

Девятый Международный Уральский Семинар

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Тезисы докладов

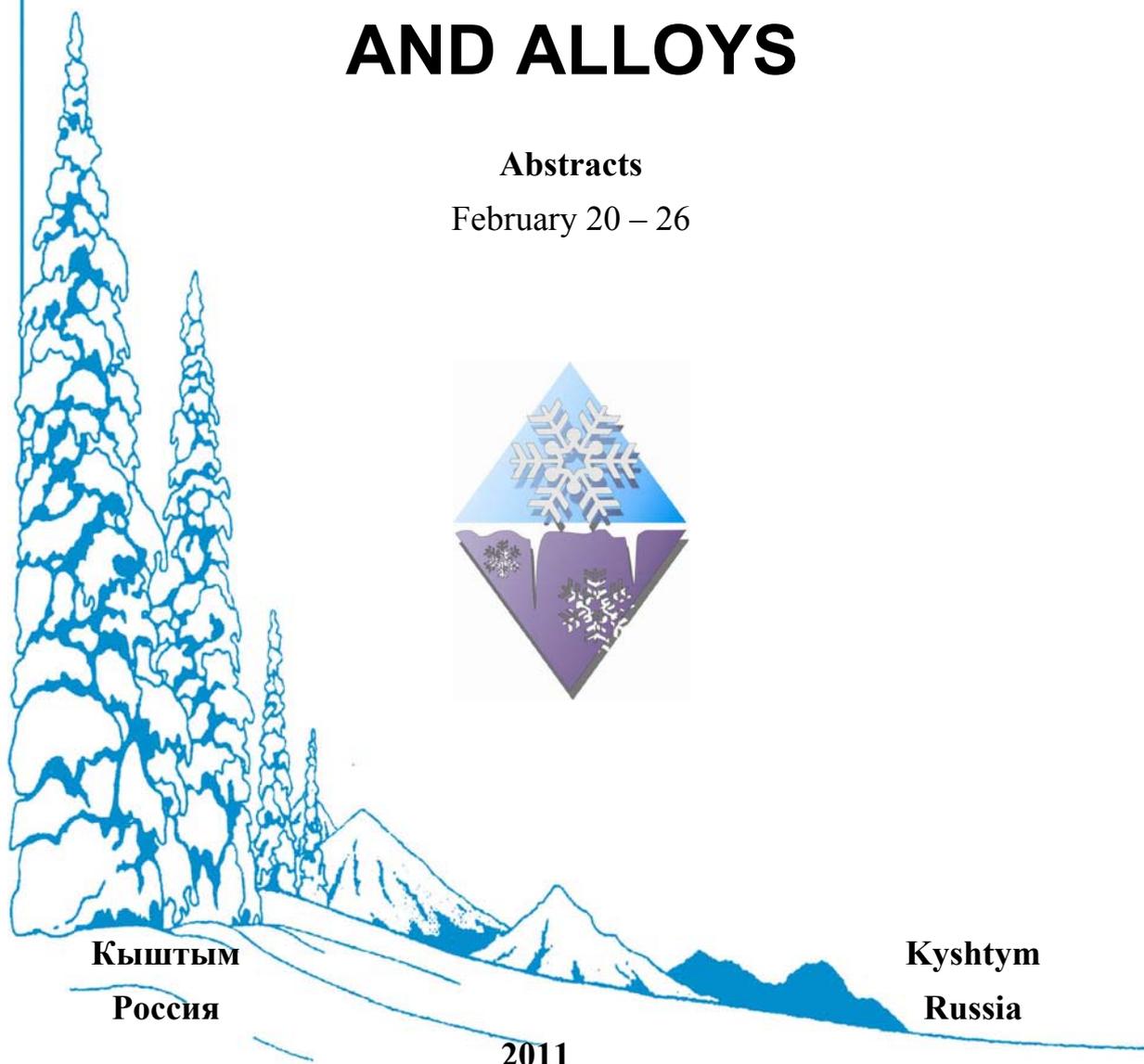
20 – 26 февраля

The Ninth International Ural Seminar

RADIATION DAMAGE PHYSICS OF METALS AND ALLOYS

Abstracts

February 20 – 26



Кыштым
Россия

Kyshtym
Russia

2011

Девятый Международный Уральский Семинар



РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

20 - 26 февраля

Тезисы докладов

Кыштым, Россия

2011

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.Е. Архипов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

А.Г. Залужный, ИТЭФ, Москва

Ю.Н. Зуев, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

В.С. Кортков, УГТУ-УПИ, Екатеринбург

А.В. Мирмельштейн, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

А.Ю. Мялицын, Советник председателя УрО РАН,
Екатеринбург

А.Л. Николаев, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

В.В. Овчинников, ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург

Ю.Н. Скрябин, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

В.Ф. Терещенко, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

Международный консультативный комитет

П.А. Алексеев, Moscow, Russia

S.L. Dudarev, Culham, UK

F.A. Garner, Richland, USA

S.I. Golubov, Oak Ridge, USA

E.M. Ibragimova, Ulugbek, Uzbekistan

M.A. Kirk, Argonne, USA

Yu.V. Konobeev, Obninsk, Russia

A.A. Podlesnyak, Oak Ridge, USA

Y.A. Quere, Paris, France

B.V. Robouch, Rome, Italy

V.N. Voyevodin, Kharkov, Ukraine

Организаторы семинара

Институт физики металлов УрО РАН

Российский Федеральный Ядерный Центр –
ВНИИТФ

Научный Совет РФТТ РАН

Международный Научно-технический Центр

Федеральное Агентство РФ по атомной энергии

Федеральное Агентство РФ по науке и инновациям

Программный комитет

В.В. Сагарадзе, ИФМ УрО РАН

A.V. Andreev, Prague, Czech Republic

В.Е. Архипов, ИФМ УрО РАН

А.Г. Залужный, ИТЭФ, Москва

В.С. Кортков, УГТУ-УПИ, Екатеринбург

А.В. Мирмельштейн, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск

А.Л. Николаев, ИФМ УрО РАН

В.В. Овчинников, ИЭФ УрО РАН

М.В. Садовский, ИЭФ УрО РАН

Секретариат

В.Л. Арбузов, ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

С.Е. Данилов, ИФМ УрО РАН, Россия

В.В. Дрёмов, РФЯЦ-ВНИИТФ, Россия

А.В. Литвинов, ИФМ УрО РАН, Россия

Д.А. Перминов, 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

С. Н. Вотинов

Н.Н. Герасименко

А. Г. Залужный

Н. Г. Колин

В. Н. Брудный

В. А. Печёнкин

В. С. Хмелевская

Наши спонсоры:

Федеральное Агентство РФ по атомной энергии,
Москва

Российский Фонд Фундаментальных Исследований,
Москва

Администрация г. Снежинск

РФЯЦ – ВНИИТФ, Снежинск

ИФМ УрО РАН, Екатеринбург

Некоммерческий фонд «Династия», Москва

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), Некоммерческому фонду «Династия» (Россия), Российскому Фонду Фундаментальных Исследований и Администрации г. Снежинск за финансовую поддержку молодых ученых–участников Семинара. Мы надеемся, что наша встреча в Снежинске будет способствовать расширению и укреплению научных контактов.

Составитель сборника

Перминов Д.А.

СОДЕРЖАНИЕ

I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ	1
POSITRON ANNIHILATION STUDY OF EFFECTS OF SOLUTE ATOMS ON EVOLUTION OF VACANCY DEFECTS IN ELECTRON-IRRADIATED Fe-Cr-BASED ALLOYS	3
<u>A.P. Druzhkov, A.L. Nikolaev</u>	
THE EFFECTIVENESS OF MATHEMATICAL MODELS FOR FUSION MATERIALS	3
S.L. Dudarev	
CURRENT STATE OF THE RADIATION DAMAGE THEORY	4
<u>S.I. Golubov, A.V. Barashev and R. E. Stoller</u>	
ON THE INTERACTION BETWEEN RADIATION-INDUCED DEFECTS AND FOREIGN INTERSTITIAL ATOMS IN α-IRON	5
<u>Alexander L. Nikolaev and Tatiana E. Kurennykh</u>	
ELECTRICAL RESISTIVITY STUDY OF THE α' PRECIPITATION IN Fe-Cr SYSTEM AT 773 K	6
Alexander L. Nikolaev	
САМООРГАНИЗАЦИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	7
В.П. Колотушкин, <u>С.Н. Вотинов</u> , А.А. Парфенов	
ЗАВИСИМОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВАКАНСИЙ С РАСТВОРЕННЫМИ АТОМАМИ ОТ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ В РАЗБАВЛЕННЫХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА	9
<u>О.И. Горбатов</u> , П.А. Коржавый, А.В. Рубан, Ю.Н. Горностырев	
ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОБСТВЕННЫХ МЕЖДУУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ С АТОМАМИ ПРИМЕСЕЙ В АЛЮМИНИИ	10
<u>А.Э. Давлетшин</u> , В.Л. Арбузов.	
РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ Fe-Ni И Fe-Ni-P С РАЗЛИЧНОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ	11
<u>С.Е. Данилов</u> , В.Л. Арбузов, В.А. Казанцев	
СЕГРЕГАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАМЕЩЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН. ПЕРВОПРИНЦИПНЫЙ РАСЧЕТ	11
<u>А.Р. Кузнецов</u> , Ю.Н. Горностырев, С.В. Окатов	
ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	12
В.А. Клименов, <u>А.П. Мамонтов</u>	
ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В СРЕДАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ХАББАРДА	14
Э.М. Ибрагимова, <u>Б.Л. Оксенгендлер</u> , С.Е. Максимов, Н.Н. Тураева	
ВЛИЯНИЕ ГЕТЕРОГЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ С ДИСЛОКАЦИЯМИ	15
<u>Д.А. Перминов</u> , А.П. Дружков, В.Л. Арбузов	
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ СЕГРЕГАЦИИ В Fe-Cr СПЛАВАХ И ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЯХ	16
<u>Печенкин В.А.</u> , Чернова А.Д., Молодцов В.Л., Лысова Г.В.	
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ЧАСТИЦАМИ (^{84}Kr, $E = 1.56 \text{ МэВ/НУКЛОН}$) НА ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ 12X18H10T	16
<u>А.В. Русакова</u> , О.П. Максимкин, М.Н. Гусев	

СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ СОБСТВЕННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В УПРУГИХ ПОЛЯХ ДИСЛОКАЦИЙ МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО МОНТЕ-КАРЛО В ОЦК (Fe, V) И ГЦК (Cu) КРИСТАЛЛАХ	17
<u>А.Б. Сивак, П.А. Сивак, В.А. Романов, В.М. Чернов</u>	
РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛАХ	18
<u>Е.А. Смирнов, А.А. Шмаков, Шишкина О.С.</u>	
КИНЕТИКА РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИОННО- И РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННОЙ СЕГРЕГАЦИИ В СПЛАВЕ Fe-Cr-Ni	19
<u>С.А. Стариков, А.Р. Кузнецов, В.В. Сагарадзе, Ю. Н. Горностырев, В.А. Печенкин, И.А. Степанов</u>	
РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.	20
<u>В.А. Степанов, В.С. Хмелевская</u>	
II. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	21
ANISOTROPIC SWELLING OBSERVED DURING STRESS-FREE REIRRADIATION OF AISI 304 TUBES PREVIOUSLY IRRADIATED UNDER STRESS	23
<u>F. A. Garner, J. E. Flinn and M. M. Hall</u>	
ENHANCEMENT OF IRRADIATION CREEP OF NICKEL-BEARING ALLOYS IN THERMALIZED NEUTRON SPECTRA CHARACTERISTIC OF LWR AND CANDU[®] REACTORS	23
<u>F. A. Garner, M. Griffiths and L. R. Greenwood</u>	
PECULIARITIES OF PLASTIC DEFORMATION PHENOMENA IN HIGH-IRRADIATED AISI 304 AND AISI 316 STAINLESS STEELS	24
<u>Gussev M.N., Busby J.T., Byun T.S.</u>	
EFFECTS OF OVERSIZED SOLUTES ON RADIATION-INDUCED SEGREGATION IN AUSTENITIC STAINLESS STEELS	25
<u>M.J. Hackett, J.T. Busby, M.K. Miller, and G.S. Was</u>	
POSTIRRADIATION EXAMINATION OF AFC-1 METALLIC TRANSMUTATION FUELS AT 8 AT.%	25
<u>B.A. Hilton, D.L. Porter and S.L. Hayes</u>	
STUDIES OF THE CORROSION OF MATERIALS BY LEAD BISMUTH EUTECTIC (LBE) AT UNLV, USA	28
<u>A. L. Johnson, J. W. Farley, D. Koury, and B. Hosterman</u>	
THE EFFECT OF LOW DOSE NEUTRON IRRADIATION ON THE TENSILE AND IMPACT PROPERTIES OF A SERIES OF TITANIUM ALLOYS.	29
<u>Pierre Marmy</u>	
MATERIAL'S CHALLENGES FOR TRAVELING WAVE REACTORS	30
<u>K. D. Weaver, T. Ellis, J. R. Gilleland and F. A. Garner</u>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ГАЗОВОЙ ПОРИСТОСТИ В U-Mo ТОПЛИВЕ ОТ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ	30
<u>С.А. Аверин, В.Л. Панченко, О.А. Голосов</u>	
ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНОУПРОЧНЕННОЙ ОКСИДАМИ СТАЛИ EUROFER ODS ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ ДО 32 СНА	31
<u>А.А. Алеев, С.В. Рогожкин, А.Г. Залужный, Н.А. Искандаров, А.А. Никитин, Н.Н. Орлов, М.А. Козодаев</u>	
ТЕРМИЧЕСКИ И РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В МОДЕЛЬНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ	32
<u>В.И. Воронин, И.Ф. Бергер, В.В. Сагарадзе, Б.Н. Гощицкий</u>	

