состоянии представлены в таблице.

Плотность, г/см ³	Удельная теплоемкость, Дж/г·К	Температуро- проводность, см ² /с · 10 ⁻³	Расчетное значение теплопроводности, Вт/м·К
3,6	0,47	2,5	0,428
4,0	0,48	3,5	0,672
5,0	0,49	5,8	1,421

Полученные экспериментальные значения хорошо согласуются с опубликованными данными зарубежных специалистов.

Выводы:

Предлагается использовать полученные значения удельной теплоемкости, температуропроводности и теплопроводности диоксида церия для расчета безопасных технологических параметров конструкции источника на основе церия-144.

ОБРАЩЕНИЕ С ПОТЕНЦИАЛЬНО ПИРОФОРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В ПРОЦЕССЕ ФРАГМЕНТАЦИИ И РАСТВОРЕНИЯ УРАН-ЦИРКОНИЕВОГО ОЯТ

Н.П. Старовойтов, В.А. Дудкин, В.А. Казаков, Р.Э. Абдулвагидов
ФГУП «ПО «Маяк», г. Озерск Челябинской области, *cpl@po-mayak.ru*

Радиохимические производства являются потенциально опасными в связи с возможностью возникновения пожаров или взрывов. В связи с этим проблемы безопасности в деятельности таких производств являются ключевыми.

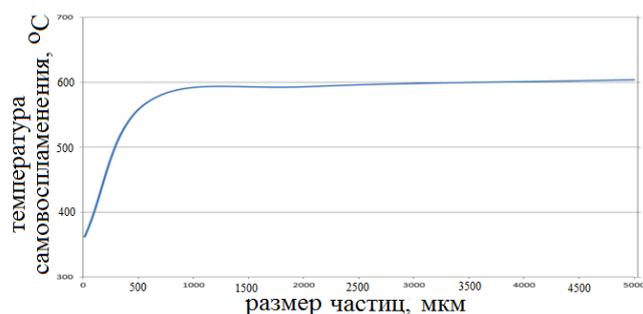
В настоящее время на заводе РТ-1 при использовании химического растворения уран-циркониевого ОЯТ потребуется его фрагментация. Фрагментацию ОТВС, содержащих пиррофорные материалы с топливной композицией из уран-циркониевого сплава, выполняют в атмосфере азота с объемной концентрацией кислорода не более 2,5 % по имеющимся заключениям на безопасность. Защитную атмосферу устанавливают для исключения возникновения и распространения пламени по частицам уран-циркониевого топлива в рабочем объеме агрегата резки и аппарата-растворителя до окончания загрузки топлива. Поддержание заданной объемной концентрации кислорода в инертной атмосфере всегда затратное мероприятие.

Цель работы – оценить безопасность регламентных условий проведения технологического процесса, оптимизировать условия проведения технологических операций и обеспечить взрывопожаробезопасность в процессе фрагментации и растворения уран-циркониевого ОЯТ, как потенциально пиррофорных материалов.

Объектом исследования в данной работе было изучение зависимости температуры самовоспламенения уран-циркониевого сплава от размеров частиц в атмосфере азота с объемной концентрацией кислорода не более 4 %, определение общей скорости газовыделения, а также скорости выделения водорода при растворении в присутствии комплексообразователя – фторид-иона.

Экспериментальная часть: Эксперимент проводили на синхронном термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter, а геометрический размер образцов определяли с использованием микроскопа Olympus SZX16. Дополнительно определили общую скорость газовыделения, а также скорость выделения взрывоопасного газа – водорода, в наиболее неблагоприятных условиях, а именно, растворением уран-циркониевого сплава в присутствии комплексообразователя – фторид-иона.

Получена экспериментальная зависимость температуры самовоспламенения от размеров частиц образцов в атмосфере азота с объемной концентрацией кислорода не более 4 %.



Полученные экспериментальные результаты, свидетельствуют, что применяемые в настоящее время методы оценки показателей пожароопасности на ФГУП «ПО «Маяк» позволяют оценивать безопасность регламентных условий проведения технологического процесса, оптимизировать условия проведения технологических операций, минимизировать возможность возникновения взрыво- или пожароопасных ситуаций.

ПОВЕДЕНИЕ МОЛИБДЕНОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ ТИПА ЭП ПРИ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ВОЗДУШНОЙ АТМОСФЕРЕ

Е.Н. Дубровин, М.Б. Ремизов, П.В. Козлов, В.А. Дудкин, С.В. Корнев
ФГУП «ПО «Маяк», г. Озерск, Россия (cpl@po-mayak.ru)

На ФГУП «ПО «Маяк» производится переработка жидких высокоактивных отходов в промышленных электропечах прямого электрического нагрева с 1987 года. Процесс остекловывания позволяет перевести жидкие ВАО в твердое состояние – алюмофосфатное стекло – для длительного безопасного хранения и последующего окончательного захоронения. За указанное время в эксплуатации находились пять аппаратов, все они в настоящий момент выведены в режим остановленной нагрузки.

При разработке аппаратов остекловывания применялись частные конструктивные решения при неизменной концепции. Одним из таких частных решений стал отказ от переточной зоны и водоохлаждаемого порога на одной из электропечей с целью максимально полного опорожнения электропечи при окончании эксплуатации. Следствием явился риск истечения большой массы готового и/или непроваренного стекла со всего объема электропечи в случае неполадок в работе сливного устройства. Кроме того, при значительном понижении уровня расплава неизбежно происходит обнажение части поверхности молибденовых электродов, применяемых для нагревания расплава.

Электрод представляет собой цилиндр, выполненный из молибдена и соединенный с токоподводом. Несколько таких электродов образуют электродную гребенку, которые в свою очередь образуют пары электродных гребенок, между которыми через расплав стекла протекает электрический ток. В случае обнажения электродов молибден начинает взаимодействовать с кислородом, что со временем приводит к уменьшению эффективной площади электрода и, как следствие, перераспределению электрического поля.

Целью проведенных работ было исследование изменения массы молибденовых таблеток за счет процесса окисления кислородом воздуха в зависимости от температуры для определения скорости ее уменьшения за единицу времени относительно площади поверхности образцов. В настоящей работе молибденовые таблетки использовались в качестве имитаторов электродов.

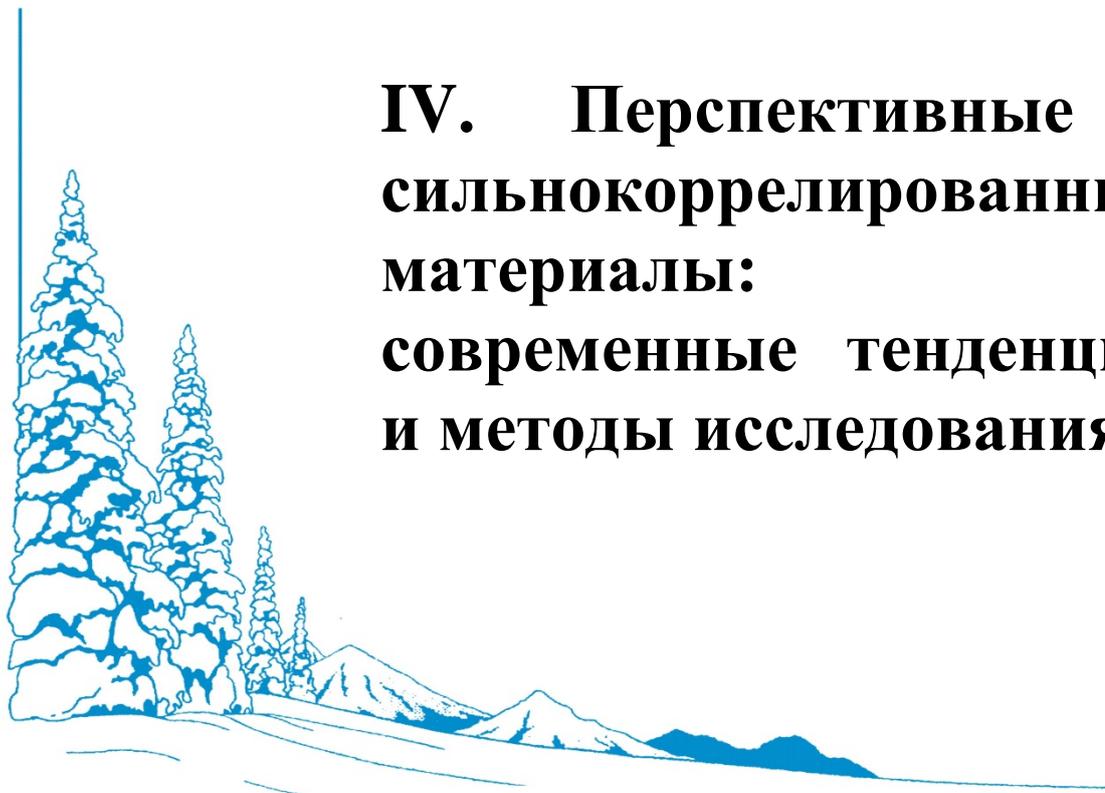
Предварительно был проведен термический анализ образцов молибдена

на термоанализаторе STA 449 F3 Jupiter для определения температуры пиковой скорости его окисления, которая составила 770 °С.

Молибденовые таблетки помещались в тигли с последующей установкой в лабораторную электропечь. Диапазон температуры составлял от 550 °С до 1000 °С. Время испытаний – 6 ч. Для образца, испытывавшегося при 1000 °С, время составило 5 ч. Кроме того, таблетка была наполовину закрыта стеклом.

В ходе проведения исследований была определена скорость убыли массы образцов. Проведенные на основе полученных данных расчеты показали, что срок службы новых молибденовых электродов в промышленной электропечи в случае потери уровня расплава составит не более 130 ч.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что ускоренное окисление молибдена начинается при температуре выше 700°С. Максимальная интенсивность окисления приходится на температуру 760°С. В промышленной электропечи окисление молибдена из-за потери уровня расплава начинается при более высокой температуре и будет происходить быстрее, чем в лабораторных опытах, вследствие саморазогрева молибдена и наличия коррозионноактивной атмосферы. На практике это неизбежно должно привести к быстрой потере практически всей части электродов, выступающих над расплавом.



IV. Перспективные сильнокоррелированные материалы: современные тенденции и методы исследования

Развитие современных технологий, в том числе ядерных технологий нового поколения, предъявляет все более жесткие требования к конструкционным и функциональным материалам, на основе которых будет создаваться элементная база прогрессивных вычислительных, информационных и контрольно-диагностических систем. Перспективными с этой точки зрения являются материалы на основе d- и f- элементов, обладающие уникальными физическими свойствами и известные в физике как системы с сильными электронными корреляциями. Выдающуюся роль в изучении физических свойств этих материалов играют спектроскопические исследования методами рассеяния нейтронов и рентгеновских лучей. Именно поэтому в Программу секции включены доклады, посвященные исследованию перспективных материалов - сверхпроводников нового поколения, фрустрированных магнетиков, валентно-нестабильных систем, ферроэлектриков, квантовых магнетиков и гибридных наноструктур - методами неупругого рассеяния нейтронов, рентгеновской спектроскопии и измерения макроскопических параметров образцов.

ATOMIC AND SPIN DYNAMICS IN CONDENSED MATTER BY NEUTRON SCATTERING WITH CRYSTAL SPECTROMETERS

Alexandre IVANOV

Institut Laue-Langevin, 71 avenue des Martyrs, 38042 Grenoble, France (aivanov@ill.fr)

The crystal neutron spectrometers have strongly profited from now routinely used two-dimensionally focusing monochromators and analysers with variable and remotely controlled curvatures. The brightness of a measured (Q, \square) pixel may be increased with these high-precision mechanical devices by a factor of more than 100. Several multi-analyser (multi-pixel) schemes have been proposed and designed with a varied progress. Promising results have been achieved in studies of polycrystalline materials using large focusing crystal surfaces that permit registration of scattered neutrons in considerable solid angle. Several examples of recently collected data will be presented. Further efforts on the optimisation and multiplexing of neutron crystal spectrometers will be outlined.

ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНОКОРРЕЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ДИФFUЗНОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ С XYZ-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ АНАЛИЗОМ

К.С. Немковский

Лаборатория Резерфорда-Эплтона, Источник Нейтронов и Мюонов ISIS, Дидкот, Великобритания (kirill.nemkovskiy@stfc.ac.uk)

Диффузное рассеяние нейтронов с хуз-анализом поляризации является мощным инструментом для исследования межатомных корреляций в конденсированных средах. В настоящем докладе обсуждаются основы формализма и практическая реализация метода на спектрометре DNS [1,2] в Центре Хайнца Майер-Лейбнитца (исследовательский реактор FRM II, Гархинг, Германия). Использование большого позиционно-чувствительного детектора в сочетании с высокой светосилой обеспечивает DNS эффективный сбор информации со значительной области обратного пространства, в то время как поляризационный анализ позволяет разделять магнитный, ядерный когерентный и спиново-некогерентный вклады в измеряемый сигнал.

Представлены примеры применения метода к изучению различных групп соединений с сильными электронными корреляциями, таких как фрустрированные магнетики, сверхпроводники на основе железа и мультиферроики. В зависимости от особенностей исследуемого соединения диффузное рассеяние нейтронов с поляризационным анализом несет информацию не только о характере, но в ряде случаев и о величине взаимодействия, и особенно эффективно для систем с ближними магнитными корреляциями и выраженной анизотропией.

Литература

[1] Schweika W., Böni P., *Physica B* v.297 (2001) p. 155.

[2] Su Y., Nemkovskiy K., Demirdis S., *J. Large-Scale Res. Facil.* A27 (2015).

ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ СВЯЗИ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ МАХ-ФАЗЫ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

И.К. Аверкиев, Э.Ф. Хаметова, О.Р. Бакиева, А.А. Колотов
Удмуртский федеральный исследовательский центр Уро РАН, Ижевск, Россия
(*elinaphanilevna851@gmail.com*)

В последнее время благодаря уникальному сочетанию таких свойств, как высокая радиационная стойкость, коррозионная стойкость и стабильность в широких областях температур [1], хорошо себя зарекомендовали новые материалы, состоящие из МАХ-фаз. МАХ-фазы представляют собой соединения с формулой $M_{(n+1)}AX_n$ ($n=1,2,3$), где M – 3d переходный металл (Ti, V, Cr, и др.), A – элемент подгруппы IIIA или IVA (Al, Si и др.), X – С и/или N [2, 3]. Подобного рода материалы необходимы в атомной энергетике. Они могут использоваться в активной зоне ядерного реактора, который представляет собой агрессивную среду для конструкционных материалов из-за высоких плотностей излучения, химически агрессивного теплоносителя и высокой температуры.

