

Двенадцатый Международный Уральский Семинар



РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

27 февраля - 4 марта

Тезисы докладов

**Кыштым, Россия
2017**

Организационный комитет:

Б.Н. Гощицкий, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Со-
председатель
Е.Н. Аврорин, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Со-
председатель
В.В. Плохой, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Зам.
председателя
В.В. Сагарадзе, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург,
Зам. председателя
Л.С. Талантова, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Зам.
председателя
В.Л. Арбузов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург,
Учёный секретарь Семинара
В.И. Бобровский, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
В.В. Дрёмов, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
А.Г. Залужный, ИТЭФ, Москва
Ю.Н. Зуев, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.С. Кортов, УГТУ-УПИ, Екатеринбург
М.В. Леонтьева-Смирнова, ВНИИНМ, Москва
А.В. Мирмельштейн, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
А.Л. Николаев, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
В.В. Овчинников, ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург
В.Ф. Терещенко, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

Международный консультативный комитет:

П.А. Алексеев, Moscow, Russia
F.A. Garner, Richland, USA
S.I. Golubov, Oak Ridge, USA
E.M. Ibragimova, Ulugbek, Uzbekistan
M.A. Kirk, Argonne, USA
Ю.В. Конобеев, Обнинск, Россия

Организаторы семинара:

Институт физики металлов УрО РАН
Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИТФ
Научный Совет РФТТ ОФН РАН

Программный комитет:

В.В. Сагарадзе, ИФМ УрО РАН
А.Г. Залужный, ИТЭФ, Москва
А.В. Козлов, ИРМ, Заречный
В.С. Кортов, УГТУ-УПИ, Екатеринбург
М.В. Леонтьева-Смирнова, ВНИИНМ, Москва
А.В. Мирмельштейн, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск
В.В. Овчинников, ИЭФ УрО РАН
С.В. Рогожкин, ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ, Москва
В.М. Чернов, ВНИИНМ, Москва

Секретариат:

В.Л. Арбузов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Учёный
секретарь Оргкомитета
Д.А. Перминов, ИФМ УрО РАН, Россия, Референт
Оргкомитета
С.Е. Данилов, ИФМ УрО РАН, Россия
В.В. Дрёмов, РФЯЦ-ВНИИТФ, Россия
Н.М. Клейнерман, ИФМ УрО РАН, Россия
Е.И. Лаврукова, ИФМ УрО РАН, Россия
А.В. Литвинов, ИФМ УрО РАН, Россия
Г.М. Соломина, ИФМ УрО РАН, Россия
Celia M. Elliott, University of Illinois at Urbana-
Champaign, USA

Комиссия по подведению итогов конкурса молодых докладчиков:

В.В. Сагарадзе, Председатель
В.Я. Баянкин
В.Н. Брудный
А.Г. Залужный
Ю.Н. Зуев
В.С. Неустроев
С.В. Рогожкин

Наши спонсоры:

Госкорпорация по атомной энергии «Росатом»,
Москва
Российский Фонд Фундаментальных Исследований,
Москва (Проект №17-02-20015)
РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск
ФГУП ПО «Маяк»
ИФМ УрО РАН, Екатеринбург
Elliott Celia M., USA
Garner F.A., USA

Организационный комитет сердечно благодарит спонсоров за их поддержку Российской науки и выражает особую благодарность Селии Эллиотт (США) и Фрэнку Гарнеру (США), Российскому Фонду Фундаментальных Исследований за финансовую поддержку молодых ученых–участников Семинара. Мы надеемся, что наша встреча в Кыштыме будет способствовать расширению и укреплению научных контактов.

I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ	1
THE STORED ENERGY FINGERPRINTS OF RADIATION DAMAGE	3
Penghui Cao, Charles Hirst, Rachel Connick, Cody Dennett, Sara Ferry, Sean Lowder, Ki-Jana Carter, Kevin Menard, Brian Turner, Ju Li, R. Scott Kemp, <u>Michael Short</u>	
АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАМЕЩЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН И КИНЕТИКИ РАСПАДА	3
<u>А.Р. Кузнецов</u> , М.В. Петрик, Ю.Н. Горностырев, Л.Е. Карькина, И.Н. Карькин, П.А. Коржавый	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ И АТОМОВ УГЛЕРОДА ПРИ СЕПАРАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В Ni ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ И НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ	4
<u>С.Е. Данилов</u> , В.Л. Арбузов, Б.Н. Гощицкий, В.Д. Пархоменко	
ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА КИНЕТИКУ ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	5
А.Г. Залужный	
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ПРИМЕСЕЙ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ ДИФФУЗИИ И РОСТ ГЕЛИЕВЫХ ПУЗЫРЬКОВ НА ГРАНИЦАХ ЗЁРЕН В АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ	6
<u>Д.Н. Демидов</u> , Е.А. Смирнов, А.Б. Цепелев	
ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДАЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ МЕТАЛЛОВ	7
<u>В.М. Чернов</u> , К.А. Мороз	
ВЛИЯНИЕ ТИТАНА И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭВОЛЮЦИЮ ВАКАНСИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ИССЛЕДОВАННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	8
<u>А.П. Дружков</u> , Д.А. Перминов, В.Л. Арбузов	
ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ЧИСТОГО НИКЕЛЯ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ И ПОСЛЕДУЮЩИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ОТЖИГОВ (НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)	8
<u>В.И. Воронин</u> , И.Ф. Бергер, Н.В. Проскурнина, Б.Н. Гощицкий	
ДИФФУЗИОННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ПРОЦЕССЕ РАДИАЦИОННОЙ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ	9
<u>В.В. Сагаралзе</u> , В.А. Шабашов, Н.В. Катаева, К.А. Козлов, А.В. Литвинов, В.Л. Арбузов, С.Е. Данилов, Б.Н. Гощицкий	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ АЛЬФА ФАЗЫ В СТАЛИ С ОСНОВОЙ X18Ni10T ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДО ДОЗЫ 150 СНА В РЕАКТОРЕ БОР-60	11
<u>Д.Е. Маркелов</u> , А.В. Обухов, Е.И. Макаров, В.С. Неустроев	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА СПЛАВА Fe-30Cr ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ МЕТОДОМ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ	11
<u>Т.Н. Букатин</u> , О.А. Корчуганова	
КВАНТОВАЯ МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДИНАМИКА: УСКОРЕННЫЙ РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РЕПЛИК	12
<u>И.И. Новоселов</u> , А.В. Янилкин	
МД МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ САМООБЛУЧЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ДИСЛОКАЦИЙ В δ-Pu	13
<u>А.В. Караваев</u> , В.В. Дремов, Г.В. Ионов	

СОДЕРЖАНИЕ

МИГРАЦИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОЛЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР <u>А.В. Козлов, В.И. Пастухов, И.А. Портных</u>	14
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В МОЛИБДЕНЕ С ПОМОЩЬЮ КЛАСТЕРНОЙ ДИНАМИКИ <u>А.Ю. Куксин, А.В. Янилкин</u>	15
МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОНАПОЛНЕННОГО ОБРАЗЦА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ <u>Е.И. Макаров, Н.В. Киреев, В.С. Неустроев, Д.Е. Маркелов, С.В. Белозеров</u>	16
РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ПОСЛОЙНЫХ ПОЛЕВЫХ ИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЛАТИНЫ, ОБЛУЧЕННОЙ ИОНАМИ Ar^+ ($E = 30$ КЭВ) <u>В.А. Ивченко, В.В. Овчинников, К.В. Шаломов</u>	17
РОЛЬ НАНОМАСШТАБНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ КАСКАДООБРАЗУЮЩЕМ ОБЛУЧЕНИИ <u>В.В. Овчинников</u>	17
СИЛЫ СТОКА ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОЦК МЕТАЛЛАХ Fe И V <u>А.Б. Сивак, С.В. Коровин, П.А. Сивак, В.М. Чернов</u>	19
ЭВОЛЮЦИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ И ВАКАНСИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СТАРЕЮЩЕГО СПЛАВА Fe-Ni-Al <u>Д.А. Перминов, А.П. Дружков, С.Е. Данилов, В.Л. Арбузов</u>	20
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИСЛОКАЦИОННЫХ СТОКОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ И ДИСЛОКАЦИОННЫЙ ПРЕФЕРЕНС В δ-Pu <u>С.В. Коровин, П.А. Сивак, А.Б. Сивак</u>	20
<u>II. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</u>	<u>23</u>
CARBON CONTAMINATION, ITS CONSEQUENCES, AND ITS MITIGATION DURING CHARGED PARTICLE SIMULATION OF NEUTRON-INDUCED VOID SWELLING <u>Lin Shao, Jonathan Gigax, Di Chen, Hyosim Kim, Frank A. Garner, Jing Wang, Mychailo B. Toloczko, S.A. Maloy</u>	25
EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF NUCLEAR REACTOR STRUCTURAL COMPONENTS WITH INNOVATIVE TESTING METHODS <u>M. Culek, R. Kopriva, M. Falcnik, I. Eliasova, B. Maresova, M. Kytka</u>	25
NEW INSIGHTS ON STRAIN HARDENING BEHAVIOR AND “TRAVELING WAVE” DEFORMATION MODES IN NEUTRON-IRRADIATED AUSTENITIC STEELS <u>Maxim N. Gussev, David A. McClintock, Frank Garner</u>	27
SWELLING, CREEP AND EMBRITTLEMENT OF D9 STAINLESS STEEL CLADDING AND DUCT IRRADIATED IN THREE FFTF DRIVER FUEL ASSEMBLIES TO HIGH NEUTRON EXPOSURES <u>F.A. Garner, B.J. Makenas, S.A. Chastain</u>	27
ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ТЯЖЕЛОИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ ОКСИДАМИ СТАЛИ <u>А.А. Богачев, С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, В.А. Скуратов, Ch. Trautmann</u>	28
ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГОМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ СО СТРУКТУРОЙ АУСТЕНИТА <u>А.В. Макаров, С.Н. Лучко, В.А. Шабашов, Е.Г. Волкова, А.Л. Осинцева, А.В. Литвинов, А.Е. Заматовский, В.В. Сагарадзе</u>	29

СОДЕРЖАНИЕ

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК (N, Mn, Cu, W) НА КОРРОЗИОННЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ AISI 316L	30
Д.А. Мережко, <u>М.С. Мережко</u> , О.П. Максимкин, М.Н. Gussev, J.T. Busby	
ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ИСПЫТАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВОЕ $\gamma \rightarrow \alpha$ ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ X18H9	31
О.П. Максимкин, С.В. Рубан, Л.Г. Турубарова	
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe НА НАНОСТРУКТУРУ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЧС-139	32
<u>Н.А. Искандаров</u> , А.А. Лукьянчук, А.С. Шутов, С.В. Рогожкин, А.Г. Залужный, Т.В. Кулевой, Р.П. Куйбида, С.Л. Андрианов, М.В. Леонтьева-Смирнова, Е.М. Можанов	
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА СКЛОННОСТЬ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ И КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ СТАЛИ 06X18H10T	33
<u>О.А. Голосов</u> , Т.Л. Кузина, В.Б. Семериков	
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРОЧНЯЮЩЕГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ TiNbN	34
<u>А.С. Ларионов</u> , С.Б. Кислицин, И.Д. Горлачев	
ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МИКРОСТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X13M2БФР	35
О.П. Максимкин, К.В. Цай, С.В. Рубан, М.А. Отставнов	
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГРАФИТА ГР-280, ОБЛУЧЁННОГО ДО ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСОВ НЕЙТРОНОВ	36
<u>Е.П. Белан</u> , Р.Н. Гатауллин	
ДЕФОРМАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЯЕМОЙ НИТРИДАМИ ХРОМА СТАЛИ 08X22GA1.24	36
<u>К.А. Козлов</u> , В.А. Шабашов, А.В. Макаров, В.В. Сагарадзе, А.Е. Заматовский А.В. Литвинов	
ЗАВИСИМОСТЬ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ВИРТУАЛЬНОЙ КОРПУСНОЙ РЕАКТОРНОЙ СТАЛИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА	37
В.А. Николаенко, <u>Е.А. Красиков</u>	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ВЗАИМОСВЯЗИ РАДИАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ, ОБЛУЧЕННЫХ ДО ВЫСОКИХ ПОВРЕЖДАЮЩИХ ДОЗ	38
<u>В.С. Неустроев</u> , С.В. Белозёров, И.Ю. Жемков, Е.И. Макаров, Д.Е. Маркелов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ОСОБЕННОСТЕЙ РАДИАЦИОННОГО ПОРООБРАЗОВАНИЯ В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛ	39
<u>В.И. Пастухов</u> , С.А. Аверин, И.А. Портных	
ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ X18H10T ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ДО РАЗЛИЧНЫХ ПОВРЕЖДАЮЩИХ ДОЗ В РЕАКТОРЕ БОР-60	40
В.К. Шамардин, Т.М. Буланова, <u>А.А. Карсаков</u> , А.В. Обухов, Р.З. Валиев, И.В. Александров, М.М. Абрамова, Н.А. Еникеев	
КОМБИНИРОВАННЫЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ПЛАЗМЕННЫЙ СПОСОБ АЗОТИРОВАНИЯ АУСТЕНИТНОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ	41
<u>А.В. Макаров</u> , Г.В. Самойлова, Н.В. Гаврилов, А.С. Мамаев, А.Л. Осинцева, Р.А. Саврай, Т.Е. Куренных	
КОРРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛИ ЭК164 ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ	42
<u>И.А. Портных</u> , В.И. Пастухов, А.В. Барыбин	

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ И ГРАФИТА ВОДОРОДОМ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ Е.А. Красиков	43
МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ДЕЛЕНИЯ И СИНТЕЗА М.В. Леонтьева-Смирнова, В.М. Чернов	44
НАНОСТРУКТУРИРУЮЩИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ <u>А.В. Макаров</u> , П.А. Скорынина, Е.Г. Волкова, А.Л. Осинцева	45
ОБНАРУЖЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В КИНЕТИКЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОРПУСНЫХ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ <u>Е.А. Красиков</u> , В.А. Николаенко, А.Л. Суворов	46
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ОБЛУЧЕННЫХ В BOR-60 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 330-350°C <u>Е.И. Макаров</u> , В.С. Неустроев, С.В. Белозеров, Д.Е. Маркелов, А.В. Обухов, Ю.В. Набойщиков	47
СКЛОННОСТЬ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ И КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ И ОТЖИГА В ИНТЕРВАЛЕ 400-750°C А.В. Яровчук, О.П. Максимкин, Л.Г. Турубарова, О.В. Рофман	48
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АУСТЕНИТНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ СТАЛЕЙ ЧС68 И ЭК164 ПОСЛЕ ВЫСОКОДОЗНОГО ОБЛУЧЕНИЯ <u>М.В. Евсеев</u> , И.А. Портных, Н.В. Глушкова, А.В. Козлов, С.В. Барсанова	49
СТРУКТУРА МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧКИ ИЗ СПЛАВА УРАНА С МОЛИБДЕНОМ И ЦИРКОНИЕМ ПОСЛЕ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ <u>Д.А. Беляев</u> , А.С. Александров, Ю.Н. Зуев, Е.А. Козлов, И.Л. Святлов, Е.А. Леви	50
ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ АТОМНО-ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК <u>С.В. Рогожкин</u> , А.А. Никитин, Н.Н. Орлов, Н.А. Искандаров, О.А. Корчуганова, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын, А.С. Шутов, М.А. Козодаев, А.Г. Залужный	50
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЗУЧЕСТИ РОССИЙСКИХ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ, ВКЛЮЧАЯ ДУО МОДИФИКАЦИИ Т.Н. Кочеткова, <u>Н.В. Катаева</u> , В.В. Сагарадзе, К.А. Козлов, М.В. Смирнова-Леонтьева, А.Ю. Никитина	51
ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ СПЛАВА Zr-2,5%Nb ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДЛИТЕЛЬНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ 40-80°C <u>С.А. Аверин</u> , В.Л. Панченко, В.А. Цыгвинцев, В.И. Пастухов	52
<u>III. ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ВКЛЮЧАЯ СИЛЬНОКОРРЕЛИРОВАННЫЕ, МЕТОДАМИ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ, РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И ИЗМЕРЕНИЯ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ</u>	53
EXOTIC MAGNETISM IN STRONGLY CORRELATED ELECTRON SYSTEMS P.A. Alekseev	55
RECENT PROGRESS IN NEUTRON SCATTERING STUDIES OF COPPER- AND IRON-BASED SUPERCONDUCTORS <u>A.S. Ivanov</u>	56

СОДЕРЖАНИЕ

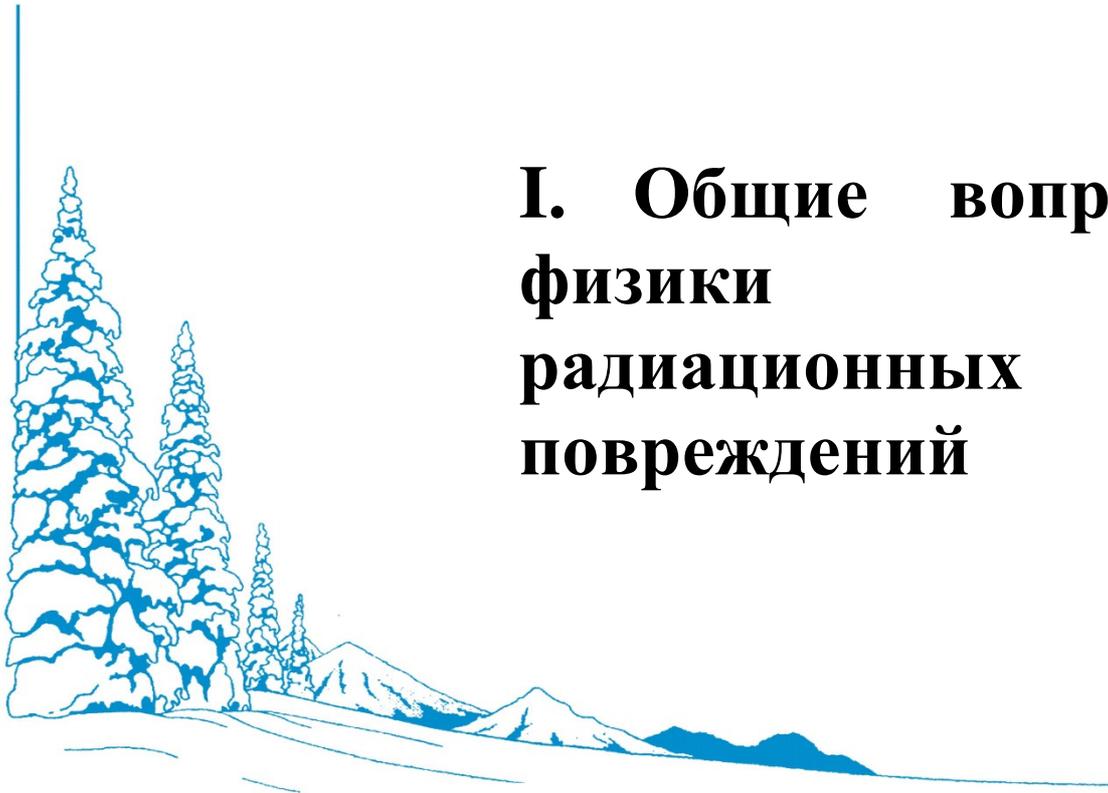
ВЛИЯНИЕ СПИН-ПЕРЕОРИЕНТАЦИОННОГО ПЕРЕХОДА НА РЕДКОЗЕМЕЛЬНУЮ ПОДСИСТЕМУ В $YbFeO_3$: ИЗИНГОВСКАЯ ЦЕПОЧКА С $S=1/2$ В ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.	57
С.Е. Никитин, L.S. Wu, A.S. Sefat, <u>К.А. Шайхутдинов</u> , Е.В. Помякушина, К. Conder, G. Ehlers, M.D. Lumsden, Z. Gai, А. Подлесняк	
ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ СПЛАВА U-6Nb МЕТОДАМИ ЯМР	57
<u>В.В. Оглобличев</u> , Ю.Н. Зуев, С.В. Верховский, С.В. Бондарчук, А.Г. Гермов, И.Л. Святов, З.Н. Волкова	
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТОУПРУГИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИБОРАТОВ	58
<u>А. Дубровский</u> , А. Фрейдман, А. Балаев, Е. Еремин, И. Гудим, В. Темеров	
КРОССОВЕР ЛОКАЛИЗАЦИЯ/ДЕЛОКАЛИЗАЦИЯ В ВАЛЕНТНО-НЕСТАБИЛЬНЫХ f-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ	59
<u>А.В. Мирмельштейн</u> , А.А. Подлесняк, В.Н. Матвиенко	
МАГНИТНАЯ ФАЗОВАЯ ДИАГРАМА СПЛАВОВ $Y_{1-x}Tb_xMn_6Sn_6$ ($X = 0, 0.175, 0.2, 0.225, 0.25$).	60
<u>А.А. Быков</u> , Ю.О. Четвериков, Е.В. Москвин, А.Н. Пирогов, С.В. Григорьев	
МАГНИТО- И СПИН-ЗАВИСИМЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ	61
<u>А.С. Тарасов</u> , М.В. Рауцкий, А.В. Лукьяненко, И.А. Бондарев, И.А. Яковлев, С.Г. Овчинников, Н.В. Волков	
МАГНИТОСТРИКЦИЯ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО МОНОКРИСТАЛЛА $HoMnO_3$	62
<u>Н. Павловский</u> , А. Дубровский, К. Шайхутдинов, К. Тереньтев	
<u>IV. РАДИАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МАГНЕТИКАХ, СВЕРХПРОВОДНИКАХ, ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИЗОЛЯТОРАХ</u>	<u>65</u>
ВЫЗВАННЫЕ НЕЙТРОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ И РЕШЕТОЧНЫХ КОНСТАНТ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $wz-GaN$ ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКЕ Al_2O_3,	67
<u>В.Н. Брудный</u> , В.М. Бойко, Н.Г. Колин	
ПРОБЛЕМА РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ МАТЕРИАЛОВ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК НА ОСНОВЕ ПЕРОВСКИТОВ	68
<u>Б.Л. Оксенгендлер</u> , С.Е. Максимов, Н.Р. Ашуров	
РАДИАЦИОННАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛИМЕРОВ: ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ	69
<u>Д.Н. Садовничий</u> , А.П. Тютнев, Ю.М. Милехин	
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(SnSe)_{1-x}(GdSe)_x$ ОБЛУЧЕННЫМИ Г-КВАНТАМИ	70
<u>М.И. Мургузов</u> , Дж.И. Гусейнов, Р.Ф. Мамедова, Т.А. Джафаров	
ЭФФЕКТЫ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ $Bi_{0.85}La_{0.15}FeO_3$	71
<u>В.Д. Пархоменко</u> , С.Г. Богданов, А.Н. Пирогов, А.Е. Теплых	
<u>V. РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ</u>	<u>73</u>
АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПОДВЕРГНУТЫХ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКЕ (Ar^+, $E = 30$ кэВ)	75
<u>Н.В. Гущина</u> , <u>В.В. Овчинников</u> , Ф.Ф. Махинько, С.А. Линник	
АНАЛИЗ РОЛИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССОВ ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩЕГО ТИПА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПЕРЕСЫЩЕННОГО	

СОДЕРЖАНИЕ

ТВЕРДОГО РАСТВОРА Fe+8.16 ат. % Mn ИОНАМИ РАЗЛИЧНОЙ АТОМНОЙ МАССЫ (Ar⁺, Xe⁺)	76
<u>В.В. Овчинников, Ф.Ф. Махинько, С.А. Бедин, К.В. Шаломов</u>	
ВЛИЯНИЕ СФОКУСИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И МИКРОТВЕРДОСТЬ АМОРФНОГО СПЛАВА FeSi₆B₁₆	77
<u>А.В. Жихарев, В.Я. Баянкин, С.Г. Быстров, И.Н. Климова, А.А. Колотов, Н.А. Орлова</u>	
ИЗМЕНЕНИЕ РЕЛЬЕФА И ФАЗОВОГО СОСТАВА МЕТАСТАБИЛЬНОГО СПЛАВА Fe_{72.5}Cu₁Nb₂Mo_{1.5}Si₁₄B₉ ПРИ НАНОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ, ВЫЗВАННОЙ ИОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ	78
<u>И.Ю. Романов, Ф.Ф. Махинько, В.В. Овчинников, А.И. Медведев, Ю.Н. Стародубцев, В.Я. Белозеров, Б.А. Логинов</u>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ АРГОНА НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ 30X13	79
<u>Н.Б. Пепеляев, С.Г. Быстров, С.М. Решетников, В.Я. Баянкин</u>	
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА	80
<u>Н.М. Созонова, А.Ю. Дроздов, В.Я. Баянкин</u>	
НАНОПРОВОЛОКИ ИЗ МЕТАЛЛОВ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗА: ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ МАТРИЧНОГО СИНТЕЗА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ	81
<u>Д.Л. Загорский, С.А. Бедин, К.В. Фролов, В.В. Артемов, С.С. Кругликов, М.А. Чуев, А.А. Ломов</u>	
ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЕГРЕГАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ В АМОРФНЫХ МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ	82
<u>А.А. Колотов, В.Л. Воробьев, В.Е. Порсев, В.Я. Баянкин</u>	
РАДИАЦИОННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПРОВОЛОК	83
<u>С.А. Бедин, Ф.Ф. Махинько, В.В. Овчинников, Н.Н. Герасименко, Д.Л. Загорский</u>	
СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ АЗОТИРОВАННОГО НА ГЛУБИНУ СЛОЯ В АУСТЕНИТНЫХ СПЛАВАХ, ПОДВЕРГНУТЫХ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ПОСЛЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ	84
<u>В.А. Шабашов, А.В. Литвинов, Л.Г. Коршунов, Н.В. Катаева, А.Е. Заматовский</u>	
ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЁВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ O⁺	84
<u>В.Л. Воробьев, Ф.З. Гильмутдинов, А.А. Колотов, П.В. Быков, В.Я. Баянкин</u>	
ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ РАДИАЦИОННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	85
<u>А.С. Смолянский, С.В. Васильева, А.В. Желтова, С.Г. Лакеев</u>	
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВЫХ ФОЛЬГ, С НАПЫЛЕННЫМ СЛОЕМ АЛЮМИНИЯ, ПОСЛЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ИОНАМИ АРГОНА	86
<u>П.В. Быков, А.Н. Тарасенков, В.Л. Воробьев, В.Я. Баянкин</u>	
ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ АРМКО-ЖЕЛЕЗА, СФОРМИРОВАННЫХ ПООЧЕРЕДНОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ Ar⁺ И N⁺	87
<u>Т.С. Картапова, Ф.З. Гильмутдинов, О.Р. Бакиева, В.Л. Воробьев, В.Я. Баянкин</u>	
VI. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА	89
RE-EXAMINATION OF ION IRRADIATION AS A CREDIBLE TOOL TO SIMULATE NEUTRON-INDUCED VOID SWELLING	91
<u>F.A. Garner, Jing Wang, Lin Shao, S.A. Maloy, V.A. Pechenkin</u>	

СОДЕРЖАНИЕ

ДИФФУЗНОЕ РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКЕ КОБАЛЬТА	91
<u>А.Е. Шестаков, Ф.А. Кассан-Оглы</u>	
О ВОЗМОЖНОСТЯХ НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В НЕЙТРОННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ИФМ УрО РАН НА РЕАКТОРЕ ИВВ-2М	92
<u>В.И. Бобровский, Б.Н. Гощицкий, В.Д. Пархоменко, Ю.Н. Скрыбин</u>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОСТИМУЛЯЦИИ И АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ФТТЛ ДЛЯ ВЫСОКОДОЗНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРОВ ТЛД-500К	94
<u>М.Г. Казанцева, В.С. Кортов</u>	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ С ЛАЗЕРНЫМ ИСПАРЕНИЕМ ДЛЯ НАНОМАСШТАБНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ	95
<u>А.А. Лукьянчук, А.А. Алеев, С.В. Рогожкин, А.С. Шутов, О.А. Разницын</u>	
РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДАННЫХ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА НАНОМАСШТАБАХ	95
<u>А.С. Шутов, С.В. Рогожкин, А.А. Алеев, А.А. Лукьянчук, О.А. Разницын</u>	
СЖИМАЕМОСТЬ И ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В ЦИРКОНИЕВОМ СПЛАВЕ Э635 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	96
<u>А.В. Седов, А.Е. Шестаков</u>	
УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ	98



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 субмикрорекристаллических 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.

THE STORED ENERGY FINGERPRINTS OF RADIATION DAMAGE

Penghui Cao¹ (pcao@mit.edu), Charles Hirst¹ (cahirst@mit.edu), Rachel Connick¹ (rconnick@mit.edu), Cody Dennett¹ (cdennett@mit.edu), Sara Ferry¹ (seferry@mit.edu), Sean Lowder¹ (slowder@mit.edu), Ki-Jana Carter¹ (kijana@mit.edu), Kevin Menard² (kevin.menard@mt.com), Brian Turner² (brian.turner@mt.com), Ju Li¹ (liju@mit.edu), R. Scott Kemp¹ (rsk@mit.edu), Michael Short¹ (hereiam@mit.edu)

¹*Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA*

²*Mettler-Toledo, LLC, Columbus, OH, USA*

The current unit of radiation damage, the displacements per atom (DPA), is a calculated exposure parameter that does not directly yield the defect populations responsible for irradiation-induced material properties. Were an a posteriori measure of radiation damage to exist, it would help to answer numerous, lingering questions about the nature and effects of irradiation. We propose the use of stored energy fingerprints as this new unit of radiation damage. They can be measured after irradiation, and they yield information about the resulting defect populations. We present a combination of time-accelerated molecular dynamics (MD) simulations and differential scanning calorimetry (DSC) measurements, which together paint a more measurable picture of the multiscale nature of radiation damage. Potential applications range from settling the neutron/ion equivalency question, to quantitatively understanding dose rate effects, to using nanocalorimetry to verify historical uranium enrichment.

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАМЕЩЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН И КИНЕТИКИ РАСПАДА

А.Р. Кузнецов¹, М.В. Петрик¹, Ю.Н. Горностырев¹, Л.Е. Карькина¹, И.Н. Карькин¹,
П.А. Коржавый²

¹*ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия (a_kuznetsov@imp.uran.ru)*

²*KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*

Сегрегации легирующих элементов на границах зерен (ГЗ) оказывают существенное влияние на физико-механические свойства сплавов, протекание фазовых превращений и формирование микроструктуры. Хотя эта проблема исследуется теоретически и экспериментально уже многие годы, механизмы взаимодействия легирующих элементов с ГЗ и образования сегрегаций остаются предметом дискуссий. В частности, не удается выделить один или несколько параметров, зависящих от характеристик ГЗ (угол разориентации, свободный атомный объем, энергия ГЗ), или от типа примесного атома (ионный радиус, энергия растворения), существенным образом определяющие сегрегационные эффекты на ГЗ.

Мы исследовали механизм образования сегрегаций на ГЗ различного типа, используя подходы различного масштабного уровня: расчет энергий сегрегаций в рамках теории функционала электронной плотности (SIESTA, PAW-VASP), метод молекулярной динамики (МД), а также метод Монте Карло (МК). В качестве объекта исследования рассмотрены сплавы Al, легированные Mg и Zn, а также сплавы Fe-Cu. Полученные результаты дают представление не только о величине энергии сегрегации, определяющей

движущую силу процесса, но и о ширине приграничной области, в которой происходит обогащение примесными элементами.

На основе расчетов *ab initio* мы сообщаем о природе принципиально различных механизмов взаимодействия атомов Mg и Zn с ГЗ в сплавах алюминия, приводящих к различному образованию сегрегаций. Атомы Mg сегрегируют в области ГЗ в виде гетерогенных агломераций в силу *деформационного* механизма взаимодействия растворенный атом – ГЗ. В отличие от этого в случае атомов Zn во взаимодействии растворенный атом – ГЗ доминирует *электронный* механизм, связанный с формированием направленных связей. В результате для атомов Zn энергетически выгодно занимать позиции внедрения на самой ГЗ и формировать тонкие слои вдоль ГЗ, ослабляя их таким образом.

Кинетика распада в поликристаллическом сплаве Fe–Cu и формирование выделений на ГЗ исследованы с использованием атомистического моделирования на различных временных масштабах: методом МК, реализующим диффузионное перераспределение атомов Cu, и методом МД, обеспечивающим атомную релаксацию кристаллической решетки. Показано, что при малом размере зерна ($D \sim 10$ нм) распад в объеме подавлен, а когерентно связанные с матрицей обогащенные Cu выделения преимущественно образуются на ГЗ. Размер и состав выделений существенно зависят от типа ГЗ: мелкие выделения (1.2–1.4 нм) имеют средний состав Fe–40 at.%Cu и образуются вблизи малоугловых ГЗ, более крупные выделения размером до 4 нм со средним составом Fe–60 at.%Cu формируются вблизи ГЗ общего типа и тройных узлов. Результаты позволяют объяснить наблюдаемые особенности обогащения ГЗ в сплавах, подвергнутых большим пластическим деформациям. Появляется возможность контролировать сегрегационное поведение примеси на ГЗ и тем самым свойства ультрамелкозернистых материалов.

Результаты получены с использованием компьютерных ресурсов КЦОД НИЦ «Курчатовский институт» (<http://computing.kiae.ru>).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ И АТОМОВ УГЛЕРОДА ПРИ СЕПАРАЦИИ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В Ni ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ И НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

*С.Е. Данилов, В.Л. Арбузов, Б.Н. Гощицкий, В.Д. Пархоменко
Институт Физики Металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (danilov@imp.uran.ru)*

Проведены комплексные исследования радиационного повреждения Ni и сплавов Ni–880 ат ppm C при электронном и нейтронном облучениях в районе комнатных температур в закаленном и деформированном состоянии.

В чистом никеле, с деформационной микроструктурой, как при электронном, так и при нейтронном облучениях наблюдают сегрегацию радиационных дефектов заключающуюся в том, что значительная часть генерированных облучением собственных межузельных атомов попадает при миграции на дислокационные стоки и не участвует в рекомбинации с вакансиями. Сегрегация радиационных дефектов имеет максимум при степени деформации около 40 %.