СОДЕРЖАНИЕ

СТРУКТУРНАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ В СПЛАВЕ U-6Nb И УСЛОВИЯ ЕЕ УСТРАНЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА	33
<u>Ю.Н. Зуев</u> , В.В. Сагарадзе, С.В. Бондарчук, А.Е. Шестаков, И.Л. Святков	
СТРУКТУРНЫЕ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НАПЛАВКИ НА КОРПУСНУЮ РЕАКТОРНУЮ СТАЛЬ	33
Ю.Н. Зуев, С.М. Новгородцев, В.В. Сагарадзе, <u>Н.В. Катаева</u> , И.Л. Святков, Е.А. Шестакова	
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БН-600 НА ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ЧС68 И ЭК164.	34
<u>А.В. Козлов</u> , И.А. Портных, Е.Н.Щербаков, В.С. Шихалев, П.И. Яговитин, Н.М. Митрофанова, О.И.Иванова	
МЕХАНОАКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНО-ОКИСЛЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ КАК МЕТОД СОЗДАНИЯ РЕАКТОРНЫХ ДУО-СПЛАВОВ НОВОГО КЛАССА	35
В.В. Сагарадзе, <u>К.А. Козлов</u> , Н.В. Катаева, В.А. Шабашов, А.В. Литвинов, Н.Ф. Вильданова	
ВЛИЯНИЕ СЖИМАЮЩИХ И РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАДИАЦИОННОЕ РАСПУХАНИЕ И ДЕФОРМАЦИЮ ПОЛЗУЧЕСТИ В АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ X18H10T	36
<u>Е.И. Макаров</u> , В.С. Неустроев, С.В. Белозеров, З.Е. Островский	
ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛЕЙ ЭК164 И ЧС68 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БН-600.	37
<u>А.М. Мосин</u> , М.В. Евсеев, И.А. Портных, А.В. Козлов, Н.М. Митрофанова, О.И. Иванова	
АТОМНО-ЗОНДОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОМАСШТАБНОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ ODS EUROFER ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ	38
<u>Н.Н. Орлов</u> , С.В. Рогожкин, А.А. Алеев, А.А. Никитин, А.Г. Залужный, Т.В. Кулевой, Р.П. Куйбида, Б.Б. Чалых	
ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИАЦИОННОЙ ПОРИСТОСТИ, СФОРМИРОВАВШЕЙСЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ БН-600 В МАТЕРИАЛЕ ОБОЛОЧЕК ИЗ СТАЛЕЙ ЭК164 И ЧС68	38
<u>И.А. Портных</u> , А.В. Козлов, Н.М. Митрофанова, О.И.Иванова	
ЗАХВАТ ВОДОРОДА НА НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ ОКИСИ ИТТРИЯ В ODS-СТАЛЯХ	39
<u>Г.А. Распопова</u> , В.Л. Арбузов	
ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ АТОМНО-ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	40
<u>С.В. Рогожкин</u> , А.А. Алеев, А.Г. Залужный, М.А. Козодаев, Н.А. Искандаров, А. А. Никитин, Н.Н. Орлов	
АНОМАЛЬНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ И РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И НОВЫЕ ПУТИ СОЗДАНИЯ УПРОЧНЯЕМЫХ ОКСИДАМИ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ	41
В.В. Сагарадзе	
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ РЕАКТОРА БН-600	42
М.В. Баканов, В.В. Мальцев, Н.Н. Ошканов, <u>В.В. Чуев</u>	
ВЫСОКОДОЗНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЯЭУ В РЕАКТОРЕ БОР-60	42
<u>Шамардин В.К.</u> , Покровский А.С.	
ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ДЕФОРМАЦИОННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СПЛАВОВ Zr-Nb-(Fe,Sn,O) ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ	43
В.Н.Шишов	

СОДЕРЖАНИЕ

ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИИ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО И ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНОГО КЛАССОВ – МАТЕРИАЛОВ ЧЕХЛОВ ОТРАБОТАВШИХ ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРА БН-350	44
О. П. Максимкин, <u>А.В. Яровчук</u> , Л.Г. Турубарова	
<u>III. СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫХ D- И F-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ</u>	45
HIGH-FIELD MAGNETIC AND MAGNETOACOUSTIC ANOMALIES IN URANIUM INTERMETALLIC ANTIFERROMAGNETS	47
<u>A.V. Andreev</u> , Y. Skourski, S. Yasin, S. Zherlitsyn, J. Wosnitza	
NEUTRON SCATTERING STUDIES OF MAGNETIC DYNAMICS IN Pnictide SUPERCONDUCTORS	47
Alexandre IVANOV	
STUDIES OF NEUTRON ELASTIC AND INELASTIC DIFFUSE SCATTERING IN SINGLE CRYSTALS	48
Jiri Kulda	
PLUTONIUM PROPERTIES IN MULTIPLE INTERMEDIATE VALENCE MODEL	49
<u>A. Mirmelstein</u> , O. Kerbel, E. Clementyev	
STUDIES OF SPIN DYNAMICS IN GEOMETRICALLY FRUSTRATED MAGNETS AT CNCS, ORNL	50
<u>A. Podlesnyak</u> , G. Ehlers, M. Frontzek, K. Conder, E. Pomjakushina and S. Barilo	
НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ КАРКАСНО-КЛАСТЕРНЫХ БОРИДОВ f- И d- МЕТАЛЛОВ	51
<u>П.А. Алексеев</u> , В.Н.Лазуков, Ж-М. Миньо, К.С.Немковский	
РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ВИЛЬЯМСОНА – ХОЛЛА К АНАЛИЗУ УШИРЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ МАКСИМУМОВ НЕЛЕГИРОВАННОГО ОБЕДНЁННОГО КРУПНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УРАНА ПОСЛЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 20-50 ГПА.	52
А.Е. Шестаков, Е.А. Козлов, <u>И.В. Артамонов</u> , А.Р. Нургалеев, И.В. Подгорнова, Е.А. Шестакова	
НЕМОНОТОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕПЛОЁМКОСТЬ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ СВЕРХПРОВОДНИКА $\text{BaPb}_{0.75}\text{Bi}_{0.25}\text{O}_3$.	52
<u>Д.А. Балаев</u> , А.А. Дубровский, С.И. Попков, К.А. Шайхутдинов, О.Н. Мартьянов, М.И. Петров	
МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРАНОВЫХ ОБОЛОЧЕК ПОСЛЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ, С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЦВЕТОВОГО КАРТИРОВАНИЯ	53
<u>Д.А. Беляев</u> , Ю.Н. Зуев, Е.А. Козлов, И.В. Подгорнова, И.Л. Святков	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СОХРАНЕННОГО ОБРАЗЦА ИЗ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО УРАНА	54
<u>С.В. Бондарчук</u> , Ю.Н. Зуев, И.В. Подгорнова, Д.А.Беляев	
МАРГАНЦЕВЫЙ ОКСИД $\text{Pb}_3\text{Mn}_7\text{O}_{12}$ СО СМЕШАННОЙ ВАЛЕНТНОСТЬЮ ИОНОВ МАРГАНЦА: СТРУКТУРА, МАГНИТНЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	55
<u>Н.В. Волков</u> , Е.В. Еремин, К.А. Саблина	
МАГНЕТИЗМ И ВАЛЕНТНАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ В КВАЗИБИНАРНЫХ СИСТЕМАХ	56
<u>Е.С.Клементьев</u> , П.А.Алексеев, В.Н.Лазуков, А.В.Мирмельштейн, А.В.Грибанов, А.А. Ярославцев	
ОБОБЩЕННАЯ ТЕОРИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СРЕДНЕГО ПОЛЯ В СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ	57
<u>М.В. Садовский</u>	

СОДЕРЖАНИЕ

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО (La_{0.5}Eu_{0.5})_{0.7}Pb_{0.3}MnO₃: ВОЗМОЖНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО РАЗОГРЕВА НОСИТЕЛЕЙ	57
<u>К.А. Шайхутдинов</u> , С.И. Попков, Д.А. Балаев, С.В. Семенов, А.А. Быков, А.А. Дубровский, Н.В. Сапронова, Н.В. Волков	
ОСОБЕННОСТИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ИЗ УРАНА, СОХРАНЁННЫХ ПОСЛЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ.	58
<u>А.Е. Шестаков</u> , И.В. Артамонов	
ПОЛИМОРФИЗМ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В КРИСТАЛЛАХ С ОЦК РЕШЕТКОЙ	59
<u>А.Е. Шестаков</u> , В.Е. Архипов, Ф.А. Кассан-Оглы	
<u>IV. РАДИАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МАГНЕТИКАХ, СВЕРХПРОВОДНИКАХ, ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ИЗОЛЯТОРАХ</u>	61
STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF LiF AFTER VARIOUS TYPE OF IRRADIATION	63
Elsaid M. Abdelshakour	
ВЛИЯНИЕ НЕСТЕХИОМЕТРИИ И ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАНТАНОВЫХ МАНГАНИТОВ	63
<u>Т.И. Арбузова</u> , С.В. Наумов, В.Л. Арбузов, С.Е. Данилов	
ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ GaAs И GaN ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	64
<u>С.М. Дубровских</u> , О.В. Ткачѳв, В.П. Шукайло	
ОБРАЗОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ И НАНОЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛАХ ФТОРИДА ЛИТИЯ ПРИ ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ	65
<u>Э.М. Ибрагимова</u> , М.А. Муссаева, М.У. Каланов	
СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ, ОБЛУЧЕННЫХ РЕАКТОРНЫМИ НЕЙТРОНАМИ	66
<u>А.В. Корулин</u> , М.А. Барков, В.М. Бойко, С.С. Веревкин, А.И. Калюканов, Н.Г. Колин, Д.И. Меркурисов, Т.Н. Харитонова, В.А. Чевычелов	
ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ (100) ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 21 МЭВ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ	68
<u>С. В. Краевский</u> , Ю.В. Половинкина, С. В. Рогожкин, А.Г. Залужный	
ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМОБАРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА НА ОСНОВЕ X-Y-Z (X = Co, Ni; Y = Cr, Mn; Z = Ga, Al, Sn)	69
<u>В.В. Марченков</u> , К.А. Фомина, Е.И. Шредер, Э.В. Галошина, В.П. Дякина, Н.И. Коуров, И.В. Медведева, В.П. Пилюгин, Е.Б. Марченкова, В.Г. Пушин, Т.В. Дьячкова, А.П. Тютюнник, Ю.Г. Зайнуллин, R. Wang, С.Р. Yang, Н.В. Weber	
ВЛИЯНИЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРО- И МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО Nd_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃	70
И.В. Медведева, <u>В.В. Марченков</u> , Е.Б. Марченкова, Т.В. Дьячкова, А.П. Тютюнник, Ю.Г. Зайнуллин, С.Р. Yang, S. S. Chen, К. Ваегнер, К.А. Фомина	
СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ РАДИАЦИОННО-МОДИФИЦИРОВАННОГО МОНОКРИСТАЛЛА Ti₅₀Ni₄₇Fe₃	71
<u>В.Д. Пархоменко</u> , С.Ф. Дубинин, В.И. Максимов	
ВЛИЯНИЕ ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В ЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ	71
Махкамов Ш., Каримов М., <u>Турсунов Н.А.</u> , Махмудов Ш.А., Саттиев А.Р.	