Одним из перспективных соединений является Ti_2AlC , поскольку обладает рядом высоких механических, электрических и термических свойств, это делает его одним из кандидатов для использования на атомных электростанциях. Ранее были проведены исследования радиационной стойкости фазы Ti_2AlC после облучения тяжелыми ионами, легкими ионами, нейтронами и электронами, недавние [2] исследования показали высокую радиационную стойкость МАХ-фаз. Однако вопрос их химической стойкости, а также изменения электронной структуры в результате облучения остается в значительной степени неизученным.

В связи с этим, целью данной работы являлось исследование химической связи и электронной структуры порошка Ti_2AlC , полученного методом механоактивации с последующей обработкой ионами аргона.

Объектом исследования являлись порошки состава Ti_2AlC , с размерами частиц от 1 до 10 мкм до и после термической обработки в атмосфере аргона при 1000 °С в течении 1 часа. Порошки были изготовлены методом механоактивации в шаровой мельнице с использованием прекурсоров в виде порошков титана, алюминия и углерода.

Облучение проводили в ионно–лучевой установке на базе сверхвысоковакуумного поста УСУ–4 с источником ионов «Пион–1М» в импульсно–периодическом режиме с длительностью импульсов 1 мс и частотой следования 100 Гц, плотностью тока в импульсе 100 мкА/см², флюенс $5 \cdot 10^{17}$ ион/см², энергия ионов аргона составляла 30 кэВ.

Исследование изменений химической связи и элементного состава проведено методами рентгено-фотоэлектронной спектроскопии и энергодисперсионной спектроскопии. Исследования изменений электронной структуры МАХ- фазы Ti_2AlC в результате термического и радиационного воздействия были проведены методом анализа спектров энергетических потерь электронов в режиме отражения от поверхности образца.

Показано, что существенное влияние на электронную структуру и химическое состояние порошков Ti_2AlC оказывает как радиационное, так и термическое воздействие.

Литература

[1] J. Steven Zinkle, G.S. Was, Materials challenges in nuclear energy // *Acta Mater.*, 2013, V.61, p. 735–758.

[2] Z. Zhang, X. Duan, D. Jia et. al. On the formation mechanisms and properties of MAX phases: A review // *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, V. **41**, ;№ 7, p 3851-3878.

[3] M. Naguib, M. Kurtoglu, V. et. al. Two Exfoliation of Ti_3AlC_2 // *Adv. Mater.*, 2011, V. **23**, p. 4248–4253.

-Dimen

КООПЕРАТИВНЫЕ И ЛОКАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СПИНОВОЙ ЩЕЛИ В ИЗОЛЯТОРАХ КОНДО YbV_{12} И $CeFe_2Al_{10}$

П.А. Алексеев^{1,2}, В.Н. Лазуков¹, П.С. Савченков¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 123182,
Российская Федерация (pavel_alekseev-r@mail.ru)

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409, Москва,
Российская Федерация

Изучено и проанализировано формирование спектров возбуждения основного состояния для Кондо изоляторов, таких как YbV_{12} , $CeFe_2Al_{10}$, с упором на соотношение между кооперативными и локальными эффектами, ответственными за его характер. Обсуждаются экспериментальные результаты внедрения различных типов дефектов в подрешетку редкоземельных (РЗ) и d-металлов. Показано, как переход от Кондо-изолятора к режиму тяжелых фермионов влияет на спектры f-электронов для $CeFe_2Al_{10}$.

Предполагается, что щель в спектре электронных возбуждений кондо-изолятора образуется за счет установления когерентности (при низких температурах $T < T^*$) в процессах Кондо-рассеяния свободных электронов зоны проводимости на массиве локализованных редкоземельных магнитных моментов. Эта когерентность, по-видимому, разрушается введением в Кондо-решетку дефектов в виде магнитных моментов даже в относительно небольшом количестве, порядка 10%.

Влияние немагнитных и магнитных примесей на спектральную функцию f-электронов, характеризующуюся наличием резонансной моды при низкой температуре для систем на основе YbV_{12} , качественно воспроизводится в рамках спин-экситонной модели [1] путем изменения параметра обмена в РЗ-подрешетке при сохранении параметра гибридизации неизменным.

Уменьшение силы гибридизации, экспериментально контролируемой шириной квазиупругой линии в спектрах магнитного рассеяния нейтронов, было проанализировано на примере Кондо-изолятора $CeFe_2Al_{10}$ [2]. Для такой системы это было реализовано на основе двух физических механизмов. Одним из них является изменение структуры полосы (вызванное замещением в окружении редкоземельных Кондо-ионов). Кроме того, гибридизация модифицируется изменением межатомных расстояний. Уменьшение гибридизации приводит к непрерывному переходу от Кондо-изолятора (спиновая щель, резонансная мода) к режиму тяжелых фермионов (квазиупругое возбуждение), сопровождающемуся спектральными изменениями - подавлением щели и соответствующим уменьшением энергии резонансной моды.

Проведенный анализ позволяет связать условия формирования основного состояния Кондо-изолятора с такими существенными факторами, как взаимодействия внутри РЗ-подрешетки, а также взаимодействие РЗ-ионов с ближайшими соседями.

Литература

- [1] Alireza Akbari, Peter Thalmeier, Peter Fulde. // *Phys Rev Lett* 2009. V. 102. №10. p.106402. [Doi:org/10.1103/PhysRevLett.102.106402](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.106402).
- [2] Alekseev P. A., Mignot J.-M., Adroja D. T., Lazukov V. N., Tanida H., Muro Y., Sera M., Takabatake T., Steffens P., Rols S. // *Phys. Rev. B* 2020. V. 102. p. 024438. [Doi:org/10.1103/PhysRevB.102.024438](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.024438)

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, СОДЕРЖАЩИХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ИОНЫ

С.А. Скоробогатов^{1,2}, К.А. Шайхутдинов¹, Д.А. Балаев¹

¹Институт физики им. Л. В. Куренского СО РАН, Красноярск 660036, Россия

²Сибирский Федеральный Университет, Красноярск 660041, Россия

Исследование редкоземельных соединений представляет большой интерес из-за уникальных свойств, которые возникают в этих соединениях. Одним из таких соединений являются ортоферриты, структурно искаженные перовскиты с общей химической формулой $R\text{FeO}_3$, где R – редкоземельный ион. В этих соединениях наблюдаются такие необычные состояния как: спонтанный спин-переориентационный переход [1], сверхбыстрое вращение намагниченности, индуцированное лазерным импульсом [2], анизотропная эволюция магнитной энтропии [3] возникновение солитонных решеток [4] и многое другое. В данных соединениях две магнитные подрешетки представлены ионами Fe^{3+} и R^{3+} . Упорядочение Fe^{3+} решетки происходит при температурах $T_N \approx 600\text{-}700$ К, а редкоземельная подсистема при $T \sim 10$ К. Общепринято, что уникальные магнитные свойства ортоферритов возникают вследствие $3d\text{-}4f$ взаимодействия, однако построение универсальной микроскопической модели наталкивается на ряд трудностей.

В нашей работе мы пробуем описать данные системы независимо в виду большой разницы по энергиям возбуждения. Исследуемые монокристаллические образцы были получены методом оптической зонной плавки и исследованы с помощью неупругого рассеяния нейтронов. Исследование спиновой динамики на двух различных энергетических масштабах: Fe^{3+} (~ 60 мэВ) и редкоземельной подсистемы Tm^{3+} (~ 4.5 мэВ) [5, 6] и Tb^{3+} (~ 15 мэВ) были проведены в Oak Ridge National Laboratory.

Исследование железной подсистемы в соединениях TbFeO_3 и TmFeO_3 показало выраженную анизотропию «в» и «вне» плоскости. Исследование редкоземельной подсистемы выявило CEF переходы, находящиеся в области низких энергий для Tm^{3+} (2 и 5 meV) [7] и Tb^{3+} (17, 27 и 35 meV), описание данных дисперсий было проведено с использованием модели точечного заряда, показывающей что данные уровни принадлежат R -ионам, а их поведение зависит расщепления их основного состояния.

Работа ведется при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), номер гранта РФФИ №20-32-90142

Литература

- [1] R.L. White, *J. Appl. Phys.* **40**, 1061 (1969).
- [2] A.V. Kimel et al., *Nature (London)* **435**, 655 (2005).
- [3] Y.J. Ke et al., *Sci. Rep.* **6**, 19775 (2016).

- [4] S. Artyukhin et al. *Nat. Mater.* **11.8**, 694-699 (2012).
[5] S.M. Shapiro et al., *Phys. Rev. B* **10**, 2014 (1974).
[6] S.E. Nikitin et al., *Phys.Rev. B* **98**, 064424 (2018).
[7] S.A. Skorobogatov et al., *Phys. Rev. B* **101**, 014432 (2020).

НЕЙТРОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ АКТИНИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Мирмельштейн

ФГУП “РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина” Снежинск, Россия
(mirmelstein@mail.ru)

В докладе дается обзор экспериментальных результатов исследования урана, плутония и некоторых соединений на их основе методом неупругого рассеяния нейтронов (по материалам, опубликованным в открытой печати). Actinидные материалы, широко применяемые в гражданской и оборонной сферах, обладают уникальными физическими свойствами, обусловленными их $5f$ оболочками. Металлический уран стал первым представителем класса актинидов, чьи свойства – с точки зрения физики твердого тела – стали объектом продолжавшегося многие десятилетия изучения, показавшими, что анизотропия теплового расширения и, как следствие, нестабильность размеров при облучении нейтронами является внутренним свойством этого металла [1]. Это привело к отказу от его использования в качестве ядерного топлива и замене на оксиды. Вероятно, это одно из самых быстрых технологических изменений, совершенных в результате фундаментальных исследований. Неупругое рассеяние нейтронов сыграло решающую роль в расшифровке природы аномалии упругих модулей α -U вблизи 40 К, показав, что аномалия связана с образованием волны зарядовой плотности [2], и что смягчение фононного спектра α -U при повышении температуры объясняется не обычным ангармонизмом, а вызвано изменениями электронной структуры [3].

Наиболее распространенное ядерное топливо UO_2 является моттовским диэлектриком, т.е. системой с сильными электронными корреляциями. При низких температурах UO_2 переходит в антиферромагнитное состояние, и при $T < T_N = 30.8$ К демонстрирует совершенно уникальную динамику, обусловленную взаимодействием вибрационных, магнитных и квадрупольных возбуждений [4].

Без экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов невозможно было решение многолетней проблемы магнитного состояния металлического плутония [5]. Эти эксперименты не только подтвердили флуктуирующий характер $5f$ электронов Pu, но и позволили понять природу аномалий упругих свойств дельта-фазы Pu [6].

Нитрид урана UN, рассматриваемый в качестве перспективного ядерного топлива, тоже проявляет нетривиальную физику. Преобладает точка зрения, согласно которой $5f$ электроны в UN имеют коллективизированный характер. Однако, недавние ЯМР эксперименты указывают на более сложную их природу [7].

Литература

- [1] L.T. Lloyd and C.S. Barrett, *J. Nucl. Mater.* **18**, 55 (1966).
[2] W.P. Crummett et al., *Phys. Rev. B* **19**, 6028 (1979) 6028.
[3] M.E. Manley et al., *Phys. Rev. Lett.* **86**, 3076(2001) 3076.

[4] G. Dolling, R.A. Cowley, and Woods, *Can. J. Phys.* **43**, 1397 (1965); J.W.L. Pang et al., *Phys. Rev. Lett.* **110**, 157401 (2013); R. Caciuffo et al., *Phys. Rev B* **84** 194409 (2011).

[5] M. Janoschek et al., *Sci. Adv.* **1:e1500188** (2015).

[6] А. Мирмельштейн, В. Матвиенко, в: *Тезисы, XVIII конференция «Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления»*, г. Троицк (Москва), 2020, с. 83.

[7] V.V. Ogloblichev, S.V. Verkhovskii, A.V. Mirmelstein et al., *Phys. Rev. B* **104**, 155148 (2021).

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНО-ВАЛЕНТНОЙ ПРИМЕСИ НА НАВЕДЕННОЕ МАГНИТНОЕ УПОРЯДОЧЕНИЕ В СИСТЕМЕ С СИНГЛЕТНЫМ ОСНОВНЫМ СОСТОЯНИЕМ PrNi

П.С. Савченков, П.А. Алексеев, В.Н. Лазуков

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

В работе рассмотрены особенности явления «наведенного» магнитного упорядочения в интерметаллическом редкоземельном соединении PrNi. Отдельное внимание уделено влиянию дефектов различной природы в редкоземельной подрешетке (немагнитная примесь La - Pr_{1-x}La_xNi[1] и промежуточно-валентная (ПВ) Ce - Pr_{1-x}Ce_xNi[2]) на условия возникновения дальнего магнитного порядка (ДМП) в системах на основе PrNi. Предложен и реализован микроскопический подход к структурному моделированию влияния дефектов на ДМП.

Результаты экспериментов по замещению на немагнитную примесь La демонстрируют наличие критического параметра, определяющего температуру перехода. Установлено, что критический параметр формируется в результате конкурирующих взаимодействий: эффектов кристаллического поля и обменного взаимодействия. Переход в ферромагнитную фазу при замещении Pr на La наблюдается вплоть до концентрации La x=0.5 (сплошная линия на Рис.1).

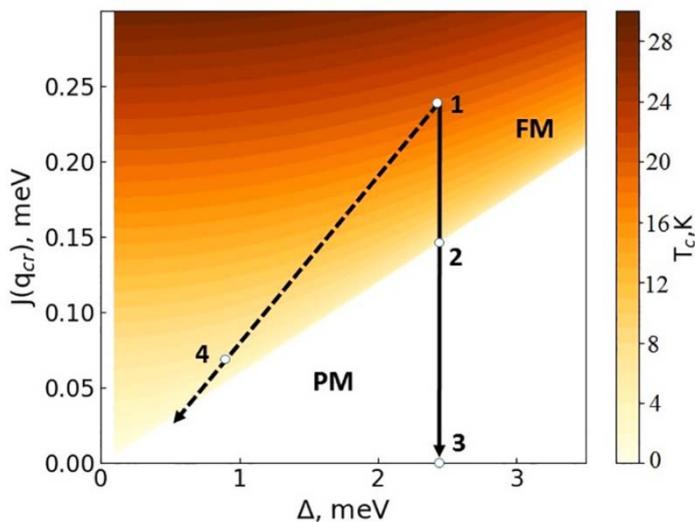


Рис.1. Диаграмма магнитных состояний систем на основе PrNi. Представлена взаимосвязь между температурой магнитного упорядочения (T_c), параметра обменного взаимодействия $J(q)$ и величиной расщепления в кристаллическом поле (Δ). Сплошной линией отмечено изменение T_c с увеличением концентрации La в Pr_{1-x}La_xNi, 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.