При облучении электронами в сплаве Ni–C также наблюдается эффект сегрегации радиационных дефектов. При облучении нейтронами сплава Ni–C эффект сегрегации радиационных дефектов не наблюдается. Это связано с влиянием углерода на

формирование комплексов вакансия – атом углерода, углеродных кластеров, комплексов атом углерода – собственный межузельный атом. Основными стоками для радиационных дефектов в каскадах атомных смещений являются области с повышенной концентрацией вакансий.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Спин», № 01201463330 и «Поток» № 01201463334) при частичной поддержке РФФИ (проект № 17-03-00223 и № 17-02-00204).

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА КИНЕТИКУ ВЫДЕЛЕНИЯ ГЕЛИЯ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.Г. Залужный

*ГНЦ РФ – Институт Теоретической и Экспериментальной Физики НИЦ «Курчатовский
Институт», 117218 Moscow, Russia (zaluzhnyi@mail.ru)*

Газообразные продукты ядерных реакций, в частности гелий, играют существенную роль в изменении свойств материалов при облучении. Известно, что атомы инертных газов способствуют зарождению и росту пор в облучаемых материалах, оказывая влияние на такие явления, как набухание, высокотемпературное радиационное охрупчивание и др. В связи с этим, исследование поведения гелия в конструкционных материалах (образование, накопление, удержание, выделение) является весьма актуальным. С целью обоснования методов экспрессной имитации накопления и удержания гелия в конструкционных материалах при реакторном облучении в данной работе был проведен сравнительный анализ спектров скорости газовыделения из образцов аустенитной стали, насыщенных гелием разными способами: облучением на циклотроне и магнитной масс-сепарационной установке, в реакторах ИРТ-2000 и БОР-60, а также методом “третиевого трюка”. Оценивается влияние дислокаций и границ зерен на выделение гелия из материалов. Проведенные исследования показали, что при насыщении гелием образцов бомбардировкой их α -частицами разных энергий, обеспечивающей одновременное введение в решетку материала гелия и радиационных дефектов (в широких диапазонах концентрации гелия и радиационной повреждаемости), кинетика выделения гелия адекватна кинетике выделения гелия из образцов, облученных в реакторах.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ПРИМЕСЕЙ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ЗЕРНОГРАНИЧНОЙ ДИФфуЗИИ И РОСТ ГЕЛИЕВЫХ ПУЗЫРЬКОВ НА ГРАНИЦАХ ЗЁРЕН В АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ

Д.Н. Демидов¹, Е.А. Смирнов¹, А.Б. Цепелев^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
(dmitrydem11@gmail.com)

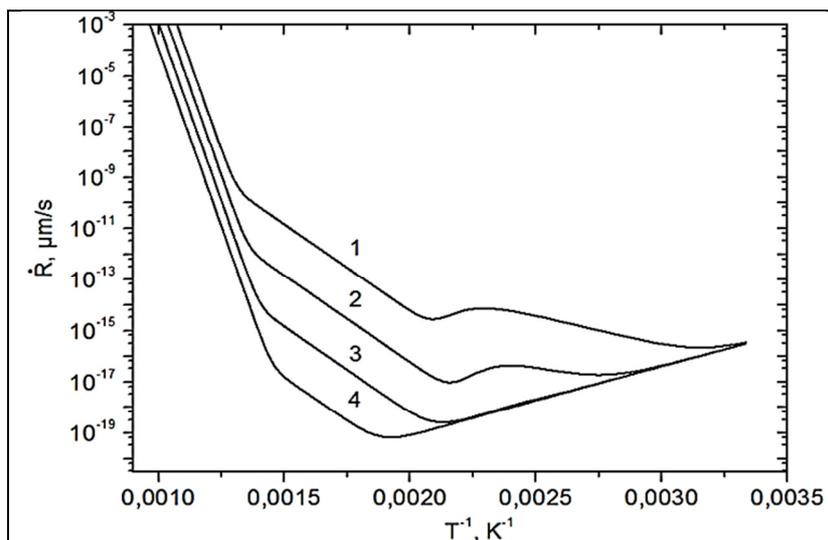
²Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН

В металлах и сплавах с примесями и границами зерен, исследовано влияние примесей и их комплексов с вакансиями и собственными межузельными атомами на характеристики радиационных дефектов (РД) и радиационно – стимулированной зернограничной диффузии (РСГД). Произведена оценка концентрации РД в объёме и в границе зерна.

При помощи развитой в предыдущих статьях методике [1-3] получения решений системы кинетических уравнений отжига РД в объёме зерна, для железа и аустенитных сталей получены температурные зависимости стационарной концентрации РД для материалов с различной энергией связи комплексов «дефект – примесь» в объёме зерна, а так же в границе зерна с учётом возникновения явления радиационно-индуцированной сегрегации.

Получена температурная зависимость концентрации комплексов «атом примеси – собственный межузельный атом» в границе зерна.

Определены температурные зависимости коэффициентов радиационно-ускоренной зернограничной самодиффузии и скорости роста гелиевого пузырька в границе зерна с учётом влияния параметров облучения, типа и концентрации примеси, объёмной доли границ зёрен.



Зависимость скорости роста пузырька гелия в границе зерна аустенитной стали от температуры при различных дозах облучения. 1 – 10^{-3} сна, 2 – 10^{-4} сна, 3 – 10^{-5} сна, 4 – 10^{-6} сна

Литература

1. Demidov D.N., Smirnov E.A., in *Physics and Chemistry of m. treatment*, 2016, **v.1**, p.5-12.
2. Demidov D.N., Smirnov E.A., Tsepelev A.B. in *IOP Conf. Series: M. Science and Engineering*, **v.130** (2016).
3. Novoselov A.N., Smirnov E.A., Elmanov G.N., in *Physics and Chemistry of m. treatment*, 2013, **v.5**, p.10-16.

ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДАЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ МЕТАЛЛОВ

В.М. Чернов, К.А. Мороз

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

Рассмотрены дислокационные механизмы формирования неустойчивого состояния низкотемпературного охрупчивания (НТО-состояния или хладноломкости) с возможностью хрупкого разрушения (лавинного распространения внутризеренной трещины) металлов (моно- и поликристаллов) с разными кристаллическими решетками (ОЦК, ГЦК, ГПУ). Условия (без облучения) формирования НТО-состояния (температуры вязко-хрупкого перехода) и внутрикристаллитного лавинного распространения трещины (хрупкого разрушения) определяются напряженно-деформированным состоянием, пределом текучести (стартовым напряжением движения дислокации), прочностью на разрыв и подвижностью дислокаций в пластической зоне трещины (концентраторе напряжения) разрушаемого металла. Скорость дислокации в пластической зоне трещины определяет скорость распространения трещины. Такие условия могут выполняться только для ОЦК и некоторых ГПУ металлов, определяя температурные области их НТО-состояний (хладноломкости) ниже температуры вязко-хрупкого перехода (В.М. Чернов, Б.К. Кардашев, К.А. Мороз, ЖТФ, 2016, том 86, № 7, с. 57-64).

Рассмотрено влияние радиационного повреждающего облучения на НТО-состояние (НТРО-состояние) металлов. При радиационных возмущениях в металлах возникают дальнедействующие динамические напряжения (упругие волны, «радиационная тряска»), усиливающие подвижность дислокаций и увеличивающие скорость релаксации напряжений в пластической зоне трещины (область динамической подвижности дислокаций в пластической зоне не реализуется). В процессе облучения неустойчивое НТРО-состояние металлов с возможностью хрупкого разрушения (лавинного распространения трещины) не формируется (не формируется температура вязко-хрупкого перехода). В процессе облучения материалов (изделий) всех кристаллических классов их трещиностойкость (пластичность) возрастает, а возможность хрупкого разрушения (лавинное распространение внутризеренной трещины) не реализуется (подавляется).

НТРО-состояния облученных металлов, проявляющих НТО-состояния без облучения (ферритно-мартенситные стали, ОЦК и некоторые ГПУ металлы и их сплавы), будут представлять опасность из-за возникающих в них остаточных радиационных упрочнений, увеличивающих температуры их вязко-хрупких переходов. Дополнительный после радиационный отжиг облученного металла будет понижать его температуру вязко-хрупкого перехода из-за уменьшения концентрации радиационных дефектов и их состояний (понижение предела текучести).

Неповреждающие (поглощающиеся) облучения металлов (энергии меньше пороговой энергии смещения, гамма) будут дополнительно влиять на условия возникновения в них НТРО-состояний в процессе облучения через увеличение температуры облучения и через продукты возникающих ядерных реакций.

Работа поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (Грант № 17-08-00656).

ВЛИЯНИЕ ТИТАНА И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭВОЛЮЦИЮ ВАКАНСИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ИССЛЕДОВАННЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А.П. Дружков, Д.А. Перминов, В.Л. Арбузов

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

Методом позитронной аннигиляционной спектроскопии исследовано образование и отжиг вакансионных кластеров в отожженной и холодно-деформированной стали X16H15M3, а также аналогичной стали, содержащей 1.02 мас.% Ti. Дефекты создавались электронным (5 МэВ) облучением при температурах 270-573 К. Проведен анализ влияния исходной дислокационной структуры на накопление и отжиг вакансионных дефектов в сталях. Показано, что вакансии в сталях взаимодействуют с атомами титана. В результате этого, в стали, содержащей титан, в процессе облучения при температурах 270 и 423 К образуются вакансионные кластеры, декорированные атомами титана, которые стабильны до температур 450 К. При этом скорость накопления вакансионных кластеров возрастает по сравнению со сталью, не содержащей титан. Высокая плотность дислокаций в деформированных сталях снижает скорость накопления вакансионных дефектов в несколько раз по сравнению с отожженными сталями. В деформированной стали, содержащей титан, было обнаружено образование мелких частиц TiC в процессе отжига в диапазоне температур 850 to 1070 К. В деформированных сталях также был обнаружен эффект блокировки захвата позитронов дислокациями. Этот эффект обусловлен сегрегацией атомов примесей и зарождением выделений на дислокациях.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема “Спин” № 01201463330).

ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ЧИСТОГО НИКЕЛЯ ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ И ПОСЛЕДУЮЩИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ОТЖИГОВ (НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

В.И. Воронин¹, И.Ф. Бергер², Н.В. Проскурнина¹, Б.Н. Гощицкий¹

¹Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (Voronin@imp.uran.ru)

²Институт химии твердого тела УрО РАН, 620990 Екатеринбург, ул. Первомайская, 91

Методом нейтронной дифракции высокого разрешения исследованы образцы чистого никеля после облучения до максимального флюенса 10^{20} н/см² и последующих изохронных отжигов до температуры 600°C. Показано, что до небольших флюенсов $\sim 10^{19}$ н/см² преобладающими дефектами являются однородно распределенные по объему материала межузельные атомы никеля и вакансии. Рост параметра решетки обусловлен большим вкладом межузельных атомов, по сравнению с отрицательным вкладом вакансий. При флюенсах, больших 10^{19} н/см² из-за радиационно-стимулированной

диффузии к стокам начинают формироваться кластеры атомов никеля, число и размеры которых увеличиваются с флюенсом. При этом отрицательный вклад вакансий из-за их большего количества начинает преобладать над вкладом межузлий, и параметр решетки, проходя через максимум, уменьшается при максимальном достигнутом в наших экспериментах флюенсе (см. рис. 1).

Температурные отжиги восстанавливают структурные параметры.

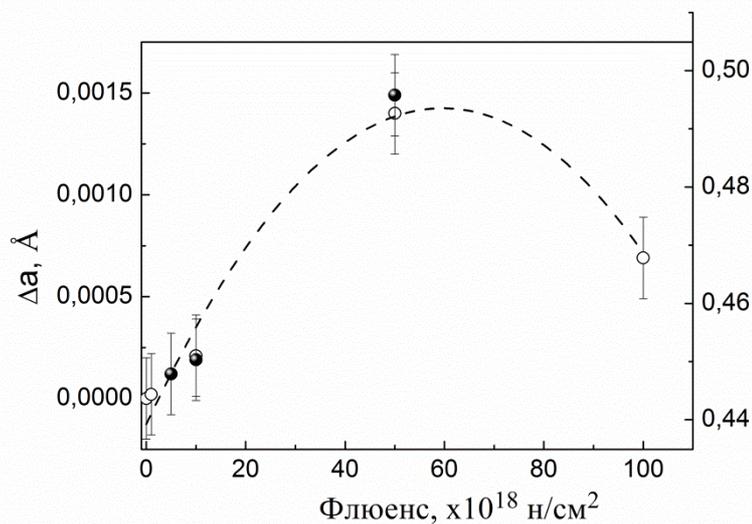


Рис.1. Зависимость параметра решетки никеля от флюенса быстрых нейтронов. Открытые точки – нейтронные, закрытые рентгеновские данные.

Работа выполнена с использованием УНУ «НМК ИФМ» в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Поток», № 01201463334).

ДИФФУЗИОННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ПРОЦЕССЕ РАДИАЦИОННОЙ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ

В.В. Сагарадзе, В.А. Шабашов, Н.В. Катаева, К.А. Козлов, А.В. Литвинов, В.Л. Арбузов, С.Е. Данилов, Б.Н. Гощицкий

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

В ранее выполненных мессбауэровских и электронно-микроскопических исследованиях была показана возможность аномального растворения самых разнообразных дисперсных фаз (интерметаллидов, карбидов, нитридов, оксидов) при низких температурах в процессе радиационного или деформационного воздействия. В частности, было исследовано [1] деформационно-индуцированное растворение интерметаллидов Ni_3Al диаметром около 4 нм в матрице аустенитного сплава Fe-35.4 Ni-9Al (ат. %) при криогенных температурах (до 77 К) в процессе сдвига под высоким давлением 8 ГПа, которое сменяется деформационно-индуцированным выделением интерметаллидов при повышении температуры деформации до 473-573 К. Измерение концентрации никеля C_{Ni} в Fe-Ni-Al матрице при растворении или выделении высоконикелевой γ' -фазы Ni_3Al осуществляли преимущественно мессбауэровским

методом, который в данном случае дает существенно более точные результаты, чем электронная микроскопия или рентгенография. Мёссбауэровские спектры получали в геометрии на пропускание резонансного излучения с энергией 14.4 кЭв от источника $\text{Co}^{57}(\text{Rh})$. Для концентрационного анализа использовали ранее полученную зависимость среднего поля $\langle H \rangle$ на ядре ^{57}Fe (при 293 К) от содержания никеля: $C(\text{Ni}) = 29,6 + 0,3 \exp(\langle H \rangle / 80)$ в Fe-Ni сплавах с 29.6 – 43.5 ат.% Ni. При изучении механизма радиационного и деформационного растворения интерметаллидов типа Ni_3Al или Ni_3Ti в аустенитных сплавах Fe-36Ni-Ti(Al) неожиданной оказалась интенсификация этого процесса при криогенных температурах (77 К). Деформационное растворение было объяснено миграцией атомов Ni, Al или Ti из интерметаллидных частиц в матрицу вслед за пересекающими частицы дислокациями в том случае, если эти атомы перешли в междоузельные положения со снижением энергии активации миграции почти на порядок. Рассчитанные значения величины дрейфа атомов примеси показали, что деформационно-индуцированный переход атомов из частицы Ni_3Ti (например, Ni) в междоузельное положение в виде краудина (энергия миграции $E \sim 0.1$ эВ) позволяет им двигаться диффузионным путем (на осязаемое расстояние ~ 1 нм и больше) в поле напряжения дислокации даже при температуре 77 К. Диффузия гантельной пары ($E \sim 0.2$ эВ) вслед за дислокацией возможна приблизительно при 173 К и выше, а диффузия по вакансионному механизму ($E \sim 1$ эВ) может осуществляться только при сравнительно высоких температурах, приблизительно 723 К и выше. Для идентификации образующихся при криогенной деформации (77 К) точечных дефектов (междоузельных атомов и вакансий) в модельном аустенитном сплаве Fe-36Ni было выполнено резистометрическое исследование. Сопоставлено поведение деформационно-индуцированных точечных дефектов при отжиге с их поведением после низкотемпературного (70 К) электронного облучения. Учитывали тот факт, что изменение электросопротивления в процессе отжига деформированного или облученного сплава при 77-140 К связано с миграцией междоузельных атомов, а при температурах выше 200 К – с миграцией вакансий. Из экспериментальных данных следует, что при низкотемпературной деформации и последующих отжигах до 550 К в сплаве Fe-36Ni происходят аналогичные диффузионные процессы, как и после низкотемпературного электронного облучения. Наблюдается образование и миграция междоузельных атомов (77-140 К) и вакансий (200-550 К), вызывающие фазовые превращения, объясняемые атомным расслоением и упорядочением высоконикелевых участков. Таким образом, при объяснении низкотемпературной деформационно-индуцированной диффузии атомов замещения в исследованных сплавах на основе железа необходимо учитывать генерацию междоузельных атомов.

Недостатком существующих в мире способов производства дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) сталей является чрезвычайно длительная (30-40 ч) первая стадия обработки – механическое легирование стального порошка. Длительность процесса механического легирования приводит к преждевременному износу и повреждению мельниц, загрязнению смеси продуктами износа, что ухудшает качество ДУО-сталей. В новом подходе для получения ДУО-сталей в качестве носителей кислорода используются не стабильные оксиды иттрия с высокой энергией межатомной связи, а малоустойчивые при деформации оксиды железа или даже поверхностные окислы железа в виде тонкой пленки вокруг частиц порошка стали. Полученные результаты по механизму деформационно-индуцированного растворения частиц позволили оптимизировать и упростить производство дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) жаропрочных реакторных сталей нового поколения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-13-00908)

Литература:

1. Sagaradze V. V., Shabashov V. A., Kataeva N. V., Zavalishin V. A., Kozlov K. A., Kuznetsov A. R., Litvinov A. V., Pilyugin. V. P. *Philosophical Magazine*. **96**, No 17, 1724 (2016).

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ АЛЬФА
ФАЗЫ В СТАЛИ С ОСНОВОЙ X18H10T ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ДО ДОЗЫ
150 СНА В РЕАКТОРЕ БОР-60**

Д.Е. Маркелов, А.В. Обухов, Е.И. Макаров, В.С. Неустроев
АО "ГНЦ НИИАР", Ульяновская область, г. Димитровград (dmitry.markl@yandex.ru)

Конструкционные материалы любого реактора работают в жёстких условиях, когда наряду с высоким уровнем нейтронных повреждающих доз, присутствуют напряжения различного типа, что способствует их повреждаемости и ухудшению физико-механических свойств. Для обеспечения надежной работы несменяемых конструкций реактора и реактора в целом используются данные, полученные из специальных экспериментов по облучению образцов и данные из исследований реальных изделий и конструкций, эксплуатировавшихся в реакторе длительное время.

В работе представлены результаты микроструктурных исследований образцов стали X18H10T, вырезанных из элементов экранной сборки реактора БОР-60, облученной до максимальной повреждающей дозы 150 сна при температурах от 330°C до 380°C, и вырезанных из образцов для механических испытаний, облученных при температурах 320-350 и 420°C. Получены новые экспериментальные данные по эволюции альфа фазы в стали с основой X18H10 - материала внутрикорпусных устройств реактора БОР-60 и реакторов ВВЭР. При ТЭМ-исследовании образцов было обнаружено три типа радиационно-индуцированных и радиационно-стимулированных фаз, которые образовались в материале в результате процессов перераспределения легирующих элементов под облучением.

Полученные данные можно использовать для обоснования критерия гамма-альфа перехода в материалах ВКУ реакторов ВВЭР при длительной эксплуатации до высоких повреждающих доз. Эти данные будут также использованы для пополнения базы данных по радиационной стойкости стали X18H10T, необходимой для обоснования продления срока службы внутрикорпусных устройств реактора БОР-60 и энергетических реакторов типа ВВЭР.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПАДА СПЛАВА Fe-30Cr ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ
МЕТОДОМ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ**

Т.Н. Букатин¹, О.А. Корчуганова²
¹НИТУ МИСиС, Москва, Россия (bukatin.t@gmail.com)
²ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт» (korchuganovaao@gmail.com)

Атомно-зондовая томография – метод, заключающийся в послойном испарении образца-иглы с дальнейшим масс-спектрометрическим анализом ионов и их детектированием. Позволяет исследовать металлы, полупроводники и другие материалы на атомарном уровне, что дает возможность исследовать локальные дефекты, осадки, зародыши новой фазы, определять их химический состав и плотность в материале, получать трехмерную картину исследуемого образца. Метод АЗТ хорошо применим для исследования распада пересыщенного твердого раствора Fe-Cr.

При помощи метода АЗТ, используя томограф с лазерным испарением, находящийся в ИТЭФ, был исследован сплав, содержащий Fe = 69,23 ат. %, Cr = 30,77 ат. %. Были подобраны параметры исследования сплава, в ходе подбора параметров изменялась мощность, получаемая образцом при облучении его лазером, путем изменения процента пропускания аттенюатора, после этого измерялась атомная концентрация образца т.к. при неправильно подобранной мощности атомы разного сорта будут испаряться неравномерно, что приведет к ошибкам в определении концентрации. Результаты подбора приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1: Зависимость концентрации от энергии импульса

% аттенюатора	$E_{имп, нДж}$	C_{Cr}
4	16,0	30,34
6	28,0	29,41
9	46,8	30,14
11	70,8	29,95
26	404,8	28,36
32	576,8	26,66
36	779,6	27,50

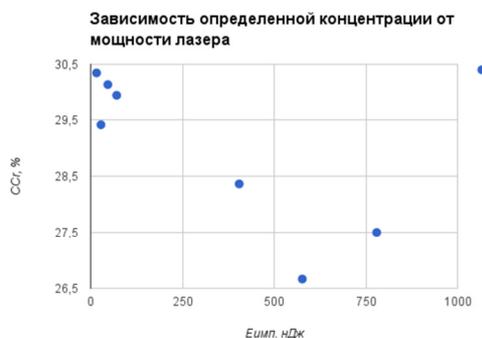


Рисунок 1 – График зависимости

В дальнейшем образцы были облучены ионами Fe с энергией 150 кэВ/z, исследован распад при облучении, сравнен с уже исследованным распадом сплава состава Fe-22Cr.

КВАНТОВАЯ МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДИНАМИКА: УСКОРЕННЫЙ РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФФУЗИИ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РЕПЛИК.

И.И. Новоселов, А.В. Янилкин

ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л.Духова", Москва, Россия (novoselov92ivan@gmail.com)

Для прогнозирования эволюции свойств сталей и сплавов, подверженных воздействию радиации, как правило, используются модели на основе кинетической теории [1,2]. Одним из главных достоинств данного подхода является возможность описания эволюции

материала на реалистичном временном масштабе. Однако построение таких моделей требует большого количества данных о характеристиках материала. В частности, необходима информация о диффузионных свойствах исследуемой системы. Зачастую проведение соответствующих экспериментов требует большого количества ресурсов или невозможно по техническим причинам. В этом случае коэффициенты диффузии могут быть оценены из атомистического моделирования.

Наиболее точным из методов данного класса является квантовая молекулярная динамика (QMD). Однако QMD расчеты также и наиболее затратны с вычислительной точки зрения, поэтому непосредственное моделирование диффузионных процессов в твердом теле может быть проведено только для температур вблизи точки плавления материала. Для расчета коэффициентов диффузии при более низких температурах необходимо использовать методы ускоренного моделирования, например, метод параллельных реплик (МПР) [3].

В данной работе исследуются особенности МПР и влияние его параметров на результаты расчета. Определены источники погрешностей, обусловленных использованием алгоритма, для наиболее существенных ошибок предложен метод корректировки. Также разработана программная реализация МПР, позволяющая проводить ускоренные QMD расчеты. Предложенный подход протестирован на примере расчета коэффициентов самодиффузии в алюминии. Результаты ускоренных расчетов хорошо согласуются как со стандартным QMD моделированием, так и с экспериментальными данными. Показано, что использование метода параллельных реплик позволило расширить масштаб времен, доступных для квантовой молекулярной динамики, с сотни пикосекунд до единиц наносекунд, причем, последнее ограничение обусловлено скорее наличием вычислительных мощностей, а не особенностями метода.

Литература

1. Dremov V. V. et.al., *Journal of Nuclear Materials*, **385**, p.79 (2009).
2. Ortiz C.J. et.al., *Physical Review B*, **75**, 184101 (2007).
3. Voter A., *Physical Review B*, **57**, p.985 (1998).

МД МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ САМООБЛУЧЕНИЯ НА ДИНАМИКУ ДИСЛОКАЦИЙ В δ -Pu

А.В. Караваев, В.В. Дремов, Г.В. Ионов

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Технической Физики имени академика Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Россия (a.v.karavayev@vniitf.ru)

Самооблучение радиоактивных материалов, таких как плутоний и сплавы на его основе, приводит к постоянному рождению первичных радиационных дефектов (ПРД) кристаллической структуры, а также продуктов распада, например, радиогенного гелия, их накоплению, диффузионной миграции по решетке, кластеризации и т.п. Микроструктура (морфология) систем точечных дефектов (т.е. характерные равновесные размеры кластеров дефектов, их форма, доля дефектов в кластерах и уединенных дефектов) является важным фактором, в значительной степени влияющим на механические свойства материала. В работе предложена и реализована оригинальная идея исследования равновесной термодинамики систем радиационных дефектов

кристаллической структуры в рамках молекулярной динамики (МД) с помощью метода термодинамического интегрирования (МТИ). МТИ, позволяющий рассчитывать термодинамические потенциалы для произвольного закона межатомного взаимодействия, впервые применен в данной работе для исследования морфологии радиационных дефектов и их поведения в кристаллической решетке. Выполнены исследования поведения радиогенного гелия в плутонии и ГЦК сплавах плутония с галлием, получены равновесные параметры гелиевых пузырьков, согласующиеся с экспериментально наблюдаемыми значениями. Выполнены исследования поведения кластеров радиационных дефектов в сплавах плутония с галлием, получены их равновесные параметры. С помощью разработанного в рамках настоящей работы метода релаксации напряжений выполнено исследование динамики дислокаций в кристаллической решетке под действием сдвиговых напряжений вплоть до практически нулевых скоростей деформации. Таким образом, выполнены оценки напряжения Пайерлса и соответственно квазистатических упругопластических характеристик материала. При этом моделирование выполнено как в отсутствие других дефектов кристаллической структуры, так и в присутствии радиационных дефектов различной морфологии. Показано, что нанометровые вакансионные комплексы и гелиевые пузырьки вызывают закрепление дислокаций, что приводит в конечном итоге к повышению квазистатического предела упругости материала. Выполнены количественные оценки изменения статического предела текучести от возраста материала, хорошо согласующиеся с наблюдаемыми в эксперименте значениями. Разработанные методики позволяют перенести технологию расчетов на прогнозирование поведения других ядерно-активных и конструкционных материалов под воздействием интенсивных радиационных нагрузок.

МИГРАЦИЯ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОЛЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР

А.В. Козлов, В.И. Пастухов, И.А. Портных

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

При эксплуатации твэлов в оболочках возникает градиент температур по толщине стенки. Это приводит к неоднородности условий миграции точечных дефектов, образующихся при нейтронном облучении, что вызывает различия радиационно-индуцированных структурных изменений по толщине оболочки. Целью работы является описание миграции точечных дефектов в оболочке твэла с учетом действующего градиента температур.

В модели миграции точечных дефектов [1] описано движение вакансий и межузельных атомов в поле градиента температур, учитывающее различие вероятностей перескока точечного дефекта в различных направлениях. Получены выражения для стационарных потоков вакансий и междоузлий по толщине стенки по направлению к оси оболочечной трубы и в противоположном направлении. Показано, что в оболочке при действии нейтронного облучения устанавливается стационарное распределение вакансий и междоузлий по толщине стенки. Рассчитано распределение концентраций точечных дефектов в оболочке из аустенитной стали при облучении твэла в реакторе на быстрых нейтронах. Показано, что градиент температур по толщине оболочки приводит к понижению концентрации вакансий у внутренней поверхности и к повышению у наружной, по сравнению с центральной областью оболочки. Это приводит к различию характеристик пористости, формирующейся у наружной и внутренней поверхностей.

Приведены экспериментальные результаты исследования радиационной пористости в образцах оболочек из аустенитных сталей, облученных при различных температурах в составе твэлов реактора БН-600. Показано, что у внутренней поверхности наблюдается область обедненная порами, а у наружной поверхности – область с крупными порами. Расчетный профиль распределения концентрации вакансий у внутренней поверхности удовлетворительно соответствует результатам измерения ширины обедненной порами области.

Литература

1. Козлов А.В. Радиационные дефекты в аустенитных сталях при нейтронном облучении и их влияние на физико-механические свойства // *Известия ВУЗов. Ядерная Энергетика*, 2011. № 1. С. 196-210.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В МОЛИБДЕНЕ С ПОМОЩЬЮ КЛАСТЕРНОЙ ДИНАМИКИ

А.Ю. Куксин^{1,2}, А.В. Янилкин¹

¹ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия (aleyanyilkin@gmail.com)

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

В работе рассматривается накопление радиационных дефектов в молибдене и сплавах молибдена при ионном или нейтронном облучении. С помощью пакетов Geant и SRIM, основанных на парных взаимодействиях и методе Монте-Карло, рассчитываются распределения по энергии первично-выбитых атомов (ПВА) для заданной энергии падающих частиц. Образование точечных дефектов и их кластеров в результате движения ПВА внутри кристалла рассчитывается с помощью метода молекулярной динамики (МД) [1]. Использование МД позволяет более точно учитывать кристаллическую структуру, а также отжиг на стадии остывания каскада. Дальнейшая эволюция дефектов протекает на существенно больших временах и масштабах, поэтому для последующего моделирования используют методы атомистического кинетического Монте-Карло (КМК) [2] или кластерной динамики (КД) [3]. Метод КМК позволяет рассматривать поведение дефектов на атомном масштабе, учитывать неравномерное распределение по пространству и использовать близкие к реалистичному взаимодействия между дефектами. В КД взаимодействие дефектов происходит в рамках теории среднего поля, то есть концентрации дефектов считаются равномерными по всему объему, а для описания взаимодействия дефектов используется теория стоков. В качестве объектов КД используются кластеры дефектов различных размеров. Это позволяет подробно рассчитывать стадию зарождения кластеров. Конечно КД является более грубым методом по сравнению с КМК, но вычислительная сложность последнего не позволяет рассматривать большие масштабы и времена.

Полученные распределения кластеров по размерам из МД расчетов используются как входные значения скорости генерации дефектов для КД. Рассмотрено несколько вариантов расчетов, моделирующих различные экспериментальные постановки. В первом рассматривается чистый объемный молибден, коэффициенты диффузии точечных дефектов и кластеров взяты работы [4]. Во втором случае рассматривается тонкая пленка, соответственно появляется сток дефектов на поверхность. Более реалистичные модели учитывают влияние примесей на подвижность дефектов. С помощью квантово-механических расчетов показано, что углерод существенно уменьшает подвижность

кластеров междоузельных дефектов. Проведено исследование влияния концентрации углерода на концентрацию образующихся дислокационных петель. Влияние примесей уменьшается с увеличением температуры, поэтому проведены расчеты при нескольких температурах.

Литература

1. Куksин А.Ю., Янилкин А.В., *ФММ* **117**, 242 (2016)
2. Хлебников В. А., Янилкин А. В., *ВАНТ* **4**, 22 (2015)
3. Ромашка М.Ю., Янилкин А.В., *ВАНТ* **3**, 64 (2015)
4. Starikov S.V., Insepov Z., Rest J., Kuksin A.Y., Norman G.E., Stegailov V.V., Yanilkin A.V. *Phys. Rev. B.* **84**, 104109 (2011)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОНАПОЛНЕННОГО ОБРАЗЦА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Е.И. Макаров, Н.В. Киреев, В.С. Неустроев, Д.Е. Маркелов, С.В. Белозеров
АО «Государственный научный центр научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Димитровград-10, Россия (Evgeny_m86@inbox.ru)

В докладе представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния газонаполненного образца сложной формы для исследования процессов радиационной ползучести [1, 2]. Показаны распределения кольцевых напряжений на внутренней и внешней трубке.

Основная цель расчета - определение деформаций и составляющих нормальных напряжений для внешней и внутренней трубок газонаполненного образца для исследования процессов радиационной ползучести.

Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) газонаполненного образца осуществляется методом конечных элементов с использованием программного комплекса (ПК) ANSYS Mechanical.

Расчеты показали, что на внутренней трубке образца под воздействием давления газа в межтрубном пространстве возникают кольцевые сжимающие, а на внешней трубке кольцевые растягивающие напряжения. Осевые напряжения примерно в 2 раза меньше кольцевых, что согласуется аналитическим расчетом, по формулам, представленным в ПНАЭ Г-7-002-86. Радиальные напряжения – незначительны по величине и не дают большого вклада в НДС, ими можно пренебречь в дальнейшем анализе влияния нагружения образца на его деформацию.

Данная расчетная модель сложного газонаполненного образца может использоваться для проведения расчетов на ползучесть при условии отсутствия эффекта радиационного набухания.

Литература

1. Неустроев В.С., Макаров Е.И., Белозеров С.В., Островский З.Е., *Физика металлов и металловедение.* **110**, №4 (2010).
2. Неустроев В.С., Белозеров С.В., Макаров Е.И., Обухов А.В., *Физика металлов и металловедение.* **115**, №10 (2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО АНАЛИЗА ПОСЛОЙНЫХ ПОЛЕВЫХ ИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПЛАТИНЫ, ОБЛУЧЕННОЙ ИОНАМИ Ar^+ ($E = 30$ КЭВ)

В.А. Ивченко^{1,2}, В.В. Овчинников^{1,2}, К.В. Шаломов^{1,2}

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

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Полевые ионные изображения поверхностных атомных слоев металлов и сплавов, полученные с острых эмиттеров, включают в себя изображения тысяч атомов, располагающихся как в узлах регулярной кристаллической решетки, так и областях, содержащих радиационные дефекты.

В настоящей работе представлены результаты применения специально разработанного алгоритма и компьютерной программы для анализа ионных полевых изображений с целью изучения характера воздействия ионов Ar^+ ($E = 30$ кэВ) на структуру поверхностных атомных слоев чистой платины.

Определены координаты изображений атомов, их яркости, размеры. Построены функции распределения значений яркостей и радиусов атомов. Показано, что по мере приближения к облученной поверхности ширина полученных распределений заметно увеличивается. Число изображаемых атомов на микрокартинах, возрастает с удалением атомного слоя от облучаемой поверхности.

Синтезированы полевые ионные изображения, содержащие только те атомы, яркости которых (или их радиусы) находятся в некоторых заданных пределах. Эти атомы могут быть выделены цветом на ионных полевых изображениях. Определены зоны наиболее интенсивного изменения полевых изображений в результате ионного облучения, являющиеся зонами прохождения плотных каскадов атомных смещений. Поврежденные зоны содержат изображения атомов как с аномально низкими, так и с аномально высокими радиусами.