СОДЕРЖАНИЕ

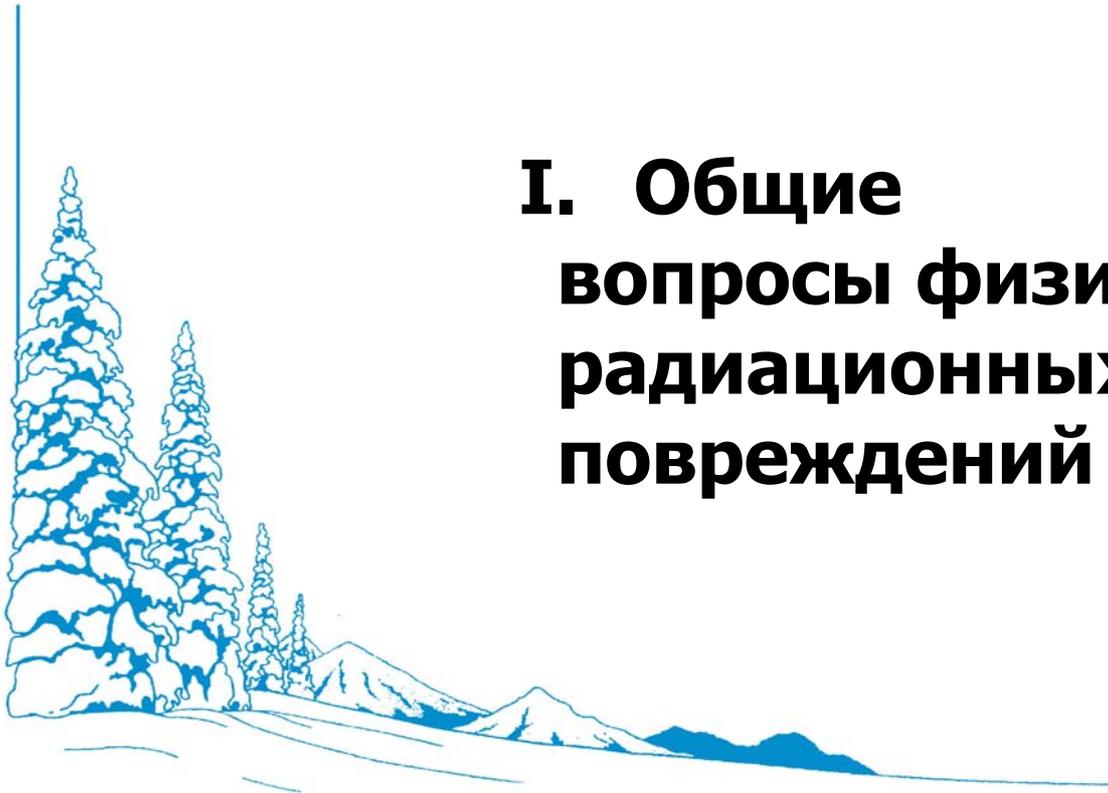
<u>V. РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ</u>	73
РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СПЛАВАХ ГЕЙСЛЕРА Cu_2MnAl И Ni_2MnGa <u>Н.Ю. Богданов, В.С. Хмелевская</u>	75
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ АЛЮМИНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ <u>П.В. Быков, Д.Г. Шайсултанов, В.Я. Баянкин</u>	77
ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ МАРГАНЦА <u>В.Л. Воробьев, П.В. Быков, В.Я. Баянкин</u>	78
ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ <u>В.В. Губернагоров, Ю.Н. Драгошанский, Т.С. Сычева, В.А. Ивченко</u>	79
ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СЕГРЕГАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ФОЛЬГАХ $\text{Ni}_{50}\text{Cu}_{50}$ С НАПЫЛЕННЫМ СЛОЕМ Al <u>Жихарев А.В., Климова И.Н., Баянкин В.Я.</u>	80
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Ar^+ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СПЛАВА Д16 В РАЗЛИЧНОМ ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ <u>В.В. Овчинников, А.А. Клепикова, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько, Л.И. Кайгородова, С.М. Можаровский, А.В. Филиппов</u>	80
СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРА РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЧИСТОЙ ПЛАТИНЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ И ИОНАМИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ <u>Е.В. Медведева, В.А. Ивченко, А.В. Козлов, Т.А. Белых, С.С. Александрова</u>	81
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРОКАТАННЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ ФОЛЬГ ВСЛЕДСТВИЕ ЭФФЕКТА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ. <u>Новоселов А.А., Баянкин В.Я., Гильмутдинов Ф.З.</u>	82
ВОЗДЕЙСТВИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ Ar^+ НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВ КАРБОНИЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА Р-20 И ВК <u>В.В. Овчинников, Ф.Ф. Махинько, Н.В. Гущина, И.В. Окулов, Н.В. Сдобнов, А.В. Федяй</u>	83
ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РАДИАЦИОННОМУ ПОРООБРАЗОВАНИЮ В СПЛАВАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПУЧКАМИ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ <u>В.В. Овчинников, В.В. Сагарадзе, Н.Л. Печеркина, Ф.Ф. Махинько</u>	84
СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СВЕЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛЕЗА, ЦИРКОНИЯ И ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ Ar^+ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ <u>В.В. Овчинников, В.И. Соломонов, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько</u>	85
НАНОСОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВЫСОКОДОЗНЫМ ИОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ <u>В.С. Хмелевская</u>	86
СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ИММЕРСИОННОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ <u>И.А. Цыганов, А. Колич</u>	87
<u>VI. ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА</u>	89
MATERIALS CHOICES FOR THE FLEXIBLE MYRRHA IRRADIATION FACILITY. <u>Pierre Marmy, Serguei Gavrilov, Rafael Fernandez and Peter Baeten</u>	91

СОДЕРЖАНИЕ

ДИФФУЗИЯ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН	91
<u>Г.В. Гаранин, В.В. Ларионов, Е.А. Склярова, И.П. Чернов</u>	
ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТОВЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ КОНВЕРТОРА НЕЙТРОННОЙ МИШЕНИ	92
<u>Е.И. Жмуриков, И.В. Савченко, С.В. Станкус, П.В. Логачёв, Л. Tecchio</u>	
ИЗМЕНЕНИЕ НАНОМАСШТАБНОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	93
<u>Н.А. Искандаров, А.А. Никитин, А.А. Алеев, С.В. Рогожкин, А.Г. Залужный</u>	
ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ НАНОЛЮМИНОФОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЙ	94
<u>В.С. Кортов, Ю.Г. Устьянцев, С.В. Звонарев</u>	
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В АЗОТИРОВАННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ Fe-Cr СПЛАВАХ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ	94
<u>В.А. Шабашов, С.В. Борисов, В.В. Сагарадзе, А.В. Литвинов, А.Е. Заматовский, К.А. Ляшков, Н.Ф. Вильданова, В.И. Воронин</u>	
ИЗУЧЕНИЕ МАРТЕНСИТНОГО γ-α' ПЕРЕХОДА ПРИ СЖАТИИ ОБРАЗЦОВ ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ СТАЛИ 12X18N10T	95
<u>Мережко М.С., Максимкин О.П., Гусев М.Н., Токтогулова Д.А.</u>	
О КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА ПО СЕЧЕНИЮ МОЩНЫХ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ	96
<u>В.В. Овчинников, С.В. Овчинников, Ф.Ф. Махинько, А.А. Повзнер</u>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ВАКАНСИЙ И ПОР В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ ПО ДАННЫМ ВРАФ	97
<u>В.И. Графутин, А.Г. Залужный, Е.П. Прокопьев</u>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАРТЕНСИТНОГО $\gamma \rightarrow \alpha'$ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛИ 12X18N10T, ОБЛУЧЕННОЙ ТЕПЛОВЫМИ И БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ, ДЕФОРМИРОВАННОЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	98
<u>Рубан С.В., Максимкин О.П., Гусев М.Н.</u>	
ИЗУЧЕНИЕ МАРТЕНСИТНОГО $\gamma \rightarrow \alpha'$ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18N10T, ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ И ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ	99
<u>С.В. Рыбин, О.П. Максимкин, Д.А. Токтогулова, М.Н. Гусев.</u>	
ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ СТАЛИ 12X18N10T И АРМКО-ЖЕЛЕЗА, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ	99
<u>Д.А. Токтогулова, О.П. Максимкин, М.Н. Гусев, М.С. Мережко</u>	
ЛОКАЛИЗАЦИЯ МАРТЕНСИТА ВБЛИЗИ ОТКОЛА ПРИ УВН НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18N10T	100
<u>К.Г. Топорищев, Ю.Н. Зуев, И.Л. Святков, А.Е. Шестаков, А.В. Павленко</u>	
МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ И ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЛИ 12X18N10T ПОСЛЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ЛЕГКОГАЗОВОЙ ПУШКЕ	101
<u>И.В. Торопов, Д.А. Беляев, Ю.Н. Зуев, Н.В. Иванова, А.В. Павленко И.Л. Святков, Е.А. Шестакова</u>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТЯЖЕЛЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ.	102
<u>Р.Р. Фазылов, Ю.Н. Долинский, Е.А. Шестакова, Ю.Н. Зуев.</u>	
ОБЛУЧЕНИЕ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ	102
<u>В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, Н.А. Шабурова</u>	

СОДЕРЖАНИЕ

ЭФФЕКТ ОС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14 МЭВ НА КНИ СБИС СТАТИЧЕСКОГО ОЗУ.	107
<u>Е.Ю. Шамаев</u> , А.П. Степовик, В. П. Шукайло	
МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДО И ПОСЛЕ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ	108
<u>Е.А. Шестакова</u> , В.Г. Субботин, В.В. Сагарадзе, А.И.Суренков, С.М.Новгородцев, И.В. Торопов, Д.А. Беляев	
<u>VII. РАБОЧИЙ СЕМИНАР МНТЦ</u>	<u>111</u>
ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НЕЙТРОННОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЙ НА РАДИАЦИОННУЮ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ	113
<u>Арбузов В.Л.</u> , Гощицкий Б.Н., Данилов С.Е., Зув Ю.Н., Карькин А.Е., Сагарадзе В.В.	
НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ МИКРО- И МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАРЕЮЩИХ СПЛАВАХ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОГО И РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ.	113
В.И.Бобровский	
ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕШЕТКИ И ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОВ ПЛЕНОК <i>n</i>-GaN НА САПФИРЕ ПРИ РЕАКТОРНОМ ОБЛУЧЕНИИ	114
<u>В.Н. Брудный</u> , Н.Г. Колин, А.В. Кособуцкий	
ВАНАДИЕВЫЙ СПЛАВ, ПЛАКИРОВАННЫЙ ФЕРРИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ - МАТЕРИАЛ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ	115
С.Н. Вотинов	
INVESTIGATION OF MOLTEN-SALT FLUORIDE SYSTEMS FOR INNOVATIVE NUCLEAR POWER ENGINEERINGS	115
А.Л. Жеребцов	
ИССЛЕДОВАНИЯ РФЯЦ-ВНИИТФ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК И ТРИТИЕВЫХ СИСТЕМ	115
Ю.Н. Зув	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ, И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ (ФЛАКСА) НА ОХРУПЧИВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ	116
Е.А. Красиков	
РАДИАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НЕЙТРОНАМИ, ИОНАМИ, ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ, НЕТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПРОБЛЕМА БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ	116
В.В. Овчинников	
РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ЦИРКОНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АКТИВНЫХ ЗОН АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ	117
В.Н. Шишов	
<u>УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ</u>	<u>118</u>



I. Общие вопросы физики радиационных повреждений

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

POSITRON ANNIHILATION STUDY OF EFFECTS OF SOLUTE ATOMS ON EVOLUTION OF VACANCY DEFECTS IN ELECTRON-IRRADIATED Fe-Cr-BASED ALLOYS

A.P. Druzhkov, A.L. Nikolaev

Institute of Metal Physics, Ural Branch RAS, Ekaterinburg, Russia (druzhkov@imp.uran.ru)

The evolution of vacancy-type defects in Fe-Cr alloys (13-16 at. % Cr) undoped and doped with C, N, Au, or Sb and in conventional ferritic-martensitic steel (~13 % Cr) has been investigated using positron annihilation spectroscopy under electron irradiation at room temperature and subsequent stepwise annealing. Small vacancy clusters are formed in the undoped Fe-16Cr alloy, which anneal out between 320 and 550 K. It has been shown that oversized substitutional solute atoms (Sb, Au) in the Fe-Cr alloy interact with vacancies and form complexes, which are stable up to 600 and 420 K, respectively. It has been found that the accumulation of vacancy defects considerably increases in the alloys and the steel with an enhanced content of interstitial impurities. It has been shown that this effect is related to the formation of vacancy-carbon complexes. It is known that chromium in iron decreases the diffusion mobility of carbon. Therefore, the structure of vacancy-carbon complexes and the kinetics of their annealing in Fe-Cr alloys differ from those in the Fe-C system.

This work was done within RAS Program (Project No. 01. 2. 006 13394), with partial support of Ural Branch RAS (Project No. 09-M-23-2004).

THE EFFECTIVENESS OF MATHEMATICAL MODELS FOR FUSION MATERIALS

S.L. Dudarev

*EURATOM/CCFE Fusion Association, Culham Centre for Fusion Energy
Abingdon, Oxfordshire OX14 3DB, UK.*

sergei.dudarev@ccfe.ac.uk

The development of new materials for cost-effective fusion power generation has recently become one of the priority issues for the international magnetic fusion programme. While the criteria related to the stability of materials under 14 MeV fusion neutron irradiation, where candidate alloys and/or composite materials for the tritium breeding blanket are expected to retain mechanical strength, fracture toughness, and creep resistance over the period of 5 to 10 years, are broadly similar to those for the next generation fission reactor materials, there are significant differences, primarily associated with the different energy spectra of fusion and fission neutrons. Recent advances in mathematical modelling show that a synergetic approach, based on concepts drawn from theoretical condensed matter physics, novel computer simulation algorithms, and model validation experiments, offers a cost-effective knowledge-based way forward in the development of fusion materials.