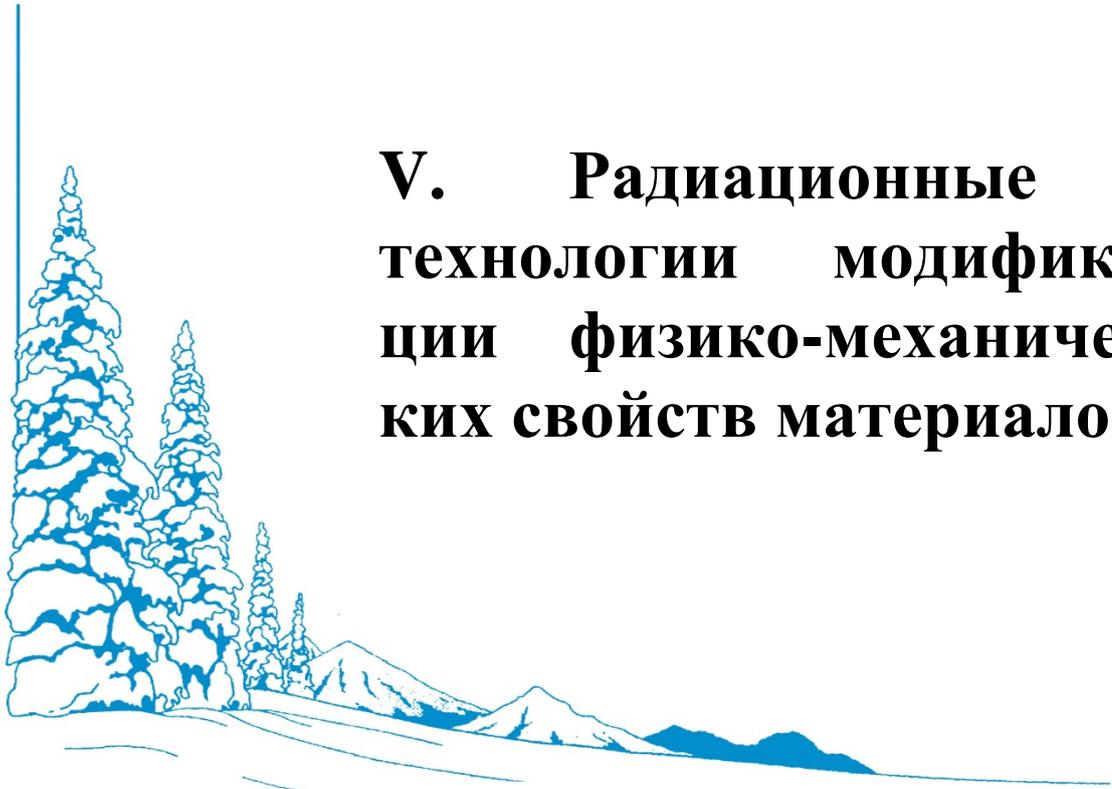
Замещение Pr на ПВ ион Ce приводит к увеличению области существования ДМП на

фазовой диаграмме (пунктирная линия на Рис.1), по сравнению с замещением немагнитной примесью. Переход в упорядоченное состояние в $\text{Pr}_{1-x}\text{Ce}_x\text{Ni}$ наблюдается вплоть до $x=0.9$. Экспериментально установлено, что магнитный момент на ионе Ce, находящегося в ПВ состоянии, себя никак не проявляет, очевидно, ввиду его подавления за счет быстрых спиновых флуктуаций. Основное влияние на температуру магнитного упорядочения от замещения Pr промежуточно-валентным ионом Ce обусловлено обнаруженным существенным подавлением расщепления в кристаллическом поле для Pr^{3+} .

Литература

[1] Savchenkov, P. S., Clementyev, E. S., Alekseev, P. A., & Lazukov, V. N. (2019). Induced magnetism and “magnetic hole” in singlet ground state system PrNi. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **489**, 165413.

[2] Savchenkov, P. S., Clementyev, E. S., Lazukov, V. N., & Alekseev, P. A. (2020). Dramatic impact of intermediate-valence impurity on induced magnetism in singlet ground state system PrNi. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **514**, 167187.



V. Радиационные технологии модификации физико-механических свойств материалов

Секция введена в Программу Семинара с целью обмена информацией о новейших достижениях в области радиационного материаловедения, связанных с разработкой физических основ и применением электронно- и ионно-лучевых, а также ионно-плазменных методов модификации структуры и свойств материалов на макро-, микро-, мезо- и наномасштабном уровне. В Программу секции включены доклады, посвященные рассмотрению фундаментальных аспектов воздействия пучков ускоренных ионов на вещество, определяющихся их корпускулярной природой и являющихся общими как для непрерывных, так и для импульсных ионных пучков.

Мощные импульсные пучки электронов, ионов, потоки плазмы и лазерного излучения ($P > 10^7$ Вт/см²) вызывают мгновенное расплавление и даже испарение поверхностного слоя вещества. Модификация свойств при этом происходит в результате формирования и распространения мощных термоупругих волн. Совмещение ионной имплантации с другими методами, например, ионно-лучевым перемешиванием пленок, нанесенных заранее на поверхность мишени (Ion Mixing) или ионно-ассистированным осаждением элементов из пара или плазмы (Ion Beam Assisted Deposition) с целью увеличения глубины воздействия, составляющей в обычных условиях лишь доли микрона, приводит к существенному усложнению и удорожанию процесса. В связи с этим особую актуальность приобретают интенсивно исследуемые в последнее время эффекты дальнего действия при ионной бомбардировке, позволяющие существенно увеличить глубину модифицируемой зоны, что особенно важно для разработки методов модификации поверхностных свойств конструкционных материалов.

Наиболее перспективным в настоящее время является изучение наномасштабных динамических эффектов при корпускулярном облучении. Наномасштабные области плотных каскадов атомных смещений, разогреваемых за времена порядка 10^{-12} с до температур 3000-5000 К и выше являются зонами взрывного энерговыделения и источником послекаскадных уединенных ударных волн, способных перестраивать метастабильные среды. Скорость выделения энергии сопоставима с таковой при ядерном взрыве. Радиационно-динамические эффекты не принимавшиеся во внимание классической радиационной физикой конденсированных сред играют важную роль также при нейтронном облучении и самооблучении расщепляющихся материалов. Их необходимо учитывать в связи с проблемой ядерной безопасности при создании новых материалов для работы во внутрикорпусных устройствах ядерных энергетических установок, а также материалов для работы в открытом космосе.

АНАЛИЗ УГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК НА СТЕКЛЕ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Т.С. Картапова, Ф.З. Гильмутдинов, М.А. Еремина, П.В. Быков
*Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск, Россия (e-mail:
tskartapova@udman.ru)*

В данной работе тонкие углеродные пленки напылялись на поверхность стекла методом магнетронного распыления углеродной мишени в среде рабочего газа Ar с последующей бомбардировкой ионами азота и аргона. В процессе варьировалась доза облучения. Толщина пленок была перепроверена методом АСМ путем измерения царапин пленки. На уровне ошибки измерения на исходной пленке значения толщины коррелируют с расчетными данными при напылении.

На электронном микроскопе Quattro S проведен анализ химического состава углеродной мишени. Показано, что неконтролируемые примеси в мишени отсутствуют, в различных точках анализа обнаруживаются примеси кислорода менее 1 %, что связано с пребыванием пористой мишени на воздухе.

Результаты измерений электропроводности показали, что облучение ионами азота приводит к увеличению исходного электросопротивления в 10-15 раз, после облучения ионами аргона в той же дозе - более чем в 30 раз. Прослеживается корреляция изменения электросопротивления углеродных пленок до и после облучения с данными АСМ по среднему размеру элементов топографии.

В связи с этим была предпринята попытка определения различий в составе и структуре методами Раман-спектроскопии и РФЭС.

По данным РФЭС, существенных различий в пленках нет. Сателлитная структура в области π и σ плазмонов, а также увеличение ширины основных пиков C1s свидетельствуют о том, что мы изначально имеем дело с пленками преимущественно разупорядоченного углерода (не графита). Из обзорных РФЭС спектров также видно, что ионная бомбардировка пленок аргоном приводит к «диффузии» натрия из стекла в пленку. Чем больше доза, тем больше интенсивность спектра натрия. Кремний и его оксиды не наблюдаются, т.е. пленки в целом являются сплошными, и стекло сквозь пленку не просматривается.

ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ N⁺ НА МОРФОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ, ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И АТОМНУЮ СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В.Л. Воробьев, П.В. Быков, Ф.З. Гильмутдинов, В.Я. Баянкин
*Удмуртский Федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск, Россия
(Vasily_L.84@udman.ru)*

Формирование поверхностных слоев металлических материалов с улучшенными механическими и эксплуатационными свойствами посредством внедрения в них ускоренных ионов относится к одному из перспективных направлений современной науки

и техники [1–4]. Несмотря на исследования в этом направлении, до сих пор остается невыясненным влияние компонентов металлических сплавов на формирование морфологии поверхности, элементного и структурно-фазового состава поверхностных слоев в результате ионного облучения. Поэтому целью данной работы является исследование морфологии поверхности, накопления азота, формирования химических соединений и структурно-фазового состояния поверхностных слоев нержавеющей стали 03X17H12M2T и титанового сплава ВТ6 при имплантации ионов N^+ . Выбор данных металлических материалов обусловлен разной химической активностью их компонентов к азоту. Химическая активность компонентов возрастает от железа к титану. Кроме того, данные сплавы находят широкое применение в качестве конструкционных материалов в химической промышленности, авиа- и судостроении. Сталь 03X17H12M2T является незакаливаемой, поэтому азотирование такого типа сталей является одним из способов повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости [5].

В работе выявлено, что облучение ионами N^+ приводит к накоплению азота в нержавеющей стали до 17 ат.%, формированию химических соединений CrN , Cr_2N , MoN , TiN и Fe_4N в виде кластеров небольших размеров и кратерообразной морфологии поверхности. В случае титанового сплава накопление азота осуществляется до 32 ат.% и сопровождается образованием нитридов титана, в частности, TiN , в виде фазовых включений по всей поверхности. Показано, что формирование морфологии поверхности нержавеющей стали определяется процессами распыления, а титанового сплава образованием множества включений из нитридов титана.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ ГЗ N 121030100002-0. Исследования выполняли 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] Козлов Д.А., Крит Б.А., Столяров В.В., Овчинников В.В., *ФизХОМ*. (2010), №1. с.50.
- [2] Сунгатулин А.Р., Сергеев В.П., Федорищева М.В., Сергеев О.В. *Известия Томского политехнического университета*. т.315 (2009), №2. с.134
- [3] Братушка С.Н., Маликов Л.В. *Вопросы атомной науки и техники*. (2011), № 6. с.126
- [4] Овчинников В.В., Макаров Е.В., Гущина Н.В. *ФММ*. т.120 (2019), №12. с.1307
- [5] Гуляев А.П. *Материаловедение*. М.: Металлургия, 1986, с.544

ВОЗДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ Ar^+ И He^+ РАЗЛИЧНОЙ АТОМНОЙ МАССЫ НА МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ СВЕРХРЕШЕТОК $Co_{90}Fe_{10}/Cu$

К.В. Шаломов¹, Н.В. Гущина¹, В.В. Овчинников¹, Р.С. Заворницын², Н.С. Банникова²,
М.А. Миляев²

¹Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (icsartf@gmail.com)

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

В литературе представлены в основном данные о влиянии ионного облучения на сверхрешетки Fe/Cr [1, 2], которые в настоящее время являются модельными объектами.

Представляет интерес исследовать влияние ионного облучения на магниторезистивные свойства усовершенствованных сверхрешеток, являющихся многообещающими с точки зрения практических применений, в частности на структуру и свойства сверхрешеток типа $\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x/\text{Cu}$.

В работе исследованы магниторезистивные характеристики магнитных металлических сверхрешеток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$ (на подложках из стекла, Al_2O_3 и Si), подвергнутых воздействию пучков ускоренных ионов Ar^+ и Xe^+ различной атомной массы с энергией 10 кэВ.

Установлено, что облучение флюенсами $1,25 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ионов Ar^+ и Xe^+ приводит к уменьшению магнитосопротивления сверхрешеток $\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Cu}$. Облучение ионами Ar^+ вызывает более существенное падение магнитосопротивления, чем облучение ионами Xe^+ , что связано с увеличенным средним проективным пробегом аргона ($R_p = 5-6 \text{ нм}$), по сравнению с Xe^+ ($R_p = 3,3-4,3 \text{ нм}$) и, соответственно, большей глубиной зоны перемешивания атомов $\sim (2-3) \times R_p$ при движении ионов от верхних слоев сверхрешетки по направлению к подложке.

Показано, что основной вклад в наблюдаемые изменения магнитосопротивления вносит не нагрев, а именно ионное облучение, вызывающее частичное по глубине сверхрешеток перемешивание атомов слоев разного состава и влияющее на состояние межслойных границ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-20173).

Литература

- [1] Kelly D.M., Schuller I.K., Korenivski V., *Physical Review* т.50 (1994), №5, с.3481
 [2] Oomi G., Yayoi T., Nakano T., *IEEE transactions on magnetics* т.50 (2014), №1, с.1500304

ВЫБОР РЕЖИМОВ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОТЖИГА ДЕФОРМИРОВАННОГО СПЛАВА Ni – 13,9 мас. % W ПУЧКАМИ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ АРГОНА

К.В. Шаломов¹, Н.В. Гущина¹, В.И. Воронин², Н.В. Проскурнина², В.И. Бобровский²,
В.В. Овчинников¹

¹Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (icsartf@gmail.com)

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

Исследовано воздействие ионов Ar^+ с энергией 15-20 кэВ (при плотностях ионного тока 100-300 мкА/см²) на микроструктуру, уровень внутренних микронапряжений и текстуру лент сплава Ni – 13,9 мас. % W, подвергнутых высокой степени холодной деформации. Данный сплав после деформации и последующего рекристаллизационного отжига ($T = 1000^\circ\text{C}$, 1 ч) приобретает острую кубическую текстуру и является перспективным материалом для изготовления подложек для ВТСП-кабелей.