В работе представлены послойные изображения поверхностных слоев облученной платины (с 1-го по 5-й и более удаленных). Показана возможность реконструкции 3D-картины облученного металла при температуре жидкого азота ($T \sim 77$ К).

Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 0389-2014-0002, а также поддержана грантом РФФИ № 16-08-00615-А.

РОЛЬ НАНОМАСШТАБНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ПРИ КАСКАДООБРАЗУЮЩЕМ ОБЛУЧЕНИИ

В.В. Овчинников^{1,2}

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

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Классическая радиационная физика основана на описании миграции радиационных

дефектов с учетом их взаимодействия с атомами и дефектами решетки. Она достаточно хорошо описывает относительно медленные процессы, приводящие к радиационному набуханию, радиационной ползучести, радиационному охрупчиванию, возникновению радиационных сегрегаций и т.д.

Однако хорошо известны эффекты, не получившие вплоть до настоящего времени адекватного объяснения. Это прежде всего «эффект малых доз» и «эффекты дальнего действия» при корпускулярном облучении.

В течение последних десятилетий исследования лаборатории пучковых воздействий Института электрофизики УрО РАН позволили выявить решающую роль наномасштабных динамических эффектов в физике воздействия ионизирующих излучений на вещество, на основании чего удастся объяснить вышеупомянутые эффекты и разработать уникальные технологии модификации объемных свойств материалов (электрических, магнитных, механических и других). Суть радиационно-динамических эффектов заключается в том, что области прохождения плотных каскадов атомных смещений, термализирующиеся за времена порядка 10^{-12} с и разогреваемые до 3000-6000 К и выше (thermal spikes), являются зонами взрывного энерговыделения, что не учитывалось классической радиационной физикой.

Радиационная тряска конденсированных сред послекаскадными волнами объясняет «эффект малых доз», заключающийся в существенном изменении структуры и свойств материалов при незначительном числе смещений на атом, а также эффекты дальнего действия при корпускулярном облучении. Эти два эффекта представляют собой по сути дела две стороны одной и той же медали.

В качестве доказательства наличия и особой роли наноразмерных зон взрывного энерговыделения впервые экспериментально измерена температура этих зон на основе анализа спектрального состава свечения мишеней в ходе их облучения ионами аргона [1, 2]. В качестве другого доказательства роли каскадных динамических эффектов получены атомномасштабные полевые ионные изображения зон прохождения плотных каскадов атомных смещений (с определением их геометрических размеров и числа выживших дефектов). Кроме того, исследовано воздействие ионов Ar^+ и He^+ на металлические нанопроволоки, диаметр которых (60 и 100 нм) сравним с диаметром каскадных областей (10-20 нм). Получены прямые электронно-микроскопические изображения нанопроволок [3] и выплескиваемых с их поверхности разогретых каскадных областей (времена выплескивания и затвердевания этих областей сопоставимы между собой).

На базе использования наномасштабных динамических эффектов разработаны основы промышленной технологии мгновенного, в течение нескольких секунд, холодного радиационного отжига алюминиевых сплавов. Предложены методы улучшения электрических и магнитных свойств материалов. Радиационно-динамические эффекты играют важную роль 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.

Литература

1. Ovchinnikov V.V., Makhin'ko F.F., Solomonov V.I., et al. *Tech. Phys. Lett.* **38** 42 (2012).
2. Ovchinnikov V.V., Makhin'ko F.F., Solomonov V.I. *Journal of Physics: Conference Series.* **652** 012070 (2015).
3. Bedin S.A., Makhin'ko F.F., Ovchinnikov V.V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* (2016).

СИЛЫ СТОКА ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОЦК МЕТАЛЛАХ Fe И V

А.Б. Сивак¹, С.В. Коровин¹, П.А. Сивак¹, В.М. Чернов²

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

²АО «ВНИИИМ», Москва, Россия

При исследованиях радиационных свойств металлов и создании их феноменологических моделей возникает необходимость знания сил стоков для собственных радиационных дефектов (РД – собственные межузельные атомы (СМА), вакансии) и преференсов (относительной разности силы стока для СМА и вакансий) элементов микроstructures разного типа.

Для ОЦК металлов Fe и V в температурном диапазоне 293 К – 1000 К определены силы стока для собственных РД и преференсы элементов микроstructures:

- малоугловые границы наклона (МГН) – дислокационные стенки, состоящие из прямолинейных краевых дислокаций в системах скольжения $\langle 111 \rangle \{110\}$ и $\langle 111 \rangle \{112\}$ – с углами разориентировки от $1,5^\circ$ до 10° , и размерами субзерна (интервал расстояния между двумя дислокационными стенками) $150a - 900a$, a – параметр решетки;
- квадратные межузельные дислокационные петли (ДП) с вектором Бюргерса $\langle 100 \rangle$, плоскостью габитуса $\{100\}$, дислокационными отрезками вдоль направлений $\langle 100 \rangle$, длина стороны ДП варьируется от $1,5a$ до $34,5a$, плотность ДП – от $(200a)^{-3}$ до $(5000a)^{-3}$;
- сферические вакансионные поры (ВП) диаметром $2a - 20a$, плотность пор $(200a)^{-3}$.

Силы стока рассчитывались в рамках многоуровневого подхода с использованием методов кинетического Монте-Карло (КМК), анизотропной линейной теории упругости (АЛТУ) и молекулярной статики (МС). Диффузия РД в модельных кристаллах, содержащих элементы микроstructures, моделировалась КМК-методом. Учет упругого взаимодействия между РД (упругими диполями) и упругими полями элементов микроstructures (МГН, ДП, ВП) производился в рамках АЛТУ. Упругие поля МГН рассчитывались в рамках АЛТУ, а ДП и ВП – с помощью МС-метода. Для расчета полей ДП в Fe использовался межатомный потенциал Романова и др., 2006; для расчета полей ВП в Fe и V – потенциалы Malerba et al., 2010 и Mendeleev et al., 2007 соответственно. Дипольные тензоры РД в Fe и V рассчитаны МС-методом с использованием потенциалов Романова и др., 2006 и Романова и др., 2012 соответственно.

Значения преференса МГН в несколько раз выше для Fe, чем для V, изменяются в пределах 30% при изменении температуры от 293 К до 1000 К, примерно обратно пропорциональны размеру субзерна, уменьшаются на порядок с увеличением угла разориентировки от $1,5^\circ$ до 10° . Значения преференса МГН намного меньше соответствующих значений равномерно распределенных по объему дислокаций.

В Fe, преференс ДП растет с размером ДП, насыщаясь при длине стороны ДП большей $20a$, и слабо зависит от плотности ДП. При температурах выше 600 К, для наименьших рассмотренных ДП значения преференса составляют всего несколько процентов, в то время как для ДП с длиной стороны больше $20a$ – десятки процентов.

Преференс ВП слабо зависит от плотности ВП, по абсолютной величине заметно меньше для крупных пор (диаметр больше $\sim 13a$), чем для малых. Максимальный преференс имеют поры с диаметром $2a$ и $3a$ в Fe и V соответственно (48% и 44% соответственно при 293 К, 28% и 7% соответственно при 1000 К).

Рассмотрены некоторые радиационные свойства металлов и их феноменологические модели с учетом полученных результатов.

ЭВОЛЮЦИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ НАНОЧАСТИЦ И ВАКАНСИОННЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СТАРЕЮЩЕГО СПЛАВА Fe-Ni-Al

Д.А. Перминов, А.П. Дружков, С.Е. Данилов, В.Л. Арбузов
Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
(perminov@imp.uran.ru)

В работе с помощью позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС) было исследовано влияние интерметаллидных наночастиц Ni₃Al на эволюцию вакансионных дефектов в гцк сплаве Fe-Ni-Al в процессе электронного облучения [1]. Показано, что наноразмерные (~4.5 нм) гомогенно распределенные в матрице интерметаллидные выделения снижают скорость накопления дефектов в сплаве. При этом данный эффект усиливается с увеличением температуры. Методами ПАС и измерения остаточного электросопротивления (ОЭС) также изучались процессы образования и роста интерметаллидных частиц в процессе термического отжига и облучения электронами. В частности были обнаружены и исследованы радиационно-индуцированное образование и рост интерметаллидных наночастиц в закаленном сплаве в процессе облучения при 573 К. Показано, что совместное использование методов ОЭС и ПАС позволяет изучать эволюцию выделений в процессе облучения и отжига параллельно с исследованием поведения вакансионных дефектов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема “Спин” № 01201463330).

Литература:

[1] A.P. Druzhkov, S.E. Danilov, D.A. Perminov, V.L. Arbuzov. *J. Nucl. Mater.* **476** (2016) 168-178.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДИСЛОКАЦИОННЫХ СТОКОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ И ДИСЛОКАЦИОННЫЙ ПРЕФЕРЕНС В δ -Pu

С.В. Коровин, П.А. Сивак, А.Б. Сивак
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (korovin_sv@nrcki.ru)

При исследованиях радиационных свойств металлов и создании их феноменологических моделей возникает необходимость знания эффективностей дислокационных стоков (ДС) для собственных радиационных дефектов (РД – собственные межузельные атомы (СМА), вакансии) и дислокационных преференсов (относительной разности эффективностей стока для СМА и вакансий).

Для δ -Pu в интервалах температур 200 К – 748 К и дислокационных плотностей

$8 \times 10^{11} \text{ м}^{-2} - 2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$, рассчитаны эффективности ДС для собственных РД и преференсы прямолинейных полных винтовых, смешанных и краевых дислокаций в системах скольжения $\langle 110 \rangle \{110\}$, $\langle 110 \rangle \{221\}$, $\langle 110 \rangle \{111\}$, $\langle 110 \rangle \{112\}$, $\langle 110 \rangle \{115\}$, $\langle 110 \rangle \{001\}$.

Эффективности ДС рассчитывались в рамках многоуровневого подхода с использованием методов кинетического Монте-Карло (КМК), анизотропной линейной теории упругости (АЛТУ) и молекулярной статики (МС). Диффузия РД в модельных кристаллах, содержащих дислокации, моделировалась КМК-методом. Учет упругого взаимодействия между РД (упругими диполями) и упругими полями дислокаций производился в рамках АЛТУ. Упругие поля дислокаций рассчитывались в рамках АЛТУ. Дипольные тензоры РД рассчитаны в [1] МС-методом с использованием потенциала межатомного взаимодействия, разработанного в рамках модифицированного метода погруженного атома в [2] (использовался набор параметров потенциала с $t^{(3)} = 0$ [3], обеспечивающий стабильность ГЦК фазы Рu при 0 К).

Эффективность ДС слабо зависит от системы скольжения дислокаций при заданном угле между дислокацией и вектором Бюргерса (в пределах 14 % и 8 % для СМА и вакансий соответственно при температуре 293 К). Эффективность ДС уменьшается с ростом температуры, ее температурная зависимость хорошо описывается выражением $\xi(T) = \xi_0 [1 - AT^{-1} \exp(-T/B)]$, где A , B – подгоночные параметры, ξ_0 – эффективность невзаимодействующего линейного стока. Зависимость эффективности ДС от дислокационной плотности ρ_d при $\rho_d < 2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$ хорошо описывается выражением $\xi(\rho_d) = s\xi_0(\rho_d) + t(\rho_d)^{1/2}$, s и t – подгоночные параметры.

Все рассмотренные дислокации (краевые, смешанные и винтовые) являются более эффективными стоками для СМА, чем для вакансий. Значения дислокационного преференса уменьшаются с ростом температуры и падением дислокационной плотности. Например, дислокационный преференс для винтовых и краевых дислокаций:

- уменьшается от 11 % до 3 % и от (32 – 39) % до (10 – 14) %, соответственно, с ростом температуры от 250 К до 748 К при $\rho_d = 2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$;
- увеличивается от 5 % до 10 % и от (16 – 20) % до (29 – 35) %, соответственно, с ростом дислокационной плотности от $8 \times 10^{11} \text{ м}^{-2}$ до $2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$.

Литература

1. Dubasova N.A., Chernov V.M., Sivak A.B., *Joint International Topical Meeting on Mathematics & Computation and Supercomputing in Nuclear Applications (M & C + SNA 2007)*, **vol. 2**, American Nuclear Society, 2007, p.786.
2. Baskes M.I., *Phys. Rev. B* **62**, 15532 (2000).
3. Uberuaga B.P., Valone S.M., Baskes M.I., Voter A.F., *AIP Conf. Proc.* **673**, 213 (2003).



II. Материалы для ядерной и термоядерной энергетики

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).

CARBON CONTAMINATION, ITS CONSEQUENCES, AND ITS MITIGATION DURING CHARGED PARTICLE SIMULATION OF NEUTRON-INDUCED VOID SWELLING

Lin Shao^{1,*}, Jonathan Gigax¹, Di Chen², Hyosim Kim¹, Frank A. Garner¹, Jing Wang^{1,3},
Mychailo B. Toloczko³, S.A. Maloy²

¹*Department of Nuclear Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843*
(Frank.garner@dslextrreme.com)

²*Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87544*

³*Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA 99354*

Self-ion irradiation of reactor structural materials at accelerated dpa rates has been used successfully to simulate the development of void swelling during neutron irradiation. The credibility of this simulation requires that factors that are atypical of neutron environments be taken into consideration and mitigated as much as possible. The major neutron-atypical variables arise from strong surface influence, strong gradients in dpa rate, injected interstitial suppression of void nucleation, compressive stress state and compositional redistribution.

However, it has recently become known that the bombarding ion beam entrains carbon, nitrogen and oxygen via Coulomb dragging and deposits these elements on the bombarded specimen. Carbon especially is deposited, ion-mixed and then diffuses into the ion damaged region. The results of a series of experiments conducted on pure Fe, model alloys and commercial alloys are presented that show the development of internal depth profiles of carbon, nitrogen and oxygen.

Carbon is known to have a strong effect on void swelling in neutron-irradiated steels and it is demonstrated in this presentation that beam-induced carbon contamination also depresses swelling during ion irradiation of HT9 ferritic-martensitic steel.

Monte Carlo modeling of the entrainment phenomenon is presented. An innovative method is then discussed that was developed to strongly reduce such contamination using multiple beam-deflection steps coupled with liquid nitrogen cooling.

EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF NUCLEAR REACTOR STRUCTURAL COMPONENTS WITH INNOVATIVE TESTING METHODS

M. Culek, R. Kopriva, M. Falcnik, I. Eliasova, B. Maresova, M. Kytka
UJV Rez, a. s., Hlavni 130, Rez, 250 68 Husinec Czech Republic,
(michal.culek@ujv.cz, radim.kopriva@ujv.cz)

One of the most important nuclear power plant (NPP) management tasks is to ensure its safe operation. The most critical component in this case is the reactor pressure vessel (RPV), which is subjected to demanding operating conditions such as high pressure, high temperature and intensive neutron flux. These factors lead up to degradation of reactor vessel materials, which cause radiation hardening and embrittlement. Most of the NPPs have established the program of surveillance specimens for monitoring of RPV material properties changes in operational conditions. These programs involve mainly standard three-point bending specimen and cylindrical specimens for tension. Large sample sizes are associated with high radioactivity and

higher consumption of archive materials, whose availability is often limited. One of the perspective ways how to evaluate the degradation of irradiated materials is the use of innovative semi-destructive test methods – ABIT (Automated Ball Indentation Test) or SPT (Small Punch Test).

Aim of presentation is to correlate results from conventional test methods with results from Automated Ball Indentation Test (ABIT). Both tests were done on 15KhMFA material in unirradiated and irradiated state. 15KhMFA is tempered bainitic steel used for the fabrication of RPV of WWER 440-type nuclear reactors. ABIT is fully computer controlled test, consisting in multiple indentation of the metal surface (scheme of indent is on Fig. 1. and schematic of applied force versus indentation depth is on Fig. 2.) Aim of the ABIT is to evaluate the localized strength characteristics of the metal. Because the indentation is carried out by a ball indenter, surface for indentation should be smooth and without sharp corners, from which could develop a crack. The development of guidelines for the evaluation of mechanical properties of structural steels of nuclear devices by the method ABIT was done by ÚJV Řež, a. s, together with the Czech Technical University in Prague, FNSPE. A number of tests of indentation have been carried in the past year in various structural materials of the WWER reactor in non irradiated state. Mechanical properties department in ÚJV Řež, a. s. held the final testing of irradiated material in semi-hot laboratories. Development of ABIT method is carried out with financial

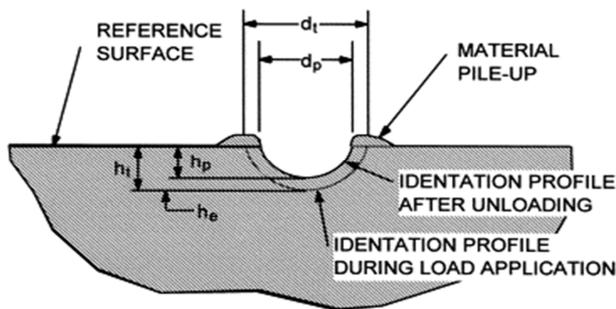


Fig. 1 - Instrumented Hardness Test method geometry during force application and after force removal (complete unloading)

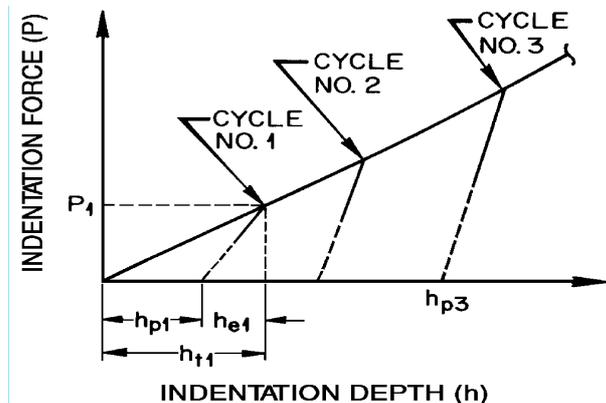


Fig. 2 - Schematic of applied force versus indentation depth of the ball indenter

support from the Technology Agency of the Czech Republic within the framework of the project "TA03011266: Development of innovative semi-destructive testing methods for highly active material to assess the life of the nuclear power plant component."

References

1. *Tests Methods for Automated Ball Indentation (ABI) Testing of Metallic Samples and Structures to Determine Tensile Properties and Stress - Strain Curves*, ISO / TC 164 / SC 3N1109, 2001-02-25 (Draft standard)

NEW INSIGHTS ON STRAIN HARDENING BEHAVIOR AND “TRAVELING WAVE” DEFORMATION MODES IN NEUTRON- IRRADIATED AUSTENITIC STEELS

Maxim N. Gussev², David A. McClintock¹, Frank Garner³

¹*Instrument and Source Division, Oak Ridge National Laboratory, P.O. Box 2008, Building 8600, MS 6476, Oak Ridge, TN, 37831-6476, USA*

²*Fusion and Materials for Nuclear Systems Division, Oak Ridge National Laboratory, P.O. Box 2008, Building 4500S, MS 6136, Oak Ridge, TN 37831-6136, USA*

³*Radiation Effects Consulting, 2003 Howell Ave., Richland, WA, 99354, USA*
(Frank.garner@dslextre.me)

Digital Image Correlation (DIC) is an advanced test method for analysis of strain rate evolution and plastic strain distribution. The method's advantages and limitations are discussed with respect to LWR applications. Limited data exist for irradiated materials, however. This work analyzes a new DIC dataset (>30 tests) on austenitic steels irradiated at SNS to ~9 dpa for comparison with data from fast and light-water reactors. Strain hardening behavior associated with martensite formation is analyzed with special focus on small strain areas where deformation bands have been observed in many specimens, retrieving band parameters such as strain amplitude and propagation rate. Results on traveling deformation waves at small strains are compared with previous data on the high-strain-amplitude deformation bands in specimens irradiated in other reactors.

Previously, the spatial distribution of the traveling wave front was determined using magnetic probes of finite diameter and these studies gave the impression that the traveling wave "front" had a measurable thickness over which the transition occurred, but it was suspected that this result was a resolution limit problem imposed by the probe size. Using the EBSD technique, however, and imaging the wave front over a grain-to-grain dimension, it is clear that the wave front is very abrupt, with the martensitic transformation nearing completion before moving from one grain to the next adjacent grain.

The complexity of the deformation behavior and associated irradiation-assisted phase instability are discussed with emphasis on the possibility that this "second-order" phenomena may become first-order in importance at higher damage levels.

SWELLING, CREEP AND EMBRITTLEMENT OF D9 STAINLESS STEEL CLADDING AND DUCT IRRADIATED IN THREE FFTF DRIVER FUEL ASSEMBLIES TO HIGH NEUTRON EXPOSURES

F.A. Garner¹, B.J. Makenas², S.A. Chastain²

¹*Texas A&M University, College Station TX USA* (Frank.garner@dslextre.me)

²*Retired, Richland WA USA*

Most data sets on void swelling and irradiation creep of austenitic structural steels were derived in relatively small amounts, making it difficult to extract full parametric dependencies for development of predictive correlations of dimensional change. This paper presents a much larger data base derived from fuel cladding and ducts constructed from D9 steel, an improved titanium-modified variant of AISI 316 stainless steel.

This report focuses on the swelling, creep, length change, ovality and embrittlement behavior of 20% cold-worked D9 cladding and duct used in three mixed-oxide driver fuel subassemblies designated C1, D9-2 and D9-4 operating at rather different temperature histories, leading to significant differences in swelling. These 217-pin assemblies were irradiated in the FFTF fast reactor to maximum exposures of 16.3, 25.3 and 21.4 x 10²² n/cm² ($E > 0.1$ MeV) or 73, 115 and 96 dpa, respectively. The fuel pin cladding reached swelling values of 21-28% in D9-4 and 37-38% in D9-2, with much of the in-core portion of the pins having attained the terminal swelling rate of ~1%/dpa. Since the D9-4 duct operated at lower temperatures than the D9-4 cladding, the swelling of the duct was relatively low, peaking at 6-7%. Due to the higher temperatures and lower dpa levels of the C1 assembly the cladding swelled the least of the three assemblies.

Void swelling was found to vary with dpa rate, irradiation temperature and small heat-to-heat differences in composition. The latter involved relatively small differences in phosphorus content, but produced significant differences in swelling. Compared to data sets derived from the smaller EBR-II fast reactor, it is shown that the temperature dependence of void swelling in the much larger FFTF is rather invariant over a large range of temperatures. The well-known "creep disappearance" phenomenon was observed to develop at moderate swelling levels. While no pin failures were observed during in-reactor operation, failure arising from severe void-induced embrittlement occurred in several D9-2 fuel pins and the D9-4 duct during post-irradiation handling.

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ТЯЖЕЛОИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННОЙ ОКСИДАМИ СТАЛИ

А.А. Богачев^{1,2}, С.В. Рогожкин^{1,2}, А.А. Никитин^{1,2}, В.А. Скуратов³, Ch. Trautmann⁴

¹ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

(bogachev@itep.ru)

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

³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁴GSI, Дармштадт, Германия

Разрабатываемые в настоящее время стали представляют собой сложные гетерогенные системы, содержащие наноразмерные включения. Распространение энергии в таких структурах носит нетривиальный характер и может способствовать локальным изменениям в структурно-фазовом состоянии материала. Решение вопроса стабильности таких сталей под влиянием высокоэнергетического излучения требует систематических исследований с использованием ионного облучения в широком интервале масс и энергий, позволяющего варьировать различные уровни ионизационных потерь энергии и как следствие результирующее воздействие на материал.

Дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали рассматриваются в качестве перспективных материалов для активной зоны ядерных/термоядерных реакторов и других высокотемпературных применений, включая космическую промышленность. ДУО сплавы должны иметь повышенную прочность и радиационную стойкость при высоких температурах по сравнению с обычными исходными сплавами. Эти исключительные механические свойства материала достигаются за счет наличия большого количества мелкодисперсных оксидных наночастиц в его микроструктуре. Облучение быстрыми тяжелыми ионами приводит к высокой диссипации энергии в решетке вдоль трека частицы. Быстрый вклад выделившейся энергии приводит к значительным изменениям в

структуре оксидных частиц.

В данной работе методами высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии проведено исследование стали ODS Eurofer облученной ионами ксенона ($1,2 \text{ МэВ/а.е.м. до } 1 \cdot 10^{14} \text{ ионов/см}^2$) и золота ($5,6 \text{ МэВ/нуклон до } 5 \cdot 10^{12} \text{ ионов/см}^2$) при комнатной температуре. Проведен анализ процессов образования треков и аморфизации внутри оксидных частиц при выбранных условиях облучения. Сопоставлен эффект высоко- и низкоэнергетического (100 кэВ/нуклон) воздействия на наномасштабное состояние ДУО стали.

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГОМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ НА СТРУКТУРУ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ СО СТРУКТУРОЙ АУСТЕНИТА

А.В. Макаров¹, С.Н. Лучко¹, В.А. Шабашов¹, Е.Г. Волкова¹, А.Л. Осинцева²,
А.В. Литвинов¹, А.Е. Заматовский¹, В.В. Сагарадзе¹

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

²*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

Одно из перспективных направлений в создании экономнолегированных высокопрочных, износо- и коррозионостойких материалов связано с разработкой сталей с повышенным содержанием азота – высокоазотистых сталей. Изучено влияние больших пластических деформаций, реализуемых методом сдвига под давлением (СД), на структуру фазовый состав и механические свойства высокоазотистой стали 08X22ГА1,24, полученной методом литья с противодавлением азота и подвергнутой различным термическим обработкам (закалка от 1180°C , старение при 450 и 550°C), формирующим аустенитную структуру металлической матрицы с нитридами хрома. Установлено, что после закалки стали от 1180°C в аустенитной структуре присутствуют крупные нерастворившиеся первичные нитриды Cr_2N . Концентрация азота в γ -твердом растворе $0,67\text{--}0,74 \text{ мас. } \%$, что существенно меньше содержания азота в стали. Последующие старение при температурах 450 и 550°C ($0,5 \text{ ч}$) приводит к выделению равномерно распределенных наночастиц CrN с ГЦК решеткой, изоморфно связанных с аустенитной ГЦК-матрицей.

Методами трансмиссионной электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, мессбауэровской спектроскопии после деформации СД при комнатной температуре зафиксировано: появление нано- и субмикроструктур; данные структуры содержат аустенит и до $20 \text{ об. } \%$ α' -мартенсита деформации; происходит частичное деформационное растворение первичных нитридов Cr_2N , полное (после старения при 450°C) и частичное (после старения при 550°C) растворение вторичных нитридов CrN ; отмечается рост параметра кристаллической решетки аустенита и соответствующие насыщение азотом до $0,92\text{--}0,99 \text{ мас. } \%$ твердого раствора.

Измерениями микротвердости по методу восстановленного отпечатка индентором Виккерса установлено эффективное (более чем двухкратное) упрочнение стали от уровня микротвердости $\sim 360 \text{ HV}0,025$ после термических обработок до 830 , 860 и $888 \text{ HV}0,025$ после деформации сдвигом под давлением соответственно закаленного и состаренных при 450 и 550°C состояний. При измерении микромеханических свойств азотистой стали

методом кинетического микроиндентирования пирамидкой Берковича отмечен рост твердости вдавливания при максимальной нагрузке от $H_{IT}=4,1-4,2$ ГПа у термообработанных состояний до 8,7 ГПа у закаленного и 9,8–9,9 ГПа у состаренных состояний. По сравнению с закалкой дополнительное старение обеспечивает более эффективное упрочнение при сдвиге под давлением и более интенсивный рост сопротивления стали упруго-пластическим деформациям при контактном нагружении вследствие деформационного растворения высокодисперсных вторичных нитридов хрома.

Деформация СД – эффективный способ деформационного упрочнения, диспергирования структуры и деформационного растворения нитридов высокоазотистой стали.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 14-13-00908.

Литература:

1. Макаров А.В., Лучко С.Н., Шабашов В.А. и др., *ФММ*, **118**, № 1, 55 (2017).

ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК (N, Mn, Cu, W) НА КОРРОЗИОННЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ AISI 316L

Д.А. Мережко¹, М.С. Мережко¹, О.П. Максимкин¹, М.Н. Gussev², J.T. Busby²

¹Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан (merzhko.mihail@gmail.com)

²Oak Ridge National Laboratory, USA

Создание новых конструкционных материалов, обладающих определенным комплексом физических и механических характеристик, является важной задачей современного материаловедения. Материалы, предназначенные для работы в ядерных и термоядерных реакторах, должны не только обеспечивать возможность длительной эксплуатации в жестких условиях (нейтронное облучение, тепловые нагрузки, коррозионная среда), но и сохранять заданные физико-механические характеристики.

В современных ядерных и термоядерных реакторах используются конструкционные материалы с различными механико-термическими обработками. Так – для создания сложных конструкций обычно применяется литые аустенитные стали, характеризующиеся относительно низкими механическими характеристиками, крупнозерновой структурой и неравномерностью распределения элементов по матрице материала. Там, где это возможно, для повышения эксплуатационных свойств, стали подвергают холодной прокатке с последующим аустенизирующим отжигом. Для реакторов 4-го поколения разработана специальная механико-термическая обработка для получения материалов с инженерией границ зерен (GBE), у которых отмечается улучшение коррозионной стойкости, уменьшен сток примесей на границы зерен и зернограничное проскальзывание [1-2].

Помимо механико-термической обработки для улучшения физико-механических свойств конструкционных сталей используется легирование. В частности, азот и марганец обладают аустенитстабилизирующим и упрочняющим действием. Стали, легированные азотом, имеют повышенное сопротивление локальным видам коррозии (питтинговой, ножевой и т.п.). Добавление меди улучшает коррозионную стойкость стали. Вольфрам – увеличивает прочность при повышенных температурах.

В настоящей работе проведено сравнительное исследование механических свойств и сопротивляемости питтинговой коррозии модифицированной нержавеющей стали AISI 316L, дополнительно легированной азотом, марганцем, медью и вольфрамом. Коррозионные испытания выполнены в соответствии со стандартом ASTM G48-03 (метод А) в 10% растворе трихлорида железа ($\text{FeCl}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Исследуемые модификации стали AISI 316L были в литом и холоднокатанном состоянии, а также с «инженерией границ зерен» (доля «специальных» границ, $\Sigma 3, 9, 27, \sim 75-80\%$). Часть образцов была облучена нейтронами на реакторе ВВР-К до максимального флюенса $5 \cdot 10^{18} \text{ н/см}^2$.

Для исследованных материалов обсуждается влияние легирующих элементов, механико-термической обработки и нейтронного облучения стали на механические свойства, и сопротивляемость питтинговой коррозии.

Литература

1. Randle V. *Materials Science and Technology*. **26**, 3(2010), pp. 253-261.
2. Murty K. L., *Journal of Nuclear Materials*. **383**, 1(2008), pp. 189-195.

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР ИСПЫТАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ФАЗОВОЕ $\gamma \rightarrow \alpha$ ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ X18H9

О.П. Максимкин, С.В. Рубан, Л.Г. Турубарова

Институт ядерной физики, г.Алматы, Республика Казахстан (maksimkin@inp.kz)

Обсуждаются результаты механических испытаний и физических исследований, необлученных и облученных нейтронами образцов стали типа X18H9, деформированных растяжением при отрицательных температурах.

Ранее, в связи с обнаружением эффекта «волны фазового превращения» в высокооблученных реакторных сталях [1,2], нами было показано, что варьируя такие параметры как степень нейтронного облучения, температуры аустенизации и испытания можно активно влиять на пострадиационную пластичность аустенитных нержавеющей сталей. Настоящая работа является продолжением изысканий в этом направлении. Термообработанные (1050°C, 30 мин) необлученные и облученные в активной зоне реактора ВВР-К флюенсами нейтронов $3,9 \cdot 10^{18}$; $1,9 \cdot 10^{19}$ и $9 \cdot 10^{19} \text{ н/см}^2$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) при температуре $\sim 80^\circ\text{C}$ образцы подвергали пошаговому растяжению на установке Инстрон-1195 со скоростью 0,5мм/мин в интервале температур от 20 до -100°C . Синхронно с диаграммой растяжения регистрировали образование и накопление индуцированной деформацией ферромагнитной α' фазы. Определены температурные зависимости характеристик прочности и пластичности, а также кинетические параметры $\gamma \rightarrow \alpha'$ перехода. В частности, установлено, что уменьшение температуры испытания до -100°C приводит к тому, что критическое напряжение начала образования α -фазы увеличивается с ростом флюенса нейтронов. При этом количество α -фазы, накопленной к моменту растяжения облученных образцов до предела прочности, уменьшается с ростом повреждающей дозы. Наряду с тем из эксперимента определяли энергетические характеристики деформационного процесса и при этом показано, что механическая работа, необходимая для начала $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при растяжении, как для необлученных, так и для облученных стальных образцов увеличивается с ростом температуры испытания от -100°C до 20°C .

На основании анализа полученных результатов предлагается наряду с известными из литературы характерными температурами M_s и M_d ввести еще один параметр - M_p , физический смысл которого заключается в том, что по достижению температуры растяжения M_p интенсивности $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода в необлученном и облученном нейтронами стальных образцах становятся одинаковыми.

Литература:

1. Максимкин О.П., Гусев М.Н., Токтогулова Д.А. «Волны пластической деформации при деформации образцов нержавеющей стали 12X18H10T, облученных до 26-55 сна в реакторе БН-350 // *Известия вузов. Физика* - 2008. - **т.51**. - №3. - стр.78-89.

2. Рубан С.В., Гусев М.Н., Рыбин С.В. Экспериментальное изучение «волны деформации» в необлученной и облученной нейтронами метастабильной стали 12X18H10T // *Вестник НЯЦ РК*. - 2010. - №2. - стр.25-30.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe НА НАНОСТРУКТУРУ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЧС-139

Н.А. Искандаров^{1,2}, А.А. Лукьянчук^{1,2}, А.С. Шутов^{1,2}, С.В. Рогожкин^{1,2}, А.Г. Залужный^{1,2},
Т.В. Кулевой^{1,2}, Р.П. Куйбида¹, С.Л. Андрианов¹, М.В. Леонтьева-Смирнова³,
Е.М. Можанов³

¹ФГБУ «ГНЦ РФ - ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
(iskandarov@itep.ru)

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

³Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических
материалов им. А.А. Бочвара

В настоящее время жаропрочные ферритно-мартенситные стали являются перспективными конструкционными материалами активной зоны ядерных реакторов. В России ведутся разработки по созданию жаропрочных 12%-ных хромистых сталей ЭК-181 (16X12В2ФТар) и ЧС-139 (20X12НМВБФАР) [1].