The recent renaissance in mathematical modelling, and the rapid accumulation of new knowledge about microstructural evolution of materials under irradiation are driven by the realization of the fact that it is unlikely that a prototype fusion reactor, or a large-scale fusion neutron source for testing materials are going to be constructed in the immediate future. At the same time, the operation of the present generation of fusion devices, including Tore-Supra in

France, Asdex Upgrade in Germany, and JET at Culham Centre for Fusion Energy in the UK, has highlighted a range of generic materials-related problems not foreseen in the past, like the problem of materials compatibility in the divertor, and the fact that a substantial amount of tritium is retained in the plasma-facing materials. The ITER programme is expected to present an even broader range of materials-related challenges.

Despite the fact the engineering design criteria and constraints imposed by radiation swelling, hardening, embrittlement, and thermal and irradiation creep, and the loss of mechanical strength of materials, are macroscopic, analysis shows that all of them are fundamentally related to microscopic reactions associated with the formation and migration of radiation defects and dislocations. These processes are controlled by energy scales of the order of an electron-volt characterizing the dynamics of atoms in the material. This fact highlights the dominant role of the atomic scale in the hierarchy of multiscale mathematical modelling methods, involving electronic, atomistic, mesoscopic (Langevin and Monte Carlo) and dislocation-based approaches. This presentation will also highlight a range of outstanding problems in the field of radiation stability of iron-based alloys and steels that have recently been addressed and partially resolved using new mathematical concepts and algorithms, validated by dedicated experiments.

This work was funded by the UK Engineering and Physical Sciences Research Council under grant EP/G003955 and the European Communities under the contract of Association between EURATOM and CCFE. The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission.

CURRENT STATE OF THE RADIATION DAMAGE THEORY

S.I. Golubov, A.V. Barashev and R. E. Stoller

Materials Science and Technology Division, ORNL, Oak Ridge, USA (golubovsi@ornl.gov)

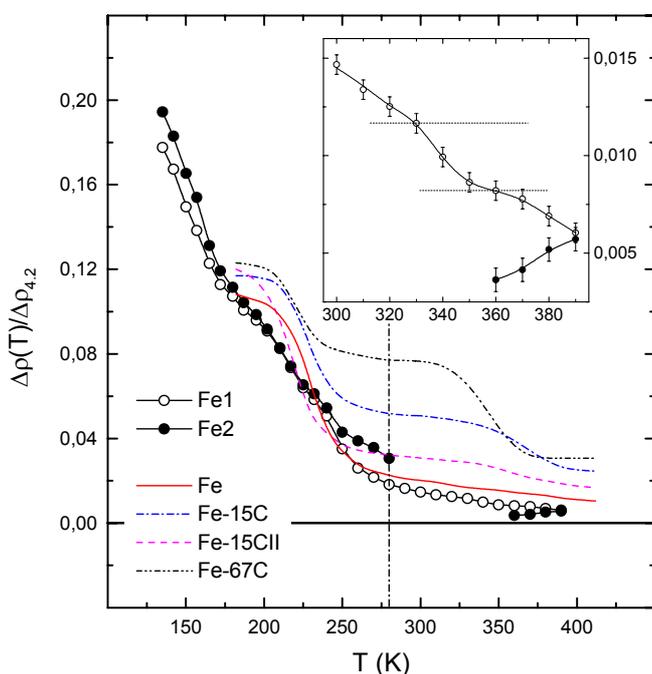
Efforts of many scientists for more than a half of a century have resulted in substantial understanding of the response of various materials to irradiation. The contribution of theory to this process is significant. Consequently, some phenomena have been predicted before their observation: void swelling, radiation-induced segregation and existence of one-dimensional mass transport under high-energy cascade-producing particle bombardment. Development of the NRT standard for a common measure of the irradiation dose, the Standard Rate Theory and its further development, the BEK model, and finally the Production Bias Model have established a framework for analyzing microstructure evolution in different materials. However, the theory has not acquired a status allowing it to play a decisive role in creating radiation-resistant materials. Moreover, some theoretical predictions are in contradiction with observations, which indicates that something important has escaped attention. In the present paper, the current theoretical framework and experimental data are analyzed and the reasons for the situation described are discussed. A way of developing a self-consistent predictive theory is outlined.

ON THE INTERACTION BETWEEN RADIATION-INDUCED DEFECTS AND FOREIGN INTERSTITIAL ATOMS IN α -IRON

Alexander L. Nikolaev and Tatiana E. Kurennykh

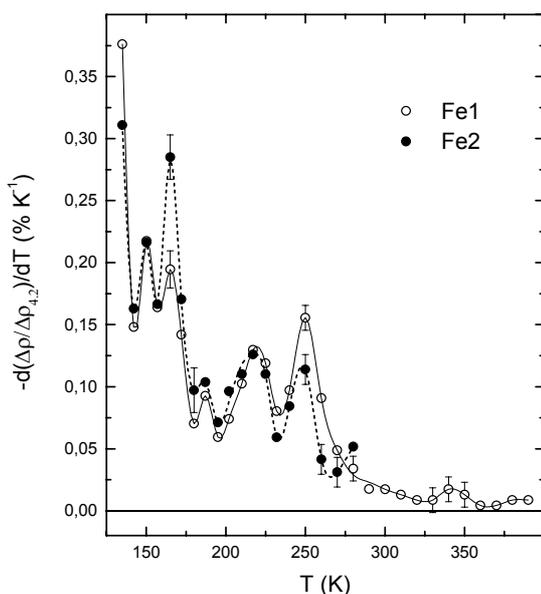
*Institute of Metal Physics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
18, S. Kovalevskoi st., Ekaterinburg, 620990 Russia (nikolaev@imp.uran.ru)*

An interaction has been investigated between Frenkel pair (FP) defects and nitrogen atoms in α -iron by means of a resistivity recovery (RR) method. Both FP partners are captured by nitrogen atoms. A release of self-interstitial atoms (SIA) takes place at 165 K and that of vacancies occurs at 250 K. Binding energies of the both FP defects with nitrogen atoms are about 0.1-0.15 eV. A weak carbon-induced stage is observed at 340 K. Analysis of a position of the stage allows concluding on a decay of the vacancy-carbon atom pairs characterised by a dissociation (binding) energy about 0.9 (0.35) eV.



RR curves of Fe1 (70 appm N) and Fe2 (130 appm N) samples at temperatures above stage I after electron irradiation. Line graphs represent RR data of Takaki et al [1] above stage II depicted for comparison. The dash-dotted vertical line marks 280 K. In the inset: high temperature portions of the Fe1 and Fe2 curves; the dashed horizontal lines mark a stage at 340 K.

Initial Frenkel pair concentrations in samples: Fe1, Fe2 – 130 appm; Fe – 84 appm; Fe-15C and Fe-67C – 90 appm; Fe-15C(II) – 490 appm.



RR spectra of Fe1 and Fe2 samples.

Interpretation of the peaks:

150 K – the onset of free migration of Fe-Ni mixed dumbbells (our iron contains ~100 appm Ni);

165 K – dissociation of SIA from atoms of N;

220 K – trapping of vacancies at atoms of N;

250 K – dissociation of vacancies from atoms of N;

340 K – dissociation of vacancies from atoms of C (estimated concentration does not exceed 1 appm).

References

1. S. Takaki et al, *Radiat. Eff.* **79** (1983) 87

ELECTRICAL RESISTIVITY STUDY OF THE α' PRECIPITATION IN Fe-Cr SYSTEM AT 773 K

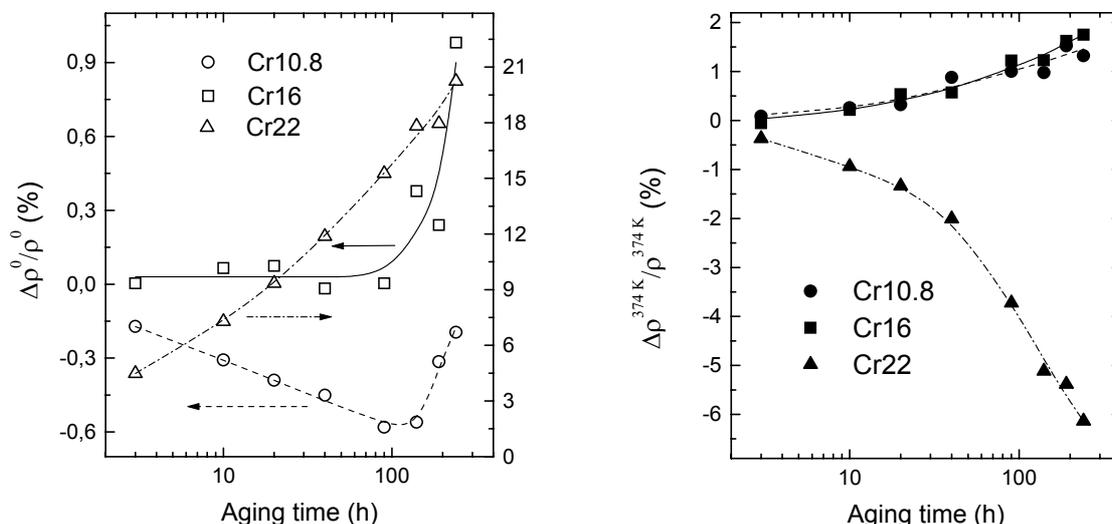
Alexander L. Nikolaev

*Institute of Metal Physics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch
18, S. Kovalevskoi st., Ekaterinburg, 620990 Russia (nikolaev@imp.uran.ru)*

Four Fe-Cr alloys (Cr8.7, Cr10.8, Cr16 and Cr22) were tempered at 773 K during 240 h. Changes in microstructure were monitored by measurements of electrical resistivity at 4.2 K (residual resistivity, ρ^0) and 374 K, $\rho(374K)$. The temperature-dependent part of the whole resistivity, so called “ideal resistivity”, i.e. $\rho^{374K} = \rho(374K) - \rho^0$, was separated. The following correlations between changes in microstructure and ρ^0 and ρ^{374K} were found based on dependencies of ρ^0 [1] and ρ^{374K} on a Cr concentration and data of the small angle neutron scattering and atomic probe tomography [2].

Residual resistivity of Cr16 and Cr22 is insensitive to depletion of the solid solution with Cr, while that in Cr10.8 drops slightly. α' precipitation leads to a rise of residual resistivity when a Cr concentration in precipitates exceeds ~ 60 at % (C_{crit}). α' precipitates with a Cr concentration below C_{crit} do not affect ρ^0 .

Changes in ρ^{374K} reflect two processes. First, depletion of the solid solution with Cr reduces ρ^{374K} . Second, inhomogeneity induced by formation of α' precipitates (with any Cr concentration) increases ρ^{374K} . Changes caused by the first process dominate in Cr22, while the second process is responsible for increase of ρ^{374K} in Cr10.8 and Cr16 where depletion with Cr is low.



Any reliable changes of ρ^0 and ρ^{374K} were not detected in Cr8.7.

1. The α - α' miscibility gap at 773 K is positioned between 8.7 and 10.8 at % Cr, most probably, closer to 8.7 at % because the Cr10.8 alloy demonstrates clear features of α' precipitation.

2. α' precipitates may nucleate with a Cr concentration below C_{crit} . Incubation time to achieve C_{crit} is very short (<3h) in Cr22 and sufficiently long (~100 h) in Cr10.8 and Cr16.

3. Volume fraction of α' precipitates after 240 h of aging is estimated as 0.15 and 0.4 vol % in Cr10.8 and Cr16, respectively.

References

1. Yu. Yu. Tsiovkin et al, 2005, *Phys. Rev.* **B72**, 224204

2. V. Jaquet, 2000, *Thesis*, Ecole Polytechnique; S. Novy et al, 2009, *J. Nucl. Mater.*, **384**, 96

САМООРГАНИЗАЦИЯ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ И РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.П. Колотушкин, С.Н. Вотинов, А.А. Парфенов
ОАО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара, Москва, Россия, kolotush@bochvar.ru

Уже в начале 90-х годов прошлого века при исследовании механизмов ускорения рекомбинации точечных дефектов, возникающих при нейтронном облучении в конструкционных материалах ядерных реакторов, было замечено, что в сплавах системы Ni-Cr с метастабильной структурой концентрация радиационных дефектов на порядок меньше после облучения при температуре 330 - 350 °С, чем в сплавах со стабильной структурой [1]. Метастабильность структуры, обеспечивающую ускорение рекомбинации радиационных точечных дефектов, проявляли сплавы, удаленные от стехиометрии упорядоченной фазы Ni₂Cr. Исследования показали, что влияние метастабильности структуры, т.е. изменчивости кристаллографических параметров, на радиационную устойчивость сплавов основывается на сравнительно одинаковой способности сплавов данного состава к формированию ближнего порядка и к расслоению. В сплавах такого состава вторая производная свободной энергии по концентрации близка к нулю, поскольку эти сплавы находятся в области диаграммы состояния, переходной от упорядочивающихся сплавов к распадающимся.

При электронно-микроскопическом исследовании структуры и фазового состава хромоникелевых сплавов на основе железа с различной исходной обработкой и сплавов системы никель-хром до и после облучения нейтронами было установлено, что изменение в процессе термообработок исходного структурно-фазового состояния позволяет существенно улучшить поведение материалов под облучением и повысить их радиационную устойчивость. В хромоникелевых сплавах на основе железа и в сплаве Ni-Cr с метастабильной структурой в результате формирования при нейтронном облучении при температуре 350 - 450 °С ловушек точечных дефектов концентрация вторичных радиационных дефектов существенно снижается, и сохраняются высокие механические свойства.