Облучение непрерывными пучками ионов Ar^+ проводилось на имплантере ИЛМ-1 с ионным источником ПУЛЬСАР-1М на основе тлеющего разряда низкого давления с холодным полым катодом. При этом варьировали параметры облучения с целью обеспечить различный нагрев образцов и их выдержку при заданных температурах.

Рентгеноструктурное исследование лент в исходном состоянии и после ионно-лучевой обработки проводилось по методу Ритвельда с использованием программы FullProf. Рентгенограммы были получены на дифрактометре ДРОН-4.

Установлено, что кратковременное облучение лент толщиной 80 мкм флюенсом $\sim 3,1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (в течение 50 с) при температурах $T \leq 370^\circ\text{C}$ и $T = 630^\circ\text{C}$ приводит к уменьшению микронапряжений во всем их объеме, но при этом сохраняется исходная текстура. При увеличении флюенса до $9,7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при $T = 630^\circ\text{C}$ происходит изменение текстуры от (220) к (200). Изменения микронапряжений и текстуры с облученной и необлученной стороны лент толщиной 80 мкм сопоставимы между собой, несмотря на то что проективный пробег ионов Ag^+ с энергией 15-20 кэВ в сплаве составляет всего лишь ~ 7 нм. Известно, что отжиг в печи (700°C , 30 мин) таких лент не приводит к их рекристаллизации.

Облучение при температуре мишени 850°C уже при флюенсе $3,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (в течение 17 с) приводит к снятию микронапряжений в объеме деформированной ленты и к кардинальному изменению текстуры от (220) к (200). Изменение текстуры происходит и в ходе аналогичного отжига в печи, однако при этом эффект снятия напряжений в 3 раза ниже, чем при ионном облучении.

Протекание процессов рекристаллизации в исследуемом сплаве в ходе облучения при температуре, ниже температуры начала термоактивированной рекристаллизации, а также более высокая скорость падения микронапряжений при облучении, чем при печном отжиге, свидетельствуют о существенной роли наномасштабных радиационно-динамических эффектов при каскадообразующем облучении метастабильных сред [1].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-20173).

Литература

Ovchinnikov V.V., *Surface and Coating Technology* v.355 (2018), p.65

ГИГАНТСКИЕ РАДИАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ КОРПУСКУЛЯРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

В.В. Овчинников

Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (viae05@rambler.ru)

Рассмотрены наномасштабные динамические эффекты и процессы, имеющие место при каскадообразующих видах облучения конденсированных сред тяжелыми ионами, нейтронами и осколками деления. Роль этих процессов находится вне поля зрения классической радиационной физики конденсированных сред. Впервые они были рассмотрены в публикациях автора и его коллег и подтверждены совместными исследованиями с немецкими коллегами (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Германия). Источниками регистрируемых эффектов являются области прохождения плотных каскадов атомных смещений, термализуемых за времена порядка одной триллионной секунды (тепловые всплески), с гигантскими температурами и тепловыми давлениями в этих областях ($T = 3000\text{-}6000 \text{ К}$, $P = 5\text{-}40 \text{ ГПа}$). По этой причине необходимо учитывать ударно-волновые эффекты при каскадообразующих видах облучения наряду с чисто миграционными процессами с участием радиационных дефектов, которые учитываются классической радиационной физикой.

Предложена теория самораспространяющихся (теоретически на неограниченные расстояния) структурно-фазовых превращений в метастабильных средах, инициируемых ионной бомбардировкой. На практике это обеспечивает: 1) увеличение как минимум на 3-5 порядков линейной шкалы воздействия ионизирующего излучения на материалы (увеличение глубины воздействия для ионов); 2) температура инициируемых облучением превращений снижается на десятки и сотни градусов по сравнению с аналогичными термически активированными процессами; 3) их скорость возрастает на несколько порядков по сравнению с термически и радиационно-стимулированными миграционными процессами.

Рассматриваются примеры радиационно-динамических (РД) процессов в металлах и сплавах (внутрифазовых и фазовых превращений) с изменением их электрических, магнитных, механических, ресурсных и др. характеристик. Конкретные приложения касаются модификации свойств функциональных материалов (резистивных, магнитных, механических, ресурсных) пучками ускоренных ионов. Выполнены также имитационные исследования радиационной стойкости материалов.

Результаты обзора частично изложены в работах [1-4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-20173).

Литература

- [1] Ovchinnikov V.V., *Surf. Coatings Technol.* v.355 (2018), p.65
- [2] Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V., Mozharovsky S.M., Kaigorodova, L.I. *Surf. Coatings Technol.* v.389 (2020), 125504
- [3] Ovchinnikov V.V., Makarov E.V., Gushchina N.V., *Metals* v.11 (2021), 1667
- [4] Овчинников В.В., Макаров Е.В., Гущина Н.В., Семенкин В.А., в *Трудах XXXI Международной конференции «Радиационная физика твердого тела»*, под ред. Бондаренко Г.Г., Москва: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2021, с.20

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ДУО-СТАЛИ: ПЭМ АНАЛИЗ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МИНИКОЛОНН

Е.А. Корнеева¹, А.С. Сохацкий¹, В.А. Скуратов¹, Е.С. Статник², П.А. Сомов²,
И.Н. Крупатин², А.И. Салимон², А.М. Корсунский^{3,2}

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

²Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

³Оксфордский университет, Оксфорд, Англия

Разработка ядерных реакторов IV поколения требует внедрения новых конструкционных материалов с улучшенными функциональными характеристиками, соответствующих экстремальным условиям эксплуатации. Одними из перспективных материалов для оболочек твэлов являются дисперсно упрочненные оксидами (ДУО) стали, высокие эксплуатационные свойства которых обусловлены входящими в их состав наноразмерными частицами на основе Y-Ti и Y-Al оксидов [1].

Согласно результатам многочисленных исследований, наночастицы сохраняют кристаллическую структуру после облучения нейтронами и ионами низких энергий

вплоть до высоких (десятки сна) уровней радиационных повреждений. Облучение тяжелыми ионами с энергиями >1 МэВ/нуклон является единственным известным на сегодняшний день типом облучения, способным приводить к существенной деградации структуры наноксидов вплоть до их полной аморфизации. В настоящей работе ДУО стали были облучены высокоэнергетическими ионами ксенона в режиме формирования одиночных аморфных треков в наночастицах и в режиме перекрытия трековых областей. Целью работы было исследование радиационно-стимулированного изменения механических свойств ДУО сталей, содержащих оксидные частицы в различном (кристаллическом или аморфном) структурном состоянии.

Было показано, что воздействие ионов ксенона с энергией 167 МэВ приводит к формированию аморфных треков в частицах $Y_2Ti_2O_7$, начинающих перекрываться при флюенсе $\sim 2 \cdot 10^{12}$ см⁻² и полной аморфизации наноксидов при увеличении флюенса ионов [2]. Порог формирования латентных треков в пирохлоре составляет 7,4-9,7 кэВ/нм, что соответствует глубине поврежденного слоя ~ 7 мкм. Для оценки влияния облучения на механические свойства ДУО сталей было проведено наноиндентирование стандартным методом и испытания сжатием плоским индентором миниколонн, полученных сфокусированным ионным пучком. Высота колонн была меньше толщины слоя мишени, в котором формируются треки. Ранее наноиндентирование колонн с полностью аморфизованными частицами не проводилось.

Проведено сравнение результатов наноиндентирования, обсуждается взаимосвязь между структурным состоянием наночастиц и уровнем изменения механических свойствам ДУО сталей, облученных тяжелыми ионами высоких энергий.

Работа была частично выполнена на базе оборудования Центра коллективного пользования "Визуализация высокого разрешения" Сколковского института науки и технологий.

Литература

[1] Ukai S., Fujiwara M. Perspective of ODS alloys application in nuclear environments // *Journal of Nuclear Materials*. – 2002. – v. **307**. – pp.749-757.

[2] Skuratov V. A. et al. Swift heavy ion tracks in $Y_2Ti_2O_7$ nanoparticles in EP450 ODS steel // *Journal of Nuclear Materials*. – 2015. – v. **456**. – pp.111-114.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФFUЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В УСЛОВИЯХ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.А. Колотов¹, В.Я. Баянкин¹, Д.И. Тетельбаум²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (УдмФИЦ УрО РАН), г. Ижевск, Россия (less@udman.ru)

²«Научно-исследовательский физико-технический институт» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород, Россия (tetelbaum@phys.unn.ru)

Проведен сравнительный анализ образцов, находящихся в аморфном и кристаллическом состояниях, облученных ионами бора. В ряде работ ранее было показано, что ионная обработка кристаллических материалов, находящихся в исходном

неравновесном состоянии (например, аморфных или прокатанных металлических фольг), приводит к ряду эффектов, отличных от материалов исходно находящихся в равновесном состоянии, таких как, аномально глубокий массоперенос, фазообразование и т.д. Одним из обсуждаемых вопросов путей миграции атомов, является наличие сильноразвитой дефектной структуры. Сравнительный анализ оттоженных образцов показывает, что дефектная структура является движущей силой миграции атомов под действием ионного облучения, но не является достаточным условием.

В работе исследуются особенности сегрегационных процессов в поверхностных слоях аморфных быстрозакаленных и поликристаллических многокомпонентных сплавов в условиях ионного облучения. Облучение образцов проводилось в одинаковых условиях. Имплантация ионов бора проводилась с энергиями $E = 20, 30, 40$ кэВ и дозой 10^{17} см⁻² на установке ИЛУ-3. Плотности ионного тока были выбраны так, чтобы при каждой энергии ионов выделяемая на образцах плотность мощности была одинаковой, и составляли для указанных энергий величины 3, 2 и 1.5 мкА/см², соответственно.

Компонентный анализ поверхностного слоя образцов показал, что в результате облучения в поверхностном слое под воздействием потока ионов протекают сегрегационные процессы. Характер наблюдаемых сегрегационных процессов укладывается в общепринятые модели. При этом видно, что характер распределения компонентов на облученной стороне и стороне обратной облучению указывает на волновую природу движущей силы, а именно выход упругих волн к поверхности. В то же время, одним из основных результатов работы является экспериментально установленное отсутствие атомов бора на противоположной облучению стороне на аморфных образцах, в то время как на кристаллических образцах отмечается наличие бора на противоположной стороне.

Основной целью данной работы было определение механизма миграции атомов в радиационном поле. Сравнивая результаты рентгеноструктурного анализа и данные компонентного состава приповерхностной области, можно сделать предположение, что в результате облучения, в поверхностных слоях происходит активное образование метастабильных фаз, состав которых изменяется в зависимости от параметров облучения. Отсутствие имплантируемых ионов (бора) на обратной стороне образцов свидетельствует, что диффузия атомов происходит по границам зерен – а в аморфных материалах данные механизмы не реализуемы в виду отсутствия межзеренных границ, в отличие от поликристаллических материалов, в которых наличие имплантируемых атомов было отмечено на противоположной стороне образцов. Движущей силой диффузионных процессов является процесс распространения упругих волн, возникших вследствие развития микроскопических процессов атомно-атомных соударений.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ Ni-Al ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Жихарев, С.Г. Быстров, Н.М. Созонова, В.Я. Баянкин

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

В работе рассматриваются результаты исследования влияния сфокусированного импульсного лазерного излучения на никелевую матрицу с нанесенным на ее поверхность слоем алюминия в зависимости от плотности мощности лазерного излучения.

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

Образование интерметаллидов на основе никеля и алюминия при термическом лазерном воздействии, характеризуются разным значением их энергии активации. В зависимости от количества энергии, переданного материалу, формируется тот тип интерметаллидного соединения, образование которого термодинамически наиболее выгодно. Следовательно, фазовый состав образовавшейся в системе Ni-Al интерметаллидной прослойки во многом будет определяться количеством энергии, передаваемой образцу. При этом также очень существенное влияние на механизм получения интерметаллида лазером оказывает скорость нагрева-охлаждения материала. Если она высока, то потери тепла в системе малы, следовательно можно сильно перегреть систему и быстро “заморозив” получившееся состояние не получить нужное соединение. Если она мала, то можно наблюдать медленное повышение температуры и, следовательно, заторможенное взаимодействие между элементами системы, что также не способствует получению требуемого соединения интерметаллида.

В качестве источника лазерного воздействия использовался импульсный оптоволоконный иттербиевый лазер “Ldesigner F1”. Облучение образцов осуществлялось сфокусированным лучом лазера в атмосфере аргона. Воздействие было одноимпульсным, а изменяемым параметром при облучении была плотность мощности лазерного излучения. Область облучения составила площадь размерами 10×10 мм.

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

В результате проведенных исследований установлено, что при выбранных режимах лазерного воздействия образцы подвергались сильному термическому воздействию. На поверхности образцов в зоне облучения наблюдается сильное расплавление поверхности. Согласно полученным РФЭС-данным установлено, что после лазерной обработки во всех случаях облучения в поверхностных слоях не наблюдается получение каких-либо интерметаллидных соединений. В полученных спектрах исследуемых образцов установлено наличие линии с $E_{св} = 74.0$ эВ, соответствующей алюминию в составе алюминатов никеля $NiAl_2O_4$. Согласно литературе соединение $NiAl_2O_4$ характеризуется как сложный оксид типа шпинель, которая может образоваться при высокотемпературном окислении (свыше $1000^\circ C$) в результате взаимодействия оксидов алюминия и никеля.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ № 121030100002-0.

Исследования выполнялись с использованием оборудования ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК Ti/Al, ПОСЛЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

П.В. Быков¹, В.Л. Воробьев¹, И.Н. Климова¹, Ю.Г. Шиляева², А.А. Шушков¹,
А.Н. Тарасенков³, А.А. Колотов¹, В.Я. Баянкин¹

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

²УдГУ, Ижевск, Россия

³НПК «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, 2]. 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 [3, 4].

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 пленок Ti/Al на поверхности титана VT1-00 в зависимости от дозы облучения ионами аргона ($5 \cdot 10^{15}$ ион/см², 10^{16} ион/см², $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² и 10^{17} ион/см²).

Работа выполнена в рамках Государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ № 121030100002-0.