Деградация эксплуатационных свойств конструкционных материалов активной зоны обусловлена воздействием облучения и высоких температур. Поскольку структурно-фазовое состояние материалов играет важную роль в механических свойствах, необходима информация о его поведении под воздействием облучения. Целью настоящей работы является изучение изменения наноструктуры стали ЧС-139 методом атомно-зондовой томографии. В работе применялось облучение ионами железа, которое позволяет моделировать каскадное рождение дефектов и, соответственно, моделировать влияние реакторного облучения на тонкую структуру исследуемого материала. Облучение проводилось на Стенде Облучения Реакторных МАтериалов «СОРМАТ» (ИТЭФ) при комнатной температуре. Образцы для атомно-зондовых исследований облучались до дозы ~9 и 18 сна. В исходном состоянии стали ЧС-139 в объеме материала обнаружено значительное число наноразмерных кластеров ($\sim 10^{23} \text{ м}^{-3}$), обогащенных хромом, ванадием, азотом и ниобием. Показано, что под воздействием облучения происходит изменение состава и размеров кластеров. Увеличение размера кластеров в процессе облучения сопровождается снижением в них концентрации хрома, ванадия, азота и ниобия.

Литература

1. Леонтьева-Смирнова М. В., Иолтуховский А. Г. и др., *Вопросы атомной науки и техники, серия: Материаловедение и новые материалы*, **1(64)**, 247 (2005).

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА СКЛОННОСТЬ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ И КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ СТАЛИ 06X18H10T

О.А. Голосов, Т.Л. Кузина, В.Б. Семериков

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

Внутрикорпусные устройства (ВКУ) реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, включающие шахту внутрикорпусную, выгородку и блок защитных труб, проектировались как несменные элементы конструкций со сроком эксплуатации равным ресурсу реактора. Первые серийные блоки ВВЭР-440 приближаются к установленному для них проектному сроку эксплуатации. Решается вопрос о возможности продления их ресурса, в частности, обоснования запроектного ресурса ВКУ. Для решения этой задачи требуются данные о поведении материалов ВКУ при продолжительном облучении.

Все элементы ВКУ ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 изготовлены из аустенитной хромоникелевой (АХН) стали 08X18H10T и ее сварных соединений. Эта сталь в исходном (необлученном) состоянии имеет высокую пластичность и высокую коррозионную стойкость в обескислороженной водной среде теплоносителя I контура. Основываясь на этих данных, а также на низких напряжениях от механических нагрузок долгое время считалось, что элементы ВКУ весьма долговечны и не могут ограничивать ресурс реакторной установки.

Проведенные за последние два десятилетия материаловедческие и лабораторные исследования физико-механических свойств и служебных характеристик облученных АХН сталей, а также случаи повреждения ВКУ зарубежных АЭС показали, что интенсивное нейтронное облучение элементов ВКУ приводит не только к сильной деградации свойств АХН сталей (снижение характеристик пластичности, трещиностойкости и стойкости к коррозионному растрескиванию), но и к возникновению значимого нагружающего фактора - внутренних напряжений. Сочетание низких свойств облученной стали и высоких напряжений может привести к преждевременному разрушению элементов ВКУ и потере их работоспособности.

Одним из важных механизмов повреждения АХН сталей при нейтронном облучении является механизм, приводящий к значимому снижению сопротивления коррозионному растрескиванию (КР) материала. К настоящему времени механизм КР облученных АХН сталей до конца не изучен. Поэтому получение экспериментальных данных по исследованию влияния нейтронного облучения на стойкость АХН сталей к КР является весьма актуальным.

В работе представлены результаты исследований склонности к межкристаллитной коррозии (МКК) и склонности к КР стали 06X18H10T после эксплуатации к качеству материала наружных оболочек твэлов четырех испарительных ОТВС реакторов типа АМБ при температуре $T=340-370^{\circ}\text{C}$ до набора флюенса нейтронов $\Phi=(2,01-8,05)\cdot 10^{21}$ н/см² ($E>0,4$ кэВ). Склонность к МКК стали 06X18H10T определяли по методу АМУ, ДУ по ГОСТ 6032-2003 и методом потенциодинамической реактивации по ГОСТ 9.914-91.

Склонность к КР оценивали по методу ускоренных испытаний в кипящих растворах $MgCl_2$ в температурном диапазоне 114-154 °С и напряжениях $0,5 \cdot \sigma_{0,2}$, $0,75 \cdot \sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,2}$.

Все три метода испытаний на МКК показали, что сталь 06Х18Н10Т, после эксплуатации имеет повышенную склонность к МКК. Скорость коррозии облученных образцов стали в кипящей 65% азотной кислоте в 200-300 раз выше, чем у необлученной стали марки 12Х18Н10Т. Ускоренными испытаниями на КР в кипящих растворах $MgCl_2$ установлено, что с увеличением температуры, растягивающих напряжений и флюенса нейтронов время до разрушения образцов из стали 06Х18Н10Т сокращается. При этом время до разрушения находится в обратной квадратичной зависимости от флюенса нейтронов.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРОЧНЯЮЩЕГО ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ПОКРЫТИЯ TiNbN

А.С. Ларионов, С.Б. Кислицин, И.Д. Горлачев

*Институт ядерной физики, Министерства энергетики РК, Алматы, Республика
Казахстан (larionov@inp.kz)*

Покрытия на основе нитридов переходных металлов, благодаря высоким физико-механическим свойствам - твердости, износостойкости и термической стабильности, относятся к перспективным конструкционным материалам в ядерной и термоядерной энергетике. Пока еще мало исследована стабильность структуры таких материалов под облучением, имеются лишь единичные работы в этом направлении [1-3].

В данной работе изучены особенности изменений нанотвердости приповерхностных слоев покрытия TiNbN под воздействием ионов Kr и Xe, моделирующих взаимодействие осколков деления ядерного топлива с конструкционным материалом, а так же физическое распыление поверхности покрытия при облучении.

Покрытия TiNbN толщиной ~800 нм осаждались на подложку из нержавеющей стали 12Х18Н10Т методом магнетронного распыления из двух магнетронов (Ti и Nb) при содержании азота в плазмообразующей газовой смеси до 35%.

Облучение ионами $^{84}Kr^{+14}$ и $^{132}Xe^{+18}$ образцов с покрытиями проведено на низкоэнергетическом канале ускорителя ДЦ-60. Энергия ионов составляла 20 кэВ на заряд, т.е. полная энергия ионов Kr = 280 кэВ, ионов Xe – 360 кэВ. Флюенс облучения составил $1 \cdot 10^{15}$ - $1 \cdot 10^{17}$ ион \times см $^{-2}$, температура облучения не превышала 150°С.

Коэффициент распыления определяли по измерению толщины распыленного слоя с применением метода Резерфордского обратного рассеяния на ионах азота и протонах. Изучение структуры поверхности до и после облучения проводилось методами электронной растровой микроскопии с рентгеновским микроанализом и атомно-силовой микроскопии.

Проведенные исследования показали, что коэффициент распыления поверхности покрытия TiNbN низкоэнергетическими ионами Kr и Xe ниже коэффициента распыления поверхности конструкционной стали 12Х18Н10Т и составляет ~5 ат./ион, а также установлена зависимость коэффициента распыления от флюенса падающих ионов.

Литература

1. Gavarini S., N.Toulhoat, C.Peaucelle, P.Martin, J. Mende, Y.Pipon, H.Jaffrezic, *J.Nucl.Mater.*, 2007, Vol.362, iss.2-3, p. 364-373.
2. Uglov V.V, Rusalski D.P., Zlotski S.V., Sevriuk A.V., Abadias G., Kislitsin S.B., Kadyrzhanov K.K., Gorlachev I.D., Dub S.N., *Surface & Coatings Technologies*, 2010, Vol. 204, p. 2095-2098.
3. Kislitsin S., Gorlachev I., Uglov V., *Structural Materials for Innovative Nuclear System (SMINS-3)*, Workshop Proceedings, Eds. OECD 2015, p. 266-279.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МИКРОСТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X13M2БФР

О.П. Максимкин, К.В. Цай, С.В. Рубан, М.А. Отставнов
Институт ядерной физики, г.Алматы, Казахстан (maksimkin@inp.kz)

Проведено комплексное исследование и дан анализ результатов экспериментов по изучению влияния облучения и температуры испытаний на изменения характеристик прочности и пластичности, а также микроструктуру нержавеющей стали феррито-мартенситного класса 12X13M2БФР (ЭП-450) при деформации. Показано, что предварительное состояние материала (вариации элементного состава, различная термическая обработка), температура растяжения, а также степени облучения нейтронами и заряженными частицами существенно влияют на характер процессов пластического течения и структурно-фазовых превращений.

С помощью оптической микроскопии исследована структура стали ЭП-450 в исходном состоянии, а также после облучения альфа-частицами (50 МэВ, У-150М) или нейтронами (ВВР-К). Показано, что в термообработанном состоянии (1050°C / 30 минут + 720°C / 1 час) сталь двухфазная, состоит из ферритной (40%) и сорбитной (60%) составляющих, соотношение которых может изменяться под действием облучения. При этом кратковременное облучение альфа-частицами при 400°C или нейтронами (5.9×10^{20} н/см²) при температуре <80°C, как правило, не приводят к изменению количества фракций феррита и сорбита в стали. Долговременное нейтронное облучение до повреждающей дозы ~40.3 сна при температуре 300°C (реактор БН-350), напротив, существенно изменяет данное соотношение в пользу увеличения ферритной составляющей (70% / 30%) за счет растворения вторичных карбидов.

Приведены результаты механических испытаний стальных образцов, облученных альфа-частицами, до концентраций гелия в материале 240 аррм и 44 аррм, деформированных одноосным растяжением при температурах 20, 400 и 800°C. Согласно полученным данным равномерное по объему легирование гелием привело к уменьшению прочностных характеристик стали ЭП-450 при температуре деформации 800°C по сравнению с необлученными образцами. Это свидетельствует, прежде всего, об отсутствии эффекта радиационного упрочнения в материале с высокой плотностью границ предположительно из-за быстрой миграции в них атомов гелия.

Пластичность облученной стали ЭП-450 снизилась в ходе растяжения при 20 и 400°C, тогда как при 800°C облученный материал, неожиданно, демонстрировал пластичность выше, чем в случае деформирования необлученного материала. Охрупчивание при низких

и средних температурах испытаний (20 и 400°C) обусловлено наличием гелия на поверхности раздела фаз, а также границах зерен и субзерен.

Методами металлографического анализа, измерений плотности и микротвердости образцов стали ЭП-450, облученных альфа-частицами и подвергнутых долговременному старению, а также образцов облученных альфа-частицами, состаренных и затем дооблученных нейтронами (5.9×10^{20} н/см²), показано, что дополнительное нейтронное облучение сильно изменяет характер коррозионной повреждаемости и физико-механические свойства стали. После нейтронного дооблучения в образцах с гелием наблюдалась интенсивная интеркристаллитная коррозия, уменьшение плотности материала, а также дополнительное радиационное упрочнение и выравнивание неоднородности упрочнения по толщине образца, которое имело место после имплантации гелия и старения.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГРАФИТА ГР-280, ОБЛУЧЁННОГО ДО ВЫСОКИХ ФЛЮЕНСОВ НЕЙТРОНОВ

Е.П. Белан, Р.Н. Гатауллин

АО «ГНЦ НИИАР», Димитровград, Россия (belan.niiar@mail.ru)

Работа посвящена исследованию влияния высокотемпературного отжига на теплопроводность реакторного графита ГР-280, облучённого при 450-650 °С до флюенсов нейтронов $(0,5-1,5) \cdot 10^{26}$ м⁻². Коэффициент теплопроводности определяли методом лазерной вспышки. Отжиг радиационных дефектов выполняли при температурах 600-1200°C в течении 2-ух часов. В результате проделанной работы был установлен характер зависимости теплопроводности исследуемых образцов от температуры и длительности отжига. Показано, что коэффициент теплопроводности начинает восстанавливаться при температуре 800-900°C; разность между коэффициентом теплопроводности образцов до и после отжига ($\lambda_{\text{обл+отж}} - \lambda_{\text{обл}}$) при температуре 1200°C лежит в пределах 19-39 Вт/(м·К); $(\lambda_{\text{обл+отж}} - \lambda_{\text{обл}})$ уменьшается с увеличением флюенса нейтронов и температуры облучения; $\lambda_{\text{обл+отж}} / \lambda_{\text{обл}}$ остаётся постоянной величиной, равной 2,3.

ДЕФОРМАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ВЫСОКОАЗОТИСТОЙ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЯЕМОЙ НИТРИДАМИ ХРОМА СТАЛИ 08X22ГА1.24

К.А. Козлов, В.А. Шабашов, А.В. Макаров, В.В. Сагарадзе, А.Е. Заматовский

А.В. Литвинов

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

Методом ЯГР исследованы структурно-фазовые переходы в высокоазотистой стали 08X22ГА1.24 при изотермических отжигах и последующей интенсивной холодной деформации во вращающихся наковальнях Бриджмена при комнатной и криогенной

температурах. Сталь получена методом литья с противодавлением азота.

Старение при 450°C и 550°C, 30 мин и интенсивная холодная деформация приводят к циклическому выделению (при отжиге) и растворению (при сдвиге под давлением) нитридов хрома в матрице аустенита.

Результатом отжига при 650°C, 2.5 ч становится полный полиморфный $\gamma \rightarrow \alpha$ переход с выделением в ОЦК матрице состава 19.6 ат.% Cr, нитридов CrN. В эксперименте по сдвигу под давлением при температурах 573, 292 и 77 К происходит рост содержания хрома в ОЦК матрице на несколько процентов. Более полное растворение нитридов хрома в случае деформации при криогенных температурах связано с ослаблением динамического старения, конкурирующего с неравновесными процессами растворения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-13-00908).

ЗАВИСИМОСТЬ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ВИРТУАЛЬНОЙ КОРПУСНОЙ РЕАКТОРНОЙ СТАЛИ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА

В.А. Николаенко, Е.А. Красиков

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия
(ekrasikov@mail.ru)*

Анализируются проблемы влияния плотности потока быстрых ($E > 0,5$ МэВ) нейтронов (интенсивности облучения) на охрупчивание материалов корпусов ядерных реакторов с водой под давлением.

Оценка зависимости радиационного охрупчивания корпусных сталей от интенсивности потока произведена в первом приближении для условного виртуального материала посредством усреднения «химического» коэффициента радиационного охрупчивания $A_F = 800(P + 0,07Cu)$ [1]. Фактический коэффициент радиационного охрупчивания определялся экспериментально, исходя из нормативной зависимости $\Delta T_F = A_F(F \times 10^{-18})^{1/3}$ [2].

Экспериментальные результаты разбиты на 5 групп с различными интенсивностями облучения в диапазоне от 130-1100 (исследовательские реакторы); 30-40,7 (проект ВВЭР-440/213); 12,5-29,7 (ВВЭР-440/213 с кассетами-экранами); до 1,3-6,9 и 0,2-1,3 (темплеты, трепаны) в единицах $10^{11} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, т.е. отличающиеся в 5000 раз.

В результате получено, что зависимость коэффициента радиационного охрупчивания виртуальной стали от интенсивности нейтронного потока имеет вид $A_F = 17,8 + 9,5/\phi$, где ϕ – интенсивность в единицах $10^{11} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. По мере уменьшения интенсивности облучения охрупчивание увеличивается, а наибольшая чувствительность к плотности потока нейтронов наблюдается в диапазоне $(0,1-1) \times 10^{11} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Данная зависимость позволяет оценивать влияние интенсивности нейтронного облучения корпусной реакторной стали на её охрупчивание.

Литература.

1. Alekseenko N.N., Amaev A.D., Gorynin I.V. and Nikolaev V.A. – *Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steel*. ANS, La Grand Park, USA, 1997.
2. *Нормы расчета на прочность элементов оборудования и трубопроводов*

корабельных атомных паропроизводящих установок с водо-водяными реакторами, НППУ-01, М., Россия, 2002 г.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ВЗАИМОСВЯЗИ РАДИАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ, ОБЛУЧЕННЫХ ДО ВЫСОКИХ ПОВРЕЖДАЮЩИХ ДОЗ

*В.С. Неустроев, С.В. Белозёров, И.Ю. Жемков, Е.И. Макаров, Д.Е. Маркелов
АО «ГНЦ НИИАР, г. Димитровград, Ульяновской области, Россия (Vsn1954@yandex.ru)*

При длительной эксплуатации реакторов возникает необходимость в оценке свойств материалов несменяемых элементов и конструкций реактора, изготовленных, как правило, из аустенитных коррозионностойких сталей с основой X18H9. Длительная эксплуатация различных конструкций в сложных и агрессивных условиях, подобно продолжительной активной жизни человека, несет в себе не только одну так называемую «болезнь», а несколько связанных в букет «болезней», которые могут ускорить окончание процесса эксплуатации элемента или конструкции.

Исторически сложилось так, что в материаловедческой «юности» атомной отрасли (1960-1970-е годы) в основном ставились оптимизационные эксперименты по выбору наиболее радиационно-стойких материалов для реакторных приложений, а радиационные явления исследовались уже в этих разрабатываемых новых материалах и всегда ставилась задача сравнения того или иного радиационного явления для разных материалов.

Таким образом, были изучены первые закономерности и особенности таких радиационных явлений как радиационные распухание и ползучесть, упрочнение и охрупчивание, изменение микроструктуры и фазовая стабильность. Были определены радиационные явления, ухудшающие радиационную стойкость конструкционных материалов (уменьшающие срок службы элементов и конструкций).

В представленной работе представлен анализ закономерностей радиационных явлений и текущее состояние новых исследований, обращающих внимание, прежде всего, на влияние длительности облучения (влияние скорости набора дозы) на свойства и структуру облученных сталей.

Рассматриваются также вопросы взаимосвязи распухания и ползучести, а также влияние особенностей формирования микроструктуры на физико-механические свойства облученных нейтронами сталей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ ПОМОЩИ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ОСОБЕННОСТЕЙ РАДИАЦИОННОГО ПОРООБРАЗОВАНИЯ В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛ

В.И. Пастухов^{1,2}, С.А. Аверин¹, И.А. Портных¹

¹АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия,

(vladimir.pastuhov1991@gmail.com)

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

Одной из причин, ограничивающих срок службы твэлов реакторов на быстрых нейтронах, является формоизменение, обусловленное радиационным распуханием – накоплением вакансионных пор под действием нейтронного облучения. Радиационно-индуцированная пористость зависит от таких параметров облучения, как температура эксплуатации и характеристик нейтронного потока. Особенностью энергетических реакторов является наличие максимума нейтронного потока в центре активной зоны и монотонное изменение температуры, как по длине, так и по толщине оболочки твэла. Различие параметров облучения приводит к пространственной неоднородности радиационного распухания оболочки твэла.

Проведено исследование пространственной неоднородности радиационно-индуцированной пористости оболочек твэлов быстрого реактора при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Возможности современных СЭМ позволяют регистрировать поры размером от 10 нм, при этом обладая возможностью исследования больших площадей поверхности [1]. Проведено исследование структурных элементов, с которыми связана локальная неоднородность пористости, при помощи методики дифракции обратно отраженных электронов (EBSD).

Сканирующая микроскопия, проведенная на поперечных шлифах, позволила выявить существенную неоднородность объемного распределения пор по толщине оболочек твэлов. На всех исследуемых участках по высоте твэла у внутренней поверхности наблюдалась обедненная зона шириной порядка 5 мкм, в которой максимальный размер пор не превышал 30 нм. Наблюдается уменьшение среднего размера пор от внутренней к наружной поверхности оболочки. Наблюдается локальная неоднородность пористости, связанная с элементами структуры и деформированными областями.

Литература

1. Pastukhov V.I., Averin S.A., Panchenko V.L., Portnykh I.A., Freyer P.D., Giannuzzi L.A., Garner F.A., Application of backscatter electrons for large area imaging of cavities produced by neutron irradiation, *J. NUCL. MATER.*, **480** (2016), p. 289-300

ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ X18H10T ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ДО РАЗЛИЧНЫХ ПОВРЕЖДАЮЩИХ ДОЗ В РЕАКТОРЕ БОР-60

В.К. Шамардин¹, Т.М. Буланова¹, А.А. Карсаков¹, А.В. Обухов¹, Р.З. Валиев²,
И.В. Александров², М.М. Абрамова², Н.А. Еникеев²

¹ОАО «ГНЦ НИИАР», Димитровград, Россия (Tenzor5@yandex.ru)

²Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет, Димитровград,
Россия

В докладе представлены результаты сравнительных исследований образцов аустенитной стали типа X18H9 в состоянии поставки и РКУП – состоянии [1] до и после облучения в реакторе на быстрых нейтронах БОР-60 при температуре 320 и 450 °С (максимальная повреждающая доза 15 сна).

Равноканальное угловое прессование (РКУП) было использовано для существенного снижения средней величины зерна стали от 40-50 мкм до 300-500 нм.

Проведено предварительное изучение структурных особенностей облучённой при 320 °С и необлучённой стали после проведения РКУП-прессования. Результаты указывают на смешанный фрагментарный характер структуры с большой степенью неоднородности.

Проведены исследования кратковременных механических свойств и микроструктуры стали типа X18H9 в состоянии после РКУП, облученной в реакторе на быстрых нейтронах БОР-60 при 320 °С и 450 °С до максимальной повреждающей дозы 15 сна.

Результаты [2], полученные после облучения различными повреждающими дозами при температурах 350°С и 450°С, позволяют отметить несколько фактов, важных для анализа влияния нейтронного облучения на механические свойства нержавеющей сталей в РКУП-состоянии.

Среди них:

- при заданных в настоящей работе условиях облучения экспериментально обнаруживается радиационное упрочнение стали в РКУП-состоянии, величина которого зависит от температуры облучения и испытания;
- упрочнение стали в РКУП-состоянии снижается с ростом повреждающей дозы, что отчасти обусловлено радиационной и термической релаксацией упругой деформации, заданной в процессе РКУ-прессования;
- термическая стабильность упрочнения РКУП-состояния стали X18H9 после облучения. Более высокое радиационное упрочнение на материале в РКУП-состоянии, по сравнению с состоянием поставки, сохраняется после облучения вплоть до температуры 650°С;
- инициируемое облучением образование частиц α -фазы на тройных стыках зерен со средним размером 50 нм;
- при $T_{исп}=550$ °С после облучения установлено повышение общего относительного удлинения на стали в РКУП-состоянии при сохранении упрочнения обусловленного РКУП-обработкой.

Делается заключение о необходимости продолжения работ с учетом полученных экспериментальных результатов.

Литература

1. Р.З. Валиев, И.В. Александров. *Объемные наноструктурные металлические материалы*, Москва ИКЦ «Академкнига» 2007 г.

2. A.A. Karsakov, V.K. Shamardin, T.M. Bulanova, Y.D. Goncharenko, I.V. Alexandrov, M.M. Abramova, M.V. Karavaeva, Effect of neutron irradiation on microstructure and properties of austenitic 321 steel, subjected to equal-channel angular pressing. *Reviews on Advanced Materials Science*, **31** (2012) 14-34.

КОМБИНИРОВАННЫЙ ДЕФОРМАЦИОННО-ПЛАЗМЕННЫЙ СПОСОБ АЗОТИРОВАНИЯ АУСТЕНИТНОЙ ХРОМОНИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ

А.В. Макаров¹, Г.В. Самойлова¹, Н.В. Гаврилов², А.С. Мамаев², А.Л. Осинцева³,
Р.А. Саврай³, Т.Е. Куренных¹

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

²*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

³*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

Существенными недостатками аустенитных хромоникелевых сталей, находящих широкое применение в атомной промышленности, являются их низкие прочностные свойства и склонность к адгезии при трении, которые не улучшаются термической обработкой. Перспективным методом упрочнения нержавеющей аустенитных сталей является низкотемпературное ионно-плазменное азотирование с использованием плазмы электронного пучка [1, 2]. Снижение температуры азотирования нержавеющей сталей ниже 450°C позволяет формировать высокопрочную (твердостью 12–15 ГПа) коррозионноустойчивую фазу пересыщенного азотом твердого раствора без образования нитридов хрома, охрупчивающих и снижающих коррозионную стойкость поверхностного слоя. В последнее время для ускорения диффузии азота и увеличения глубины азотированного слоя при низкотемпературном плазменном азотировании успешно применяют предварительную наноструктурирующую обработку SMAT (surface mechanical attrition treatment) – ультразвуковую обработку шариками в вакууме [3]. Эффективным методом наноструктурирования и деформационного упрочнения аустенитных сталей является финишная наноструктурирующая фрикционная обработка скользящим индентором [4].

В настоящей работе на основе комплексного экспериментального исследования с использованием методов микродюрометрии, электронной сканирующей микроскопии, профилометрии, рентгеноструктурного анализа и метода ядерных реакций показаны хорошие перспективы применения наноструктурирующей фрикционной обработки индентором из синтетического алмаза для повышения эффективности азотирования в плазме электронного пучка. Предложенный комбинированный деформационно-плазменный способ азотирования аустенитной хромоникелевой стали, включающий фрикционную обработку с последующим азотированием в плазме электронного пучка, обеспечивает увеличение глубины упрочненного слоя и повышение качества азотированной поверхности (снижение шероховатости) при низкотемпературном (350°C) азотировании.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-08-07947) и в рамках Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-9-12-45).

Литература

1. Гаврилов Н.В., Меньшаков А.И., *ФХОМ*. № 5, 31 (2012)

2. Гаврилов Н.В., Меньшаков А.И., *ЖТФ*. **82**, № 3, 88 (2012)
3. Laleh M., Kargar Farzad, Velashjerdi M., *J. Mater. Eng. Perform.* **22**, Is. 5, 1304 (2013)
4. Макаров А.В., Скорынина П.А., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Саврай Р.А., *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. №4 (69), 80 (2015)

КОРРОЗИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛИ ЭК164 ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

И.А. Портных, В.И. Пастухов, А.В. Барыбин
АО «ИРМ», Заречный, Россия (irm@irmatom.ru)

При работе ТВС в реакторах на быстрых нейтронах происходят коррозионные повреждения внутренней и наружной поверхностей оболочек твэлов, что является одним из факторов, ограничивающих длительность их эксплуатации. Традиционным методом изучения коррозии оболочек является металлография. В АО «ИРМ» была разработана методика изучения коррозионных повреждений методом сканирующей электронной микроскопии. Целью проведенной работы являлось получение экспериментальных данных по повреждениям различных участков оболочек твэлов из стали ЭК164 со стороны топливной композиции и натриевого теплоносителя.

Исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TESCAN Mira 3LMU, оборудованном системой энергодисперсионного анализа характеристического рентгеновского излучения X-Act 6 (Oxford Instruments), что позволило наряду с изучением топографии поверхности выполнять анализ элементного состава областей матрицы, границ зерен и выделений. В работе приведены результаты исследований участков оболочек из стали ЭК164 твэлов после эксплуатации ТВС в зоне среднего обогащения реактора БН-600 до достижения максимальной повреждающей дозы 95 сна при температурах облучения 430...600 °С. Показано, что происходит взаимодействие материала оболочки твэла с топливной композицией с внутренней стороны оболочки и с натриевым теплоносителем с наружной стороны оболочки. Выявлено, что в некоторых участках коррозионные повреждения неоднородны по глубине проникновения по периметру внутренней поверхности оболочки. По границам зерен наблюдается растрескивание с отслаиванием зерен. Показано, что наблюдается диффузия по границам зерен палладия внутрь стали с образованием частиц в границах, при этом изменяется их состав. Вместе с тем, со стороны топливной композиции наблюдаются коррозионные поражения тела зерна материала оболочки. Взаимодействие стали ЭК164 с натриевым теплоносителем с наружной стороны в исследованном температурном диапазоне приводит к образованию с наружной стороны оболочки твэла оксидного слоя и слоя обедненного по легирующим элементам: хрому и никелю. Распределение коррозионных повреждений по высоте активной зоны сопоставлено с результатами гамма-спектрометрических исследований.

Проведено сравнение глубины коррозионных повреждений, как с внутренней, так и с наружной сторон оболочек из стали ЭК164 твэлов после эксплуатации в ТВС зонах большого и малого обогащений реактора БН-600 [1], [2].

Литература

1. Портных И. А., Пастухов В. И., Козлов А. В. Состояние поверхностей оболочек

ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛИ ЭК164 ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ БН-600 ДО МАКСИМАЛЬНОЙ ДОЗЫ 96 СНА // *Труды XXIV Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь 07– 12 июля 2014 г.)*, под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2014 г., С 269-281.

2. Портных И. А., Пастухов В. И., Козлов А. В. Взаимодействие топливной композиции и жидкометаллического теплоносителя с оболочками ТВЭЛОВ из стали ЭК164 после эксплуатации в зоне малого обогащения реактора БН-600 при температурах облучения 510...625°C // *Одиннадцатый международный уральский семинар «Радиационная физика металлов и сплавов», 23 февраля – 1 марта 2015г.*, Сборник тезисов, 2015. С 55.

ЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ И ГРАФИТА ВОДОРОДОМ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

Е.А. Красиков

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия
(ekrasikov@mail.ru)

В обычной энергетике водороду как первоисточнику разрушений элементов оборудования уделяется пристальное внимание [1]. Не менее актуально рассмотрение взаимодействия водорода с конструкционными материалами атомной и термоядерной энергетике [2].

При исследовании радиационно-водородного охрупчивания отечественной стали корпусного типа, а также корпусной и нержавеющей стали производства США, возникли вопросы о неизвестном источнике водорода в облучённых металлических образцах, концентрации которого многократно превышают прогнозные значения [3-6]. Позже неожиданно высокие концентрации водорода обнаружены и в облучённом графите [7]. Необходим поиск источника этого водорода, тем более, что водородные флокены в больших количествах обнаружены в корпусах реакторов бельгийских АЭС [8,9].

В качестве вероятной начальной гипотезы о неучитываемом источнике водорода в ядерном реакторе можно предположить генерацию протонов при бета-распаде свободных нейтронов [10].

Литература

1. А.Б. Вайнман. *Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления*. Киев, Наукова думка, 1990.
2. N.N. Alekseenko. *Radiation Damage of Nuclear Power Plant Pressure Vessel Steels*. ANS, 1997, p.97.
3. Е.А. Красиков. *Исследование радиационно-водородного охрупчивания и диффузии водорода в облученной стали 48ТС-3*. Канд. дисс., М, 1974.
4. С.Р. Brinkmann, *Effects of Hydrogen on the Ductile Properties of Irradiated Pressure Vessel Steels*. Report IN-1359, NRTS, Idaho Falls, 1970.
5. А.И. Jacobs. *Hydrogen buildup in Irradiated Type-304 Stainless Steel*. ASTM STP 956. F.A. Garner, and N. Igata, Eds. ASTM, Philadelphia, 1987, pp.239-244.
6. L.R. Greenwood, F.A. Garner D.M. Oliver. Surprisingly Large Generation and Retention of Helium and Hydrogen in Pure Nickel. *Journal of ASTM International*, April 2004, vol.1, №4.

Paper ID JAI11365, pp.529-539.

7. А.Б. Бирюков, Е.А. Красиков, Д.В. Андреев. Влияние нейтронного облучения на выход водорода из графитов. *ВАНТ, сер. Термоядерный синтез*, вып.1-2, 1998, стр.3-8. РНЦ «Курчатовский институт» М.

8. I. Tweer. *Flawed Reactor Pressure Vessels in the Belgian NPPS Doel3 and Tihange2 Comments on the FANC Final Evaluation Report 2015*. 2016.

9. *ORNL Evaluating of Electrabel Safety Cases for Doel3/Tihange2: Final Report (R1)*. ORNL/TM-2015/59349, Nov.2015.

10. Ю.А. Мостовой, К.Н. Мухин, О.О. Патаракин. Нейтрон вчера, сегодня, завтра. *УФН*, **166**, №9. 1996, стр. 987-1022.

МАЛОАКТИВИРУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ДЕЛЕНИЯ И СИНТЕЗА

М.В. Леонтьева-Смирнова, В.М. Чернов

АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»), 123098, Москва, Россия
(VMChernov@bochvar.ru)

Разработка и создание крупно-масштабной ядерной и термоядерной энергетики в условиях требований повышения мощности, надежности, безопасности и экономичности инновационных реакторов (деления, синтеза, гибридных) и реализации полного замкнутого ядерного топливного цикла (ПЗЯТЦ) и радиационно-эквивалентного (миграционного) захоронения радиоактивных отходов (РАО) за относительно малый (в историческом масштабе) период времени (100-300 лет) после облучения выдвигает ряд требований к конструкционным материалам (КМ) для основных реакторных компонент. КМ должны обеспечивать работу реакторов в штатных и нештатных условиях, улучшать использование и наработку топлива, уменьшать образование ядерных отходов и повышать экологическую безопасность при эксплуатации и при выводе из эксплуатации реакторов. Такие условия требуют специальных материаловедческих разработок и промышленного освоения новых высокотехнологичных КМ, обеспечивающих расширение температурных, радиационных и дозовых пределов их применения и минимизацию времени послереакторного охлаждения для последующей переработки (рециклирования) и радиационно-эквивалентного захоронения РАО. Требования к новым КМ приближаются к технологическим пределам.

Задачей является:

- создание новых природоподобных технологий, которые не наносят урон окружающему миру и позволяют восстанавливать нарушенный баланс между биосферой и техносферой.
- сохранение естественного радиационного баланса земли после некоторого небольшого (в историческом масштабе) времени после добычи уранового сырья, эксплуатации и вывода из эксплуатации реакторов.
- передача информации о ядерных объектах (остановленных реакторах, захоронениях, свалках) и гарантированное обеспечение их радиационной безопасности через длительное время (тысячу лет).

Таким требованиям удовлетворяют только малоактивируемые (с быстрым спадом

активности) КМ (МАКМ: ферритно-мартенситные хромистые стали, сплавы ванадия, композит SiC_f/SiC). МАКМ дают возможность их повторного использования (рециклирования) или радиационно-эквивалентного захоронения после облучения за время не более 100-200 лет (зависит от нейтронного спектра, дозы облучения, элементного состава).

МАКМ разрабатываются и создаются промышленные технологии их получения (США, Япония, Россия, Франция, Англия, Германия, Китай, Индия) для активных зон реакторов деления и синтеза с разными типами теплоносителей (жидкометаллические, жидкие соли, гелий, вода) и ядерного топлива. В значительной мере научные и технологические проблемы выбора, создания и дальнейших модификаций МКМ решены.