При сравнении эффективности влияния структурных и фазовых изменений в кристаллической решетке, обусловленных различными факторами, например, влиянием атомов внедрения, надразмерных атомов замещения и т.п. на радиационную стойкость

облучаемых нейтронами хромоникелевых сталей и сплавов было обнаружено: максимальное ускорение рекомбинации вакансий и межузельных атомов происходит под влиянием образования тетрагональных искажений решетки, возникающих в процессе упорядочения сплавов переходных металлов. Формирование ближнего порядка, а вместе с ним искажений решетки, служащих ловушками точечных дефектов, обеспечивает равновесие количества зарождающихся и рекомбинирующих точечных дефектов. Этот процесс можно рассматривать как самоорганизацию структуры облучаемых сплавов, поскольку он обеспечивает возобновление разрушаемой в каскадах смещения кристаллической решетки и, как следствие, незначительное вакансионное распухание и высокую радиационную устойчивость конструкционных материалов [2].

Если же структура сплавов переходных металлов стабилизируется при облучении нейтронами, т.е. в сплавах происходят фазовые переходы, такие сплавы быстро утрачивают способность сопротивляться радиационному воздействию и поддерживать ускоренную рекомбинацию точечных дефектов, что обуславливает деградацию механических свойств материалов.

Проявляющееся в ряде систем сплавов переходных металлов одновременное воздействие нейтронного облучения и термодинамического ближнего упорядочения на перераспределение атомов кристаллической решетки является синергетическим и формирует непрерывную динамическую самоорганизацию структуры металлов. Таким образом, самоорганизация кристаллической структуры в процессе радиационного повреждения обеспечивает удлинение инкубационного периода накопления вторичных радиационных дефектов и сохранение необходимых механических свойств конструкционных материалов

Наиболее эффективный механизм ускорения рекомбинации вакансий и межузельных атомов связан с ближним упорядочением и тетрагональными статическими искажениями кристаллической решетки. Статические искажения возникают по границам нанодоменов ближнего упорядочения, которые содержат осцилляции распределения в матрице атомов никеля и хрома с интервалом расположения и линейными размерами нанодоменов 2 – 4 нм (рисунок 1), а границы нанодоменов являются ловушками для точечных радиационных дефектов.

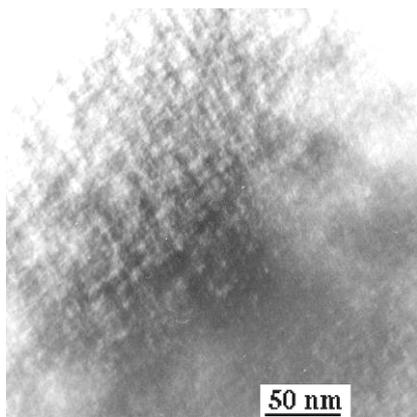


Рисунок 1 - Нанодомены в сплаве никеля с 41 % мас. Cr после закалки и отжига при температуре 450 °С в течение 9000 ч

Число атомов в нанодоменах ближнего упорядочения невелико, поэтому расстояние между энергетическими уровнями такой частицы $\delta = E_F/N$ (E_F — энергия Ферми, N — число атомов в частице) сравнимо с тепловой энергией $k_B T$. Активность малых металлических частиц начинает проявляться, когда δ по величине близко к $k_B T$ [3]. Проведенные исследования показали, что нанодомены ближнего упорядочения со средним размером $\sim 2 - 3$ нм, образующиеся при облучении нейтронами в сплавах никеля с хромом, представляют собой частицы размером, при котором проявляются каталитические свойства частицы. Они образуют гомогенно распределенную в матрице

систему или подрешетку каталитически активных центров, взаимодействующих с вакансиями и межузельными атомами. При линейном размере частиц (нанодоменов) ~ 2 - 3 нм количество атомов в них в системе Ni-Cr составляет 150 - 250 для температуры 600 К [4]. Закрепление точечных дефектов в зоне влияния нанодоменов ближнего упорядочения является эффективным фактором ускорения рекомбинации и повышения радиационной устойчивости сплавов.

Список источников

[1] В.П. Колотушкин. Влияние структурного состояния на стабильность Cr-Ni- сталей и сплавов при облучении нейтронами. *"Физика металлов и металловедение"*. 2004, том 97, № 2, с. 63-73.

[2] Колотушкин В.П. Вотинов С.Н. *МиТОМ*, 2006, № 10 (616), с. 27-31.

[3] А.И. Гусев. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 416 с.

[4] Колотушкин В.П., Парфенов А.А. Самоорганизация нанокристаллической структуры сплавов переходных металлов под действием температуры и облучения как основа для создания радиационно-стойких конструкционных материалов ядерных реакторов. *Металлы*, 2010. № 2, с. 1-13.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВАКАНСИЙ С РАСТВОРЕННЫМИ АТОМАМИ ОТ МАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ В РАЗБАВЛЕННЫХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

О.И. Горбатов^{*}, П.А. Коржавый^{**}, А.В. Рубан^{**}, Ю.Н. Горностырев^{***}

**Институт Квантового Материаловедения, Екатеринбург 620107, Россия
(oleg.gorbatov@iqms.ru)*

***Королевский Технологический Институт (КТН), SE-100 44 Стокгольм, Швеция*

****Институт Физики Металлов, УрО РАН, Екатеринбург 620041, Россия*

Взаимодействие вакансии с растворенными атомами определяет механизм диффузии и, тем самым, все диффузионно-контролируемые процессы в твердых телах. Знание этих взаимодействий является особенно важным для понимания структурных преобразований, развивающихся в реакторных материалах в условиях облучения, когда концентрация вакансий велика. Традиционные подходы рассматривают размерное несоответствие ионных радиусов примеси и матрицы как основной механизм взаимодействия растворенного атома с вакансией (деформационное взаимодействие). В тоже время, согласно современным представлениям, важную роль играет химическое взаимодействие, зависящее от электронной структуры примеси.

Используя методы теории функционала электронной плотности, реализованные в схеме локально самосогласованных функций Грина (LSGF), мы провели систематические первопринципные расчеты энергии взаимодействий вакансии с растворенными атомами $3p$ (Al, Si, P, S), $3d$ (Sc - Cu) и $4d$ (Y - Ag) элементов в сплавах на основе ОЦК Fe. Расчеты проводились как для ферромагнитного, так и для парамагнитного состояния, моделируемого в приближении разупорядоченных локальных моментов (DLM).

Показано, что на первых двух координационных сферах взаимодействие вакансия-примесь определяется химическим вкладом, энергия которого закономерно изменяется в

ряду элементов с ростом числа валентных электронов. Магнетизм оказывает существенное влияние на взаимодействия вакансия-примесь для $3p$ и $3d$ элементов. При этом переход ферромагнитного ОЦК Fe в парамагнитное состояние сопровождается уменьшением энергии взаимодействия, которое наиболее значительно для примесей Mn, Cr и Cu. Полученные результаты имеют большое значение для понимания кинетики структурных изменений в сплавах на основе железа, в зависимости от температуры.

ПАРАМЕТРЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОБСТВЕННЫХ МЕЖДОУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ С АТОМАМИ ПРИМЕСЕЙ В АЛЮМИНИИ

А.Э.Давлетшин, В.Л.Арбузов.

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (andreydavletshin@mail.ru)

Приведен обзор собственных и литературных экспериментальных данных по параметрам взаимодействия (энергии связи, радиусы захвата) атомов примесей с собственными междоузельными атомами в алюминии, полученных из экспериментов по исследованию накопления радиационных дефектов и их отжига после облучения.

В настоящее время используется два метода экспериментального определения радиусов захвата подвижных собственных междоузельных атомов атомами примеси :

1. Метод, основанный на анализе кривых возврата остаточного электросопротивления на стадии I_E [1];
2. Метод обратной скорости накопления (ОСН) [2].

Обсуждаются вопросы, связанные с особенностями этих методов.

С помощью метода ОСН определены относительные радиусы захвата подвижных СМА атомами примеси в сплавах Al при температуре облучения 54 К: для атомов Mg $R_t = 0.6 \pm 0.07$, для Si $R_t = 0.72 \pm 0.12$, для Sn $R_t = 0.6 \pm 0.1$, для Li $R_t = 0.22 \pm 0.03$.

Из экспериментов по исследованию накопления радиационных дефектов и их последующего отжига проведена оценка энергии связи комплексов атом примеси - СМА в сплавах Al: для атомов Mg $E_{св} = 0.14$ эВ, для Si $E_{св} = 0.3$ эВ, для Sn $E_{св} = 0.34$ эВ, для Li $E_{св} = 0.24$ эВ.

Проведен анализ полученных значений параметров взаимодействия для различных типов примесей в алюминии.

Обнаружено, что при облучении в области температур II стадии возврата в большинстве Al сплавов происходит перестроение комплексов СМА - атом примеси и формирование более крупных гетерогенных комплексов СМА на атомах примеси.

Литература

1. Rizk R., Vajda P., Maury F. e. a., *J. Appl. Phys.*, 47, 11, 4740—4745 (1976)
2. Волленбергер Г., Дворжак Ф., Ленартц Р. *В кн.: Материалы школы по радиац. и другим дефектам в твердых телах.* Ин-т физики ГССР, Тбилиси, 1974, с. 73—115.

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ Fe-Ni И Fe-Ni-P С РАЗЛИЧНОЙ МИКРОСТРУКТУРОЙ

С.Е. Данилов, В.Л. Арбузов, В.А. Казанцев

Институт Физики Металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия. (danilov@imp.uran.ru)

Методами остаточного электросопротивления и коэффициента термического расширения (КТР) исследованы процессы радиационно-индуцированного расслоения твердого раствора и эволюции радиационных дефектов при облучении в диапазоне 240-570 К и отжигах в сплавах Fe-34,7ат.%Ni и Fe-34,7ат.%Ni-0,1%P с различной микроструктурой, созданной холодной деформацией. Сравниваются сплавы в состояниях: закаленном от 1373 К, состаренном при 780 К, деформированном на 40 % и деформированном, но отожженном при 573 К для удаления вакансионных кластеров. Получены дозовые и температурные зависимости расслоения твердого раствора, при облучении электронами и при последующих изохронных отжигах.

Показано, что процесс радиационно-индуцированного расслоения твердого раствора, приводящий к сильному росту остаточного электросопротивления (до 20 %) и к росту КТР (до 10^{-5} K^{-1}) происходит при облучении 5 МэВ электронами до доз на уровне $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ и при последующих отжигах. Вакансионные кластеры, как деформационного, так и радиационного происхождения действуют в качестве стоков точечных дефектов и снижают радиационно-индуцированное расслоение твердого раствора, они диссоциируют при отжигах в интервале 350 - 500 К, приводя к появлению мигрирующих вакансий, которые в свою очередь, обеспечивают продолжение процесса расслоения твердого раствора. Однако, основное и наиболее сильное влияние на расслоение при электронном облучении оказывает дислокационная микроструктура; она снижает расслоение твердого раствора более чем в три раза при 573 К. Взаимодействие вакансий с атомами фосфора приводит к усилению образования вакансионных кластеров как в деформированном, так и в облученном инваре и к уменьшению расслоения твердого раствора и роста КТР. Показано, что концентрационные неоднородности матрицы в состаренном сплаве не являются заметными стоками для точечных дефектов. Влияние разной микроструктуры при низких температурах облучения не является существенным, а при высоких температурах нивелируется влияние старения и деформационных вакансионных кластеров.

Работа поддержана Проектом МНТЦ № 3074.2, проектами РФФИ № 11-02-00224 и № 11-03-00018

СЕГРЕГАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАМЕЩЕНИЯ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН. ПЕРВОПРИНЦИПНЫЙ РАСЧЕТ

А.Р. Кузнецов***, Ю.Н. Горностырев***, С.В. Окатов**

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

***Институт квантового материаловедения, Екатеринбург, Россия*

Сегрегации растворенных атомов на границах зерен (ГЗ) оказывают значительное влияние, как на фазовую стабильность, так и на физико-химические свойства сплавов.

Хотя термодинамические принципы образования сегрегаций известны давно, микроскопический механизм этого явления продолжает оставаться предметом дискуссий. Традиционные подходы рассматривают размерное несоответствие ионных радиусов как основную причину взаимодействия растворенного элемента с ГЗ (деформационное взаимодействие). Согласно современным представлениям определяющую роль в образовании сегрегаций на ГЗ играет химическое взаимодействие, зависящее от электронной структуры примеси.