Исследования выполнялись 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), 1-6

[3] 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), 012012

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

КОНЦЕПЦИЯ КВАЗИНЕЙТРОНОВ И ХАРАКТЕРНЫЕ СООТНОШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ СИНТЕЗИРУЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

М.П. Кашенко^{1,2}, М.А. Коваленко¹, А.Я. Купряжкин¹, Н.М. Кашенко¹, М.Б. Смирнов²,
В.В. Илюшин², Ю.Л. Чепелев², В.И. Печорский², С.А. Краюхин³

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия (mpk46@mail.ru)

²Уральский государственный лесотехнический университет

³Технический университет УГМК

Концепция квазинейтронов была предложена в [1]. Суть концепции квазинейтрона проста. Поскольку существуют предельные связанные состояния электрона и протона, с одной стороны, в виде атома водорода (с размером $\sim 10^{-10}$ м), а с другой стороны, в виде нейтрона [2] (с размером $\sim 10^{-15}$ м), то естественно допустить возможность и промежуточных квазинейтронных состояний, когда электрон осуществляет «эскорт» протона, экранируя его положительный заряд. Очевидно, что относительно положительного ядра квазинейтрон может рассматриваться в качестве нейтральной частицы, если размер самого квазинейтрона мал по сравнению с расстоянием от квазинейтрона до ядра. Как показано в [3], в качестве радиуса межнуклонного сильного взаимодействия можно принять $R_s^* \approx 10^2 \text{ фм} = 10^{-13} \text{ м}$. Следовательно, для захвата протона исходным ядром ${}^A_Z X$ с образованием ядра ${}^{A+1}_{Z+1} Y$ достаточен электронный «эскорт» протона до расстояний R_s^* . В экспериментах [4] наблюдался синтез цинка при участии меди, что согласуется с концепцией квазинейтронов. В связи с этим естественно возникает задача определения соотношений синтезированных изотопов $f(A_2^*)/f(A_1^*)_{\text{exp}}$, которые должны задаваться природным соотношением исходных изотопов $f(A_1)/f(A_2)_{\text{nat}}$. Здесь $A_{1,2}$ – массовые числа исходных изотопов, $A_{1,2}^* = A_{1,2} + 1$. В результате соотношения синтезированных изотопов могут заметно отличаться от их природного соотношения $f(A_2^*)/f(A_1^*)_{\text{nat}}$, как это следует из данных Табл.1 для синтезируемых изотопов цинка и галлия, где учтено, что $f(A_2^*)/f(A_1^*)_{\text{exp}} = f(A_1)/f(A_2)_{\text{nat}}$.

Таблица 1. Отличие ожидаемых соотношений изотопов (exp), синтезируемых при захвате протонов изотопами меди и цинка от соотношений в природе (nat)

Z	Z + 1	Z, A ₁ , A ₂	Z + 1, A ₁ [*] , A ₂ [*]	f(A ₂ [*])/f(A ₁ [*]) _{exp}	f(A ₂ [*])/f(A ₁ [*]) _{nat}
29 (Cu)	30 (Zn)	Cu, 63, 65	Zn, 64, 66	0.446	0.56
30 (Zn)	31 (Ga)	Zn, 68, 70	Ga, 69, 71	0.03306	0.66367

Результаты масс - спектрометрии для синтезированных изотопов цинка (при электролизе воды с использованием медных электродов) и галлия (при использовании цинковых электродов) в целом согласуются с ожидаемыми результатами. Наблюдаемые отклонения от ожидаемых значений обусловлены вкладом реакций, дополнительных к захвату протонов.

Литература

- [1] Кашенко М.П., Кашенко Н.М., *Письма о материалах*. т. 9 (2019), № 3, с.316
- [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] Кашенко М.П., Балакирев В.Ф., *Письма о материалах*. т. 8(2018), № 2, с.152
- [4] Kashchenko M.P., Balakirev V. F., Kashchenko N. M., Smirnov M. B., Chepelev Yu. L.,

МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ АРГОНА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

Н.М. Созонова, О.Р. Бакиева

*Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Ижевск, Россия
(sozonova@udman.ru)*

В работе рассматривается изменение ближней структуры поверхности металла при облучении ионами аргона с энергией 30 кэВ. Моделирование выполнено на программном пакете LAMMPS для молекулярной динамики. Исследованы процессы формирования атомной структуры ближнего порядка поверхностных слоев железа при ионном облучении аргоном. Для выявления изменений структуры при ионном воздействии область, заполненную атомами железа, облучали ионами аргона с начальной энергией 30 кэВ. Построены парные корреляционные функции через одинаковые промежутки времени для отслеживания изменений, происходящих в ходе облучения. Наблюдается распыление атомов с поверхности и образование точечных дефектов в моделируемой области.

Данные моделирования сравнивались с результатами экспериментальных исследований локальной атомной структуры в пределах первой координационной сферы. Экспериментальные данные получены с поверхности железа после облучения ионами аргона. Спектры энергетических потерь электронов были получены в геометрии обратного рассеяния вторичных электронов от поверхности образца на Оже-микроспектрометре JAMP-10S(JEOL). Анализ полученных экспериментальных данных проведен методом решения обратной задачи.

Таким образом, результаты моделирования с использованным потенциалом и заданными параметрами облучения хорошо описывают эксперимент по радиационному воздействию на поверхность железа.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 121030100002-0. При выполнении исследований использовалось оборудование ЦКП «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» УдмФИЦ УрО РАН.

ОБ ЭФФЕКТЕ ИОННО-ПУЧКОВОЙ МОДИФИКАЦИИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Н.В. Гущина¹, В.В. Овчинников¹, К.В. Шаломов¹, Д.И. Вичужанин²

¹Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (guscha@rambler.ru)

²Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Проведено исследование влияния облучения ионами Ag^+ на усталостную прочность горячепрессованных профилей толщиной 6 мм из сплавов Д16 (Al-Cu-Mg) и В95 (Al-Zn-Mg-Cu) после закалки и естественного старения.

Облучение образцов проводилось на установке ионно-лучевой обработки ИЛМ-1, оснащенной ионным источником ПУЛЬСАР-1М на основе тлеющего разряда с холодным полым катодом. Были использованы следующие параметры облучения: $E = 20$ кэВ, $j = 200$ мкА/см², $F = 2 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ см⁻². Максимальная температура нагрева образцов при облучении не превышала 40°C.

Образцы были испытаны на сервогидравлическом испытательном стенде INSTRON 8801. Для определения кривой усталости Веллера были проведены циклические усталостные испытания в синусоидальном цикле с частотой нагружения 3 Гц. Коэффициент дисбаланса цикла (коэффициент асимметрии) был равен -1.

Установлено, что кратковременное двухстороннее облучение ионами Ag^+ с энергией 20 кэВ указанными флюенсами при отсутствии нагрева образцов приводит к значительному увеличению количества циклов до разрушения в условиях пониженных амплитуд нагрузок. $\sigma/\sigma_B = 0,3$. Для сплава Д16 максимальное увеличение в 2,4 раза наблюдается при флюенсе ионов $F = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻². Усталостная прочность сплава В95 возрастает в 5 раз после облучения ионами Ag^+ флюенсом $F = 1 \cdot 10^{16}$ см⁻².

Этот результат может быть связан с тем, что поверхность и объем облучаемого образца подвергаются «мгновенному» (в течение нескольких секунд) радиационному отжигу [1] ионным пучком, в результате чего и поверхность, и объем практически становятся избавлены от деформационных дефектов. Из-за этого разрушение с поверхности образца начинается гораздо позже, так как процессы накопления повреждений и трещинообразования развиваются гораздо медленнее.

Полученные данные указывают на возможность использования ионно-лучевой обработки на завершающих этапах производства перспективных алюминиевых сплавов.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ № 19-08-00802-а.

Литература

[1] Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V., Mozharovsky S.M., Kaigorodova L.I. *Surf. Coatings Technol.* v.389 (2020), 125504

ОБРАЗОВАНИЕ ВЫСОКОМАРГАНЦЕВОГО АУСТЕНИТА В СПЛАВЕ Fe–6.35 at. % Mn ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 300-450°C В ОТСУТСТВИЕ ТЕРМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ «РАДИАЦИОННОЙ ТРЯСКИ» ИОНАМИ Ar⁺ (E = 15 кэВ)

В.В. Овчинников¹, Е.В. Макаров¹, В.А. Семёнкин^{1,2}, Н.В. Гущина¹

¹Институт электрофизики УрО РАН, 620016, Екатеринбург, Россия (efre-m@yandex.ru)

²Уральский федеральный технический университет имени Первого президента России
Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Методами мессбауэровской спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии установлено, что кратковременное (в течение 4 секунд) облучение холоднокатаной фольги состава Fe-6.35 ат.% Mn толщиной 25 мкм ионами Ar⁺ (E = 15 кэВ) при нагреве до 300-450°C вызывает фазовое превращение $\alpha \rightarrow \gamma$ с образованием многократно обогащенного марганцем аустенита (от 23,8 до 38,0 ат.%). Сделанные оценки не позволяют объяснить эти процессы явлениями тепловой и радиационно-усиленной диффузии. В качестве объяснения мы использовали модель наноразмерных динамических эффектов, связанных с встряхиванием среды мощными посткаскадными уединенными волнами. Такие волны, становясь незатухающими в метастабильных средах и играя в определенном смысле роль температуры, вызывают кратковременное гигантское увеличение подвижности атомов и переход этих сред в состояние с минимальной свободной энергией. Концентрации Mn c_1 и c_2 в α - и γ -фазах, рассчитанные на основе расшифровки мессбауэровских спектров для температур облучения 311, 378 и 449°C, достаточно хорошо соответствуют результатам экстраполяции линий равновесной фазовой диаграммы в область низких температур. Полученные данные сопоставляются с результатами ранее выполненных работ [1, 2].

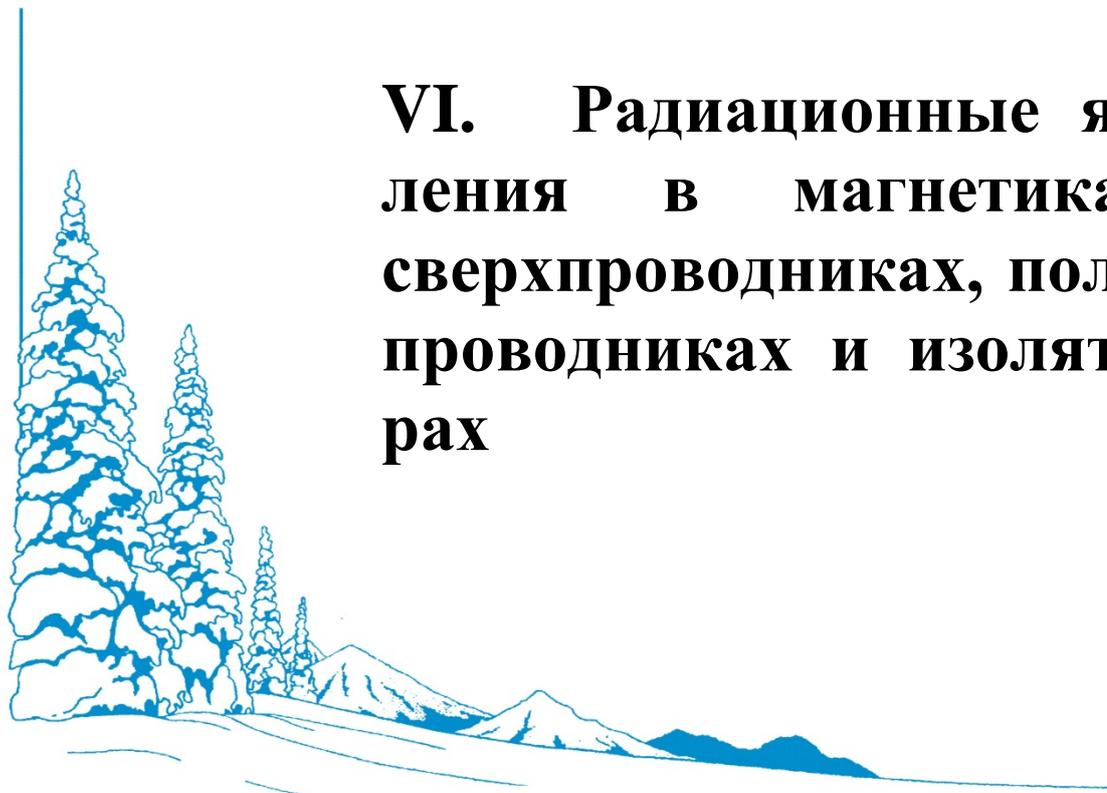
Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-20173).

Литература

[1] Ovchinnikov V.V., Makarov E.V., Gushchina N.V., *Metals* v.11 (2021), №11, 1667

[2] Овчинников В.В., Макаров Е.В., Гущина Н.В., Семенкин В.А., в *Трудах XXXI Международной конференции «Радиационная физика твердого тела»*, под ред. Бондаренко Г.Г., Москва: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2021, с.20

VI. Радиационные явления в магнетиках, сверхпроводниках, полупроводниках и изоляторах



Тематика секции традиционно формируется с целью дать участникам Семинара (в основном, "металлистам") общее представление о последних результатах исследований радиационных эффектов в сверхпроводниках, полупроводниках, и диэлектриках (в том числе, магнитных). В первых двух случаях значительные изменения физических свойств материалов наступают при облучении достаточно малыми флюенсами высокоэнергетических частиц. Поэтому изучение причин таких повреждений и деградации физико-механических свойств этой группы материалов всегда являлось и является актуальной задачей. В программе Семинара представлены доклады по физике радиационных эффектов в полупроводниках и изоляторах. Поведение радиационных дефектов и изменение физико-механических свойств анализируется в таких материалах как манганиты, оксиды и др. Обсуждаются аморфизация кремния при воздействии ионными пучками, диэлектрический эффект в ВТСП-керамике, принципы радиационной модификации полупроводников и диэлектриков, влияние радиационного разупорядочения на полупроводниковые детекторы излучений.