Рассмотрены МАКМ, разрабатываемые в России (АО «ВНИИНМ»), их свойства, возможности и сроки радиохимической переработки и перспективы применения:

- ферритно-мартенситная 12%-ая хромистая сталь ЭК-181 (RUSFER-EK181, Fe-12Cr-2W-V-Ta-B), промышленное производство.
- сплавы ванадия. Создан сплав V-4Ti-4Cr (ВМ-ДПЧ-9, опытно-промышленное производство). Разрабатываются более жаропрочные и коррозионно-стойкие сплавы системы V-Cr-W-Zr-C-O (опытное производство).

НАНОСТРУКТУРИРУЮЩИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

А.В. Макаров¹, П.А. Скорынина², Е.Г. Волкова¹, А.Л. Осинцева²

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

²*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия*

Аустенитные хромоникелевые стали находят широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости и технологичности. Эффективным методом повышения прочностных и трибологических свойств термически неупрочняемых аустенитных сталей является наноструктурирующая фрикционная обработка скользящим индентором [1]. При эксплуатации и на стадии технологических операций изделия из аустенитной стали могут подвергаться нагреву. Целью работы явилось исследование влияния термического воздействия на микротвердость, фазовый состав и структуру стали 12X18H10T, подвергнутой фрикционной обработке и поиск возможностей упрочнения аустенитной стали комбинированными деформационно-термическими обработками.

Методом электронной просвечивающей микроскопии установлено, что фрикционная обработка сферическим индентором из синтетического алмаза приводит к формированию в поверхностном слое аустенитной стали 12X18H10T фрагментированных субмикроструктурных (с размером кристаллитов более 100 нм) и нанокристаллических (с размерами кристаллитов менее 100 нм) мартенситно-аустенитных структур. Количество α' -мартенсита деформации на поверхности стали достигает 65 об. %, а микротвердость возрастает до $\text{HV}_{0,025}=690$.

Изучено влияние нагрева в диапазоне температур 100-900°C на структурно-фазовое состояние и микротвердость стали 12X18H10T, подвергнутой наноструктурирующей фрикционной обработке. На основании полученных результатов предложены два режима

комбинированных деформационно-термических обработок, которые предусматривают проведение после фрикционной обработки отжига при температурах 450 и 650°C (выдержка 2 ч) [2]. Отжиг при 450°C обеспечивает сохранение в структуре 60 об. % α -мартенсита деформации и повышение твердости поверхности до HV0,025=900 за счет упрочнения мартенситно-аустенитных структур наноразмерными карбидами Cr₂₃C₆, которые выделяются из мартенсита деформации при старении. При комбинированной обработке, включающей фрикционную обработку и отжиг при 650°C, на поверхности стали образуется аустенитная субмикро- и нанокристаллическая структура с твердостью HV0,025=630, превышающей исходную твердость аустенитной стали в закаленном состоянии почти в 3 раза.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы УрО РАН (проект № 15-9-12-45) при частичной поддержке РФФИ (проект № 15-08-07947).

Литература

1. Макаров А.В., Скорынина П.А., Осинцева А.Л., Юровских А.С., Саврай Р.А., *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. №4 (69), 80 (2015).
2. Макаров А.В., Скорынина П.А., Волкова Е.Г., Осинцева А.Л., *Вектор науки ТГУ*. №4 (38), (2016).

ОБНАРУЖЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В КИНЕТИКЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОРПУСНЫХ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ

Е.А. Красиков, В.А. Николаенко, А.Л. Суворов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия
(ekrasikov@mail.ru)

Влияние плотности потока (интенсивности, флакса) быстрых нейтронов на охрупчивание реакторных материалов – критически важная проблема при применении данных форсированных радиационных испытаний в нейтронных полях высокой интенсивности для обоснования работоспособности материалов в природных условиях (низкий флукс). Исследования зависимости радиационного повреждения (охрупчивания) от флакса быстрых нейтронов сталей корпусного типа выявили наличие нестабильности в виде немонотонных участков и значительного разброса экспериментальных данных. Обнаружение признаков процесса самоорганизации в кинетике охрупчивания – нестабильности в виде немонотонных участков, свидетельствующих о трансформациях структуры –, актуализирует проблему обеспечения достоверности данных по радиационной стойкости корпусных сталей и формирует мотивацию к поиску путей регулирования радиационной стойкости (наноструктурирование, формирование предвыделений и т.п. для стимулирования аннигиляции радиационных дефектов), разработке способов создания радиационностойкого интеллектуального самовосстанавливающегося металла.

Ожидаемые результаты:

- развитие теории и изучение механизмов радиационного повреждения корпусных сталей;
- разработка более адекватных моделей радиационного охрупчивания;
- усовершенствование программ образцов-свидетелей;
- разработка способов и создание средств для адекватного натурному

форсированному облучению материалов корпусов реакторов;
— поиск путей создания самоорганизующихся радиационноустойчивых материалов.

Литература

1. Красиков Е.А., Николаенко В.А. Радиационный отжиг радиационного повреждения корпусной стали. *XI Международный уральский семинар «Радиационная физика металлов и сплавов»*, г. Снежинск, Россия. 23 февраля-1 марта 2015 г.
2. Красиков Е.А., Николаенко В.А. Немонотонное охрупчивание корпусной стали. *Атомная энергия*, **т.119**, вып.1, июль 2015, стр.41-44.
3. Красиков Е.А., Николаенко В.А. Радиационный отжиг радиационного повреждения стали корпуса реактора. *XI Международная научная конференция «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах» (РТЭП-2015)*. 31 августа-10 сентября 2015 г., г. Ялта, Республика Крым, Россия.
4. Красиков Е.А. Предпосылки повышения информативности и управляемости программ образцов-свидетелей повышенной живучести для корпусов реакторов с водой под давлением. *V Всероссийская конференция «Безопасность и живучесть технических систем»*. Красноярск 12-16 октября 2015 г. Материалы и доклады. Том 1. стр. 251-255.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ, ОБЛУЧЕННЫХ В БОР-60 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 330-350°C

Е.И. Макаров, В.С. Неустроев, С.В. Белозеров, Д.Е. Маркелов, А.В. Обухов,
Ю.В. Набойщиков

АО «Государственный научный центр научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Димитровград-10, Россия (Evgeny_m86@inbox.ru)

В настоящей работе приведены результаты исследования радиационной ползучести газонаполненных образцов сложной формы, облученных в реакторе БОР-60 при температуре облучения 330-350°C до различных повреждающих доз [1, 2].

Целью данного доклада является экспериментальное определение влияния вида напряженного состояния на деформацию ползучести в аустенитных сталях X18H10T под действием нейтронного облучения в быстром реакторе БОР-60.

Проведено сравнение влияния сжимающих и растягивающих напряжений на ползучесть стали 08X18H10T. Результаты могут быть использованы для проверки моделей влияния напряжений разного типа на радиационную ползучесть.

Исследование облученных стандартных и коаксиальных газонаполненных образцов аустенитной стали 08X18H10T в реакторе БОР-60 показало, что с увеличением повреждающей дозы линейно возрастает изменение диаметра и длины газонаполненных образцов. Рассчитанные в данной работе модули ползучести для стали X18H10T хорошо согласуются с модулями ползучести для сталей аустенитного класса с основой X18H9.

Результаты данного исследования используются в прочностных расчётах выгородки реакторов ВВЭР-1000 и новых проектов ВВЭР-1200.

Литература

1. Неустроев В.С., Макаров Е.И., Белозеров С.В., Островский З.Е., *Физика металлов и*

металловедение. **110**, №4 (2010).

2. Неустроев В.С., Белозеров С.В., Макаров Е.И., Обухов А.В., *Физика металлов и материаловедение*. **115**, №10 (2014).

СКЛОННОСТЬ К МЕЖКРИСТАЛЛИТНОЙ КОРРОЗИИ И КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ И ОТЖИГА В ИНТЕРВАЛЕ 400-750°С

А.В. Яровчук, О.П. Максимкин, Л.Г. Турубарова, О.В. Рофман
Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан (e-mail: Yarovchuk@mail.ru)

Проведены исследования влияния нейтронного облучения и температурного воздействия на структуру и коррозионные свойства аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T. Объектами изучения явились образцы, вырезанные из стенок чехлов отработавших тепловыделяющих сборок реактора на быстрых нейтронах БН-350. Повреждающие дозы составляли 55,4; 55,7 и 58,9 сна, а температура облучения не превышала 400°С. Для сравнения использовали образцы из листовой холоднокатаной стали 12X18H10T, часть из которых после аустенизации (отжиг при 1050°С в течение 30 минут) подвергали облучению нейтронными потоками в активной зоне исследовательского реактора ВВР-К до флюенсов: $4 \cdot 10^{18}$; $1,9 \cdot 10^{19}$ н/см² ($E > 0,1$ МэВ). После аустенизации образцы отжигали в области температур 400 ÷ 750°С (с шагом 50°, выдержка 3 часа). Коррозионные испытания на межкристаллитную коррозию (МКК) проводили методом АМУ (ГОСТ 6032-2003). Коррозионное растрескивание облученных и состаренных образцов выполняли, используя методику воздействия постоянной нагрузки в агрессивной среде (30% FeCl₃) и без нее. После испытаний с помощью ферритометра «Forster» проводили измерения магнитной составляющей в образцах.

Исследования показали, что наибольшей склонностью к межкристаллитному разрушению обладает аустенитная нержавеющая сталь после длительного облучения нейтронами. Методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что повышенную склонность к МКК проявляют образцы, в которых после изгиба на 90° появляется наибольшее количество магнитной составляющей. Таким образом можно предположить, что наряду с дисперсностью структурных составляющих важную роль в реализации межкристаллитного разрушения играет магнитная α' -фаза.

Установлено, что сопротивление коррозионному растрескиванию при воздействии постоянной нагрузки и агрессивной среды с повышением температурой отжига аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T изменяется немонотонно. В условиях одновременного воздействия агрессивной среды и растягивающей нагрузки механизм растрескивания сложен и сопровождается появлением многочисленных питтинговых образований, которые трансформируются в микро и макротрещины. Максимальное количество мартенситной α' -фазы формируется при испытаниях на воздухе в образцах, отожженных при 650°С, что обусловлено в основном развитием процесса сенсбилизации. Сделан вывод, что снижение сопротивления коррозионному растрескиванию в хлоридной среде происходит за счет выпадения карбидных образований, а также зарождения мартенситной α' - фазы.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АУСТЕНИТНЫХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ СТАЛЕЙ ЧС68 И ЭК164 ПОСЛЕ ВЫСОКОДОЗНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

М.В. Евсеев, И.А. Портных, Н.В. Глушкова, А.В. Козлов, С.В. Барсанова
ОАО «ИРМ», Заречный, Россия (irm@irmatom.ru)

Быстрые реакторы с топливным циклом на принципах самообеспечения и нераспространения ядерных материалов (БН-600, БН-800, БРЕСТ и др.) во многом составят основу ядерной энергетики во второй половине нынешнего столетия.

Высокие температуры и дозы облучения в реакторах БН приводят к тому, что ключевой для таких реакторов становится проблема создания конструкционных материалов оболочек твэлов, обладающих комплексом механических и технологических свойств, совместимостью с теплоносителем и топливным материалом, а также стабильностью свойств при нейтронном облучении.

В настоящее время штатным материалом оболочек твэлов ТВС реактора БН-600 является аустенитная сталь ЧС68-ИД (06X16H15M2Г2ТФР) в состоянии 20% холодной деформации, с использованием которой реактор БН-600 переведен на эксплуатационный ресурс с достижением максимального выгорания топлива 12,5% т.а. и максимальной повреждающей дозы до 87 сна. В качестве перспективной стали в последнее время также рассматривается разработанная во ВНИИНМ аустенитная сталь ЭК164-ИД х.д. (07X16H19M2Г2БТР), менее склонная к распуханию, для которой прогнозируется достижение повреждающей дозы не менее 110 сна.

Целью работы являлся анализ влияния нейтронного облучения на механические свойства оболочек твэлов БН-600 из аустенитных сталей ЧС68 и ЭК164.

Обобщены результаты определения механических свойств оболочек из данных материалов после эксплуатации в диапазоне температур от 370 до 630°C и повреждающих доз вплоть до 80–95 сна.

Кратковременные механические свойства определялись по результатам двух видов испытаний: одноосного растяжения кольцевых образцов, изготовленных из оболочек твэлов, и нагружения трубчатых образцов внутренним давлением пластичного заполнителя (ВДТЗ). Испытания кольцевых образцов дают консервативную оценку механических свойств, не позволяющую адекватно оценить остаточную работоспособность оболочек, но дают сравнительные значения характеристик прочности и пластичности образцов, облученных в различных условиях, с достаточно представительной статистикой. Результаты испытаний трубчатых образцов более адекватно характеризуют механические свойства в реальных условиях нагружения оболочек твэлов, но имеют менее представительную статистику, из-за большого размера образца.

Образцы для механических испытаний из оболочек различных твэлов выбирались таким образом, чтобы температуры их облучения были близки, а повреждающие дозы при этом несколько различались. В результате построены дозовые зависимости механических свойств сталей ЧС-68 и ЭК164 для различных температур облучения.

Сравнительные исследования характеристик механических свойств сталей ЧС-68 и ЭК164 по результатам испытаний трубчатых образцов показали, что прочность и пластичность оболочек обеих сталей в диапазоне температур от 20 до 600°C и повреждающих дозах до ~90 сна имеют высокие значения: предел прочности выше

600 МПа, общее относительной удлинение не ниже 1–2%. При рабочих температурах испытания оболочки из стали ЭК164-ИД х.д. имеют характеристики пластичности выше, чем оболочка из стали ЧС68-ИД х.д.

В процессе исследований обнаружены эффекты низкотемпературного (НТРО) и высокотемпературного (ВТРО) радиационного охрупчивания материала оболочек твэлов, которые присущи обеим маркам сталей. Эффект ВТРО в большей степени проявляется в оболочках из стали ЭК164-ИД х.д.

СТРУКТУРА МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧКИ ИЗ СПЛАВА УРАНА С МОЛИБДЕНОМ И ЦИРКОНИЕМ ПОСЛЕ ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Д.А. Беляев, А.С. Александров, Ю.Н. Зуев, Е.А. Козлов, И.Л. Святлов, Е.А. Леви
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск (bad1331@mail.ru)

Приведены результаты металлографического исследования толстостенной сферической оболочки из сплава урана с молибденом и цирконием, подвергнутой взрывному нагружению. Получены экспериментальные данные о закономерностях структурных изменений в материале в результате воздействия ударной волны.

ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ АТОМНО-ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

С.В. Рогожкин^{1,2}, А.А. Никитин^{1,2}, Н.Н. Орлов¹, Н.А. Искандаров¹, О.А. Корчуганова¹,
А.А. Лукьянчук¹, О.А. Разницын¹, А.С. Шутов^{1,2}, М.А. Козодаев^{1,2}, А.Г. Залужный^{1,2}
¹ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия
(Sergey.Rogozhkin@itep.ru)

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

В современных исследованиях материалов ядерной техники значительное внимание уделяется изучению особенностей микроструктуры. Необходимая информация лежит в области нано- и даже атомных масштабов, и должна отражать как структурные изменения, так и перераспределение химических элементов. Эти явления определяют не только этапы зарождения радиационных повреждений, но в ряде случаев возникающие наноразмерные особенности вызывают изменение макроскопических свойств (например, распухание, охрупчивание и др.). С другой стороны, при разработке перспективных конструкционных материалов активной зоны реакторов также уделяется особое внимание формированию различных наноразмерных особенностей структуры, поскольку этим может быть обеспечено возрастание механических свойств, повышение радиационной стойкости. Наиболее приемлемым методом изучения на атомных масштабах структурно-фазовых особенностей многокомпонентных материалов, динамично развивающимся в последнее время, является атомно-зондовая томография (АЗТ).

В ИТЭФ накоплен значительный опыт атомно-масштабных исследований свойств конструкционных материалов методами АЗТ, в том числе и в условиях облучения. Томографические атомно-зондовые исследования в ИТЭФ в настоящее время ведутся по следующим направлениям: - исследование корпусных материалов водо-водяных энергетических реакторов; - исследование дисперсионно твердеющих ферритно-мартенситных сталей; - исследование дисперсно-упрочненных оксидами сталей; - исследование радиационной стойкости конструкционных материалов ядерной техники в имитационных экспериментах с использованием ионных пучков. Цель настоящей работы дать обзор современного состояния исследований, проводящихся в ИТЭФ.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЗУЧЕСТИ РОССИЙСКИХ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ, ВКЛЮЧАЯ ДУО МОДИФИКАЦИИ

Т.Н. Кочеткова¹, Н.В. Катаева¹, В.В. Сагарадзе¹, К.А. Козлов¹, М.В. Смирнова-Леонтьева²,
А.Ю. Никитина²

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

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

В работе выполнены длительные высокотемпературные испытания под нагрузкой (на вырезанных из оболочек ТВЭЛ поперечных микрообразцах) российских реакторных сталей с ОЦК решеткой после закалки и высокого отпуска при 720°C, приводящего к выделению карбидов типа Cr₂₃C₆ и VC в ферритно-мартенситной структуре. Определены характеристики длительной прочности, пластичности и скорости ползучести при 650, 670 и 700°C и напряжениях 60, 80, 100 и 140 МПа. Установлено, что по уменьшению скорости ползучести реакторные стали располагаются в следующем порядке: (ЭП-823 и ЭП-900), ЭК-181, (ЭП-450 и ЧС-139), ЭП-450-ДУО. Показано, что в процессе длительных выдержек под нагрузкой в реакторных сталях с ОЦК решеткой происходит деградация речной мартенситной структуры с уменьшением плотности дислокаций и образованием свободных от дислокаций субзерен, а также огрубление хромсодержащей карбидной фазы M₂₃C₆. Причиной повышенной термической устойчивости стали ЧС-139 при испытании на ползучесть является большее содержание углерода (0,21 мас.%), чем в остальных сталях, что обеспечивает повышенное количество карбидов типа Cr₂₃C₆, затрудняющих миграцию границ зерен и субзерен. Второй причиной высокой термостойкости сталей ЧС-139 и ЭП-450 является максимальное суммарное содержание тугоплавких элементов Mo, W, Nb, V, Ta (2,40 - 2,52 мас.%), сдерживающих развитие диффузионных процессов разупрочнения.

Среди исследованных сталей наиболее высокие характеристики длительной прочности и сопротивления ползучести имеет дисперсно-упрочненная оксидами сталь ЭП-450-ДУО, содержащая в ферритной матрице наиболее термостойкие иттрий-титановые оксиды со средним размером 5 нм, которые несколько увеличиваются в размерах в процессе длительных испытаний. При 700°C 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 по теме «Структура» при частичной финансовой поддержке по проекту УрО РАН (№ 15-9-2-16).

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ СПЛАВА Zr-2,5%Nb ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДЛИТЕЛЬНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ 40–80°C

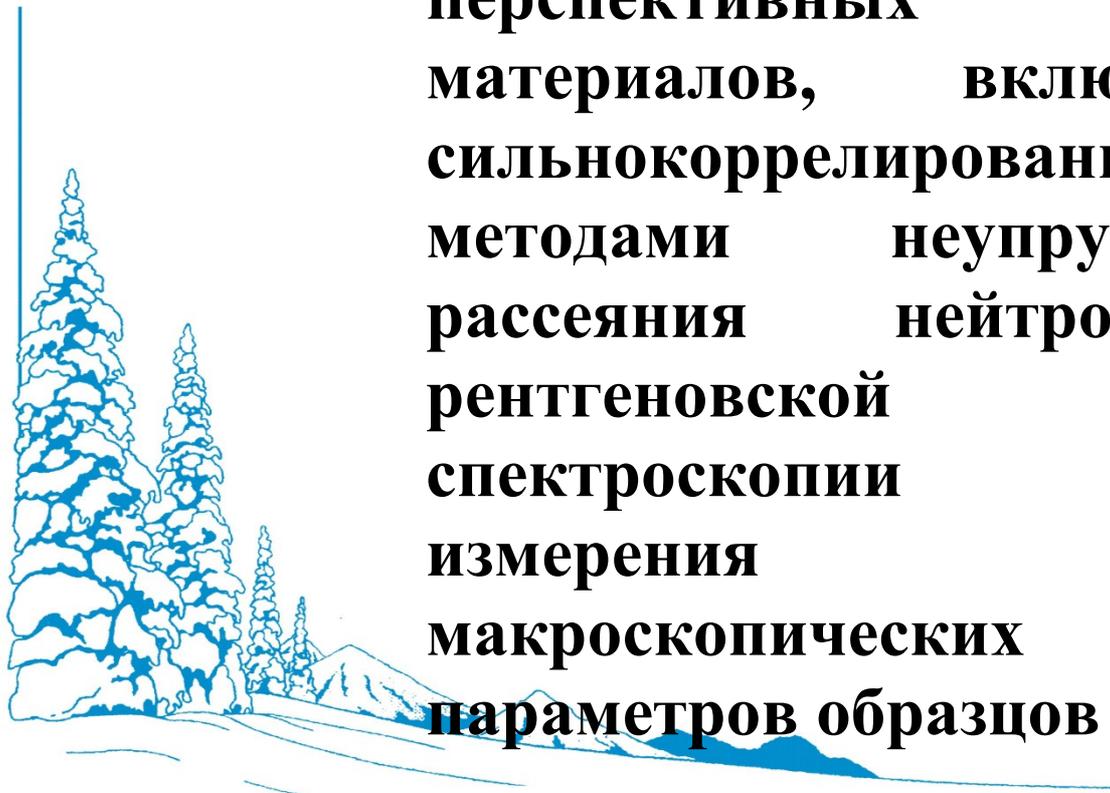
С.А. Аверин, В.Л. Панченко, В.А. Цыгвинцев, В.И. Пастухов
АО «ИРМ», Заречный. Россия, (irm@irmatom.ru)

Циркониевые сплавы широко используются в атомной промышленности как одни из основных конструкционных материалов активной зоны ядерных тепловых реакторов. Они подвергаются воздействию нейтронного облучения при различных температурах. Это приводит к изменению свойств материалов, которое во многом определяется эволюцией структуры.

В работе приведены результаты исследований эволюции микроструктуры сплава Zr-2,5%Nb после длительного облучения в энергетических реакторах РБМК-1000 в зависимости от набранного флюенса нейтронов (повреждающей дозы).

Исследования выполнены на образцах, вырезанных из каналов системы управления и защиты после эксплуатации в течение от 7 до 39 календарных лет при температуре 40–80°C под воздействием потока нейтронов ($E > 1$ МэВ) плотностью порядка $2 \cdot 10^{12}$ см⁻²с⁻¹. Проведены структурные исследования с применением электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Показано, что под облучением зеренная структура сплава практически не изменяется, происходит радиационно-термический отжиг исходных дислокаций преимущественно за счет дислокаций <a>-типа, регистрируемые дислокации относятся к <c>-компонентным. Образуются радиационные дефекты в виде кластеров и дислокационных петель <a>-типа. Показано, что при длительном нейтронном облучении в сплаве протекают радиационно-индуцированные диффузионные процессы, приводящие к уменьшению содержания Nb в выделениях β -Nb, в матрице появляются новые мелкодисперсные выделения на основе Nb.



III. Исследования перспективных материалов, включая сильнокоррелированные, методами неупругого рассеяния нейтронов, рентгеновской спектроскопии и измерения макроскопических параметров образцов

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.

EXOTIC MAGNETISM IN STRONGLY CORRELATED ELECTRON SYSTEMS

P.A. Alekseev

NRC "Kurchatov Institute" Moscow, Russia (pavel_alekseev-r@mail.ru)

NRNU "MEPI" Moscow, Russia

Rare earth based strongly correlated electron systems (SCES) demonstrate a wide range of different types of a ground state. Its variety started from trivial paramagnetic states or long range magnetic ordering ones originating from crystal field splitting of f-electron multiplet competing with exchange interaction of local moments, and arrived at highly exotic ones. The latter, for instance, could be as Kondo-insulator with combination of charge-, spin-gap with valence instability; or long range magnetic ordered state in initially singlet ground state system; or some combination of long range magnetic order with superconductivity and valence instability; etc. Physical background for these features inherent to electron subsystem may be elucidated by detailed neutron scattering experiments, first of all by magnetic neutron scattering spectroscopy and diffraction. These methods provide microscopic information about the character of the ordered state and magnetic moment value as well as about spectral features of the dynamical magnetic susceptibility including the spin fluctuation characteristics of valence unstable compounds.

Specific features of such unusual ground states are analyzed on the base of the results of the extended experimental studies of $\text{CeT}_2\text{Al}_{10}$ (T=Fe,Ru,Os), PrNi, $\text{EuCu}_2(\text{Si,Ge})_2$. The report displays previous and recent results in the field under study for a number of representative rare earth intermetallic compounds. The number of the examples is presented, in particular: the systems with induced long range ordering for crystal field defined singlet ground state metals; Kondo-insulators with possibility for formation of long range magnetic order below metal to insulator transition; systems with coexistence of long range magnetic order with intermediate valence state or heavy fermion state.

This work is partially supported by the RFBR grant 14-22-01002.

References

1. Tiden N.N., Clementyev E.S., Alekseev P.A., Nefeodova E.V., Lazukov V.N., Gvasaliya S.N., Adroja D. "Magnetic excitations near induced phase transition in PrNi" (2006), *Physica B: Condensed Matter*, **378-380**, Pages 1085-1086.
2. Mignot J.-M., Alekseev P.A., Robert J., Petit S., Nishioka T., Matsumura M., Kobayashi R., Tanida H., Nohara H., Sera M., "Dispersive magnetic-resonance mode in the Kondo semiconductor CeFe_2Al_1 " (2014), *Phys. Rev. B* **89**, 161103(R).
3. Alekseev P.A., Menushenkov A.P., Mignot J.-M., Nemkovski K.S., Yaroslavtsev A.A., Kozlenko D.P, "Long Range Order and Spin-Fluctuations in Strongly Correlated Electron System with Valence Instability" (2015), *Physics Procedia* **71** 303-307.
4. P. A. Alekseev, J.-M. Mignot, P.S. Savchenkov, V.N. Lazukov "First evidence for a Sm^{3+} -type contribution to the magnetic form factor in the quasielastic spectral response of intermediate valence SmB_6 " *JETP Letters* **103** (10) 636-642 (2016).

RECENT PROGRESS IN NEUTRON SCATTERING STUDIES OF COPPER- AND IRON-BASED SUPERCONDUCTORS

A.S. Ivanov

¹*Institut Max von Laue – Paul Langevin, Grenoble, France (aivanov@ill.fr)*

Spin excitation spectra are studied by inelastic neutron scattering in different families of superconductors and their parent compounds focusing at the “magnetic resonance” type of response. These excitations, first observed in YBCO family of the cuprate superconductors and then confirmed to be present in the other compounds including iron-based generations, attracted attention because it appeared when entering the superconducting state thus evoking a particular role of magnetic excitations in formation of superconductivity. The resonance is considered as a fingerprint of the “novel” type, called d-wave, of superconducting pairing contrary to “classical” s-wave pairing. In the report we outline the role in this research of neutron scattering spectroscopy at steady state neutron sources (nuclear reactors) with the help of three-axis spectrometers powered by “optical” focusing and measurement channel multiplexing as well as polarization analysis techniques.

We follow the evolution of the resonance and other magnetic excitations in various superconductors and relative compounds as a function of wave vector, temperature, magnetic field, doping with magnetic and non-magnetic impurities. The collected data are described within itinerant carrier models giving way to interpretation of the magnetic excitations in both normal and superconducting states.

In the case of cuprate superconductor the main attention in the recent experiments focused on the underdoped regime of the YBCO family with attention given to so called “pseudo-gap” state and anisotropy of the excitations in the mono-domain (detwinned) samples.

The iron based superconductors are represented by selenides family AFe_xSe_y ($A = K, Rb$) where a new resonance wave vector was discovered. The most recent research in the sulfur-doped derivative has permitted us to follow a specific transformation of the resonance excitation interpreted as an evidence for switching between s^+ and s^{++} types of pairing. In the other pnictides “122”-family $BaFe_2As_2$ with various dopings the anisotropy of magnetic response is emphasized in the experiments with uniaxial pressure applied *in situ* to the single crystal samples.

ВЛИЯНИЕ СПИН-ПЕРЕОРИЕНТАЦИОННОГО ПЕРЕХОДА НА РЕДКОЗЕМЕЛЬНУЮ ПОДСИСТЕМУ В YbFeO_3 : ИЗИНГОВСКАЯ ЦЕПОЧКА С $S=1/2$ В ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

С.Е. Никитин^{1,2}, L.S. Wu³, A.S. Sefat⁴, К.А. Шайхутдинов¹, Е.В. Помякушина⁵, К. Conder⁵,
G. Ehlers³, M.D. Lumsden³, Z. Gai⁶, А. Подлесняк³

¹*Институт физики им. Л.В. Куренского СО РАН, Красноярск, Россия (smp@iph.krasn.ru)*

²*Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия*

³*Quantum Condensed Matter Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA*

⁴*Materials Science and Engineering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA*

⁵*Laboratory for Scientific Developments and Novel Materials, Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland*

⁶*Center for Nanophase Materials Sciences, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA*

С помощью неупругого рассеяния нейтронов в монокристалле ортоферрита YbFeO_3 изучена низкоэнергетическая спиновая динамика Yb^{3+} выше и ниже спин-переориентационного перехода $T_{SR} \sim 7$ К. Ниже T_{SR} наблюдались как явно видимые магнитные возбуждения, так и континуум, которые имеют дисперсию только в одном направлении, что характерно для Изинговской цепочки с $s=1/2$ в продольном магнитном поле H_z , большем, чем антиферромагнитный (AFM) обмен J . Установлено, что флуктуации моментов иттербия в основном продольные и происходят параллельно (или перпендикулярно) по отношению к моментам железа выше (или ниже) температуры спин-переориентационного перехода T_{SR} . Наблюдаемые магнитные возбуждения могут быть описаны одномерным Изинговским AFM гамильтонианом с учетом слабого поперечного Гейзенберговского члена и магнитного поля H_z , которое полностью поляризует все спиновые моменты, $\langle S_n^z \rangle = S$.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ФАЗОВОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ СПЛАВА U-6Nb МЕТОДАМИ ЯМР

В.В. Оглобличев¹, Ю.Н. Зуев², С.В. Верховский¹, С.В. Бондарчук², А.Г. Гермов¹,
И.Л. Святков², З.Н. Волкова¹

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

²*Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ технической физики им. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия*

Впервые применены локальные методы ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядре ниобия ^{93}Nb для исследования фазового превращения быстро закаленного состояния сплава U-6Nb (U: 6 вес.% Nb).

В процессе фазового превращения при изотермическом отжиге $T_{отж} = 500^\circ\text{C}$ в объеме

сплава происходит рост доли атомов ниобия с магнитной восприимчивостью, соответствующей сплавам U-Nb с большей концентрацией ниобия. Формирование обогащенных ниобием структурных выделений с величиной локальной магнитной восприимчивости меньше чем магнитная восприимчивость исходного твердого раствора закаленной высокотемпературной γ -фазы завершается по истечении 60 часов отжига.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТОУПРУГИХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИБОРАТОВ

*А. Дубровский, А. Фрейдман, А. Балаев, Е. Еремин, И. Гудим, В. Темеров
ИФ СО РАН им. Л.В. Киренского, Красноярск, Россия (andre-do@yandex.ru)*

Магнитоэлектрический эффект, отражающий взаимодействие между магнитным порядком, обусловленным наличием нескомпенсированного спинового магнитного момента иона, и электрической поляризацией, обусловленной зарядами ионов, привлекает внимание исследователей уже более века. Однако механизм, отвечающий за магнитоэлектрический эффект на микроскопическом уровне, остается невыясненным до конца. Материалы, в которых наблюдается магнитоэлектрический эффект, показывают сильную зависимость поляризации от приложенного магнитного поля (так называемый прямой магнитоэлектрический эффект – ME_H), либо изменение намагниченности при приложенном электрическом поле (так называемый обратный магнитоэлектрический эффект – ME_E).

Среди веществ, в которых наблюдается магнитоэлектрический эффект, выделяется семейство боратов $RM_3(BO_3)_4$, где R – редкоземельный ион, а M – ион Al, Fe, Ga, Sc, Cr. Данные вещества имеют пространственную группу R32, что определяет отсутствие центра инверсии. Поскольку в данных соединениях присутствуют магнитные 3d или 4f ионы, это приводит к различным магнитным взаимодействиям, в том числе к мультиферроизму. Кристаллическая структура семейства боратов сильно анизотропна. Подрешетка M-атомов образует геликоидальную цепочку вдоль c-оси, образованную M^{3+} ионами, в то время как ионы редкоземельного металла R изолированы друг от друга, образуя призмы RO_6 , без взаимодействия типа R–O–R.

В работе [1] в кристалле $HoAl_3(BO_3)_4$ был открыт прямой гигантский магнитоэлектрический эффект. Обращает на себя внимание тот факт, что данный материал не является мультиферроиком в общепринятом смысле, так как не является магнитоупорядоченным веществом. Также в цитируемой работе наблюдалась магнитострикция данного кристалла. Авторы не дали каких-либо объяснений касательно наблюдаемых явлений.

В данной работе мы приводим исследование обратного магнитоэлектрического эффекта и диэлектрической проницаемости в кристалле $HoAl_3(BO_3)_4$ для выявления микроскопического механизма, отвечающего за наличие данного эффекта. Также с целью выявить связь между 4f и 3d подсистемами в данном семействе кристаллов (в зависимости от их типа меняется кристаллическое поле) и для проверки данной микроскопической модели нами были исследованы прямой магнитоэлектрический эффект и магнитострикция семейства кристаллов $RM_3(BO_3)_4$, где R – Sm, La, Ho, Tb, а M – ион Al, Fe, Ga и их комбинации.