Для выяснения роли электронных эффектов в образовании сегрегаций методами теории функционала электронной плотности (PAW-VASP) с учетом атомной релаксации проведен расчет электронной структуры и полной энергии кристаллита, содержащего специальную ГЗ и атом легирующего элемента в различных позициях относительно ГЗ. В качестве примера рассмотрены границы наклона $\Sigma 5\{210\}[001]$, $\Sigma 5\{310\}[001]$ в Al, легированном Mg или Si, и $\Sigma 3\{112\}[001]$ в ОЦК-Fe, легированном Ni или Cu. Показано, что в случае ГЗ с высокой плотностью совпадающих узлов в плоскости границы ($\Sigma 5\{310\}[001]$ и $\Sigma 3\{112\}[001]$) энергия взаимодействия определяется перестройкой электронной структуры в узлах ГЗ с атомной координацией, отличающейся от объемной. При этом ее величина зависит от переноса заряда и магнитного состояния примеси (для ГЗ в ОЦК-Fe). В тоже время, для ГЗ с низкой плотностью совпадающих узлов в плоскости границы, таких как $\Sigma 5\{210\}[001]$, испытывающих значительную атомную релаксацию, существенный вклад в энергию взаимодействия дает деформационное взаимодействие. Сделан вывод о том, что неравновесные ГЗ, для которых кристаллографическая атомная координация нарушена в широкой прилегающей области, имеют повышенную склонность к образованию сегрегаций легирующих элементов.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН (проекты 09-М-23-2004, 10-2-13-ПРО).

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В.А.Клименов, А.П.Мамонтов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Металлы и сплавы находятся в состояниях, весьма далеких от состояния термодинамического равновесия, достижению которого препятствуют энергетические параметры дефектных и примесных перестроек. При облучении ионизирующим излучением металлов и сплавов появляются состояния, маловероятные с позиций равновесной термодинамики.

Исследовано влияние ионизирующего излучения остановленного промышленного уран – графитового реактора при мощности дозы 0,15 – 0,18 P/c и ионизирующего излучения радиоактивного источника кобальт-60 при мощности дозы 240 – 250 P/c на прочностные характеристики аустенитной стали, титана, вольфрама, молибдена, твердых сплавов В8 и Т15К6. Проводились измерения на исходных образцах и образцах, облученных дозой $10^4 P$ ионизирующего излучения. Результаты измерений твердых сплавов ВК8 приведены в таблице.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ФИЗИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Режим обработки образцов	Разрушающая нагрузка, кГс	Предел прочности при изгибе, кГс/см	Деформация, мм	Жесткость, кГс/мм	Микротвердость, кГс/мм ²
Исходные образцы	443	9843	0,058	7637	1290
Облучение в реакторе	392	8756	0,042	9350	1634
Облучение ⁶⁰ Co	390	8754	0,041	9348	1632

Как видно, результаты измерений зависят только от дозы облучения и не зависят от мощности дозы. После облучения уменьшается разрушающая нагрузка, предел прочности при изгибе, деформация, увеличивается жесткость и микротвердость сплава.

Уменьшение количества дефектов и упорядочение структуры металлов и сплавов при облучении малой мощностью дозы ионизирующего излучения, когда меньше сотой доли атомов ионизируется, возможно только за счет освобождения запасенной энергии в кристаллической решетке в результате цепных процессов аннигиляции дефектов. Процессы аннигиляции вакансий с генетически связанными междоузельными атомами инициируются ионизацией.

Исследования, выполненные с помощью растрового электронного микроскопа РЭМ-200, показали, что образцы сплава ВК8 содержали частицы карбида вольфрама в виде многоугольных призм или цилиндров с поперечными размерами 1 – 10 мкм. В этом сплаве дефектные области сосредоточены на границах раздела WC-Co. Уменьшение количества дефектов при ионизирующем облучении в результате аннигиляции или рекомбинации дефектов должно сопровождаться тепловыделением, обусловленным освобождением запасенной в кристалле энергии. При этом происходит изменение структуры материала. Для идентификации исходные и облученные образцы анализировались методом масс-спектрометрии вторичных ионов. В масс-спектрах облученных образцов наблюдались пики, соответствующие ионам CoWC. Это подтверждено при изучении поверхности разрушения методом реплик на просвечивающем электронном микроскопе ЭВМ-100. Появление новой фазы и изменение дефектности материала изменило и характер излома образцов:

- поры вдоль областей спайности исчезают и уменьшается их количество на границе раздела WC-Co;
- на поверхности карбида вольфрама появляются элементы вязкого излома – гребни отрыва, вязкий излом;
- уменьшается вытяжка кобальтовой связки вокруг частиц карбида вольфрама.

Таким образом, упорядочение структуры твердого сплава при воздействии ионизирующего излучения сопровождается значительными структурными превращениями. Наиболее сильные изменения происходят в областях с высокой плотностью дефектов, например, на границах раздела WC-Co. Наиболее вероятно, что наблюдаемые превращения структуры являются следствием локального разогрева в результате цепных реакций между дефектами.

Метод акустической эмиссии, генерируемой в процессе облучения, является наиболее перспективным методом для контроля качества и диагностики металлов и сплавов. Измерения акустической эмиссии выполнены в процессе облучения титана, сплавов ВК8 и

T15K6. Эти сплавы используются для изготовления бурового инструмента для бурения горных пород. Имеется прямая корреляция количества импульсов акустической эмиссии с прочностными характеристиками твердого сплава. В области аннигиляции дефектов возникает тепловая вспышка за счет освобождения запасенной в кристаллической решетке энергии, которая составляет около 19 эВ. Освобождение запасенной энергии приводит к резкому возрастанию температуры в ограниченном объеме, затем температура практически мгновенно уменьшается до температуры окружающей область аннигиляции среды.

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В СРЕДАХ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ХАББАРДА

Э.М.Ибрагимова*, Б.Л.Оксенгендлер**, С.Е.Максимов**, Н.Н.Тураева**

*Институт ядерной физики Академии Наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан;

** Институт электроники Академии Наук Республики Узбекистан, Ташкент, Узбекистан (oksengendlerbl@yandex.ru)

Отрицательная энергия Хаббарда, реализуемая в средах с сильным электрон-ионным взаимодействием (Андерсон, 1975), радикально изменяет дефектные процессы, вплоть до превращения дефектов в дефектоны-инверсоны [1,2]. Не менее существенные изменения будут проявляться и в элементарном акте радиационного дефектообразования (РДО). Современная теория РДО, основанная на представлениях о выходе выбитого атома за пределы зоны неустойчивости (ЗН) в процессе случайного блуждания (Оксенгендлер, 1978; Винецкий, 1979), характеризуется сечением [3]:

$$\sigma_d = \frac{C_m}{(T_{\max} E)^m} \left\{ \frac{1}{m} \left(\frac{T_{\max}^m}{\tilde{U}_0^m} - 1 \right) - \frac{T_{\max}^m}{\tilde{\varepsilon}^m} \left(\exp \left(\frac{\tilde{U}_0}{\tilde{\varepsilon}} \right) \right) \left[\Gamma \left(-m, \frac{T_{\max}}{\tilde{\varepsilon}} \right) - \Gamma \left(-m, \frac{\tilde{U}_0}{\tilde{\varepsilon}} \right) \right] \right\} \quad (1)$$

Здесь E - энергия налетающей частицы, \tilde{U}_0 – потенциальная энергия смещённого атома на границе ЗН, $\tilde{\varepsilon}$ - потери смещённого атома при движении его в ЗН, T_{\max} - максимально возможная передача энергии (в лобовом столкновении) от быстрой частицы регулярному атому, C_m и m – параметры сталкивающихся частиц, $\Gamma(a,x)$ – неполная Γ -функция.

В средах с положительной энергией Хаббарда $R_0^+ = a\sqrt{e^2/(\xi a Q_m)}$ - радиус ЗН Виньярда-Кошкина, Q_m – тепловая энергия миграции междоузельного атома, ξ – диэлектрическая проницаемость среды. В средах с отрицательной энергией Хаббарда при каждой перезарядке междоузельного атома осуществляется инверсная безбарьерная миграция ($Q_m^* \rightarrow 0$), и задача смещения атома становится аналогичной проблеме разделения зарядов Онзагера (1938); приспособив этот результат к проблеме РДО, можно ввести новый радиус ЗН:

$R_0^- = e^2/(\xi kT)$; при этом остаётся справедливой формула (1). В случае дефектонного (инверсионного) характера междоузельного атома [1] годится более адекватная теория, основанная на формализме Чепмена-Колмогорова [4].

Развитые соображения позволяют дать трактовку ряду низкотемпературных аномальных радиационных эффектов в полупроводниках.

1. Оксенгендлер Б.Л., Письма в ЖЭТФ **24**, №1, 12 (1976).
2. Оксенгендлер Б.Л., Тураева Н.Н., ЖЭТФ **130**, №3(9), 472 (2006).
3. Оксенгендлер Б.Л., Тураева Н.Н., Максимов С.Е. и др., ЖЭТФ **138**, №3, 469 (2010).
4. Оксенгендлер Б.Л., Тураева Н.Н., Лапина Н.А. и др., Письма в ЖТФ **19**, №11, 59 (1993).

ВЛИЯНИЕ ГЕТЕРОГЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ВЫДЕЛЕНИЙ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ С ДИСЛОКАЦИЯМИ

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

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (d_perm@rambler.ru)

На сегодняшний день холодная пластическая деформация конструкционных материалов является наиболее эффективным из используемых способов снижения вакансионного распухания аустенитных сталей. Однако, экспериментальные данные показывают [1], что эффект дислокаций при больших степенях деформации ($> 30\%$) существенно падает. Это связано с тем, что на процессы зарождения и роста пор влияет не только плотность дислокаций, но также и характер их распределения. При больших степенях деформации формируется сложная, локально неоднородная микроструктура. Кроме того, такая структура возникает вследствие перестройки дислокаций, а также интенсивного образования дислокационных петель при облучении. При этом распухание сталей не только не снижается, а в ряде случаев даже увеличивается. Этот эффект усиливается за счет того, что дислокации и дислокационные петли обладают преференсом по отношению к межузлиям. Уменьшить преференс дислокаций к МА и стабилизировать дислокационную структуру можно легированием сталей элементами, взаимодействующими с дислокациями.

Позитроны являются хорошо известным зондом для дефектов вакансионного типа и дислокаций. Кроме того, в [2,3] нами было показано, что сегрегация атомов примеси и зарождение интерметаллидных частиц выделений типа $Ni_3Ti(Al)$ на дислокациях приводит к изменению аннигиляционных характеристик. Это позволяет изучать гетерогенное зарождение выделений на дислокациях и влияние этого процесса на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами на ранних стадиях облучения (< 1 сна), когда только формируются небольшие скопления дефектов в виде петель или трехмерных кластеров.

В этой работе исследовались сплавы Fe-36.5мас.%Ni и Fe-36.5мас.%Ni-2мас.%Ti, предварительно продеформированные (на 40%) при комнатной температуре и облученные электронами при 300К и 573К. В ходе работы было установлено, что в сплаве Fe-Ni с развитой дислокационной структурой в процессе облучения происходит образование вакансионных скоплений, не смотря на высокую плотность дислокаций. Образование скоплений обусловлено наличием большого количества областей, свободных от дислокаций. В сплаве Fe-Ni-Ti с развитой дислокационной структурой накопление дефектов в процессе облучения существенно снижено по сравнению со сплавом Fe-Ni с аналогичной структурой. Этот эффект обусловлен тем, что частицы выделений Ni_3Ti , присутствующие на дислокациях, снижают преференс дислокаций к межузельным атомам и, тем самым, усиливают взаимную рекомбинацию точечных дефектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (Проект №3074.2) и Уральского отделения РАН (Программа № 10-2-05, шифр «Импульс»).

Литература

1. Brager H.R. *J. Nucl. Mater.* **57**, 103 (1975)
2. Арбузов В.Л., Дружков А.П., Печеркина Н.Л., Данилов С.Е., Перминов Д.А., Сагарадзе В.В. *ФММ* **92**, 75 (2001)
3. A.P. Druzhkov, D.A. Perminov. *Materials Science and Engineering* **A527**, 3877 (2010)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ СЕГРЕГАЦИИ В Fe-Cr СПЛАВАХ И ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЯХ

Печенкин В.А., Чернова А.Д., Молодцов В.Л., Лысова Г.В.

ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск, Российская Федерация (var@ippe.ru)

Под облучением сплавы переходят в стационарное состояние с неоднородным составом. Радиационно-индуцированная сегрегация (РИС) приводит к существенному изменению их состава возле основных объектов микроструктуры (стоков точечных дефектов): границ зерен и образца, дислокаций, некогерентных выделений, пор и оказывает сильное влияние на фазовый состав, набухание, коррозию, охрупчивание и другие радиационные явления в сплавах. Изучение РИС и формирования радиационно-индуцированных фаз является необходимым этапом разработки новых радиационно-стойких сплавов.

В работе рассмотрены экспериментальные данные и механизмы РИС в Fe-Cr сплавах и ферритно-мартенситных сталях. Разработаны физические модели и методы расчета нестационарной РИС возле плоских (границ зерен и образца), сферических (выделений, пор) и цилиндрических (дислокаций) стоков точечных дефектов в тройных сплавах замещения с зависящими от состава диффузионными подвижностями компонентов. Методами молекулярной динамики исследована зависимость диффузионных подвижностей компонентов и энергий связи смешанных гантелей от состава Fe-Cr сплавов. Проведено моделирование РИС в таких сплавах и ферритно-мартенситных сталях, особое внимание уделено ионному облучению.