LATENT TRACKS IN NANOCRYSTALLINE $Y_4Al_2O_9$ IRRADIATED WITH HIGH ENERGY HEAVY IONS

A. Ibrayeva^{1,2}, A. Mutali^{2,3,4}, J. O'Connell¹, Arno Janse van Vuuren¹, Alexander Sohatsky², Vladimir Skuratov^{3,5,6}, Liudmila Alekseeva⁷

¹Centre for HRTEM, Nelson Mandela University, Port Elizabeth, South Africa
(a.d.ibrayeva@gmail.com)

²Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

³Flerov Laboratory of Nuclear Research, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

⁴L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

⁵National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

⁶Dubna State University, Dubna, Russia

⁷Physico-Technical Research Institute, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

This work focuses on the investigation of structural changes in $Y_4Al_2O_9$ (nc-YAM) irradiated with swift heavy ions in a range of electronic stopping powers 6÷35 keV/nm using high resolution TEM techniques. Bi and Xe ions were found to form latent tracks in studied nano-oxides (Fig.1) that contrasts with their extremely high radiation stability in a metallic matrix [1].

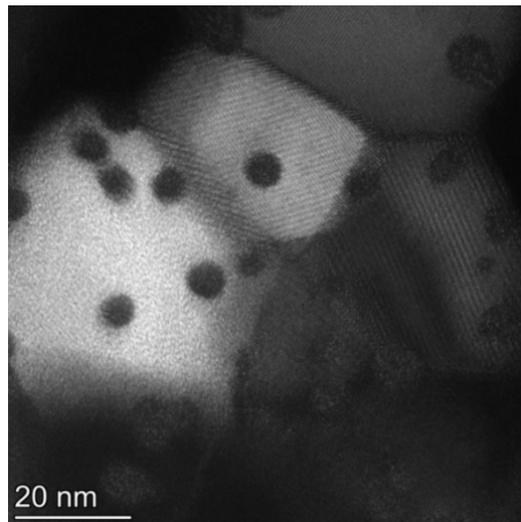


Fig. 1. DF TEM image of nc-YAM irradiated with Xe with energy of 0.2 MeV/u

Based on the analysis of the TEM data threshold conditions to the formation as of continuous so discontinuous tracks in nc-YAM were estimated. No effect of grain size on the ion track parameters was observed for all specific ionizing energy losses used in experiments.

Acknowledgement. This research was funded by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (grant No AP09058081 “Radiation stability of dielectric nanoparticles in oxide dispersion-strengthened alloys against irradiation with heavy ions of fission fragment energy”). Authors would like to thank the IC-100, U-400 and DC-60 accelerator staff of the FLNR JINR and INP.

References:

[1] Rogozhkin S.V. et.al TEM analysis of radiation effects in ODS steels induced by swift heavy ions, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* v.486 (2021), p.1-10.

MECHANISMS RESPONSIBLE FOR THE DEPTH DEPENDENT CRYSTAL ROTATION OBSERVED IN NiO EXPOSED TO SWIFT HEAVY ION IRRADIATION.

D.A. Douglas-Henry, J.H. O'Connell

CHRTEM, University Way, Summerstrand, Port Elizabeth, South-Africa (Danielle.Douglas-Henry@mandela.ac.za)

Exposure to swift heavy ion irradiation (SHI) is known to induce material specific changes in the microstructure. Various models are used to predict damage formation and explain these microstructural changes. Certain materials (such as NiO) have been seen to exhibit significant crystal rotation when exposed to SHI irradiation at an off normal incidence. To date, very little published data is available regarding SHI induced rotation, with only bulk sampling techniques such as x-ray diffraction spectra and surface shifts having been employed [1, 2]. Without electron microscopy investigations, nothing can be definitively said about the microstructural changes facilitating this effect.

In this study, the microstructural changes in single crystal NiO were studied. These crystals were irradiated with Au ions at 45° with energies of 593 MeV and 940 MeV. Fluences ranged from 1.4×10^{14} to 9.6×10^{14} ions/cm². A depth dependent investigation of the crystal rotation was performed using electron backscatter diffraction (EBSD). In-plane rotation varied from 20.2° – 51.6°. High-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) was utilized to interrogate the microstructural changes facilitating bulk rotation. No amorphization was observed and the specimen remained single crystalline despite the depth dependent rotation. The crystal rotation seen thus needs to be facilitated by an advanced network of dislocation cells.

TEM imaging revealed a dense network of dislocations along the primary slip directions of the material. The dislocations at high fluences ($\sim 10^{14}$ ions/cm²) are seen to form cells of approximately 30 nm diameter, which seems to resemble mosaic Low Energy Dislocation Structures (LEDS). A different mechanism of ion hammering is thus considered.

The authors would like to acknowledge Siegfried Klaumünzer for the provision of the NiO specimens used in this study as well as all his valuable discussions.

References

- [1] I. Zizak, G. Schumacher, N. Darowski, and S. Klaumünzer, "Ion-Beam-Induced Collective Rotation of Nanocrystals," *Phys. Rev. Lett.*, **vol. 101**, no. 065503, pp. 1–4, 2008.
- [2] I. Zizak, N. Darowski, S. Klaumünzer, G. Schumacher, J. W. Gerlach, and W. Assmann, "Grain rotation in nanocrystalline layers under influence of swift heavy ions," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, **vol. 267**, no. 6, pp. 944–948, 2009.

MICROSTRUCTURAL RESPONSE OF SILICON NITRIDE TO FISSION FRAGMENTS

Arno Janse van Vuuren¹, Anel Ibraeva^{2,3}, Vladimir Skuratov^{4,5,6}, Maxim Zdorovets^{3,7}

¹*Centre for HRTEM, Nelson Mandela University, South Africa (arnojvv@gmail.com)*

²*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan*

³*Astana Branch of Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan*

⁴*Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, Joint Institute for Nuclear Research, Russia*

⁵*National Research Nuclear University MEPhI, Russia*

⁶*Dubna State University, Russia*

⁷*Ural Federal University, Russia*

Si₃N₄ is not only an important semiconductor material but is also under consideration for use as candidate-inert-matrix-fuel-hosts (IMs) for the burn-up of plutonium and minor actinides [1,2]. IMs are envisioned as one possible means to close the nuclear fuel cycle in an effort to reduce the amount of high-level waste materials which require long-term storage [3]. The physical properties of this material make it well suited to reactor conditions [2]. However, to prove the viability for nuclear applications its' radiation stability must be tested. In this investigation swift heavy ions are therefore used to simulate the effects of fission fragments on microstructure of Si₃N₄.

To assess the behaviour of different phases of Si₃N₄ under irradiation, polycrystalline (Al doped) bulk samples, amorphous thin films and nanoparticles were irradiated with ions of varying stopping power. The samples were irradiated with Xe (167, 220, 480 MeV) and 710 MeV Bi ions. Selected samples were also irradiated with 220 MeV Xe ions at temperatures ranging from LNT to 1000 K. The microstructural effects of swift heavy ions on these materials were analysed using transmission electron microscopy techniques.

The effect of fission fragments on the microstructure of Si₃N₄, through electronic energy deposition processes, and the formation of latent tracks in crystalline, amorphous and radiation-induced-amorphous phases of silicon nitride will be presented.

References

[1] Yamane, J. et al. (2008) Progress in Nuclear Energy 50, 621.

[2] Nappé, J.C. et al. (2011) Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 269, 100.

[3] Lee, Y.-W. et al. (2001) Metals and Materials 7(2), 159

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА КРИТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕНТОЧНЫХ ВТСП КОМПОЗИТАХ

И.А. Руднев, Д.А. Абин, С.В. Покровский, А.С. Стариковский, М.А. Осипов,
И.В. Мартиросян

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
(iarudnev@mephi.ru)

Одним из практических применений высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) ленточных композитов второго поколения является изготовление различных магнитных систем, в том числе для ускорительной техники и термоядерных реакторов. В процессе эксплуатации сверхпроводящая обмотка в таких системах неизбежно будет подвергаться воздействию ионизирующего излучения с образованием радиационных дефектов в слое ВТСП. Этот процесс может привести к постепенной деградации как критических характеристик, так и структуры ВТСП. В докладе представлены новые экспериментальные результаты, демонстрирующие изменение критической температуры и критического тока ВТСП-лент второго поколения при облучении ВТСП-слоя ионами Cu $E = 6,3$ МэВ в широком диапазоне плотностей энергии вплоть до полной потери сверхпроводящих свойств. Критическая температура измерялась четырехконтактным методом. Критический ток рассчитывался по кривым намагничивания, измеренным в диапазоне температур от 5 до 77 К и магнитных полей до 8 Тл. В результате проведенных исследований показано, что критический ток более чувствителен к радиационным дефектам, чем критическая температура (см. рисунок). Это означает, что ВТСП ленты потеряют токонесущие характеристики даже при низкой рабочей температуре в диапазонах относительно низких флюенсов, когда критическая температура еще высока. Полученные данные будут использованы для ресурсного прогноза функционирования ВТСП элементов в реальных радиационных полях.

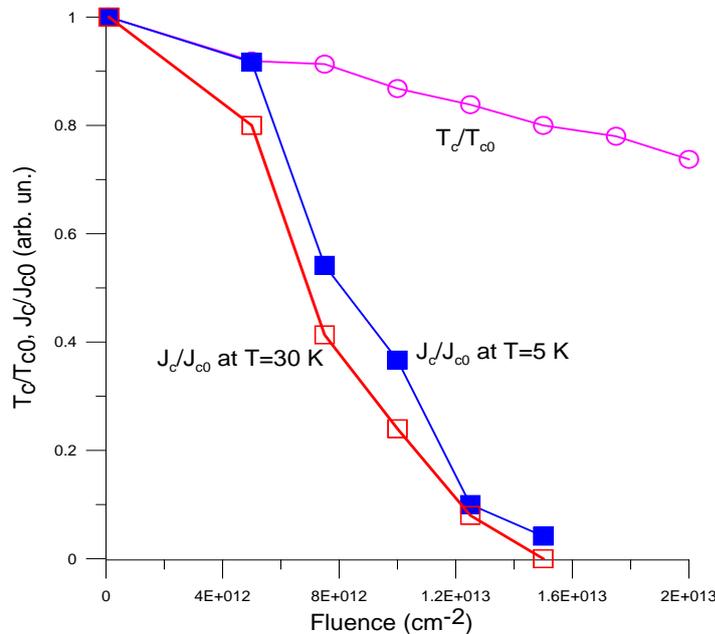


Рис. Зависимости нормированной критической температуры и критического тока (при двух температурах) от флюенса ионного облучения

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Росатома в рамках научного проекта № 20-21-00085

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР n-InSb-i-GaAs

В.В. Углов, Е.А. Колесникова, А.К. Кулешов, Д.П. Русальский, Е.В. Тетеруков
Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь (uglov@bsu.by)

Значительное практическое применение в твердотельной микроэлектронике и полупроводниковом приборостроении имеет узкозонный полупроводник группы A^3B^5 – антимонид индия. На основе антимонида индия изготавливают высокочувствительные фотоэлементы, датчики Холла, оптические фильтры и т.д. Такие микроустройства обладают высокой энергоэффективностью, позволяя значительно снижать энергетические, материальные и эксплуатационные затраты на надежную работу автотранспорта, авиационной и космической техники.

Космические аппараты в полете подвергаются радиационному воздействию. Это приводит к ухудшению эксплуатационных параметров и отказов в работе материалов и элементов оборудования. Возникновение отказов связано преимущественно с теми или иными радиационными эффектами, вызываемыми воздействием на материалы электронов и ионов, энергии которых лежат в очень широком диапазоне: $\sim 10^3 - 10^{20}$ эВ [1].

Получение структур n-InSb-i-GaAs проводилось методом взрывного термического испарения монокристаллического порошка InSb на пластины GaAs (100) [2]. Температура подложки-держателя с пластиной GaAs составляла $(375,0 \pm 2,5)$ °С. При этой температуре формируются гетероэпитаксиальные пленки InSb [3]. Толщина измерялась с помощью профилометра MahrMarSurf M400. Измеренная толщина пленки InSb составила $(2,00 \pm 0,05)$ мкм.

Для имитации условий радиационного воздействия на околоземной орбите структур n-InSb-i-GaAs были подвергнуты облучению пучком электронов на линейном ускорителе У-003 с энергией 5,5 МэВ и дозой до $2,5 \cdot 10^{14}$ эл./см². В таблице представлены электрические свойства структур n-InSb-i-GaAs до и после облучения пучком электронов.

Таблица. Электрические свойства структур n-InSb-i-GaAs

Доза, эл./см. ²	n, см ⁻³	μ , см ² /(В×с)
Исходный	$(5,4 \pm 0,5) \times 10^{16}$	$(21 \pm 2) \times 10^3$
$2,5 \times 10^{13}$	$(1,7 \pm 0,1) \times 10^{19}$	$(11,1 \pm 0,8) \times 10^3$
$2,5 \times 10^{14}$	$(1,82 \pm 0,13) \times 10^{19}$	$(10,2 \pm 0,7) \times 10^3$

В результате исследования установлено, что концентрация носителей зарядов возрастает при облучении. Предполагается, что имеет место переход валентных электронов в зону проводимости вследствие внутренней ионизации, вызванной облучением. При этом подвижность носителей заряда при облучении пучком электронов с дозой $2,5 \cdot 10^{13}$ эл./см² уменьшается в 2 раза. Увеличение дозы облучения структур n-InSb-i-GaAs до $2,5 \cdot 10^{14}$ эл./см² не приводит к изменению значений концентрации и подвижности носителей заряда.

Литература

[1] Новиков, Л.С. *Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учебное пособие* / Л. С. Новиков, Университетская книга, Москва, 2010, с. 192.

[2] Maissel, L. I. *Handbook of Thin Film Technology*, New York, 1970, p. 800.

[3] Е. А. Kolesnikova [et al.], *Journal of the Belarusian State University. Physics*. № 3 (2021) p. 20.

МЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В Si₃N₄, ОБЛУЧЕННОМ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

А.Т. Жумажанова^{1,2}, А.К. Мутали^{1,2,3}, А.Д. Ибраева^{1,2,3}, В.А. Скуратов^{3,4,5},
А.К. Даулетбекова^{1,2}, Е.А. Корнеева³, А.Т. Акылбеков¹, М.В. Здоровец^{1,2,6}

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

²Астанинский филиал Института ядерной физики, Нур-Султан, Казахстан

³Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия (skuratov@jinr.ru)

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

⁵Университет «Дубна», Дубна, Россия

⁶Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Облучение тяжелыми ионами с энергиями 1÷3 МэВ/нуклон характеризуется ярко выраженным неоднородными профилями удельных потерь на ионизацию и упругое рассеяние. При этом уровень потерь энергии изменяется в очень широких пределах, что в свою очередь, приводит к неоднородному пространственному распределению радиационных повреждений и, как следствие, механических напряжений. Для энергий ~ 1 МэВ/нуклон, представляющих наибольший интерес с практической точки зрения для моделирования воздействия осколков деления, эта величина находится в пределах, от нескольких микрон до 10 микрон. Следовательно, для получения достоверной информации о профилях напряжений необходимо использовать экспериментальные методы с пространственным разрешением ~ 1 микрон. Подобная точность может быть достигнута в методиках, основанных на применении пьезоспектроскопического эффекта, связывающего спектральный сдвиг в оптических спектрах поглощения, люминесценции, или рамановского рассеяния, с величиной механических напряжений [1,2].