Литература

1. K.-C. Liang, R. P. Chaudhury, B. Lorenz, *et al.*, *Phys. Rev. B* **83**, 180417(R) (2011).

КРОССОВЕР ЛОКАЛИЗАЦИЯ/ДЕЛОКАЛИЗАЦИЯ В ВАЛЕНТНО-НЕСТАБИЛЬНЫХ f-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ

А.В. Мирмельштейн¹, А.А. Подлесняк², В.Н. Матвиенко¹

¹*Отделение экспериментальной физики, РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия (mirmelstein@mail.ru)*

²*Quantum Condensed Matter Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA*

Переход между локализованным и делокализованным (блуждающим) поведением является одной из актуальных проблем физики сильно коррелированных систем. Такой переход в системе 5f электронов является центральным событием в актинидной серии, в тяжелой части которой 5f электроны ведут себя как локализованные, а в легких актинидах они более делокализованы. Переход происходит вблизи Pu и Am. В лантанидах, в которых 4f орбитали пространственно менее протяжены, чем 5f в актинидах, переход локализация/делокализация может происходить в материалах на основе церия (начало РЗ), самария (середина РЗ ряда) и иттербия (конец РЗ ряда) под воздействием температуры или давления, приводящих в некоторых случаях к структурным фазовым переходам со скачком объема. В последние годы в понимании природы перехода локализация/делокализация в системах с нестабильной f-электронной оболочкой достигнут значительный прогресс, обусловленный, в том числе, результатами экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов.

Промежуточно-валентное соединение CeNi испытывает индуцированный давлением структурный фазовый переход первого рода со скачком объема и, таким образом, является привлекательной системой для изучения вызванной давлением делокализации f электронов в системах с нестабильной f-электронной оболочкой. Заметим, что валентность Ce в CeNi заметно отличается от целого значения [1]. Другими словами, f электроны в этом соединении даже при нормальном давлении находятся в переходном режиме между локализованным и делокализованным поведением. Следовательно, можно ожидать, что в результате структурного фазового превращения с объемным коллапсом система еще сильнее сдвинется в сторону делокализованного поведения f электронов.

Ранее мы показали, что фаза высокого давления соединения CeNi принадлежит пространственной группе $R\bar{3}m$ [2]. В данной работе техника неупругого рассеяния нейтронов применяется для исследования динамической магнитной восприимчивости CeNi до и после структурного превращения. Результаты этих экспериментов показывают, что структурный переход приводит к усилению Ce 4f—Ni 3d гибридизации в CeNi, тогда как неупругий магнитный форм-фактор не изменяется и остается таким же, как свободной ионе Ce^{3+} . С учетом последних теоретических работ в этой области [3,4] обсуждается вопрос о физическом смысле и количественной мере процесса делокализации в системах с нестабильной f-электронной оболочкой.

Литература

1. V.N. Lazukov, E.N. Nefedova *et al.*, *Appl. Phys. A* **74** [Suppl.], S559 -S561 (2002).

2. A. Mirmelstein, A. Podlesnyak, A.M. dos Santos *et al.*, *Phys. Rev. B* **92**, 054102 (2015).

3. B. Chakrabarti, M.E. Pezzoli, G. Sordi *et al.*, *Phys. Rev. B* **89**, 125113 (2014).

4. Xin Yao, Cai-Zhuang Wang, Kai-Ming Ho, Jörg Schmalian, Kristjan Haule, and Gabriel Kotliar, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 196801 (2013).

МАГНИТНАЯ ФАЗОВАЯ ДИАГРАММА СПЛАВОВ $Y_{1-x}Tb_xMn_6Sn_6$ ($x = 0, 0.175, 0.2, 0.225, 0.25$).

А.А. БЫКОВ¹, Ю.О. Четвериков¹, Е.В. Москвин^{1,2}, А.Н. Пирогов^{3,4}, С.В. Григорьев^{1,2}

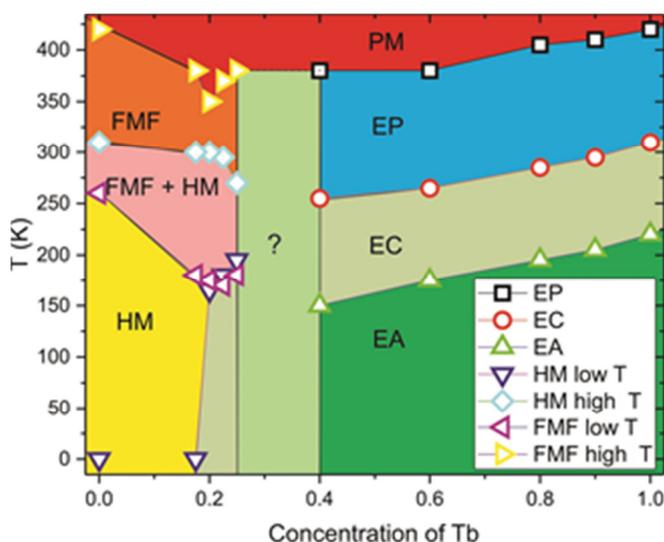
¹Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Гатчина, Россия
(redi87@bk.ru)

²Санкт Петербургский государственный университет, Санкт Петербург, Россия

³Институт физики металлов им. М.Н. Михеева, Екатеринбург, Россия

⁴Уральский государственный университет, Екатеринбург, Россия

В течении нескольких последних лет, существенное внимание уделяется сплавам, имеющим слоистую магнитную структуру. В этом числе и соединения типа RMn_6Sn_6 , где R это редкоземельный ион [1-5]. В данной работе соединения $Y_{1-x}Tb_xMn_6Sn_6$ ($x = 0, 0.175, 0.2, 0.225, 0.25$) исследовались методом малоуглового рассеяния нейтронов и спин эхо парамагнитное рассеяние нейтронов. Было обнаружено геликомагнитный тип магнитного упорядочения для YMn_6Sn_6 в широком диапазоне температур ниже $T_N = 310$ К. По мере приближения к T_N на карте рассеяния появляется еще один пик с Лоренцевой формой профиля в центре карты, то есть пик с $Q = 0$. Причина появления этого пика на карте рассеяния это появление ферромагнитных флуктуаций магнитных моментов Mn в плоскости ab. Магнитный порядок в соединениях, допированных Tb, меняется с увеличением температуры от конической ферромагнитной фазы в низких T через геликоидальную фазу к фазе ферромагнитных корреляций вблизи T_N . Температурно-концентрационная магнитная фазовая диаграмма сплавов $Y_{1-x}Tb_xMn_6Sn_6$, построенная на основе полученных данных, представлена ниже. Данные для концентраций больше $x = 0.25$ взяты из [3].



References

1. G. Venturini, D. Fruchart, and B. Malaman, *J. Alloys Compd.* **236**, 102 (1996).
2. F. Canepa, R. Duraj, C. Lefèvre, B. Malaman, A. Mar, T. Mazet, M. Napolitano, A.

Szytula, J. Tobola, G. Venturini, and A. Vernière, *J. Alloys Compd.* **383**, 10 (2004).

3. N.K. Zajkov, N.V. Mushnikov, E.G. Gerasimov, V.S. Gaviko, M.I. Bartashevich, T. Goto, and V.I. Khrabrov, *J. Alloys Compd.* **363**, 40 (2004).

4. S. G. Bogdanov, N. V. Mushnikov, P. B. Terentiev, E. G. Gerasimov, S. V. Grigoriev, A. I. Okorokov, Yu. O. Chetverikov, G. Ekerlebe, K. Pranzas, and A. N. Pirogov, *Phys. Met. Metallogr.* **114**, 566 (2013).

5. A. A. Bykov, Yu. O. Chetverikov, A. N. Pirogov, and S. V. Grigor'ev, *JETP Letters*, **101**, 699 (2015).

МАГНИТО- И СПИН-ЗАВИСИМЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ГИБРИДНЫХ СТРУКТУРАХ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

А.С. Тарасов^{1,2}, М.В. Рауцкий¹, А.В. Лукьяненко^{1,2}, И.А. Бондарев^{1,2}, И.А. Яковлев^{1,3}, С.Г. Овчинников^{1,2}, Н.В. Волков^{1,3}

¹Институт физики им. Л.В. Киренского, Федеральный исследовательский центр "Красноярский научный центр СО РАН", Красноярск, 660036, Россия (taras@iph.krasn.ru)

²Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, 660041, Россия

³Сибирский государственный аэрокосмический университет, Красноярск, 660014, Россия

Исследование магнитотранспортных явлений в гибридных структурах совместимых с КМОП технологией является привлекательной областью исследований, поскольку, помимо интересных физических свойств, такие структуры демонстрируют эффекты, важные, прежде всего, с прикладной точки зрения [1]. В этой работе мы представляем результаты исследований магнитозависимых транспортных свойств гибридных структур на основе кремния.

Структуры Mn/SiO₂/p-Si и Fe/SiO₂/p-Si были выращены методом термического испарения в сверхвысоком вакууме. Магнитосопротивление измерялось с помощью источника-измерителя KEITHLEY 2400, фотонапряжение - при помощи нановольтметра KEITHLEY 2182A, а магнитоимпеданс – используя LCR-метр Agilent E4980A.

В структуре Mn/SiO₂/p-Si были обнаружены эффекты гигантского магнитоимпеданса (МИ) и магнитосопротивления (МС) (рисунок 1(a)). Эффект действия магнитного поля связан с подавлением ударной ионизации, и реализуется с помощью двух механизмов, что приводит к увеличению пороговой энергии необходимой для запуска процесса ударной ионизации. Первый – сдвиг уровней энергии акцепторов от потолка валентной зоны, второй – действие сил Лоренца, которые искривляют траекторию носителей заряда.

При исследовании фотовольтаического эффекта в структуре Fe/SiO₂/p-Si обнаружена высокая

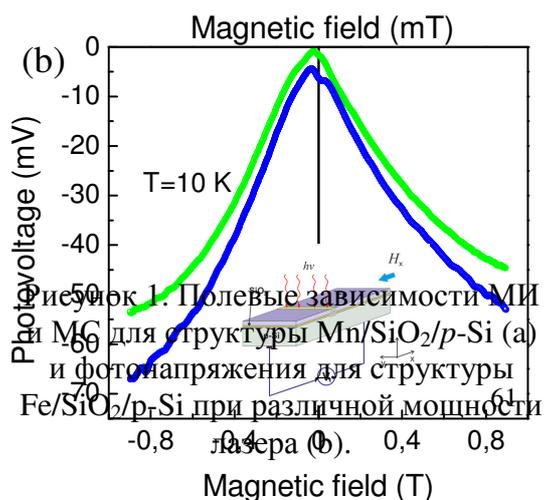
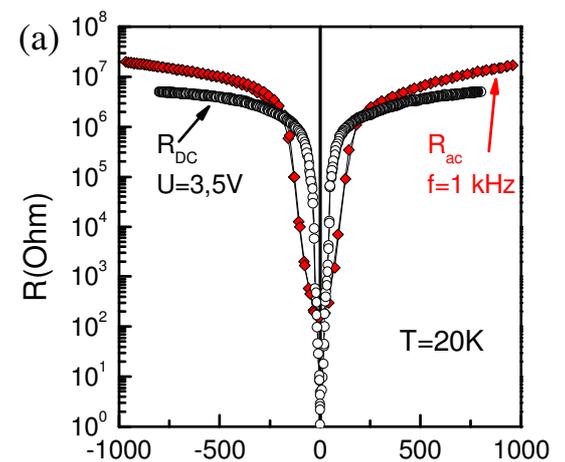


Рисунок 1. Полевые зависимости МИ и МС для структуры Mn/SiO₂/p-Si (a) и фотонапряжения для структуры Fe/SiO₂/p-Si при различной мощности лазера (b).

чувствительность эффекта к магнитному полю, наиболее сильно проявляющаяся при температурах ниже 12 К (рисунок 1(b)). Наиболее вероятно, включение магнитного поля приводит к сдвигу акцепторных состояний, вследствие чего изменяются параметры барьера Шоттки, который, в большей степени, определяет величину и знак фотонапряжения. Следовательно, магнитное поле контролирует фотовольтаический эффект.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского Края (Проекты. №16-42-242036 и №16-42-243046).

Литература

1. R. Jansen, *Nature Materials* **11**, 400 (2011).

МАГНИТОСТРИКЦИЯ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО МОНОКРИСТАЛЛА HoMnO_3

*Н. Павловский, А. Дубровский, К. Шайхутдинов, К. Тереньтев
ИФ СО РАН им. Л.В. Киренского, Академгородок 50, стр. 38, Красноярск, Россия
(mik0la@yandex.ru)*

HoMnO_3 является типичным представителем семейства гексагональных манганитов, чья магнитная фазовая диаграмма была хорошо изучена ранее [1]. Ниже температуры магнитного упорядочения $T_n=72$ К, HoMnO_3 упорядочивается в неколлинеарную 120° спиновую структуру с магнитной симметрией $R\bar{6}_3cm$. В температуре переориентации спинов $T_{sp}=40$ К, моменты марганца поворачиваются в плоскости, изменяя магнитную симметрию к $R\bar{6}_3cm$, также существует еще один спин-переориентационный переход моментов Mn в температуре близкой к 4 К.

В данной работе был синтезирован монокристалл гексагонального замещенного манганита лантана HoMnO_3 методом оптической зоной. Был измерен эффект магнитострикции в температурном интервале от 4.2 до 100 К, и при приложенных магнитных полях вплоть до 14 Т. Данный эффект был измерен вдоль всех кристаллографических осей в различных конфигурациях направления приложенного магнитного поля и направления эффекта магнитострикции (продольная и поперечная магнитострикция).

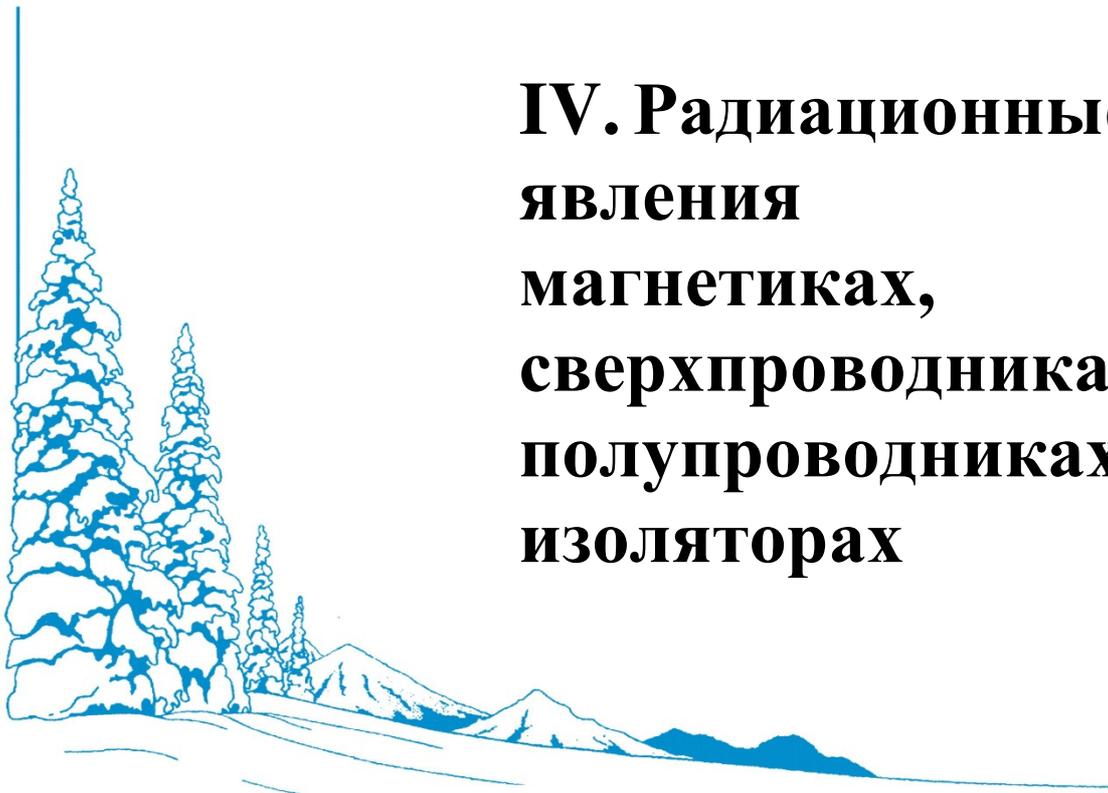
Поведение эффекта магнитострикции показало большое количество особенностей, наблюдаемых в различных температурах и конфигурациях поле – стрикция, в том числе: немонотонность и смена знака стрикции. Причем, поведение эффекта магнитострикции в температурах ниже спин-переориентационного перехода ионов Mn хорошо коррелирует с магнитной фазовой диаграммой HoMnO_3 .

Но, т.к. в исходном соединении присутствовало 2 магнитных подсистемы (4f и 3d элементов), было решено синтезировать образец замещенного гексагонального манганита лантана с замещением на немагнитный ион в редкоземельной подсистеме с целью выяснить влияние 4f подсистемы на поведение эффекта магнитострикции.

Для этой цели был синтезирован образец YMnO_3 с немагнитной 4f подсистемой, на котором также были проведены измерения эффекта магнитострикции. Результаты измерений показали, что само значение магнитострикции стало меньше на порядок и пропали все особенности характерные для HoMnO_3 . Отсюда можно сделать вывод о том, что главную роль в магнитострикционных свойствах играют ионы Ho.

Литература

1. F. Yen, C. dela Cruz, B. Lorenz, E. Galstyan, Y.Y. Sun, M. Gospodinov, C.W. Chu. *J. Mater. Res.*, **Vol.22**, No.8 (2007)



IV. 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 $\text{La}_2\text{SrMn}_2\text{O}_7$, LaMnO_3 , оксид CuO , Si , SmB_6 , GaN 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.

ВЫЗВАННЫЕ НЕЙТРОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ И РЕШЕТОЧНЫХ КОНСТАНТ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ wz -GaN ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОДЛОЖКЕ Al_2O_3 ,

В.Н. Брудный¹, В.М. Бойко², Н.Г. Колин²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050
Томск, Россия (brudnyi@mail.tsu.ru)

²Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, 249033
Обнинск, Россия

Гетероструктуры GaN/ Al_2O_3 широко используются в технологических целях, поскольку обеспечивают получение приемлемых по кристаллическому качеству приборных структур. Исследовано влияние быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) до флюенса $1,75 \times 10^{20}$ бн/см² и быстрых плюс тепловых нейтронов до флюенса $3,5 \times 10^{20}$ бтн/см² на электронные свойства и параметры кристаллической решетки слоев GaN(Si) и GaN(Mg), выращенных на подложке (0001) Al_2O_3 . Установлено, что облучение нейтронами преобразует исходные образцы n-GaN(Si) в полуизолирующий материал с удельным электросопротивлением около 1×10^{10} Ом·см при комнатной температуре. В то же время удельное сопротивление исходных образцов p-GaN (Mg) возрастает выше 1×10^{10} Ом·см в связи с p/n - конверсией типа проводимости материала в результате смещения уровня Ферми в верхнюю половину запрещенной зоны GaN, а затем падает до $\sim 1 \times 10^{10}$ Ом·см, как и в исходных образцах n-GaN. Эти изменения электросопротивления GaN при нейтронной бомбардировке являются результатом захвата свободных носителей заряда радиационными дефектами акцепторного в исходном n-GaN, и донорного типов в исходных образцах p-GaN. В результате этого уровень Ферми во всех исследованных образцах переходит в верхнюю половину GaN запрещенной зоны и закрепляется ниже дна зоны проводимости в предельном положении вблизи $E_c - 0,7$ эВ при комнатной температуре, что близко к положению собственного уровня зарядовой нейтральности нитрида галлия. Последующее облучение нейтронами таких образцов снижает удельное электросопротивление материала до $\sim 1 \times 10^6$ Ом·см при максимальных для данной работы потоках нейтронов. Такое "аномальное" уменьшение удельного сопротивления в "переоблученных" образцах GaN наблюдалось ранее в некоторых работах и для других облученных нейтронами полупроводников, например, в GaAs. Этот эффект связан с прыжковой проводимостью носителей заряда по состояниям радиационных дефектов в сильно поврежденном материале. В таких образцах GaN кривые $\rho(D)$ в области больших доз практически одинаковы, независимо от исходных уровней легирования материала и его типа проводимости.

Дифракция рентгеновских лучей выявляет увеличение c -параметра решетки GaN при нейтронной бомбардировке до предельных величин $\sim 0,44\%$ по отношению к исходному значению в исследуемых образцах и до $\sim 0,51\%$ по отношению к недеформированному GaN, в то время как a -параметр решетки остается почти неизменным. В то же время рост c -параметра решетки подложки Al_2O_3 достигает значения около $0,11\%$ при облучении нейтронами, в то время как a -параметр практически не изменяется в пределах точности измерений.

Интерпретация данных изохронного отжига облученных нейтронами образцов n- и p-GaN показывает, что дефекты донорного и акцепторного типа отжигаются в обоих типах материалов. В то же время электронные свойства сильно облученных образцов GaN указывает на наличие стабильных дефектов решетки даже после отжига до 1000°C . В то

же время измерения термической стабильности облученных нейтронами образцов показывают, что $\Delta c/c_0$ возвращается к своему исходному значению при нагреве до 1000°C с основной стадии отжига около 400°C , что указывает на отжиг точечных дефектов.

ПРОБЛЕМА РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ МАТЕРИАЛОВ СОЛНЕЧНЫХ ЯЧЕЕК НА ОСНОВЕ ПЕРОВСКИТОВ

Б.Л. Оксенгендлер, С.Е. Максимов, Н.Р. Ашуров

Научно-Исследовательский Центр Химии и Физики Полимеров при Национальном Университете Узбекистана, Ташкент, Узбекистан (oksengendlerbl@yandex.ru)

Проблема радиационной стойкости, являющейся важнейшим атрибутом функционирования солнечных элементов на основе полупроводников, подразделяется на два аспекта: 1) деградация солнечного элемента (СЭ) под действием света из рабочего диапазона; 2) деградация СЭ под действием высокоэнергичной радиации. Первый аспект важен при обычной наземной эксплуатации, второй – при работе в космосе. Механизмы, реализующие эти два аспекта радиационной физики, весьма различны [1]. Применительно к СЭ на основе органико-неорганических перовскитов радиационно-деградационные процессы осуществляются за счёт весьма специфических типов процессов, резко отличающих их от других полупроводниковых СЭ (например, от Si).

1. *Деградация при световом облучении.* Особенность физики здесь связана с сильной ионностью решётки и с тем, что валентная зона образована, в основном, из орбитали I, соответствующей ионному состоянию Г. При поглощении светового кванта имеет место реакция $\Gamma + h\nu \rightarrow \Gamma^0$, что ликвидирует яму Маделунга-Эвальда для Г и способствует выходу Γ^0 в междоузлие. Этот процесс идёт в конкуренции с дырочной делокализацией, так что вероятность деградации $\eta \sim \exp(-\Delta E_v^e/v_D h)$, где ΔE_v^e – максимальная ширина валентной зоны, v_D – дебаевская частота. Этот множитель резко возрастает в дефектных областях, где ΔE_v^e мало.

2. *Деградация при высокоэнергичном облучении.* Здесь основной особенностью материала является сильная асимметрия масс атомов, что на первый план выставляет двухстадийный процесс: сначала быстрая частица (электрон) смещает лёгкий атом из молекулы $\text{CH}_3\text{-NH}_3$, который затем, рассеиваясь, смещает соседние тяжёлые атомы (например, Г). В результате такого образования дефектов резко понижается порог энергии облучающей частицы. Например, доля быстрого электрона с массой m_e и атома Г с массой M_i максимально возможная передача энергии атому такова: $E_{\max}^2/E_{\max}^1 = 4M_i^2(m_e+M)^2/[(M_i+M)^2(m_e+M_i)^2] \gg 1$, где M – масса лёгкого атома. Таким образом, резко превалирует сечение дефектообразования по процессу «частица – лёгкий атом – тяжёлый атом» над каналами типа «частица – тяжёлый атом». Отметим, что аналогичный процесс был обнаружен много лет назад в германии, легированном водородом (см. [1]).

3. *Деградация солнечных элементов с фрактальными интерфейсами при ионизирующем излучении.*

Так как наличие фрактальных интерфейса приводит к увеличению его площади, облучение ионизирующим светом (также как любым типом ионизирующего излучения в общем случае), принимая во внимание полупроводниковый характер перовскита, это может привести к различным вероятностям возникновения дефектов и поверхностной радиационно-стимулированной диффузии атомов в областях с разными знаками

кривизны. Это, в свою очередь, исключает дополнительную добавку в 13% в величине фототока. Следует отметить, что эффективное 13%-ное увеличение фототока было обнаружено в работе [2]

Литература.

1. Оксенгендлер Б.Л., Тураева Н.Н. *Радиационная физика конденсированных сред. Т. 1: Концепции*. Ташкент. «Фан» (2006), 136 с.
2. Zheng L., Ma Y., Chu S. et.al., *Nanoscale* **6**, 8171 (2014).

РАДИАЦИОННАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛИМЕРОВ: ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Д.Н. Садовничий¹, А.П. Тютнев², Ю.М. Милехин¹

¹ФГУП "Федеральный центр двойных технологий "Союз", Московская обл., Россия,
(fcdt@monnet.ru)

²Московский государственный институт электроники и математики, Москва, Россия

Возникающие в полимерных материалах электрические поля и токи утечки в поле действия ионизирующего излучения могут быть причиной отказов сложных технических систем. Однако до настоящего времени описание радиационной электропроводности полимеров остается актуальным вопросом, что во многом обусловлено различиями в структуре полимерных материалов [1-5].

В работе обсуждаются результаты численного анализа закономерностей переходного процесса установления радиационной электропроводности, как на этапе облучения, так и на этапе релаксации после окончания облучения. Предложено аналитическое выражение для описания спада радиационной электропроводности в рамках модели Роуза-Фаулера-Вайсберга (РФВ) в малосигнальном режиме облучения, выполнено его сравнение с прямыми численными расчетами. На основании проведенных расчетов предложены удобные экспериментальные методы определения абсолютных значений основных параметров модели РФВ (эффективного частотного фактора, сдвига термализованных носителей заряда до их захвата в единичном электрическом поле и дисперсионного параметра). Предложенная методика определения параметров модели РФВ апробирована на примере известных литературных данных для полистирола и полиэтилена высокого давления. Наряду с анализом малосигнального режима подробно исследованы и нелинейные эффекты, связанные с бимолекулярной рекомбинацией носителей заряда и заполнения ловушек. Проведен также анализ температурной зависимости радиационной электропроводности и ее связи с молекулярной подвижностью в полимерах.

Литература

1. Тютнев А.П., Садовничий Д.Н., Боев С.Г., *Химия высоких энергий*. **29**, 115 (1995).
2. Тютнев А.П., Садовничий Д.Н., Боев С.Г., *Химическая физика*. **16**, 85 (1997).
3. Садовничий Д.Н., Тютнев А.П., Хатилов С.А., Милицын Ю.А., *Химия высоких энергий*. **32**, 7 (1998).
4. Тютнев А.П., Садовничий Д.Н., Саенко В.С., Пожидаев Е.Д., *Высокомолек. соед. А*. **42**, 16 (2000).
5. Садовничий Д.Н., Хатилов С.А., Тютнев А.П., Милицын Ю.А., *Химия высоких*

энергий. **37**, 191 (2003).

б. Садовничий Д.Н., Тютнев А.П., Милёхин Ю.М., *Химия высоких энергий.* **42**, 485 (2008).

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ (SnSe)_{1-x}(GdSe)_x ОБЛУЧЕННЫМИ γ – КВАНТАМИ

М.И. Мургузов, Дж.И. Гусейнов, Р.Ф. Мамедова, Т.А. Джафаров
Азербайджанский государственный педагогический университет, Баку,
Азербайджанская республика (cih_58@mail.ru)

Одной из актуальных проблем физики полупроводникового материаловедения является повышение радиационной стабильности материалов, полученных на основе соединений типа $A^{IV}B^{VI}$, что обусловило интерес к легированию этих материалов редкоземельными элементами (РЗЭ), приводящему к повышению устойчивости к радиационным воздействиям. Нами изучено влияние γ – облучения на основные термоэлектрические характеристики твердых растворов (SnSe)_{1-x}(GdSe)_x.

Исследовано влияние гадолиния на электрофизические свойства твердых растворов (SnSe)_{1-x}(GdSe)_x ($x \leq 2,00$ мол% GdSe). Установлено, что в зависимости от содержания гадолиния происходит инверсия с изменением знака проводимости. При малых содержаниях гадолиния (до $\approx 0,25$ мол% GdSe) происходит интенсивное рассеяние носителей заряда от фононов, что приводит к уменьшению общей теплопроводности и подвижности носителей. Выявлено, что исследованные образцы являются частично компенсированными полупроводниковыми материалами со смешанным типом проводимости.

Образцы получены методом направленной кристаллизации. Сначала до облучения были измерены термоэлектрические параметры: термоэ.д.с. (S); электропроводность (σ) и теплопроводность (χ). Затем образцы облучались γ -квантами с дозой $D=0.6$ Гр/сек в течение 30 часов ($\epsilon=9.0$ кЭВ) и вновь

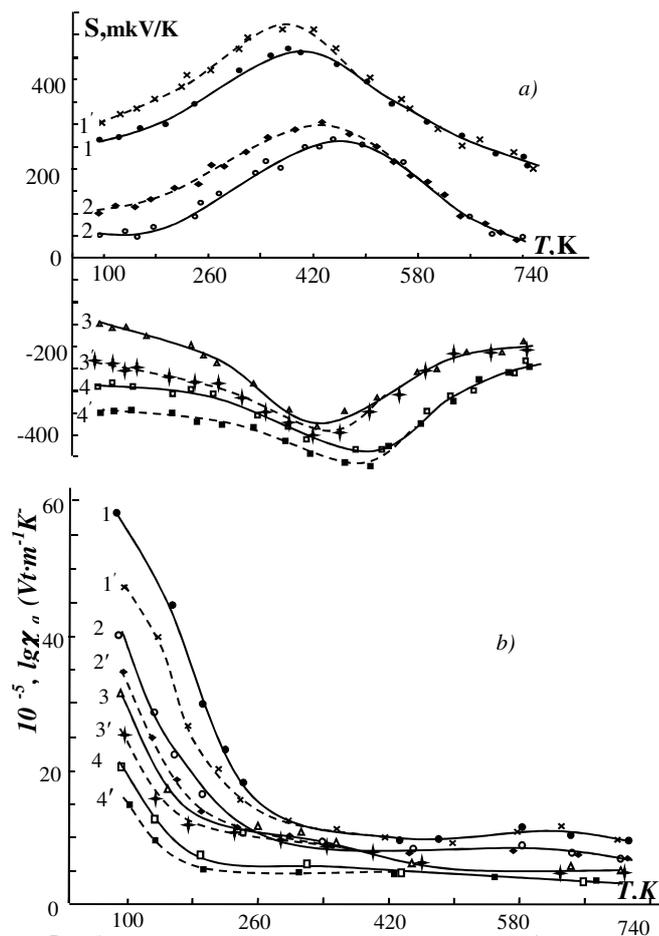


Рис.1. Температурное зависимости термо.э.д.с (a) и теплопроводности (b) в системе сплав (SnSe)_{1-x}(GdSe)_x (пунктир линии после облучения) 1-x=0; 2-x=0,005; 3-x=0,01; 4-x=0,025;

измеряли выше указанные параметры. Некоторые результаты измерений показаны на рисунке.

Качественные оценки показывают, что после облучения во всех исследованных образцах, не зависимо от типа проводимости, термоэ.д.с. увеличивается а теплопроводность уменьшается. Уменьшение общей теплопроводности во всех образцах связано с образованием в подрешетках олова и селена новых междоузельных дефектов. С ростом температуры, относительное изменение термо э.д.с и теплопроводности уменьшается, что по-видимому связано с уменьшением скорости рекомбинации между радиационным и структурным дефектами.

ЭФФЕКТЫ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ $\text{Vi}_{0.85}\text{La}_{0.15}\text{FeO}_3$

В.Д. Пархоменко, С.Г. Богданов, А.Н. Пирогов, А.Е. Теплых

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (parkhomenko@imp.uran.ru)

Замечательной особенностью ViFeO_3 является сосуществование ферроэлектрического ($T_C=1123$ К) и антиферромагнитного ($T_N=643$ К) состояний. Это позволяет рассматривать этот материал перспективным для применения в устройствах записи информации и т.п. К настоящему времени предпринято много попыток улучшить свойства ViFeO_3 , как с помощью частичных замещений атомов Vi и Fe различными атомами, так и используя облучение высокоэнергетическими ионами и электронами.

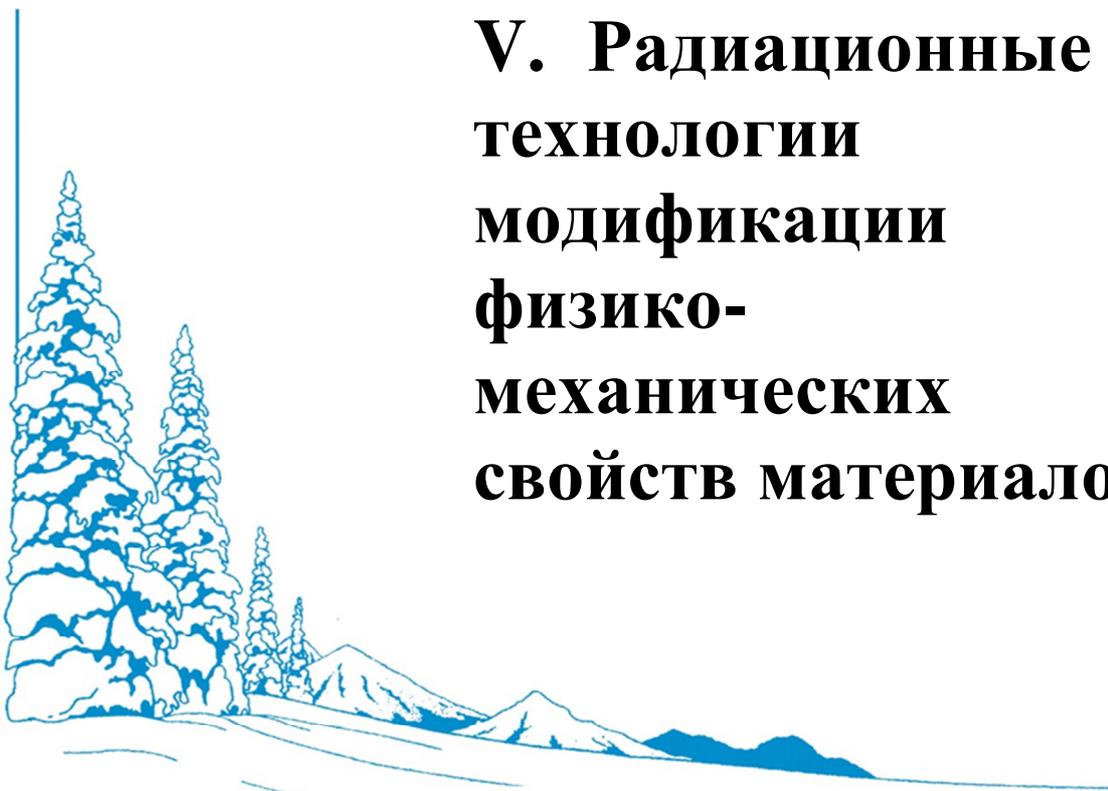
Исследованный образец приготовлен методом твердотельной реакции. Частичное замещение висмута на лантан, $\text{Vi}_{0.85}\text{La}_{0.15}\text{FeO}_3$, позволило получить однофазное состояние. Образец синтезирован и любезно предоставлен португальскими коллегами.