Разработанные модели позволяют предсказывать РИС возле различных объектов микроструктуры в условиях нейтронного облучения после моделирования сегрегации возле поверхности образца при экспрессном облучении ионами.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ЧАСТИЦАМИ (^{84}Kr , $E = 1.56$ МэВ/НУКЛОН) НА ПРЕВРАЩЕНИЕ В СТАЛИ 12X18H10T

А.В. Русакова, О.П. Максимкин, М.Н. Гусев

Институт Ядерной Физики НЯЦ РК, г. Алматы, Казахстан, arussakova@gmail.com

Радиационные повреждения и структурно-фазовые превращения в материалах оболочек твэлов быстрых реакторов вызываются не только нейтронами, но и тяжелыми осколками деления. В настоящей работе изучали мартенситное превращение в стали 12Х18Н10Т под воздействием облучения тяжелыми ионами. Образцы с размерами рабочей части 10×3.5×0.3 мм отжигали при 1050°С в течение 30 минут, затем часть образцов подвергли растяжению при 20°С, а часть облучению высокоэнергетическими ионами ^{84}Kr ($E = 1.56 \text{ МэВ/нуклон}$, $\Phi_1 = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$; $\Phi_2 = 4 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$) на ускорителе ДЦ-60 (Астана, Республика Казахстан).

Для исследования структурно-фазовых превращений в стали был использован растровый электронный микроскоп JSM-7500F, снабженный детектором обратно рассеянных электронов (НКЛ-детектор). Для получения текстурных характеристик образцов использовался метод анализа дифракционных картин обратно рассеянных электронов (EBSD).

Обнаружено, что в приповерхностном слое облученного образца формируются α - и ϵ -фазы. При этом увеличение флюенса ведет к увеличению количества α - фазы. Исследованы особенности морфологии α -фазы, сформировавшейся в процессе облучения.



Аустенит

α - мартенсит

Рис. 1 Карта фаз, снятая в режиме EBSD, $\times 7500$ для образца стали 12Х18Н10Т, облученного ^{84}Kr флюенсом $\Phi = 1 \cdot 10^{15}$ ион/см² (шаг сканирования 0,05 мкм)

Приведены результаты изучения особенностей мартенсита деформации в данном материале. Проанализированы сходство и различие α -фазы, образовавшейся при деформации и в результате облучения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ СОБСТВЕННЫХ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В УПРУГИХ ПОЛЯХ ДИСЛОКАЦИЙ МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОГО МОНТЕ-КАРЛО В ОЦК (Fe, V) И ГЦК (Cu) КРИСТАЛЛАХ

А.Б. Сивак*, П.А. Сивак*, В.А. Романов**, В.М. Чернов***

*РНЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия (sivak_ab@nfi.kiae.ru)

**ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск, Россия

***ОАО «ВНИИНМ», Москва, Россия

Методом кинетического Монте-Карло проведено моделирование диффузии собственных точечных дефектов (СТД) в упругих полях дислокаций различных типов в температурном диапазоне (293-1000) К в ОЦК (Fe, V) и ГЦК (Cu) кристаллах с дислокационной плотностью $\sim (0.1 - 3) \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Энергии взаимодействия между СТД

(упругие диполи) и упругими полями дислокаций рассчитывались в рамках анизотропной теории упругости.

Дальнедействующие упругие поля дислокаций в значительной степени определяют эффективность дислокаций как стоков СТД в рассматриваемом температурном диапазоне. Эффективность дислокаций уменьшается с ростом температуры и стремится к величине для линейного стока без поля взаимодействия. Подобрано аналитическое выражение, аккуратно описывающее данные моделирования.

В исследованном диапазоне дислокационных плотностей зависимость эффективности стока дислокаций от дислокационной плотности с хорошей точностью описывается линейной зависимостью от квадратного корня из дислокационной плотности. При стремлении дислокационной плотности к нулю, указанная линейная зависимость стремится к величине, примерно равной $\pi/2$.

Рассмотренные особенности поведения СТД в дислокационных упругих полях могут оказывать существенное влияние на эволюцию микроструктуры материалов под повреждающим облучением.

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Е.А. Смирнов, А.А. Шмаков, Шишкина О.С.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

E-mail: EA_Smirnov36@mail.ru

Разработана методика и впервые в экспериментальной практике рассчитаны коэффициенты и параметры радиационно-стимулированной граничной диффузии (РСГД) Ti^{44} в α -Ti и α -Zr. Показано, что в исследованном температурном интервале значения коэффициентов ускорения РСГД составляют 3,5-7,0 порядков и согласуются с аналогичными значениями для объемной радиационно-стимулированной самодиффузии в α -Ti и α -Zr [1,2]. Оцененное значение энергии миграции вакансий по границам зерен составляет величину порядка 0,9 эВ для α -Ti и α -Zr, согласующееся с аналогичным для диффузии по объему.

Разработана методологическая схема расчета коэффициентов РСГД для различного типа границ в нанокристаллических материалах с иерархической структурой. Для расчета коэффициентов РСД по границам нанокластеров использована ранее разработанная авторами модель влияния примесей и комплексов вакансия-примесь на РСГД и представления о границах нанокластеров как мощном стоке радиационных дефектов [1,2]. С использованием полученных ранее данных по РСГД в α -Ti и α -Zr и разработанной методологической схемы проведены расчеты коэффициентов и параметров РСГД по границам нанокластеров на примере указанных материалов. Показано, что при определенных значениях энергии связи комплексов и повышенном содержании примесей на стоках наблюдается значительное снижение энергии миграции вакансий по границам нанокластеров и увеличение уровня подвижности при низких температурах по сравнению с границами нанозерен на порядки.

На базе методики оценки характеристик радиационно-стимулированной взаимной диффузии в системе Zr-Nb [3] впервые в экспериментальной практике проведен расчет

коэффициентов взаимной радиационно-стимулированной граничной диффузии (РСГВД) для той же системы. На примере выбранной системы впервые проведена разработка методологии оценки температурных зависимостей коэффициентов радиационно-стимулированной взаимной диффузии в нанокристаллических материалах в зависимости от доли границ. Рассчитаны эффективные коэффициенты РСГД и РСГВД в Zr и его сплавах с Nb.

Список литературы

1. Смирнов Е.А. *ВАНТ, Материаловедение и новые материалы*, вып. 2 (63), 2004, с. 36-45
2. Смирнов Е.А., Шмаков А.А., Спиридонов А.К. *Физика и химия обработки материалов*, 2010, № 3, с. 18-25
3. Шишкина О.С., Смирнов Е.А. *ВАНТ, Материаловедение и новые материалы*, вып. 2(71), 2008, с.45-52

КИНЕТИКА РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИОННО- И РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННОЙ СЕГРЕГАЦИИ В СПЛАВЕ Fe-Cr-Ni

С.А. Стариков*, А.Р. Кузнецов*, В.В. Сагарадзе*, Ю. Н. Горностырев*, В.А. Печенкин**, И.А. Степанов**

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

**ГНЦ РФ Физико-энергетический институт, Обнинск, Россия

В настоящей работе исследована кинетика сегрегации никеля на границы зерен (ГЗ) в сплаве Fe-Cr-Ni при интенсивной пластической деформации и в условиях облучения. В обоих случаях формирование сегрегаций связано с направленными потоками точечных дефектов из объема на ГЗ, которые приводят к разделению компонент сплава в приграничной области (обратный эффект Киркендала). Кинетика образования сегрегаций изучалась путем численного решения уравнений диффузии, учитывающих рождение и поглощение точечных дефектов, а также их взаимную рекомбинацию [1, 2]. Показано, что зависимость концентрации никеля от времени облучения для радиационно-индуцированной сегрегации (РИС), которая обычно наблюдается при повышенных температурах, может быть немонотонной как для неподвижной, так и для движущейся границы. Т.о., при облучении сегрегация никеля на ГЗ в стационарном состоянии может быть меньше, чем в предшествующее ему время. Показано, что появление такой немонотонности обусловлено развитием стадии «быстрой» РИС [2]. Ширина приграничной зоны обогащения никелем монотонно возрастает со временем, достигая стационарного значения. Качественно сходный характер имеет аналогичная зависимость ширины приграничной зоны обогащения никелем от времени в случае деформационно-индуцированной сегрегации (ДИС). В отличие от случая РИС, зависимость концентрации никеля от времени облучения при ДИС являлась монотонной в силу того, что ДИС обычно наблюдается при невысоких температурах (в работе использована температура близкая к комнатной), при которых стадия «быстрой» ДИС не развивается.

Работа выполнена по теме «Структура» при поддержке УрО РАН (проект 10-2-12-БЯ) и РФФИ (проект 10-03-00113).

Литература

1. Стариков С.А., Кузнецов А.Р., Сагарадзе В.В. и др., *ФММ* 102, №2, 147 (2006)
2. Stepanov I.A., Pechenkin V.A., *Mater. Science Forum* 294-296, 775 (1999)

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.

В.А.Степанов, В.С.Хмелевская

ИАТЭ НИЯУ «МИФИ», Обнинск, Россия, khmel@iate.obninsk.ru, stepanov@iate.obninsk.ru

В условиях радиационного воздействия в материалах на нанометровых масштабах может развиваться пластическая деформация. При ионном и лазерном воздействиях это связано с эффектом увеличения объема тонкого имплантированного слоя или с термическим расширением скин-слоя. В случае каскадообразующего радиационного воздействия пластическая деформация является следствием неупругой релаксации каскадных областей размером до 10 нм, которые на коротких временах характеризуются чрезвычайно высокой энергией – до нескольких эВ на атом.

В том случае, когда масштаб развития пластической деформации оказывается меньше минимально возможного расстояния между дислокациями возникает бездислокационное упрочнение металлов, характеризующимся, как минимум, на порядок большим модулем упрочнения. Пластическая деформация оказывается связанна с образованием и эволюцией двумерных дефектов (плоскости сдвига, двойники, дефекты упаковки и т.п.). Плотность таких дефектов может превышать 10^7 см^{-1} .

Показана возможность процесса, при котором при бездислокационной пластической деформации в металлах происходит структурирование на нанометровом масштабе. Это показано в рамках теории Орнштейна-Цернике применительно к пластической деформации. Рост флуктуаций пластического течения приводит к особой нанокластерной структуре металла, обнаруживаемой микроскопическими методами. Появлению таких структур сопутствуют сильные изменения свойств (механических, электрофизических, магнитных), которые также можно связывать с известными радиационными явлениями в материалах (распухание, охрупчивание, деградация электропроводности и др.).

Приведены экспериментальные результаты, иллюстрирующие особенности пластической деформации в условиях ионной имплантации металлических материалов (металлы Zr, Ti, сплавы Fe-Ni-Cr, Ni-Cr, Cu-Ni, Fe-Cr, V-Ti-Cr, интерметаллиды – фазы Гейслера Cu_2MnAl и Ni_2MnGa). После облучения ионами различной природы в узком интервале радиационных параметров (доз, температур мишени и плотностей ионного потока) формируются так называемые R-состояния с характерной кластерной структурой (размер кластеров от 3 до 100 нм), простирающиеся до значительных глубин (эффект дальнего действия). В материалах наблюдается повышение микротвердости в несколько раз, увеличение намагниченности в 3-4 раза (в фазах Гейслера).



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, набухания 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).

ANISOTROPIC SWELLING OBSERVED DURING STRESS-FREE REIRRADIATION OF AISI 304 TUBES PREVIOUSLY IRRADIATED UNDER STRESS

F. A. Garner¹, J. E. Flinn² and M. M. Hall³

¹*Pacific Northwest National Laboratory, Richland WA*

²*Argonne National Laboratory, EBR-II Project, Idaho Falls ID (Retired)*

³*Bechtel Bettis Company, West Mifflin, PA*

A “history effects” experiment was conducted in the EBR-II fast reactor that involved the reirradiation of AISI 304 cladding and capsule tubes. It is shown that when irradiated tubes had not previously experienced stress, subsequent irradiation led to additional swelling strains that were isotropically distributed. However, when tubes previously irradiated under a 2:1 biaxial stress were reirradiated without stress the additional swelling strains were not isotropically distributed. The tubes retained a memory of the previous stress state that appears to be attempting to distribute strains in the directions dictated by the previous stress state. It is clear, however, that the memory of that stress state is fading as the anisotropic dislocation microstructure developed during irradiation under stress is replaced by an isotropic dislocation microstructure during subsequent exposure in the absence of stress.

It is also shown that once the transient regime of swelling nears completion, further changes in stress state or irradiation temperature have no influence on the swelling rate thereafter. A comparison is made with another published experiment on AISI 304 where specimens previously irradiated in the stress-free state were subsequently reirradiated under stress. In both cases the terminal swelling rate was ~1%/dpa, regardless of the distribution of strains.

ENHANCEMENT OF IRRADIATION CREEP OF NICKEL-BEARING ALLOYS IN THERMALIZED NEUTRON SPECTRA CHARACTERISTIC OF LWR AND CANDU[®] REACTORS

F. A. Garner¹, M. Griffiths² and L. R. Greenwood³

¹*Radiation Effects Consulting, Richland WA USA*

²*Atomic Energy of Canada Limited, Chalk River, Ontario, Canada*

³*Pacific Northwest National Laboratory, Richland WA USA*

Studies of neutron-induced stress relaxation conducted in water-moderated reactors prior to the early 1980s derived irradiation creep rates that were later found to be significantly higher than were derived from later experiments conducted in fast reactors. More recent experiments continue this trend. The question arises whether water-moderated neutron spectra indeed cause more irradiation creep per dpa or whether some other factor is acting to cause an apparent increase. The answer now appears to be a combination of these two possibilities, but with both arising from an identical but previously unanticipated source.