В настоящей работе методы рамановской спектроскопии с пространственным разрешением были использованы для изучения профилей остаточных механических напряжений в поликристаллическом нитриде кремния, облученном ионами Хе (167 МэВ, $1 \times 10^{11} \div 4.87 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$) и Вi (710 МэВ, $1 \times 10^{11} \div 1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$). Уровень напряжений определялся по сдвигу линии 862 см^{-1} в спектрах комбинационного рассеяния. Установлено, что в облученном слое формируются поля напряжений различного знака, разделенные буферной зоной, находящейся на глубине, совпадающей с толщиной слоя образца, аморфизованного при высоких флюенсах ионов за счет многократного перекрытия трековых областей. Предполагается, что область действия сжимающих напряжений ограничена зоной формирования латентных треков. На больших глубинах регистрируются растягивающие напряжения, уровень которых достигает максимального значения в области конца пробега ионов. Размер аморфизованного слоя оценивался также из дозовой зависимости ширины на полувысоте доминирующей линии 204 см^{-1} и данных сканирующей электронной микроскопии.

Работа выполнена в рамках проекта МОН РК АР 08856368 «Радиационная стойкость керамик на основе нитридов и карбидов по отношению к воздействию тяжелых ионов с энергиями осколков деления»

Литература

[1] Murari N. et al. Raman piezo-spectroscopic behavior of aluminum nitride // *Applied spectroscopy*. – 1997. –v. **51**. – pp. 1761-1765.

[2] Ma Q., Clarke D. R. Stress measurement in single -crystal and poly
using their optical fluorescence // *Journal of the American Ceramic Society*. –1993. –v. **76**. –

РАСЧЕТ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ЛЕНТОЧНЫХ ВТСП КОМПОЗИТАХ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

И.В. Мартиросян, Д.А. Абин, А.И. Подливаев, И.А. Руднев
 Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия
 (mephizic@gmail.com)

В докладе представлены результаты численного анализа радиационных повреждений в высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) ленточных композитах. Нами проведена подготовка и адаптация программных продуктов для проведения численного моделирования процессов дефектообразования в ВТСП материале. Сформулирован алгоритм экспрессной экспериментальной методики, позволяющей оценить неоднородность критического тока сверхпроводящего слоя по толщине пленки, которая возникла в результате облучения сверхпроводника быстрыми заряженными частицами (водород и гелий). Посредством пакета SRIM/TRIM рассчитаны профили радиационного повреждения этими частицами в ВТСП слое (см. рисунок). Данная методика может применяться для исследования неоднородности сверхпроводящих свойств ВТСП слоя во внешних магнитных полях. Показано, что для изучаемого образца сверхпроводящего слоя GdBaCuO-123, методика может применяться при значении величины индукции внешнего магнитного поля $B_{ext}=0.1$ Тл и выше. Проведен расчет числа смещений на атом (сна) при различных флюенсах облучения. Была обнаружена следующая особенность радиационной деградации сверхпроводящих свойств ВТСП пленки. После облучения образцов сверхпроводящего композита с различным покрытием неоднородность критического тока по толщине существенно зависела от характера покрытия, но не зависела от типа облучения. В дальнейшем предполагается расширить проведенные расчеты на быстрые ионы более тяжелых элементов.

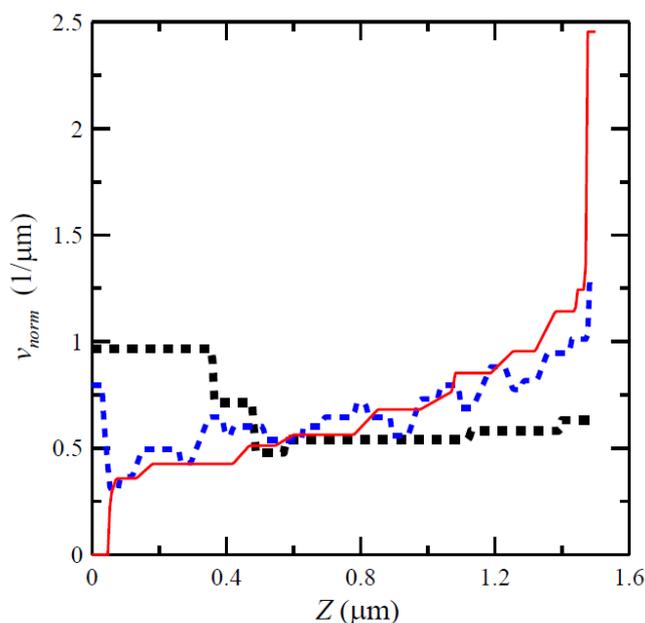


Рис. Нормированная плотность радиационных вакансий при облучении ионами гелия (Жирная прерывистая черная линия образец с защитными слоями меди и серебра; средняя

прерывистая синяя линия образец с защитным слоем только серебра; тонкая сплошная красная линия - образец без защитных слоев)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Росатома в рамках научного проекта № 20-21-00085



VII. Техника и методика эксперимента

В Программу Семинара традиционно включается методическая секция с целью ознакомить участников с последними методическими разработками в области радиационной физики и радиационного материаловедения, дать информацию о новых источниках излучений, а также по применению новых методов исследования конденсированных сред.

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

Roman Petrov, Deputy Director; Alexey Baranov, General Manager
*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.



REVEALING HIDDEN DEFECTS THROUGH STORED ENERGY MEASUREMENTS OF RADIATION DAMAGE

Charles A. Hirst¹, Fredric Granberg², Boopathy Kombaiiah³, Penghui Cao⁴, Scott Middlemas³, R. Scott Kemp¹, Ju Li^{1,5}, Kai Nordlund², Michael P. Short^{1,3},

¹*Dept. Nuclear Science and Engineering, Massachusetts of Tech., Cambridge, MA 02139, USA (hereiam@mit.edu)*

²*Dept. Physics, University of Helsinki, P.O. Box 43, FIN-00014, Helsinki, Finland*

³*Materials and Fuels Complex, Idaho National Laboratory, Idaho Falls, ID 83415, USA*

⁴*Dept. Mechanical and Aerospace Engineering, Univ. California Irvine, Irvine, CA, USA*

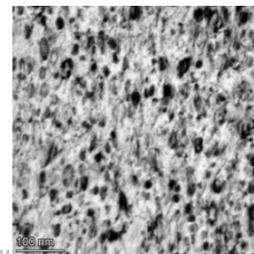
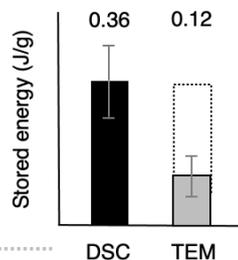
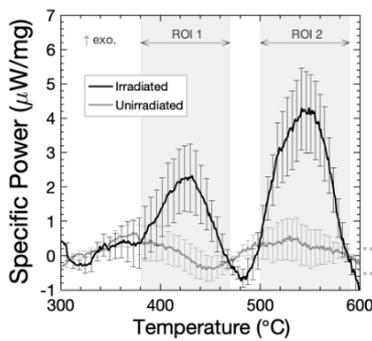
⁵*Dept. Materials Science and Engineering, Massachusetts of Tech., Cambridge, MA 02139, USA*

With full knowledge of a material's atomistic structure, it is possible to predict any macroscopic property of interest. In practice, this is hindered by limitations of the chosen characterization techniques. For example, electron microscopy is unable to detect the smallest and most numerous defects in irradiated materials. Instead of spatial characterization, we propose to detect and quantify defects through their excess energy. Differential scanning calorimetry (DSC) of irradiated Ti measures defect densities 3 times greater than those determined using transmission electron microscopy. Our experiments also reveal two energetically-distinct processes where the established annealing model predicts one. Molecular dynamics (MD) simulations discover the defects responsible and inform a new mechanism for the recovery of irradiation-induced defects. The combination of annealing experiments and simulations can reveal defects hidden to other characterization techniques, and it has the potential to uncover new mechanisms behind the evolution of defects in materials.

Annealing radiation damage

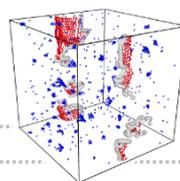
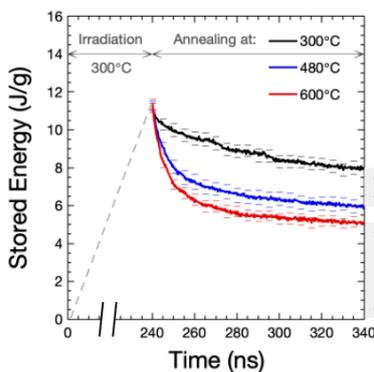
Stored energy measures hidden defects

Experiments

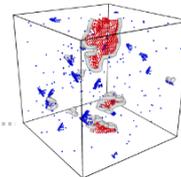


Additional stages of recovery are revealed

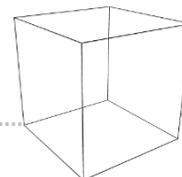
Simulations



1. Dislocation loops glide through a field of point defects & small clusters annihilating them.



2. Dislocations (loops & network) annihilate at sinks and with each other.



ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В НЕЙТРОННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ИФМ УРО РАН

В.И. Бобровский, А.Ф. Губкин

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

Масштаб проявлений радиационно-индуцированных процессов в конструкционных реакторных материалах простирается от параметра кристаллической ячейки до макроскопических размеров образца, охватывая формирование нанокластеров, преципитатов, дислокаций, сеток внутренних напряжений, пор, а также изменения в зеренной структуре и радиационно-стимулированное набухание и ползучесть материала. Соответственно, достаточно полное исследование их должно носить мультимасштабный характер, опираясь на комплексное использование различных экспериментальных методов, занимающих свои “экологические ниши”. На наноуровне важные результаты способны дать электронная микроскопия, мессбауэровская, атомно-зондовая и позитрон-аннигиляционная спектроскопии, а также малоугловое рассеяние нейтронов. В масштабах проявления дифракционных эффектов – нейтронно- и рентгеноструктурный анализ. Полезные результаты могут принести магнитные измерения. А далее начинается сфера исследований макроскопических свойств.

Используя метод нейтронной дифракции, можно определить, прежде всего, кристаллографические параметры решетки материала: ее сингонию и группу симметрии, параметры решетки, числа заселенности кристаллографических позиций. Но вдобавок к такой информации дифракционный спектр отражает и важные особенности микроструктурного состояния образца, проявляющиеся в виде несовершенства кристаллической решетки. Современные методы нейтронно-дифракционного анализа позволяют установить на основании экспериментальных данных наличие и параметры текстуры образца, размеры областей когерентного рассеяния, величину и анизотропию внутренних микродеформаций решетки, обусловленных полями микронапряжений, которые могут генерироваться как в окрестности дислокаций, так и преципитатов. Естественно, на нейтронных дифрактограммах немедленно фиксируется изменение фазового состава материала, причем с возможностью проведения анализа микроструктурного состояния для каждой из фаз. Методики проведения такого анализа хорошо разработаны, реализованы в виде программных пакетов и продолжают развиваться далее.

Нейтронный материаловедческий комплекс ИФМ УрО РАН (НМК ИФМ) располагает возможностями и уникальным опытом работ с высокоактивными конструкционными материалами, в том числе, после их реальной эксплуатации в промышленных быстрых реакторах. В НМК ИФМ функционируют три нейтронных дифрактометра, имеются также вибрационный магнитометр, рентгеновский дифрактометр и мессбауэровский спектрометр, приспособленные для исследования радиоактивных образцов.

Наиболее перспективным путем развития дальнейших исследований данных материалов нам представляется развитие научной кооперации с АО «Институт реакторных материалов» и объединение наших экспериментальных возможностей для решения задач радиационного материаловедения.

Работы выполняются в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Поток»).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РАДИАЦИОННОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ 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

Развитие современных космических систем сталкивается с необходимостью разработки новых экспериментальных методов оценки радиационной стойкости конструкционных материалов непосредственно в условиях космоса, так как экспозиция в космосе отдельных образцов материалов [1] для последующего их изучения на Земле не может обеспечить непрерывный контроль и не может дать достаточное количество данных ввиду сложности и дороговизны аккуратного возврата образцов из космоса. В 2020-м году нами был разработан новый метод – изготовление экспериментальных установок в виде спутников Земли. Это явилось новым в мировом масштабе, патентоспособным и на удивление недорогим решением ввиду выхода на серийное производство и стоимость при этом в 2-3 миллиона рублей базовой части спутников, в которую мы планируем помещать и образцы материалов, и различные исследующие их приборы, пересылающие данные на Землю в течении многих лет работы на орбитах. Вакуум и различные радиационные воздействия открытого космоса являются здесь приятно бесплатным естественным приложением.

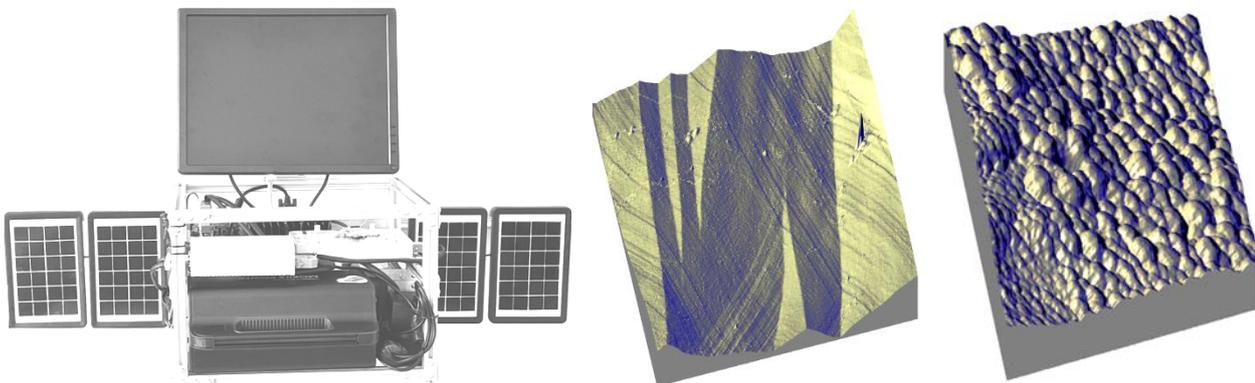


Рис.1. Рабочий прототип первого в мире зондового микроскопа-спутника Земли (слева) и полученные кадры 8x8 мкм поверхности висмута до (по центру) и после (справа) воздействий с параметрами солнечного ветра скоростей потока ионов до 200 км/с.