Методами нейтронной дифракции, малоуглового рассеяния нейтронов и магнитных измерений исследованы структурное и магнитное состояния $\text{Vi}_{0.85}\text{La}_{0.15}\text{FeO}_3$ облученного в реакторе ИВВ-2М быстрыми нейтронами ($E>0,1$ МэВ), флюенс 5×10^{20} см⁻².

Анализа картин нейтронного рассеяния методом Ритвельда (программа FullProf) показал, что в массивном спрессованном облученном образце образовались фазы Vi_2O_3 и Fe_3O_4 и наблюдается дефицит кислорода. Это состояние сохраняется уже более двух лет. Хранение на воздухе, в течение более четырех месяцев, облученного размолотого в порошок образца, приводит к восстановлению исходного состояния.

Магнитными измерениями установлено, что в массивном образце, благодаря выпадению фазы Fe_3O_4 , проявляется ферромагнитное состояние, коэрцитивная сила $H_c=650$ Ое.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующее предположение. Свободный пробег первично выбитых нейтронами атомов (ПВА) кислорода составляет около 350 нм., что значительно, более чем в 10 раз, превышает длину свободного пробега тяжелых ПВА Vi, La и Fe. В процессе облучения, которое продолжалось более 40 суток, часть ПВА кислорода выходило на границы зерен, что привело к дефициту кислорода в образце. Этот дефицит и явился, по-видимому, причиной выпадения фаз Vi_2O_3 и Fe_3O_4 . Хранение на воздухе облученного образца с развитой поверхностью (порошок) привело к восстановлению содержания кислорода в образце и возвращению его в исходное структурное состояние.



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, посвящённые 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 плёнок, нанесённых 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 уединённых 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 МИКРОСТРУКТУРЫ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ,
ПОДВЕРГНУТЫХ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКЕ (Ar^+ , $E = 30$ кэВ)**

Н.В. Гущина¹, В.В. Овчинников^{1,2}, Ф.Ф. Махинько¹, С.А. Линник¹

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

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

С целью изучения радиационно-динамических эффектов при ионном облучении и возможности их использования для модификации структуры и свойств титановых сплавов в работе изучено влияние ионов аргона с энергией 30 кэВ на структуру и свойства образцов (толщиной 2,5-3 мм) титановых сплавов Gr2 и Ti6Al4V в различном исходном состоянии.

Облучение образцов сплавов ионами Ar^+ проведено на ионном имплантере ИЛМ-1 в непрерывном режиме при изменении параметров облучения: энергия ионов $E = 30$ кэВ, плотность ионного тока $j = 200-500$ мкА/см²; флюенс $F = 10^{16}-2 \cdot 10^{18}$ см⁻². В ходе облучения осуществлялся мониторинг температуры образцов с помощью тонкой хромель-алюмелевой термопары, подключенной к системе автоматической регистрации цифровых сигналов фирмы Advantech «Adam 4000».

Установлено, что при облучении отожжённых сплавов в использованных режимах исходная микроструктура, представляющая собой рекристаллизованные равноосные зерна, сохраняется, твердость облученных образцов сравнима со значениями твердости исходных образцов. Результат воздействия ионного облучения в использованных режимах на структуру и свойства деформированных образцов зависит от сплава. Так, в случае облучения образцов сплава Ti6Al4V, исходная мелкодисперсная волокнистая структура сохраняется, твердость не изменяется. Облучение же образцов деформированного сплава Gr2, с исходной мелкодисперсной волокнистой структурой, приводит к уменьшению его твердости, что связано с протеканием во всем объеме образцов процессов рекристаллизации с образованием равноосных мелкодисперсных зерен размером 5-10 мкм. Такой радиационный отжиг в ходе ионного облучения протекает при нагреве образцов (без выдержки) до температуры на 150-180°C ниже температуры традиционного отжига этих сплавов (при 680°C) и за более короткое время (9 мин вместо 35 мин). Таким образом, показана возможность быстрого радиационного отжига титанового сплава Gr2 пучками ускоренных ионов инертного газа при пониженных температурах

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10054).

АНАЛИЗ РОЛИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССОВ ДАЛЬНОДЕЙСТВУЮЩЕГО ТИПА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПЕРЕСЫЩЕННОГО ТВЕРДОГО РАСТВОРА Fe+8.16 ат. % Mn ИОНАМИ РАЗЛИЧНОЙ АТОМНОЙ МАССЫ (Ar^+ , Xe^+)

В.В. Овчинников^{1,2}, Ф.Ф. Махинько¹, С.А. Бедин¹, К.В. Шаломов^{1,2}

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

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Исследованы процессы перераспределения атомов и особенности протекания α (ОЦК) \rightarrow γ (ГЦК) структурного фазового превращения в объеме фольг сплава Fe+8.16 ат. % Mn (толщиной 30 мкм) в ходе облучения ионами Ar^+ ($E = 20$ кэВ, $j = 50-100$ мкА/см²; проективные пробеги ионов <0.003 мкм). Рассчитаны значения параметра ближнего атомного порядка по Каули, а также количество и состав α - и γ -фаз, формирующихся при $\alpha \rightarrow \gamma$ переходе. Определены параметры сверхтонкого электрического и магнитного взаимодействия ядер ^{57}Fe в различном атомном окружении, отражающие изменения электронной структуры атомов железа в зависимости от состояния сплава.

Установлено, что с увеличением атомной массы внедряемого иона усиливается интенсивность распада пересыщенного (метастабильного при комнатной температуре) твердого раствора Fe+8.16 ат. % Mn. Это касается, как стадии предвыделения, с образованием ближнего атомного порядка, так и стадии $\alpha \rightarrow \gamma$ структурного фазового превращения.

Сравнение результатов воздействия пучков ионов Ar^+ и Xe^+ различной массы с изученным ранее [1] воздействием пучка света на закаленный сплав Fe+8.16 ат.% Mn (при полном совпадении режима изменения температуры образца) свидетельствуют о наличии нетепловой составляющей воздействия пучков ускоренных ионов, роль которой увеличивается с ростом атомной массы иона. Последнее связывается с большей плотностью энерговыделения для более массивных ионов.

Согласно выполненным расчетам [1,2], процессы, наблюдаемые в метастабильных закаленных сплавах железа, могут инициироваться, послекаскадными ударными волнами, переходящими в *незатухающий режим* распространения. Этот механизм может быть использован в качестве объяснения природы многократно ускоренных процессов в конденсированных средах при пониженных температурах, протекающих под воздействием ионной бомбардировки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10054).

Литература

1. Овчинников В.В., Гущина Н.В., Овчинников С.В. *ФММ* **116**, 1234 (2015).
2. Овчинников В.В. *Успехи физических наук* **178** 991 (2008).

ВЛИЯНИЕ СФОКУСИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И МИКРОТВЕРДОСТЬ АМОРФНОГО СПЛАВА $\text{FeSi}_6\text{B}_{16}$

А.В. Жихарев¹, В.Я. Баянкин¹, С.Г. Быстров, И.Н. Климова¹, А.А. Колотов¹, Н.А. Орлова²

¹ФГБУН Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск (less@ftiudm.ru)

²Удмуртский государственный университет, г. Ижевск (orlova@udsu.ru)

Аморфные металлические сплавы благодаря своим свойствам давно привлекают внимание исследователей. Интерес к ним связан с их возможностью уникального сочетания таких свойств, как магнитных, электрических, механических, прочностных и т.д. недостижимых для кристаллических материалов. Это делает их перспективными в использовании во многих отраслях промышленности [1,2]. Но при этом необходимо отметить, что аморфное состояние является неравновесным состоянием. Под действием температур или длительного хранения в них может происходить распад аморфной фазы с потерей свойств. Поэтому исследование поведения таких материалов под термическим воздействием представляет научный и практический интерес. Одним из способов такого термического воздействия может служить лазерная обработка материалов. Лазерная обработка обеспечивает локальное воздействие на материал, при котором можно регулируя режимы работы лазерной установки добиться таких условий воздействия лазера, которое позволит изменять лишь структуру и свойства поверхностного слоя материала и не затрагивать его внутренние слои. Это в свою очередь дает возможность создания материалов со специфическими модифицированными поверхностными свойствами [3-5]. Немаловажно отметить, что лазерное воздействие актуально для обработки хрупких материалов и материалов малой толщины (лент, фольг или тонких пластин). Однако необходимо учитывать, что такое воздействие является высокоэнергетическим, что при импульсном режиме за короткий промежуток времени при поглощении энергии материалом могут происходить различные процессы: высокоскоростной нагрев, течение и испарение материала, упрочнение поверхности, фазовые переходы и т.п. Для аморфного состояния материала это может привести к перераспределению элементов системы или к частичной или полной кристаллизации сплава или полному разрушению облучаемого объекта. Поэтому, изучая происходящие процессы в аморфном сплаве под действием лазера, можно будет определять режимы обработки и механизмы формирования необходимых свойств изучаемого сплава требуемых для условий его эксплуатации.

В работе представлены результаты исследования влияния импульсного лазерного излучения на изменение топографии, состава, структуры и микротвердости аморфного металлического сплава $\text{FeSi}_6\text{B}_{16}$.

Литература:

1. А.М. Глезер, Б.В. Молотилов. *Структура и механические свойства аморфных сплавов*. М.: Металлургия, 1992. 208 с.
2. *Аморфные металлические сплавы*. Под ред. Ф.Е. Люборского. М.: Металлургия, 1987. 584 с.
3. Р.В. Арутюнян и др. *Воздействие лазерного излучения на материалы*. М.: Наука, 1989. 367 с.
4. А.А. Веденов, Г.Г. Гладуш. *Физические процессы при лазерной обработке материалов*. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.

5. В.Я. Баянкин, В.Ю. Васильев, И.Н. Шабанова. *Сегрегационные эффекты на поверхности метастабильных металлических систем*. Издательство Института прикладной механики УрО РАН, 1999. 288 с.

ИЗМЕНЕНИЕ РЕЛЬЕФА И ФАЗОВОГО СОСТАВА МЕТАСТАБИЛЬНОГО СПЛАВА $Fe_{72.5}Cu_1Nb_2Mo_{1.5}Si_{14}B_9$ ПРИ НАНОКРИСТАЛЛИЗАЦИИ, ВЫЗВАННОЙ ИОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

И.Ю. Романов¹, Ф.Ф. Махинько¹, В.В. Овчинников^{1,2}, А.И. Медведев^{1,2},
Ю.Н. Стародубцев^{2,3}, В.Я. Белозеров³, Б.А. Логинов⁴

¹Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (ivan@iep.uran.ru)

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия

³Научно-производственное предприятие «Гаммамет», Екатеринбург, Россия

⁴Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной
техники», г. Зеленоград, Россия

Круг применений магнитомягких материалов в современной технике постоянно расширяется, соответственно растет потребность в разработке новых и эффективных методов управления различными свойствами электротехнических сплавов. Ряд работ [1-3] свидетельствует об улучшении атомной и магнитной структуры магнитомягких материалов в результате воздействия пучков ускоренных ионов.

В данной работе изучено влияние ионов Ar^+ с энергией 30 кэВ на аморфные ленты магнитомягкого сплава $Fe_{72.5}Cu_1Nb_2Mo_{1.5}Si_{14}B_9$, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава, и, находящихся в метастабильном аморфном состоянии.

Облучение лент толщиной 25 мкм непрерывными пучками Ar^+ ($E = 30$ кэВ, $j = 300$ мкА/см², $D = 3.75 \cdot 10^{15}$ см⁻²) проводилось с использованием ионного источника ПУЛЬСАР-1М на основе тлеющего разряда с холодным полым катодом [4]. Нагрев образцов контролировался термопарой в режиме реального времени. Исходные и облученные образцы отжигали на воздухе в течение 1 ч в диапазоне температур 730-840 К.

Структурно-фазовые превращения, инициируемые облучением и протекающие в ходе термической обработки, исследовались с помощью рентгеноструктурного анализа (с облученной и необлученной сторон образца), а также методом атомно-силовой микроскопии по изменению рельефа поверхности при переходе из аморфного состояния в многофазное в нанокристаллическое. Рентгеновские дифрактограммы снимались на дифрактометре D8 DISCOVER (Германия, Bruker) в медном излучении ($Cu K_{\alpha 1,2}$). Поверхность образцов анализировалась на зондовом микроскопе СММ-2000 [5] в режиме атомно-силовой микроскопии.

Установлено, что облучение ионами Ar^+ при кратковременном нагреве до 620 К (что на 150 К ниже термического порога кристаллизации) приводит к полной кристаллизации аморфного сплава (по всей толщине лент) с выделением кристаллов твердого раствора α -Fe(Si), близкого по составу к $Fe_{80}Si_{20}$, стабильной фазы Fe_3Si и метастабильных гексагональных фаз.

Атомно-силовая микроскопия наглядно демонстрирует трансформацию слабо выраженного рельефа аморфного образца в четко видимую после облучения зеренную

структуру. Зеренная структура формируется как на облученной поверхности, так и на необлученной, что, как и данные рентгеноструктурного анализа, свидетельствует о процессе кристаллизации во всем объеме исследуемых образцов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10054).

Литература

1. Соколов Б.К., Губернаторов В.В., Драгошанский Ю.Н. и др. *ФММ*. **89**, 4, 32 (2000).
2. Губернаторов В.В., Сычева Т.С., Драгошанский Ю.Н. и др. *ДАН*. **410**, 2, 194 (2006).
3. Овчинников В.В. *Успехи физических наук*. **178**, 9, 991 (2008).
4. Gavrilov N. V., Mesyats G.A., Nikulin S.P. et al. *J. Vac. Sci. Technol*, **A14**, 1050 (1996).
5. Логинов Б. А. Москва, ГОУ МИФИ (ГУ), 2007, 92 с .

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ АРГОНА НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ 30X13

Н.Б. Пепеляев¹, С.Г. Быстров², С.М. Решетников¹, В.Я. Баянкин²

¹Удмуртский Государственный Университет, г. Ижевск, Россия (termi364@mail.ru)

²Физико-технический институт УРО РАН, г. Ижевск, Россия

Хромистые стали широко применяются в различных областях техники. Однако их существенным недостатком является подверженность локальной коррозии. Поэтому актуальным остается вопрос поиска новых методов повышения коррозионной стойкости высоколегированных сталей. Целью нашей работы являлось изучение влияния имплантации ионов аргона на физико-химическое строение и коррозионное поведение высокохромистой стали.

Объектом исследования являлась сталь марки 30X13. Предварительно была проведена термическая обработка стали – отжиг в защитной атмосфере при температуре 900°C с охлаждением на воздухе. Далее проведена механическая обработка образцов - шлифовка и полировка пастой ГОИ до шероховатости $R_a=0,02$ мкм (13 класс шероховатости). После полировки образцы подверглись облучению ионами аргона с энергией 30 кэВ и следующими дозами: 10^{16} ион/см² (образец №1), $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² (образец №3), 10^{17} ион/см² (образец №5). Обработка проводилась на оригинальной ионно-лучевой установке ПИОН – 1М на базе сверхвысоковакуумного поста УСУ–4. Топографию поверхности образцов как исходного (без облучения) так и после ионной имплантации исследовали методом АСМ на приборе SOLVER-P47PRO. Измерение микротвердости производилось на приборе ПМТ-3М при нагрузке 10 г и выдержке 8 с. Химическое строение поверхности образцов изучалось методом РФЭС на приборе ЭС-2401 с послойным травлением ионами аргона на глубину до 20 нм. Поляризационные измерения выполнены в потенциодинамическом режиме на потенциостате Р-30. В качестве коррозионных сред был выбран боратный буферный раствор с pH=7,4 с добавлением 0,01М K₂SO₄.

В результате проведенных исследований установлено, что физико-химическое строение образцов и их коррозионное поведение изменяются неравномерно с увеличением дозы облучения. Микротвердость исходного образца совпадает с микротвердостью образца №3 в пределах погрешности измерений, при этом твердость

образцов №1 и №5 стала ниже на ~49%. Данные РФЭС свидетельствуют, что после ионной имплантации происходит увеличение концентрации углерода и кислорода и изменение химического состояния всех элементов в глубоких слоях материала по сравнению с необлученным образцом. На поляризационных кривых максимальные анодные токи отмечены для образца №5, минимальные – для образца №3, значения для исходного образца и образца №1 занимают промежуточное положение. По результатам АСМ видно, что коррозионное разрушение поверхности исходного образца прошло интенсивнее, чем образцов после ионной имплантации. Также по изображения АСМ заметно, что изменился характер коррозионных повреждений. На исходном образце это равномерные глубокие питтинги, а поверхность образцов после ионной имплантации подверглась, предположительно, язвенной коррозии. Глубина язв порядка 20 нм, они располагаются островками на исследуемой поверхности.

Предложен механизм процессов, объясняющий наблюдаемые явления.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Н.М. Созонова, А.Ю. Дроздов, В.Я. Баянкин

*Физико-технический институт Уральского отделения РАН, Ижевск, Россия
(less@ftiudm.ru)*

Ионная имплантация широко применяется в различных областях науки как метод модифицирования механических свойств поверхностного слоя твердого тела, но некоторые вопросы до сих пор остаются малоизученными. Актуальными остаются исследования образования и накопления радиационных дефектов, поведения внедренных атомов, эффекта поверхностной сегрегации и влияние короткоживущих некогерентных источников упругих волн. Их изучение является трудной задачей, поскольку при комнатной температуре часть радиационных дефектов отжигается и физическое состояние материала во время и после облучения отличаются. Поэтому наибольший интерес представляют результаты, полученные непосредственно во время ионной имплантации и сразу после ее окончания. Это возможно с помощью компьютерного моделирования ионной имплантации.

Моделирование выполняется с использованием программного пакета LAMMPS [1] и потенциалов погруженного атома (embedded atom method potential) [2, 3] для систем на основе железа. Данное семейство потенциалов позволяет в рамках классической МД точнее описывать характер взаимодействия, свойства и структуру металлов и сплавов по сравнению с парными межатомными потенциалами. При этом обеспечивается хорошее количественное согласие с широким набором экспериментальных данных и первопринципных расчетов, включая постоянную решетки для различных температур, модули упругости, энергии точечных дефектов, температуру плавления, энергию ОЦК-ГЦК перехода, плотность и структурный фактор жидкой фазы. Шаг по времени подбирался для различных энергий ионной имплантации и составлял 10^{-16} с.

В данной работе с помощью программного пакета LAMMPS создавалась система FeNi, содержащая не более 60000 атомов. Выбиралось несколько атомов Ni для моделирования процесса ионной имплантации, которым присваивалась скорость, соответствующая энергии облучения 10-30 кэВ. Далее проводилась стабилизация системы путем релаксации при комнатной температуре. Для анализа исследуемой структуры были

построены функции радиального распределения в разные моменты времени. В результате моделирования было обнаружено, что происходит образование различных дефектов в структуре моделируемого образца. Также происходит поверхностная сегрегация. Вычислена ширина модифицированного слоя.

Литература

1. URL: LAMMPS WWW Site: <http://lammps.sandia.gov/>.
2. Daw M. S., Baskes M. I., *Phys. Rev. B.* **29**, № 12 (1984).
3. Daw M.S., Baskes M.I., *Phys. Rev. Lett.* **50** (1983).

НАНОПРОВОЛОКИ ИЗ МЕТАЛЛОВ ГРУППЫ ЖЕЛЕЗА: ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ МАТРИЧНОГО СИНТЕЗА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ

Д.Л. Загорский¹, С.А. Бедин^{1,2}, К.В. Фролов¹, В.В. Артемов¹, С.С. Кругликов³, М.А. Чуев⁴,
А.А. Ломов⁴

¹Центр кристаллографии и фотоники РАН, Москва, Россия (dzagorskiy@gmail.com)

²МПГУ, Москва, Россия

³РХТУ им Д.И.Менделеева, Москва, Россия

⁴Физико-технологический институт РАН, Москва, Россия

Нанопроволоки (НП) из сплавов металлов группы железа (Fe-Ni, Fe-Co) получены методом матричного синтеза [1]. Решён вопрос подбора трековой матрицы для синтеза, поскольку коммерческие трековые мембраны [2] не всегда пригодны для задач матричного синтеза. Исследованы особенности гальванического процесса. Показано, что процесс состоит из нескольких этапов. Осаждение металла в поры имеет нелинейный характер из-за диффузионных ограничений. Специфические особенности последующей стадии - образование «шапочек» также изучены. Методами электронной микроскопии, Мёссбауэровской спектроскопии и магнитного гистерезиса исследованы зависимости структуры и магнитных свойств НП от условий электроосаждения. Показано, что элементный состав может отличаться от состава ростового раствора и это отличие увеличивается при увеличении скорости роста и/или при уменьшении диаметра НП. Установлено, что фазовый состав полученных НП в основном отвечает чистому металлическому альфа-железу. Методом мёссбауэровской спектроскопии оценены параметры сверхтонкого расщепления для железо-кобальтовых НП. Показано, что для железо-никелевых НП спектр может быть представлен как суперпозиция по крайней мере трёх магнитных секстетов с параметрами B_{hf} 27-33 Т. Железо кобальтовые НП демонстрировали магнито-жесткие свойства (коэрц. сила более 1000 Э), в то время как железо-никелевые НП обладали магнито-мягкими свойствами (коэрц. сила менее 100 Э). Показано, что магнито-жесткие свойства НП железо-кобальтового сплава могут направленно изменяться путём изменения условий синтеза.

Работа выполнялась при поддержке Гранта РФФИ 15-08-04949. Авторы благодарны проф. Апелю П.Ю.(ОИЯИ, г.Дубна) за предоставление полимерных образцов. В работе использовалось оборудование ЦКП ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Ссылки

1. C.R. Martin // *Science*, 1994, v. 266, p. 1961.

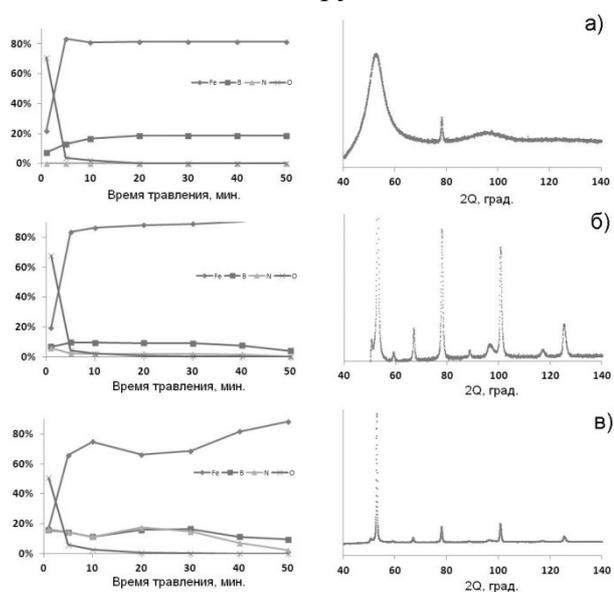
2. Brock T. // *Membrane filtration*. Science Tech., Inc. Madison, 1983, 462 p.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СЕГРЕГАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ В АМОРФНЫХ МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.А. Колотов, В.Л. Воробьев, В.Е. Порсев, В.Я. Баянкин

ФГБУН Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск, Россия (less@ftiudm.ru)

Одним из актуальных направлений прикладных и фундаментальных исследований является вопрос термической стабильности аморфных сплавов. Здесь не маловажен анализ структуры и сегрегационных процессов особенно на ранних стадиях кристаллизации, поскольку процесс кристаллизации аморфных сплавов протекает через последовательность метастабильных состояний, при этом свойства сплава изменяются настолько, что мы можем говорить о двух различных материалах, одинакового химического состава. Отсюда возникает задача управления кристаллизацией, как метода создания новых материалов. В рамках работы исследуются закономерности эволюции структуры и состава поверхностных слоев аморфных сплавов, подвергнутых ионно-лучевой обработке. В работе показано, что структурные изменения аморфной фазы и поверхностных кристаллов аморфного сплава зависят не только от параметров облучения – дозы и энергии ионов, но и от типа имплантируемых ионов.



Распределение компонентов сплава $Fe_{82}B_{18}$ в поверхностном слое, после облучения ионами азота: а) исходное; б) $D = 10^{16}$ ион/см²; в) $D = 10^{17}$ ион/см²

Показано, что в результате ионной бомбардировки происходит распад аморфной фазы с выделением набора метастабильных фаз, при этом скорость и количество новых фаз зависит как от параметров облучения, так и от типа облучаемых ионов. При этом немаловажно, что температура разогрева мишени определяется плотностью тока и энергией первичных атомов. Отмечено, что кристаллизация при ионной имплантации протекает при более низких температурах, чем в случае термической кристаллизации. Из этого можно сделать вывод, что решающую роль в процессе диффузии и фазообразования играют микроскопические процессы развития каскадов атомно-атомных соударений. 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.

РАДИАЦИОННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОПРОВОЛОК

С.А. Бедин¹, Ф.Ф. Махинько¹, В.В. Овчинников^{1,2}, Н.Н. Герасименко³, Д.Л. Загорский⁴

¹ Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия (bserg5@gmail.com)

² Уральский федеральный университет им. Ельцина, Екатеринбург, ул. Мира, 19

³ НИУ «Московский институт электронной техники», г. Зеленоград, пл. Шокина, 1

⁴ ФНИЦ «Кристаллографии и фотоники» РАН, Москва, Ленинский проспект, 59

Настоящая работа посвящена исследованию радиационной стабильности нанопроволок (НП) из чистого никеля и железо-никелевого сплава $\text{Fe}_{0,56}\text{Ni}_{0,44}$, получаемых методом матричного синтеза на основе полимерных трековых мембран при облучении пучками ионов Ag^+ и Xe^+ . Можно предположить, что стабильность наноразмерных структур будет отличаться от стабильности объёмных материалов соответствующего состава [1]. Очевидно, что способ и условия получения НП определяют их стабильность. Так, проведенное исследование показало, что при использованных параметрах облучения как ионами Ag^+ , так и ионами Xe^+ ($E = 20$ кэВ, $j = 300$ мкА/см², флюенсы $10^{16} - 10^{18}$ см⁻²) происходит деформация и оплавление НП, даже при незначительном нагреве пучком (до 150°C). Воздействие ионов Xe^+ более интенсивное. Исследована также зависимость стабильности НП от их диаметра, флюенса облучения и типа внедряемых ионов. В целом можно сделать вывод о низкой радиационной стабильности НП при использованных режимах облучения ионами Ag^+ и Xe^+ , под воздействием ионного облучения с высокой плотностью ионного тока. Сделано предположение о важной роли термализованных областей плотных каскадов атомных смещений (thermal spikes), являющихся наноразмерными зонами взрывного энерговыделения, разогреваемыми до нескольких тысяч градусов, в видоизменении структуры НП.

Авторы благодарны сотруднику ИК РАН Артёмову В.В. за помощь в проведении электронномикроскопических исследований. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10054).

Литература

1. Andrievski R.A. Nanostructures under extremes // *Physics-Uspekhi*, 2014, **V. 57**, No. 10. P.945.

СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ОСОБЕННОСТИ АЗОТИРОВАННОГО НА ГЛУБИНУ СЛОЯ В АУСТЕНИТНЫХ СПЛАВАХ, ПОДВЕРГНУТЫХ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ПОСЛЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

В.А. Шабашов, А.В. Литвинов, Л.Г. Коршунов, Н.В. Катаева, А.Е. Заматовский
Институт физики металлов имени М.Н.Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия
(litvinov@imp.uran.ru)

В качестве способа модификации поверхности для улучшения функциональных свойств сталей и сплавов широко применяется ионно-плазменное (ИП) напыление и, в частности, азотирование. В азотированных ионно-плазменным методом аустенитных сплавах Fe-12Cr-30Ni и Fe-15Cr-38Ni с использованием сухого трения скольжения и сдвига под давлением в наковальнях Бриджмэна осуществлено увеличение глубины (от 5 до 20 мкм) градиентной по концентрации и фазовому составу поверхности. В основу обработки положены циклические фазовые деформационно-индуцированные переходы «растворение-выделение» нитридов хрома. В результате азотирования при 500°C, 1 ч в поверхностном слое сплавов формируется раствор азота в матрице Fe-Cr-Ni-N и дисперсные нитриды хрома CrN и железа Fe₄N. Последующее сухое трение скольжения или сдвиг под давлением приводят к наноструктурированию, деформационному растворению нитридов железа и хрома, а также механическому сплавлению поверхностных и внутренних, неподверженных азотированию, слоев сплава. Кроме того, в деформированной матрице аустенита формируются вторичные нитриды хрома Cr₂N. При дополнительном отжиге 600°C, 2 ч. происходит дополнительный выход азота из аустенитного Fe-Cr-Ni-N твердого раствора с преимущественным формированием нитрида Cr₂N и увеличением объема (глубины) измененной по составу и структуре матрицы сплава. Обратная последовательность, а именно, предварительное фрикционное воздействия и последующее азотирование поверхности не дают заметного увеличения глубины азотированного слоя. Это объясняется ускоренной миграцией неравновесных границ зёрен в наноструктурированной трением поверхности, приводящей к завершению рекристаллизации за время, существенно меньшее времени азотирования 1 ч. при 500°C. Следствием быстрой рекристаллизации становится незначительным эффект быстрой диффузии в наноструктурированной трением поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-07947) и гранта УрО РАН (№ 15-9-12-45).

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СЛОЁВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕДНО-НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ O⁺

В.Л. Воробьёв, Ф.З. Гильмутдинов, А.А. Колотов, П.В. Быков, В.Я. Баянкин
ФГБУ науки Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск, Россия
(vasily.1.84@mail.ru)

Формирование химического и фазового составов, атомной и локальной атомной структур поверхностных слоёв металлических материалов, в том числе наноразмерных, с улучшенными механическими и эксплуатационными свойствами различными

физическими или химическими методами, в частности ионной имплантацией, относиться к одному из направлений современной науки и техники [1-2]. Несмотря на исследования в этом направлении до сих пор остаются не выясненными процессы формирования этих слоёв, структурные механизмы их реализации и природа изменения различных свойств металлов и сплавов в результате ионного облучения.

В связи с этим, цель данной работы – сравнительные исследования формирования состава и химического строения наноразмерных поверхностных слоёв медно-никелевого сплава $\text{Cu}_{50}\text{Ni}_{50}$ имплантацией ионов O^+ , Ag^+ и поочерёдной имплантацией ионов Ag^+ и O^+ в импульсно-периодическом режимах. Выбор медно-никелевого сплава обусловлен тем, что данный сплав, с одной стороны, можно рассматривать как модельный сплав, а, с другой стороны, медно-никелевые сплавы находят широкое применение в различных отраслях современной промышленности, в частности, в судостроении [3]. В качестве имплантируемых ионов выбраны элементы химической и инертной природы, соответственно.

В работе выявлено накопление атомов кислорода в наноразмерных поверхностных слоях медно-никелевого сплава после имплантации ионов O^+ , сопровождающееся одновременной сегрегацией атомов никеля и формированием оксида никеля – NiO . Имплантация ионов Ag^+ приводит к обогащению приповерхностных слоёв атомами меди и к обеднению атомами никеля. При этом как атомы меди, так и атомы никеля находятся в металлическом химически несвязанном состоянии. При поочерёдной имплантации ионов Ag^+ и O^+ показано, что сегрегированные к приповерхностным слоям атомы меди в условиях имплантации ионов Ag^+ препятствуют накоплению атомов кислорода в приповерхностных слоях при последующей имплантации ионов O^+ , что обусловлено слабой химической активностью атомов кислорода к атомам меди.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-43-180765

Литература

1. А. Д. Погребняк и др. // *ФИП*. 2011. Т. 9. №4. С. 284 – 321.
2. . И. А. Курзина // *Известия РАН. Серия физическая*. 2013. Т. 77. №9. с. 1271 – 1275.
3. Воскобойников В.Г. и др. *Общая металлургия. 6-изд., перераб. и доп.* // М.: ИКЦ «Академкнига». 2005. 768 с.

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ РАДИАЦИОННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Смолянский^{1,2}, С.В. Васильева¹, А.В. Желтова³, С.Г. Лакеев¹

¹ Филиал АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», Москва, Россия (assafant@live.ru)

² РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

³ ФББ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Как правило, процессы радиационной модификации полимерных материалов направлены на изменение поверхностных свойств материалов [1]. Шероховатость является одной из основных характеристик поверхности материала [2], поэтому представляется актуальным проводить изучение радиационно-индуцированных изменений шероховатости поверхности полимеров. В настоящее время для анализа изменений микроструктуры поверхности материалов всё чаще применяют фрактальный подход [2].

Цель настоящего исследования состояла в обосновании возможности применения фрактального подхода для изучения закономерностей изменения: а) микрогеометрии поверхности в результате физико-химической модификации озоном полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) плёнок, облученных потоком ускоренных ионов ксенона; б) шероховатости поверхности частиц порошка облученного политетрафторэтилена (ПТФЭ).

а) Методами растровой электронной (РЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и смачиваемости по воде исследовано изменение микроструктуры поверхности ядерных фильтров (ЯФ) на основе ПЭТФ плёнок, подвергнутых газо- и жидкофазному озонолизу. Обнаружена корреляция в изменении величины поверхностной фрактальной размерности D_s и поверхностных свойств ЯФ, причём направление модификации поверхностных свойств определяется режимом обработки: в случае газофазного озонолиза происходит гидрофобизация поверхности ЯФ; при жидкофазном озонолизе обнаружена гидрофилизация поверхности ЯФ. Заключено, что природа обнаруженных изменений поверхностных свойств определяется изменением шероховатости поверхности ЯФ.

б) Методами просвечивающей электронной микроскопии и низкотемпературной сорбции азота изучено радиационно-индуцированное изменение шероховатости поверхности частиц порошков ПТФЭ (марка Ф-4 ПН 90, ГОСТ 10007-80), гамма-облученных (^{60}Co) в интервале поглощённых доз от 10 до 1000 кГр при мощности дозы 15 ± 3 Гр/с. Установлена корреляция между изменением шероховатости поверхности частиц порошкообразного гамма-облученного ПТФЭ и величиной D_s с увеличением дозы облучения. Предположено, что природа обнаруженной корреляции обусловлена конкуренцией между процессами радиационной кристаллизации и деструкции ПТФЭ.

Настоящее исследование проведено при поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (Субсидия от «20» октября 2014 г., № 14.576.21.0053; уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57614X0053) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-07-00025).

Литература

1. Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Тупиков В.И., *Основы радиационной стойкости органических материалов*, Энергоатомиздат, М., 1994, 256 с.
2. Федер Е., *Фракталы*, Мир, М., 1991, С. 226.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВЫХ ФОЛЫГ, С НАПЫЛЕННЫМ СЛОЕМ АЛЮМИНИЯ, ПОСЛЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ИОНАМИ АРГОНА

П.В. Быков¹, А.Н. Тарасенков², В.Л. Воробьев¹, В.Я. Баянкин¹

¹ФГБУН Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск, Россия, (less@ftiudm.ru)

²НПКТЦ 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 превышение 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 [3, 4]. 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. Полученные таким образом приповерхностные слои могут приобретать отличные от «материнских» предел прочности, текучести, ударную вязкость, трещиностойкость, коррозионную стойкость, износостойкость [5]. Дополнительно, совмещение процесса нанесения покрытий с ионной обработкой позволяет варьировать толщину модифицированного слоя, что впоследствии позволяет изменять его физико-механические и эксплуатационные свойства в некотором диапазоне значений [6].

Целью данной работы являлось исследование влияния облучения ионами аргона на формирование состава и структуры поверхностных слоев, промышленного титана VT1-0 с напыленным слоем Al.

Исследование методом РФЭС показало, что перемешивание сопровождается формированием соединения титана с алюминием Ti-Al. Выявлено образование связей Ti-C, как после напыления пленки алюминия, так и после ионно-лучевого перемешивания. Выявлена очередность образования связей от Al-O к Ti-O по мере увеличения глубины приповерхностного слоя, как после напыления пленки алюминия, так и после ионно-лучевого перемешивания.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проект №15-17-2-50

Литература

1. Комаров Ф.Ф. *Ионная имплантация в металлы*. М.: Металлургия, 1990. 216 с.
2. И.А. Курзина, Э.В. Козлов, Ю.П. Шаркеев. *Градиентные поверхностные слои на основе интерметаллидных частиц: синтез, структура, свойства*. Томск: Изд-во НТЛ, 2013. 260 с.
3. Киреев Р.М. *Вестник УГАТУ*. **10** (1) 96 (2008).
4. Костюк Г.И., Бруйка О.О., Кот Н.И. *Вести АИНУ*. (1) 25 (2009).
5. Морозов В.В., Олейников В.Н. *Вестник ИжГТУ*. (1) 36 (2007).
6. Сергеев В.П. и др. *Известия ТПУ*. **309** (2) 149 (2006).

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ АРМКО-ЖЕЛЕЗА, СФОРМИРОВАННЫХ ПООЧЕРЕДНОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ Ar⁺ И N⁺

Т.С. Картапова, Ф.З. Гильмутдинов, О.Р. Бакиева, В.Л. Воробьев, В.Я. Баянкин
ФГБУ науки Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск, Россия
(radostinka301@yandex.ru)

Формирование поверхностных слоёв металлических материалов, в том числе

наноразмерных, с улучшенными механическими и эксплуатационными свойствами методом ионной имплантации относится к одному из актуальных направлений современной науки и техники [1-2]. Однако, несмотря на преимущества метода ионной имплантации, в ряде случаев недостатком данного способа является малая глубина проникновения ионов, их низкая концентрация, и, в связи с этим, недостаточная степень модификации свойств. Поэтому исследования, направленные на увеличение глубин проникновения и концентрации имплантируемого элемента, модифицирования поверхностных слоев металлов и их сплавов имплантацией ионами средних кинетических энергий, представляют научный и практический интерес. В частности, требует дальнейшего изучения влияние созданных предварительной ионной имплантацией аргона на поверхности армко-железа структур на процессы миграции атомов азота и формирование поверхностных слоёв при последующем облучении ионами N^+ .

В данной работе проведены сравнительные исследования химического состава, межатомных химических связей и атомной структуры поверхностных слоев армко-железа, сформированных имплантацией ионов N^+ и последовательной имплантацией ионами Ag^+ и N^+ , и их влияние на механические и электрохимические свойства. Обсуждаются механизмы влияния предварительной имплантации ионов Ag^+ на глубину проникновения атомов азота и формирование поверхностных слоёв последующей имплантацией ионов N^+ . Исследовано влияние легирующих компонентов различной химической активности в сплавах на основе железа на результат ионно-лучевой модификации.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта «Умник» дог. № 9302 ГУ2015 и проекта РФФИ 16-43-180765 р_а.



VI. 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.

RE-EXAMINATION OF ION IRRADIATION AS A CREDIBLE TOOL TO SIMULATE NEUTRON-INDUCED VOID SWELLING

F.A. Garner¹, Jing Wang¹, Lin Shao¹, S.A. Maloy², V.A. Pechenkin³

¹Texas A&M University, College Station, TX 77843 (Frank.garner@dslextrême.com)

²Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM 87544

³Institute of Physics and Power Engineering, Obninsk, Russia

Unavailability of high-flux test reactors requires that ion irradiation serve as a surrogate for investigating factors that lead to swelling resistance of improved alloys. Most current studies are directed toward lower-swelling ferritic-martensitic alloys and their ODS variants. The credibility of using charged particle simulation requires that the impact of all neutron-atypical features of ion irradiation be identified, understood and minimized.

In order to demonstrate that ion irradiation is a credible tool, it is required that self-ion irradiation reproduce major aspects of neutron-induced swelling dependencies (compositional, fabrication, flux-spectral) observed in neutron tests. Ion irradiation should also reproduce the swelling behavior (bilinear, steady-state after incubation), but should especially reproduce the well-established post-transient swelling rates of 1%/dpa for fcc iron-base and 0.2%/dpa for bcc iron-base alloys.

While recent studies show very clearly the bilinear swelling behavior of ferritic-martensitic alloys with a post-transient swelling rate of 0.2%/dpa, most studies on austenitic alloy were conducted in the 1970s-1990s, but these did not show the expected 1%/dpa for fcc iron-base alloys. Many earlier studies, especially for simple metals and fcc iron-base alloys, are reexamined in light of recently attained insights and current calculational practices. The results of this reexamination are very encouraging, attesting to the credible use of ion simulation for void swelling.

It is shown that dpa calculational codes (EDEP, BRICE, IONDOSE, early versions of TRIM) used in earlier studies overestimated energy deposition rates by ~20 -35%, leading to artificially high dpa levels and an incorrect visualization of swelling vs. depth. When these earlier data sets are reevaluated using the SRIM code, the 1%/dpa is indeed routinely observed. Additionally, injected-interstitial suppression of void nucleation, not clearly observed in these earlier studies, is equally strong in both bcc and fcc iron-base alloys. Previous theoretical treatments did not predict this latter result.

ДИФФУЗНОЕ РАССЕЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКЕ КОБАЛЬТА

А.Е. Шестаков¹, Ф.А. Кассан-Оглы²

¹РФЯЦ-ВНИИТФ, г.Снежинск (a.e.shestakov@vniitf.ru)

²ИФМ, г.Екатеринбург

Применение теории, опирающейся на существование в идеальных монокристаллах когерентно колеблющихся макрообъектов, позволило рассчитать картины диффузного рассеяния на ОЦК монокристаллах чистых металлов [1,2], хорошо описывающие наблюдаемые распределения [2,3]. При понижении температуры происходит фазовое превращение, но в низкотемпературной решётке остаётся группа когерентно

колеблющихся плоскостей, что порождает в обратном пространстве набор светящихся стержней, проходящих через узлы обратной решётки.

Результаты моно-Лауэ измерений с поворотом образца (рис. 1) экспериментально подтверждают существование в обратном пространстве светящихся стержней, порождаемых когерентно колеблющимися плоскостями, параллельными базисной, в гексагональной решётке кобальта. Получено распределение интенсивности вдоль стержня между узлами обратной решётки (рис. 2). Зафиксировано, что вдоль всего стержня интенсивность существенно выше фона и монотонно убывает при удалении от узлов обратной решётки. Зафиксирована различная ширина максимумов интенсивности вблизи узлов обратной решётки, что связано с различной яркостью узлов обратной решётки, которая определяется структурным фактором соответствующего набора плоскостей в прямом пространстве. Отмечено, что геометрические факторы в эксперименте могут существенно влиять на интенсивность и требуют учёта.

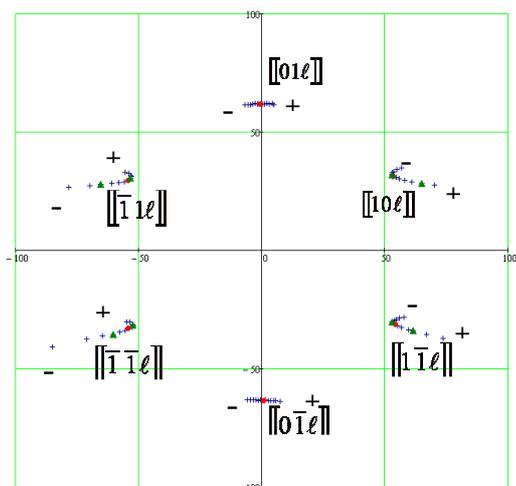


Рисунок 1. Движение рефлексов на детекторе при повороте образца.

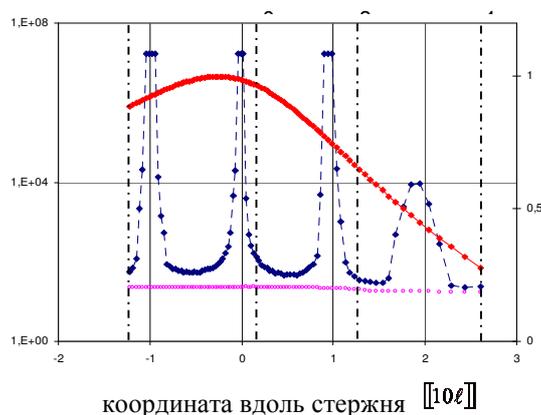


Рисунок 2. Изменение интенсивности вдоль стержня $[10\ell]$.

Литература

1. Ф.А. Кассан-Оглы, В.Е. Найш, И.В. Сагарадзе “Диффузное рассеяние в металлах с ОЦК решёткой и кристаллогеометрия мартенситных фазовых переходов ОЦК-ГЦК и ОЦК-ГПУ”, *ФММ*, **т.65**, вып.3, стр.481-492 (1988).
2. F.A. Kassan-Ogly V.E. Naish and I.V. Sagaradze “Diffuse scattering and structural phase transitions”, *Phase Transitions*, **v.49**, 89-141 (1994).
3. Ф.А. Кассан-Оглы, В.Е. Архипов, А.Е. Шестаков, Фазовые переходы в кристаллах с ОЦК структурой, *ФММ*, **т.109**, вып.6, стр.608-624 (2010).

О ВОЗМОЖНОСТЯХ НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В НЕЙТРОННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ИФМ УрО РАН НА РЕАКТОРЕ ИВВ-2М

В.И. Бобровский, Б.Н. Гощицкий, В.Д. Пархоменко, Ю.Н. Скрябин
ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия, (bobrovskii@imp.uran.ru)

Институт физики металлов УрО РАН располагает на исследовательском реакторе ИВВ-

2М Нейтронным Материаловедческим Комплексом (НМК ИФМ), включенным в перечень Уникальных научных установок России 1-ой категории. В настоящее время НМК ИФМ является единственным в России центром, в котором нейтронографическими методами исследуются высокорadioактивные материалы, в том числе, функциональные, для использования в промышленности. В частности, за последние годы нами выполнены систематические исследования радиационно-индуцированных явлений в аустенитных сталях, являющихся основным материалом для изготовления оболочек ТВЭЛов быстрых реакторов. Нейтронно-дифракционные методы являются высокоэффективным средством отслеживания эволюции микроструктуры материалов под воздействием нейтронного облучения, а именно, фазового состава, микровыделений, дефектности, текстуры, размеров зерен и состояний их границ и т.д. В НМК ИФМ нейтронографические методы исследования дополнены возможностями проводить также рентгеноструктурный анализ образцов и изучение их магнитных свойств. В ближайшее время у нас начнет функционировать также мессбауэровский спектрометр.

Особый интерес представляют исследования состояния материалов реальных оболочек ТВЭЛов после их эксплуатации в быстрых энергетических реакторах. В городе Заречном имеется уникальное сочетание возможностей для таких работ. Во-первых, в непосредственном соседстве с БАЭС расположен Институт реакторных материалов, располагающий оборудованием для подготовки образцов из топливных сборок после их эксплуатации в реакторе БАЭС, а также для изучения их физико-механических свойств и электронной микроскопии. Во-вторых, на его территории функционирует наш Нейтронный материаловедческий комплекс. Опыт многолетнего сотрудничества БАЭС, ИРМ и ИФМ УрО РАН и объединение их экспериментальных возможностей позволяют обеспечить систематическое, комплексное изучение радиационно-индуцированных эффектов в материале оболочек топливных элементов быстрых реакторов БАЭС.

За последние годы нами уже получены новые данные о процессах, идущих при нейтронном облучении в реальных реакторных сталях и модельных сплавах в зависимости от их состава, легирования и технологии изготовления. Выявлено существование конкурентных процессов, развивающихся в микроструктуре этих материалов, и влияние на них условий облучения.

Помимо этого мы обладаем большим опытом изучения радиационных дефектов и влияния нейтронного облучения на свойства различных сверхпроводников и магнетиков.

Детальный обзор нашей деятельности дан на сайте ИФМ УрО РАН:

<http://imp.uran.ru/?q=ru/content/neytronnyy-materialovedcheskiy-kompleks-instituta-fiziki-metallov-uro-ran-na>

Работы выполняются с использованием УНУ «НМК ИФМ» в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Поток», № 01201463334) и проекта УрО РАН 15-17-2-3.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОТОСТИМУЛЯЦИИ И АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ФТТЛ ДЛЯ ВЫСОКОДОЗНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ДЕТЕКТОРОВ ТЛД-500К

М.Г. Казанцева¹, В.С. Кортов²

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, РФ
(masanya_91@mail.ru)

²Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, РФ

В настоящее время широкое применение источников ионизирующего излучения большой мощности влечет за собой интенсивное развитие высокодозной дозиметрии. При регистрации сигнала термолюминесценции (ТЛ) с детектора, облученного высокой дозой радиации, пики на кривой термовысвечивания, которые несут информацию о поглощенной дозе в материале, регистрируются в диапазоне повышенных температур (до 700°C). За них ответственны глубокие ловушки, существующие в материале детектора. В указанном диапазоне температур возникают эффекты, мешающие качественному измерению сигнала с детектора: влияние теплового фона, разрушение исходной структуры детектора и другие факторы. Данную проблему необходимо решать совершенствованием существующих методов регистрации сигнала ТЛ. Одним из решений является применение метода фототрансферной термолюминесценции (ФТТЛ).

Цель данной работы заключается в определении оптимальных параметров фотостимуляции и апробация метода ФТТЛ для высокодозных измерений с помощью детекторов ТЛД-500К.

В настоящей работе исследовались стандартные термолюминесцентные детекторы ТЛД-500К на основе номинально чистых анион-дефектных монокристаллов α -Al₂O₃. Образцы облучались дозами в диапазоне от 100 Гр до 20 кГр от источника гамма-излучения ⁶⁰Со. Фотостимуляция производилась синими светодиодами ($\lambda = 470$ нм). Для измерения ФТТЛ использовалась экспериментальная установка кафедры «Физические методы и приборы неразрушающего контроля» Уральского федерального университета.

При фотостимуляции люминесценции очень важно учитывать соотношение между двумя одновременно происходящими и конкурирующими процессами – переносом зарядов с глубоких ловушек материала на более мелкие и одновременное опустошение ловушек под действием света. В результате проделанной работы были определены оптимальные режимы фотостимуляции для облученных детекторов ТЛД-500К - ток через светодиоды (300 мА) и время стимуляции (15 сек). При данных параметрах ФТТЛ облученных образцов содержит 2 пика в области невысоких температур (200 и 310°C соответственно).

Установлено, что для обоих пиков ФТТЛ наблюдается близкая к линейной дозовая характеристика. Таким образом, проведенные эксперименты подтверждают перспективность использования метода ФТТЛ для высокодозных измерений с помощью детекторов ТЛД-500К.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ С ЛАЗЕРНЫМ ИСПАРЕНИЕМ ДЛЯ НАНОМАСШТАБНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

А.А. Лукьянчук^{1,2}, А.А. Алеев^{1,2}, С.В. Рогожкин^{1,2}, А.С. Шутов^{1,2}, О.А. Разницын^{1,2}

¹ ФГБУ "ГНЦ РФ ИТЭФ" НИЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

(Anton.Lukyanchuk@itep.ru)

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

Передовые разработки перспективных материалов и устройств всё чаще требуют контролировать состояние на масштабах порядка нанометров. Атомно-зондовая томография является достаточно новым и динамично развивающимся методом исследования материалов на нано- и даже атомных масштабах, восстанавливающим расположение атомов в объеме материала при одновременном определении их химической природы. В основе этого метода лежит принцип по-атомной разборки материалов и проекционного увеличения, использовавшегося ранее в полевой атомно-ионной микроскопии, а также времяпролетная масс-спектрометрия, примененная к каждому испаренному иону.

В настоящее время в атомно-зондовой томографии, наряду с импульсно-полевым испарением ионов из изучаемого образца, широкое распространение получило лазерное испарение. Применение лазеров в атомно-зондовой томографии позволяет исследовать не только металлы, но и полупроводники и диэлектрики. Также, с появлением новых систем детектирования и типов геометрий движения испаренных ионов, стало возможным существенно увеличить объем получаемых данных.

В настоящей работе представлены результаты разработки, создания и пуска Прототипа Атомного Зонда с фемтосекундным Лазерным испарением и позиционно-чувствительным детектором на линиях задержки для томографического (3D) анализа химического состава материалов (далее ПАЗЛ-3D). Применение лазерного испарения позволяет существенно расширить спектр исследуемых материалов от сталей до стекол. Разрешающая способность зонда составляет 1-2 Å в глубину, а латеральное разрешение порядка 3 Å. Максимальное разрешение по массе на полувысоте пика составляет 1000. В данной работе показаны этапы разработки установки, а также продемонстрированы возможности по исследованию материалов с нано и микро особенностями.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДАННЫХ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА НАНОМАСШТАБАХ

А.С. Шутов^{1,2}, С.В. Рогожкин^{1,2}, А.А. Алеев¹, А.А. Лукьянчук¹, О.А. Разницын¹

¹ ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

(Anton.Shutov@itep.ru)

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

Современная разработка перспективных материалов подразумевает контроль особенностей структурно-фазового состояния вплоть до наномасштабов. Атомно-

зондовая томография (АЗТ) - один из наиболее динамично развивающихся методов анализа на масштабах, близких к межатомным. Данная методика основана на поэтапном испарении материала с последующей регистрацией испаренных частиц при помощи позиционно чувствительного детектора, также выполняющего роль времяпролетного масс-спектрометра. При этом АЗТ позволяет получить атомные карты исследуемых материалов и детектирует практически все содержащиеся химические элементы. Дальнейших анализ полученных атомных карт позволяет обнаружить и охарактеризовать присутствующие особенности структурно-фазового состояния материала.

Задача по обнаружению и описанию исследуемых особенностей решается при помощи методов статистического анализа атомно-зондовых данных, таких как кластерный анализ, парно-корреляционный и частотный анализ, построение линейного, радиального концентрационного профиля и проксиграмм. Результаты, получаемые в ходе обработки данных, позволяют описать количество, химический состав и размеры неоднородностей, а также построить концентрационный профиль межфазных границ.

В данной работе рассматриваются основные тенденции развития методов обработки атомно-зондовых данных, применяемых в ИТЭФ. Изначально использовавшийся в середине 2000-х годов набор инструментов был достаточен для проведения характеристики кластеров и крупных межфазных границ в небольшом объеме данных, собираемых атомным зондом ЕСОТАР (~10×10×500 нм³). Решение таких задач выполнялось путем анализа однородности твердого раствора методами частотного и парно-корреляционного анализа, а также применения базовых алгоритмов поиска кластеров. Разработанный в ИТЭФ в 2015 году прототип атомного зонда с лазерным испарением ПАЗЛ-3D позволил увеличить объем собираемых данных в несколько десятков раз, что в свою очередь, привело к существенному увеличению видов, размеров и сложности объектов исследования. Таким образом, возникла задача по совершенствованию инструментов анализа, для описания более сложных наноразмерных особенностей материалов. В настоящей работе представлены реализованные и планируемые к реализации методы обработки данных, такие как методы ближайших соседей, алгоритмы окружения и эрозии, уточняющие форму кластеров, а также построение изоповерхностей и проксиграмм. На примере большого количества экспериментов по исследованию наноструктурированных многокомпонентных сплавов продемонстрированы особенности применения различных методов обработки данных атомно-зондовой томографии.

СЖИМАЕМОСТЬ И ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД В ЦИРКОНИЕВОМ СПЛАВЕ Э635 ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

А.В. Седов, А.Е. Шестаков

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск (a-sedov86@mail.ru)

Циркониевый сплав Э635 (Zr – Nb 1% - Sn 1,2% - Fe 0,35%, % масс) является перспективным материалом для использования в качестве оболочек твэлов. Для расчётов поведения материала при высоких давлениях и температурах, а также прогнозирования поведения в сложных условиях эксплуатации и возможных аварийных ситуаций необходимо учитывать наличие α - ω фазового перехода.

В настоящей работе проведены дифракционные измерения на циркониевом сплаве Э635 в диапазоне давлений от нормального до 11 ГПа при комнатной температуре.

Съёмка производилась в Mo-K α излучении на рентгеновском дифрактометре с двухкоординатным детектором типа Imaging Plate. Для всестороннего сжатия образца использовалась ячейка с алмазными наковальнями DAC (Diamond Anvil Cell) типа Böhler-Almax.

Определено сосуществование в сплаве в условиях эксперимента в разном объёмном соотношении α - и ω -модификаций циркония в диапазоне давлений от $6,9 \pm 0,3$ до $10,9 \pm 0,3$ ГПа (Рис.1).

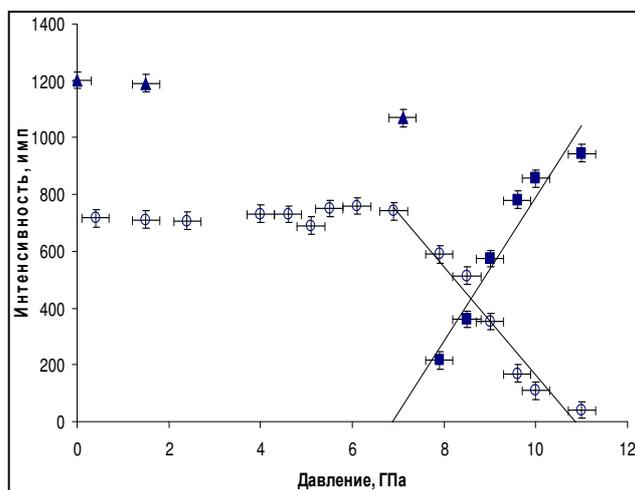


Рис.1. Интенсивность пиков α и ω -фаз Zr с ростом (α – круг, ω - квадрат) и уменьшением давления (ω – треугольник)

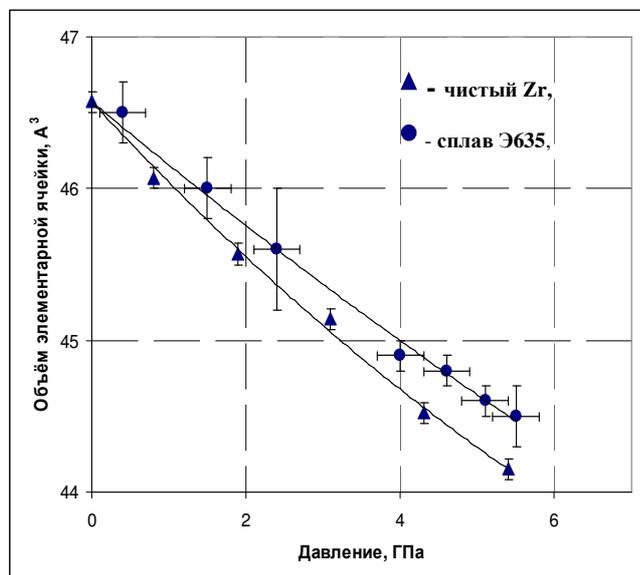


Рис.2. Зависимость объёма элементарной ячейки α -фазы в сплаве Э635 от давления (круги)

Давление, при котором начинается $\alpha \rightarrow \omega$ фазовое превращение при статическом объёмном сжатии в сплаве Э635 выше, чем в чистом цирконии. При уменьшении давления до нормального обратный $\omega \rightarrow \alpha$ переход не происходит, как и в чистом цирконии.

Определены параметры решетки ω -фазы при нормальном давлении. Уменьшение объёма, приходящегося на один атом, при $\alpha \rightarrow \omega$ превращении составило 1%. Величина изотермического модуля объёмной упругости при нормальных условиях для α -фазы в сплаве Э635 приблизительно на 15% больше значения, полученного для чистого циркония.

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

A		G		M	
Alekseev P.A.	55	Gai Z.	57	Makenas B.J.	27
B		Garner Frank	27	Maloy S.A.	25,91
Busby J.T.	30	Garner F.A.	27,91	Maresova B.	25
C		Garner Frank A.	25	McClintock	27
Cao Penghui	3	Gigax Jonathan	25	David A.	
Carter Ki-Jana	3	Gussev M.N.	30	Menard Kevin	3
Chastain S.A.	27	Gussev Maxim	27	P	
Chen Di	25	N.		Pechenkin V.A.	91
K. Conder	57	H		S	
Connick Rachel	3	Hirst Charles	3	Shao Lin	25,91
Culek M.	25	I		Short Michael	3
D		Ivanov A.S.	56	Sefat A.S.	57
Dennett Cody	3	K		T	
E		Kemp R. Scott	3	Toloczko	25
Ehlers G.	57	Kim Hyosim	25	Mychailo B.	
Eliasova I.	25	Kopriva R.	25	Trautmann Ch.	28
F		Kytka M.	25	Turner Brian	3
Falcnik M.	25	L		W	
Ferry Sara	3	Li Ju	3	Wang Jing	25,91
		Lowder Sean	3	Wu L.S.	57
		Lumsden M.D.	57		

A		Букатин Т.Н.	11	Д	
Абрамова М.М.	40	Буланова Т.М.	40	Данилов С.Е.	4,9,20
Аверин С.А.	40,52	Быков А.А.	60	Демидов Д.Н.	6
Алеев А.А.	94	Быков П.В.	84,86	Джафаров Т.А.	70
Александров А.С.	50	Быстров С.Г.	77,79	Дремов В.В.	13
Александров И.В.	39	В		Дроздов А.Ю.	79
Андрианов С.Л.	32	Валиев Р.З.	40	Дружков А.П.	8,20
Арбузов В.Л.	4,8,9,20	Васильева С.В.	85	Дубровский А.	58,62
Артемов В.В.	81	Верховский С.В.	57	Е	
Ашуров Н.Р.	68	Волков Н.В.	62	Евсеев М.В.	49
Б		Волкова Е.Г.	29,45	Еникеев Н.А.	40
Бакиева О.Р.	87	Волкова З.Н.	57	Ереми Е.	58
Балаев А.	58	Воробьев В.Л.	82,84,86,87	Ж	
Барсанова С.В.	49	Воронин В.И.	8	Желтова А.В.	85
Барыбин А.В.	42	Г		Жемков И.Ю.	38
Баянкин В.Я.	77,79,80,82,	Гаврилов Н.В.	41	Жихарев А.В.	77
	84,86,87	Гатауллин Р.Н.	36	З	
Бедин С.А.	76,81,83	Герасименко Н.Н.	83	Загорский Д.Л.	81,83
Белан Е.П.	36	Гермов А.Г.	57	Залужный А.Г.	5,32,50
Белозеров В.Я.	78	Гильмутдинов Ф.З.	84,87	Заматовский А.Е.	29,36,84
Белозеров С.В.	16,38,47	Глушкова Н.В.	49	Зуев Ю.Н.	50,57
Беляев Д.А.	50	Голосов О.А.	33	И	
Бергер И.Ф.	8	Горностырев Ю.Н.	3	Ивченко В.А.	17
Бобровский В.И.	92	Горлачев И.Д.	34	Ионов Г.В.	13
Богачев А.А.	28	Гощицкий Б.Н.	4,8,9,92	Искандаров Н.А.	32,50
Богданов С.Г.	71	Григорьев С.В.	60		
Бойко В.М.	67	Гудим И.	58		
Бондарев И.А.	61	Гусейнов Дж.И.	70		
Бондарчук С.В.	57	Гущина Н.В.	75		
Брудный В.Н.	67				

УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

К		Мережко Д.А.	30	Садовничий Д.Н.	69
Казанцева М.Г.	94	Мережко М.С.	30	Самойлова Г.В.	41
Караваев А.В.	13	Милехин Ю.М.	69	Святов И.Л.	50,57
Карсаков А.А.	40	Мирмельштейн А.В.	59	Седов А.В.	96
Картапова Т.С.	87	Можанов Е.М.	32	Семериков В.Б.	33
Карькин И.Н.	3	Мороз К.А.	7	Сивак А.Б.	19,20
Карькина Л.Е.	3	Москвин Е.В.	60	Сивак П.А.	19,20
Кассан-Оглы Ф.А.	91	Мургузов М.И.	70	Скорынина П.А.	45
Катаева Н.В.	9,51,84	Н		Скрябин Ю.Н.	92
Киреев Н.В.	16	Набойщиков Ю.В.	47	Скуратов В.А.	28
Кислицин С.Б.	34	Неустроев В.С.	11,16,38,47	Смирнов Е.А.	6
Климова И.Н.	77	Никитин А.А.	28,50	Смирнова-	51
Козлов А.В.	14,49	Никитин С.Е.	57	Леонтьева М.В.	
Козлов Е.А.	50	Никитина А.Ю.	51	Смолянский А.С.	85
Козлов К.А.	9,36,51	Никитина А.Ю.	51	Созонова Н.М.	80
Козодае М.А.	50	Николаенко В.А.	37,46	Стародубцев Ю.Н.	78
Коллин Н.Г.	67	Новоселов И.И.	12	Суворов А.Л.	46
Колотов А.А.	77,82,84	О		Т	
Коржавый П.А.	3	Обухов А.В.	11,40,47	Тарасенков А.Н.	86
Коровин С.В.	19,20	Овчинников В.В.	17,75,76,78,	Тарасов А.С.	61
Кортов В.С.	94		83	Темеров В.	58
Корчуганова О.А.	11,50	Овчинников С.Г.	61	Теплых А.Е.	71
Коршунов Л.Г.	83	Оглобличев В.В.	57	Тереньтев К.	62
Кочеткова Т.Н.	51	Оксенгендлер Б.Л.	68	Турубарова Л.Г.	31,48
Красиков Е.А.	37,43,46	Орлов Н.Н.	50	Тютнев А.П.	69
Кругликов С.С.	81	Орлова Н.А.	77	Ф	
Кузина Т.Л.	33	Осинцева А.Л.	29,41,45	Фрейдман А.	58
Кузнецов А.Р.	3	Отставнов М.А.	35	Фролов К.В.	81
Куйбида Р.П.	32	П		Ц	
Куксин А.Ю.	15	Павловский Н.	62	Цай К.В.	35
Кулевой Т.В.	32	Панченк В.Л.	52	Цепелев А.Б.	6
Куренных Т.Е.	41	Пархоменко В.Д.	4,71,92	Цыгвинцев В.А.	52
Л		Пастухов В.И.	14,39,42,52	Ч	
Лакеев С.Г.	85	Пепеляев Н.Б.	79	Чернов В.М.	7,19,44
Ларионов А.С.	34	Перминов Д.А.	8,20	Четвериков Ю.О.	60
Леви Е.А.	50	Петрик М.В.	3	Чуев М.А.	81
Леонтьева-	32,44	Пирогов А.Н.	60,71	Ш	
Смирнова М.В.		Подлесняк А.	57	Шабашов В.А.	9,29,36,84
Линник С.А.	75	Подлесняк А.А.	59	Шайхутдинов К.	62
Литвинов А.В.	9,29,36,84	Помякушина Е.В.	57	Шайхутдинов К.А.	57
Логинов Б.А.	78	Портных И.А.	14,39,42,49	Шаломов К.В.	17,76
Ломов А.А.	81	Порсев В.Е.	82	Шамардин В.К.	40
Лукьяненко А.В.	61	Проскурнина Н.В.	8	Шестаков А.Е.	91,96
Лукьянчук А.А.	32,50,95	Р		Шутов А.С.	32,50,95
Лучко С.Н.	29	Разницын О.А.	50,95	Я	
М		Рауцкий М.В.	61	Яковлев И.А.	61
Макаров А.В.	29,35,41,45	Решетников С.М.	79	Янилкин А.В.	12,15
Макаров Е.И.	11,16,38,47	Рогожкин С.В.	28,32,50,95	Яровчук А.В.	48
Максимкин О.П.	30,31,35,48	Романов И.Ю.	78		
Максимов С.Е.	68	Рофман О.В.	48		
Мамаев А.С.	41	Рубан С.В.	31,35		
Мамедова Р.Ф.	70	С			
Маркелов Д.Е.	11,16,38,47	Саврай Р.А.	41		
Матвиенко В.Н.	59	Сагарадзе В.В.	9,28,36,51		
Махинько Ф.Ф.	75,76,78,83				
Медведев А.И.	78				

Ответственный за выпуск ПЕРМИНОВ Д.А.

Отпечатано на Ризографе ИФМ УрО РАН, тираж 110 экз., заказ №02,
объем 4,25 печ.л., формат 298 x 210,
620137, г. Екатеринбург, ул. С.Ковалевской, дом №18, ИФМ УрО РАН