Более чем 30-летний задел [2] по конструированию радиационно-стойких зондовых микроскопов с разрешением до 1 нм позволил нам создать первую такую лабораторию (рис.1) – спутник в виде первого в мире зондового микроскопа, запуск которого планируется на лето 2022 года. Ряд организаций, в том числе Военная академия связи им. С.М.Буденного, несколько университетов и институтов РАН - начали готовить актуальные образцы [3], например, графена [4], висмута и пьезокерамики, однако представляется значимым участие в этом и имеющих передовой задел в радиационном материаловедении организаций атомной отрасли России.

Литература:

[1] Беспалов В.А., Логинов Б.А., Новиков Л.С., Никитушкина О.Н., *Физика и химия обработки материалов*, 2008, № 2, с.28

[2] Суворов А.Л., Логинов Б.А., Макеев О.Н., Патент на изобретение № RU 2169954 С1

[3] Логинов Б.А., *Наноиндустрия*, 2021, № 5, с.270

[4] Левин К.Л., Беспалова Е.А., Ванькаев А.С., Клюкина Е.В., Лопатин А.В., Метальников Н.М., Сапрыкин М.Э., Логинов А.Б., Оразов И.В., Логинов Б.А., *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 2021, № 9, с.51

ПРОФИЛОМЕТРИЯ И КОНТУРОГРАФИЯ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТАНОВОК АТОМНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В.Б. Логинов¹

¹АО «Завод ПРОТОН», Зеленоград, Москва, Россия (metrology@z-proton.ru)

Современное развитие атомной энергетики требует всё более точного изготовления деталей установок, а также контроля изменения формы и структуры поверхности деталей в процессе эксплуатации. Контроль подвергшихся радиационному воздействию поверхностей материалов позволяет выявить покрытия и материалы с наибольшим сроком эксплуатации. Хорошо развитым и стандартизированным методом определения качества поверхностей детали и исследования структуры поверхностей является метод профилометрии, заключающийся в «ощупывании» поверхности алмазным зондом с радиусом острия около 1 мкм вдоль линии с последующим отображением профиля с точностью до 1 нм по вертикали и вычислением параметров шероховатости. Однако выпускаемые в мире профилометры не приспособлены к измерениям шероховатости специфичных для атомной промышленности вогнутых и криволинейных поверхностей. Являясь в России единственными изготовителями профилометров (модель 130) [1], наша организация по просьбе РФЯЦ-ВНИИТФ (г.Снежинск) в 2021 году разработала и апробировала для этого принципиально новые конструкции датчиков вертикального типа для таких задач, что позволяет существенно расширить область применения профилометров для задач ядерной отрасли.

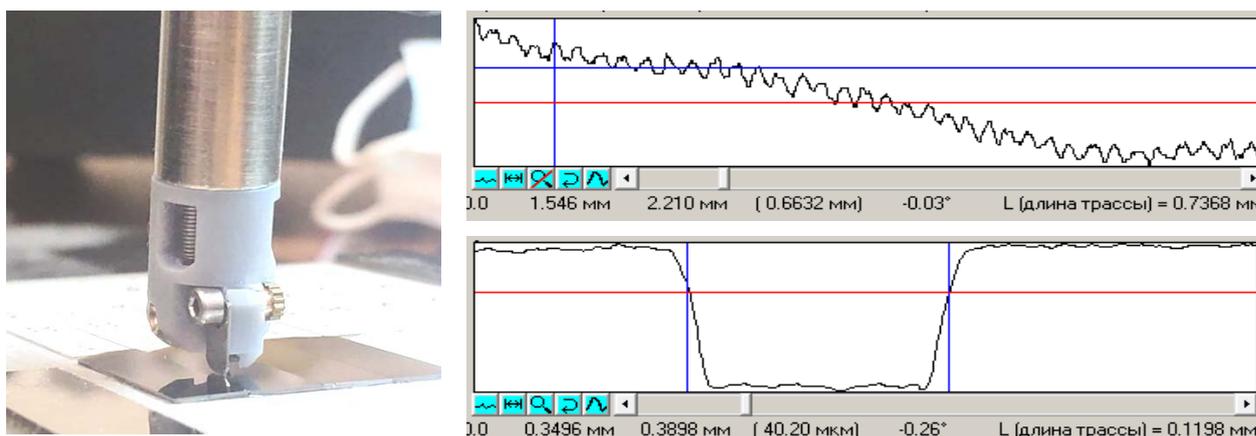


Рис. 1. Рабочий прототип первого в мире вертикального датчика для измерения шероховатости поверхности (слева), а также получаемые профили с возможностью оцифровки каждого дефекта поверхности с вычислением их геометрии.

Для контроля геометрии деталей с точностью до 1 мкм при деталях до 1 метра, особенно при их сложной форме, нами также разработан и запатентован [2] первый в России контурограф (модель 220) - прибор для измерения контура поверхности и оцифровки геометрических размеров [3] - радиусов кромок, углов, высот ступенек, параметров резьбы и прочих размеров. Апробация этого прибора успешно прошла почти в

20-ти организациях разных отраслей, в том числе в АО «Точмаш» (г.Владимир) и ПО «Маяк» (г.Озерск), и имеет потенциал для применения в атомной промышленности.

Литература:

[1] Логинов В.Б., Троян В.И., Борисюк П.В., Чубунова Е.В., Елкин А.Г., Логинов Б.А., *Измерительная техника*, 2015, № 5, с.21

[2] Елкин А.Г., Логинов Б.А., Логинов В.Б., Троян В.И., *Патент RU 2537363 C2*

[3] Логинов В.Б., Троян В.И., Елкин А.Г., Логинов Б.А., Борисюк П.В., Борман В.Д., Тронин В.Н., *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2014, № 5, с.52

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

A		P		Д
Alekseeva Liudmila77		Petrov Roman 87		Данилов С.Е. 13
B		S		Даулетбекова А.К. 82
Baranov Alexey87		Short Michael P. 88		Дегтярев Н.А. 19
Barashev A.V.18		Skuratov Vladimir 77, 79		Демидов Д.Н. 4, 6
C		Smirnova E.A. 3		Дёмин А.С. 10
Caو Penghui88		Sohatsky Alexander 77		Дуб А.В. 9
D		Z		Дубков С.В. 28
Douglas-Henry D.A.78		Zdorovets Maxim 79		Дубровин Е.Н. 47
G		A		Дудкин В.А. 45, 46, 47
Garner F.A.31		Абади Г. 38		Е
Golubov S.I.18		Абдулвагидов Р.Э. 46		Евсеев М.В. 20, 23
Granberg Fredric88		Абин Д.А. 80, 83		Епифанов Н.А. 10
Gussev M.N.31		Аверин С.А. 20, 24		Еремина М.А. 61
H		Аверкиев И.К. 52		Ж
Hirst Charles A.88		Аккузин С.А. 32		Жемков И.Ю. 7
I		Акылбеков А.Т. 82		Жихарев А.В. 67
Ibraeva Anel79		Алексеев П.А. 53, 56		Жумажанова А.Т. 82
Ibrayeva A.77		Алмаева К.В. 19, 32		З
IVANOV Alexandre51		Б		Завалишин В.А. 34
J		Бакиева О.Р. 52, 71		Заворницын Р.С. 62
Janse van Vuuren Arno77, 79		Балаев Д.А. 54		Залужный А.Г. 27, 30
K		Банникова Н.С. 62		Заматовский А.Е. 31
Kemp R. Scott88		Баянкин В.Я. 61, 66, 67, 69		Здоровец М.В. 36, 37, 38, 82
Kombaiyah Boopathy88		Белов М.М. 37		Злоцкий С.В. 36, 37, 38
Korzhavyy P.A. 3		Белоногов М.Н. 26		И
L		Бобровский В.И. 63, 89		Ибраева А.Д. 82
Li Ju88		Богачев А.А. 27, 30		Иванов И.А. 36
M		Богучава Г.Д. 30		Илюшин В.В. 70
Middlemas Scott88		Бондаренко Г.Г. 10		Исинбаев А.Р. 14, 24
Mutali A.77		Боровицкая И.В. 10		Искандаров Н.А. 30
N		Быков П.В. 61, 69		Искандарова Е.Ф. 22, 43
Neethling J.H.17		Быстров С.Г. 67		К
Nordlund Kai88		В		Казаков В.А. 45, 46
Nourazar M. 3		Веремей И.С. 38		Казанцев В.А. 13
O		Вичужанин Д.И. 72		Карагерги Р.П. 23
O'Connell J.77		Волкова Т.С. 22, 43		Картапова Т.С. 61
O'Connell J.H.17, 78		Воробьев В.Л. 61, 69		Катаева Н.В. 34
Olivier E.J.17		Воронин В.И. 63		Кашченко М.П. 11, 70
		Г		Кашченко Н.М. 11, 70
		Гайдар А.И. 10		Ке Д. 37
		Гильмутдинов Ф.З. 61		Кияшко М.В. 36
		Глушкова Н.В. 9		Клауз А.В. 27, 30
		Горшкова Ю.Е. 30		Климова И.Н. 69
		Гринчук П.С. 36		Коваленко М.А. 70
		Громов Д.Г. 28		Козлов А.В. 9, 14, 21, 23, 24, 31
		Губкин А.Ф. 89		Козлов К.А. 14, 31
		Гущина Н.В. 62, 63, 72, 73		Козлов П.В. 44, 47
				Козловский А.Л. 36
				Козловский Л.А. 37, 38
				Колесникова Е.А. 81
				Колотов А.А. 52, 66, 69
				Коренев С.В. 47

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

Корнеева Е.А. 65, 82
 Корсунский А.М. 65
 Крашенинников Ю.М. 7
 Краюхин С.А. 70
 Крупатин И.Н. 65
 Кузнецов А.Р. 5
 Кулешов А.К. 81
 Кулешова Е.А. 35
 Купряжкин А.Я. 70

Л

Ладейщиков К.М. 9, 21
 Лазуков В.Н. 53, 56
 Латышев С.В. 10
 Леви Е.А. 26
 Леонтьева-Смирнова М.В. . 19, 32,
 34
 Линник В.В. 19, 32
 Литовченко И.Ю. 19, 32
 Логинов Б.А. 90
 Логинов В.Б. 91
 Лукьянчук А.А. 27, 30

М

Макаров Е.В. 73
 Макаров Е.И. 7
 Мальцев Д.А. 35
 Марголин Б.З. 35
 Маркелов Д.Е. 7
 Мартиросян И.В. 80, 83
 Масляев С.А. 10
 Мережко Д.А. 31
 Мережко М.С. 31
 Миляев М.А. 62
 Мирмельштейн А.В. 55
 Мороз К.А. 19
 Морозов Е.В. 10
 Мутали А.К. 82

Н

Набойщиков Ю.В. 7
 Нежданов А.Г. 23
 Немковский К.С. 51
 Неустроев В.С. 7
 Никитин А.А. 27, 30
 Никитина А.А. 9, 31, 34
 Николаев А.Л. 7
 Новиков Д.В. 28

О

Овчаренко А.М. 12
 Овчинников В.В. . 8, 62, 63, 64, 72,
 73
 Осипов М.А. 80

П

Панкратова О.М. 44
 Панченко В.Л. 9, 31
 Пастухов В.И. 23
 Перминов Д.А. 7
 Печорский В.И. 70
 Пименов В.Н. 10
 Погляд Н.С. 7
 Подливаев А.И. 83
 Покровский С.В. 80
 Полехина Н.А. 19, 32
 Портных И.А. 14, 23, 24
 Проскурнина Н.В. 63

Р

Разницын О.А. 27, 30
 Ремизов М.Б. 44, 47
 Рогожкин С.В. 27, 30
 Руднев И.А. 80, 83
 Рудских В.В. 22, 43
 Русальский Д.П. 81
 Рыскулов А.Е. 37, 38

С

Савицкий А.И. 28
 Савченков П.С. 53, 56
 Сагарадзе В.В. 5, 6, 13, 31, 34
 Салимон А.И. 65
 Самедов В.К. 24
 Санников И.В. 26
 Санникова П.А. 26
 Сасиновская И.П. 10
 Сафонов Д.В. 35
 Сафонов И.А. 9
 Семёнкин В.А. 73
 Сивак А.Б. 4, 6
 Сивак П.А. 6
 Сивак П.А. 4
 Скоробогатов С.А. 54
 Скуратов В.А. 65, 82
 Смирнов М.Б. 70
 Созонова Н.М. 67, 71
 Соколовский Д.А. 7
 Сомов П.А. 65

Сохацкий А.С. 65
 Стариков С.А. 5
 Стариковский А.С. 80
 Старовойтов Н.П. 45, 46
 Статник Е.С. 65
 Степанов Н.В. 35
 Субботин В.Г. 26

Т

Тарасенков А.Н. 28, 69
 Татауров Е.Ю. 22, 43
 Тетельбаум Д.И. 66
 Тетеруков Е.В. 81

У

Углов В.В. 36, 37, 38, 81

Ф

Фазылов Р.Р. 26
 Фролов А.С. 35

Х

Хаметова Э.Ф. 52
 Хмельницкий Д.В. 26
 Холод В.М. 36
 Хомич А.А. 27, 30

Ц

Цыгвинцев В.А. 20

Ч

Чепелев Ю.Л. 70
 Чернов В.М. 19, 32

Ш

Шабашов В.А. 13, 31
 Шайдуллин С.М. 44
 Шайхутдинов К.А. 54
 Шаломов К.В. 62, 63, 72
 Шелан В.А. 26
 Шиляева Ю.Г. 69
 Шутов А.С. 27, 30
 Шушков А.А. 69

Я

Ярков В.Ю. 20, 23, 24

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

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН, тираж 90 экз., заказ №02,
 объем 3,1 печ.л., формат 298 x 210,
 620137, г. Екатеринбург, ул. С.Ковалевской, дом №18, ИФМ УрО РАН