It was in the early 1980s that the $^{58}\text{Ni}(n, \gamma)^{59}\text{Ni}$ reaction with thermal neutrons was recognized as a precursor to enhanced helium production via the $^{59}\text{Ni}(n, \alpha)$ reaction and in the late 1980s to enhanced hydrogen production via the $^{59}\text{Ni}(n, p)$ reaction. Both of these reactions are highly exothermic and produce unexpectedly high amounts of additional atomic displacements. The unrecognized increases in dpa rate lead to calculations of artificially high

rates of creep in thermalized spectra. Additionally, the generation of helium and hydrogen-filled bubbles causes a new creep mechanism called bubble-enhanced creep to occur, with the creep rate increasing by both processes.

In some extreme cases of very highly thermalized spectra operating on high nickel alloys (X750 in CANDU far-from-core positions) the ^{59}Ni contributions totally dominate the production of dpa, producing total relaxation of preloaded springs in less than 3 years whereas previous predictions based on in-core tests predicted relaxation would occur only after 600-700 years.

PECULIARITIES OF PLASTIC DEFORMATION PHENOMENA IN HIGH-IRRADIATED AISI 304 AND AISI 316 STAINLESS STEELS

Gussev M.N.^{*,**}, Busby J.T.^{*}, Byun T.S.^{*}

^{*} Oak-Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA (gussevmn@ornl.gov)

^{**} University of Tennessee, Knoxville, TN, USA

Recently the “true stress – true strain” curves have been widely published and discussed for irradiated materials. The “true curves” have many advantages compared to the traditional engineering curves. For example, the true curves give the ability to investigate the real deformation behavior, but few papers are devoted to irradiated material “true curves” analytical presentation. In metastable chromium-nickel steels the deformation hardening is under the influence of other phenomena. These phenomena include formation and accumulation of α -martensite. It influences stress-corrosion resistance and other material performance measures. Despite practical importance and scientific interests of martensitic transformation, it has not been thoroughly investigated for irradiated materials. Other key factor influencing material property and plastic flow process is grain size. In some cases due to fabrication methods the material grain size may be as large as 200-1000 micrometers. It is interesting from a scientific and practical point of view to investigate large grain irradiated material.

In the present work, the results of plastic flow, deformation hardening and martensitic $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation are described and analyzed for AISI 304 and AISI 316 stainless steels of industrial heats and for the same steels with molybdenum and hafnium additions. Also samples of cast irradiated AISI 316 steel were tested. Flat samples with gauge dimensions $7.6 \times 1.5 \times 0.75$ mm and round samples with gauge diameter 2.1 mm and length 12 mm were tested (tensile, compression and indentation tests) at temperature intervals of RT-290°C. Post-deformation structure investigation of samples was performed with using of scanning electron microscopy and EBSD-analyze. For martensite content measurement the ferroprobe unit and magnetic saturation methods were used.

The standard engineering mechanical properties, values of critical stress σ_{cr} and strain ε_{cr} corresponding to the start of martensitic transformation were defined. By using optical extensometry, the diagrams “true stress σ – true strain ε ” were obtained. For some cases during archive and literature data analysis, calculated true curves were used. Kinetic curves of martensite accumulation were obtained as result of tensile, compression and ball indentation tests. The influence of irradiation on austenite stability of investigated steels are estimated and discussed. Peculiarities of irradiated steels plastic flow are investigated and analyzed with using of different plasticity physics equations (Ludwig, Swift, Holloman). Impact of irradiation on parameters of these equations is discussed.

EFFECTS OF OVERSIZED SOLUTES ON RADIATION-INDUCED SEGREGATION IN AUSTENITIC STAINLESS STEELS

M.J. Hackett*, J.T. Busby**, M.K. Miller**, and G.S. Was***

* *TerraPower LLC, Bellevue, WA 98004 (mhackett@terrapower.com)*

** *Materials Science and Technology Division, Oak Ridge National Lab, Oak Ridge, TN 37831*

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

Radiation-induced segregation (RIS) in austenitic stainless steels is characterized, in part, by a detrimental loss of Cr at grain boundaries caused by irradiation-produced defect diffusion to sinks. Since RIS is considered to be part of a complex process that increases the susceptibility for irradiation-assisted stress corrosion cracking (IASCC) in light water reactors [1, 2], reducing RIS may benefit IASCC susceptibility.

One method that has been examined for suppressing RIS is the addition of oversized solute atoms to enhance recombination and reduce defect diffusion to sinks. The primary objective of this work is to establish the mechanism by which oversized solute atoms reduce RIS in stainless steel. A solute-vacancy trapping mechanism and its effect on RIS were incorporated into the composition-dependent modified inverse Kirkendall (MIK) model [3]. The trapping model (MIK-T) revealed that the binding energy was the most important parameter to the trapping model and that large binding energies were required for significant reductions in RIS [4].

Austenitic stainless steels with Zr or Hf additions (compositions shown in Table 1) were irradiated with 3.2 MeV protons at 400°C and 500°C [5]. Grain boundary Cr depletion was measured with transmission electron microscopy and showed a dramatic reduction in the amount of Cr depletion up to 3 dpa at 400°C and 1 dpa at 500°C. However, the experiments showed that the effectiveness of the solute additions disappeared above 3 dpa at 400°C and above 1 dpa at 500°C. The loss of solute effectiveness with increasing dose is attributed to a loss of oversized solute from the matrix due to growth of carbide precipitates. Solute concentrations were based on an imaging analysis of carbide sizes and densities to determine the amount of solute remaining in solution. Atom probe measurements observed the loss of oversized solute in solution as a function of irradiation dose. These observations were supported by diffusion analysis suggesting that significant solute diffusion by the vacancy flux to precipitate surfaces occurs on the time scales of proton irradiations.

POSTIRRADIATION EXAMINATION OF AFC-1 METALLIC TRANSMUTATION FUELS AT 8 AT.%

B.A. Hilton*, D.L. Porter** and S.L. Hayes**

**TerraPower, LLC, Bellevue, Washington, USA (bhilton@terrapower.com)*

***Idaho National Laboratory, P.O. Box 1625 MS 6188, Idaho Falls, ID, USA*

Introduction

The U. S. Advanced Fuel Cycle Initiative (AFCI) seeks to develop and demonstrate the technologies needed to transmute the long-lived transuranic actinide isotopes contained in spent nuclear fuel into shorter-lived fission products, thereby dramatically decreasing the volume of material requiring disposition and the long-term radiotoxicity and heat load of high-level waste

sent to a geologic repository. The AFC-1 irradiation tests are designed to evaluate the feasibility of the use of actinide bearing fuel forms in advanced sodium-cooled fast reactors for the transmutation of transuranic elements from nuclear waste [1]. AFC-1B, AFC-1F and AFC-1Æ are the first set of irradiation tests to be studied. AFC-1B and AFC-1F contain non-fertile and low-fertile actinide bearing metallic alloy fuel compositions. AFC-1Æ contains both non-fertile and low-fertile actinide bearing nitride fuel compositions and is discussed in a separate paper [2]. The tests were irradiated in the Idaho National Laboratory's (INL) Advanced Test Reactor (ATR) to an intermediate burnup of 4 to 8 at.% ($3.5 - 8.9 \times 10^{20}$ fissions/cm³). Sibling tests are being irradiated to reach a final burnup up to 40 at.%.

Experiment Description

The AFC-1B, AFC-1F and AFC-1Æ irradiation tests were designed to provide irradiation performance data at intermediate burnups of 4 to 8 at.% on non-fertile and fertile actinide transmutation fuel forms containing plutonium, neptunium and americium isotopes [Refs. 3-6]. AFC-1B contains four non-fertile metallic fuel compositions (Pu-12Am-40Zr, Pu-10Am-10Np-40Zr, Pu-60Zr and Pu-40Zr). There are two Pu-12Am-40Zr rodlets irradiated to different burnup. AFC-1F contains four fertile metallic fuel compositions (U-28Pu-4Am-2Np-30Zr, U-27Pu-3Am-2Np-40Zr, U-34Pu-4Am-2Np-20Zr, and U-29Pu-7Am). There are two rodlets each of the U-28Pu-4Am-2Np-30Zr and U-27Pu-3Am-2Np-40Zr compositions.

The rodlet assembly is designed as a miniature fast reactor fuel rod with a standard diameter and reduced length. The rodlet assembly consists of the metallic or nitride fuel column, sodium bond, stainless steel Type 421 (HT-9) cladding and an inert gas plenum. A stainless steel capsule assembly contains a vertical stack of six rodlet assemblies. Details of the capsule and rodlet radial dimensions of the metallic and nitride fuel specimens were provided previously [3].

Postirradiation Examinations (PIE)

Preliminary results of postirradiation hot cell examinations of AFC-1B and AFC-1F irradiation tests are reported for five non-fertile metallic alloy transmutation fuel rodlets and six low-fertile metallic alloy transmutation fuel rodlets. Non-destructive examinations on the eleven metallic fuel rodlets included visual examination, dimensional inspection, gamma scan analysis, and neutron radiography. Detailed examinations, including fission gas puncture and analysis, ceramography and isotopics and burnup analyses, were performed on three non-fertile and two low-fertile metallic alloy transmutation fuel rodlets.

Figure 1 displays the fission gas release burnup dependence of the 11 metallic alloy rodlets and includes data of U-xPu-10Zr (i.e. x=0 - 26) for comparison. The fission gas release behavior of the transmutation metallic fuels follows the same trend as the U-xPu-10Zr fuel when correlated with fission density. There is negligible amount of fission gas release until a fission density of $\sim 6.0 \times 10^{20}$ f/cm³. At this threshold burnup, there is a rapid increase in fission gas release that is displayed by the AFC-1 metallic fuel samples similar to U-xPu-10Zr behavior. It is significant that there is no difference in fission gas release behavior between the non-fertile (non-uranium bearing) and low-fertile (uranium bearing) compositions. Based on gas release at this intermediate burnup, it is predicted that fission gas release of the transmutation fuels at higher burnup will show a slightly increasing plateau. This will be evaluated during PIE of the sibling experiments AFC-1D and AFC-1H.

Comparisons of metallography indicate the transmutation metallic alloy fuels show similar microscopic and swelling characteristics as U-xPu-10Zr fuels at equivalent burnup. The U-xPu-10Zr metallic alloy fuels historically exhibit three stages of porosity development and swelling: 1. incubation characterized by very low swelling rate up to a threshold burnup of $\sim 0.35 \times 10^{21}$ f/cm³ (1.0 at.% U-xPu-10Zr), 2. transition characterized by rapid fission gas driven swelling until a network of open porosity fully develops, the fuel contacts the cladding and majority of fission

gas is released occurring at burnups between $\sim 0.35 - 1.0 \times 10^{21} \text{ f/cm}^3$ (1.0-3.0 at.% U-xPu-10Zr) and 3. stable irradiation change characterized by a slowly increasing plateau due to accumulation of solid fission products and retained fission gas occurring at burnups $> 1.0 \times 10^{21} \text{ f/cm}^3$ (3.0 at.% U-xPu-10Zr). Fig. 2 displays metallograph of the low-fertile metallic alloy composition at two burnups, 0.42 and $0.60 \times 10^{21} \text{ f/cm}^3$, indicating that the transmutation metallic fuels transition stage occurs at fission density around $0.6 - 1.2 \times 10^{21} \text{ f/cm}^3$. The observation of the transition behavior being similar to U-xPu-10Zr fuels provides another indication that the fuel performance of metallic fuel forms is similar for a wide range of actinide compositions and zirconium content.

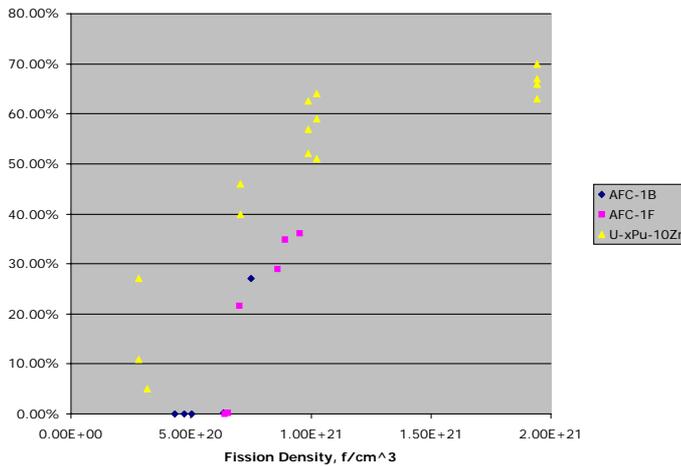


Fig. 1. Fission gas release from metallic alloy transmutation fuel rodlets irradiated in AFC-1B and AFC-1F Capsules and U-xPu-10Zr (x=0 – 26)

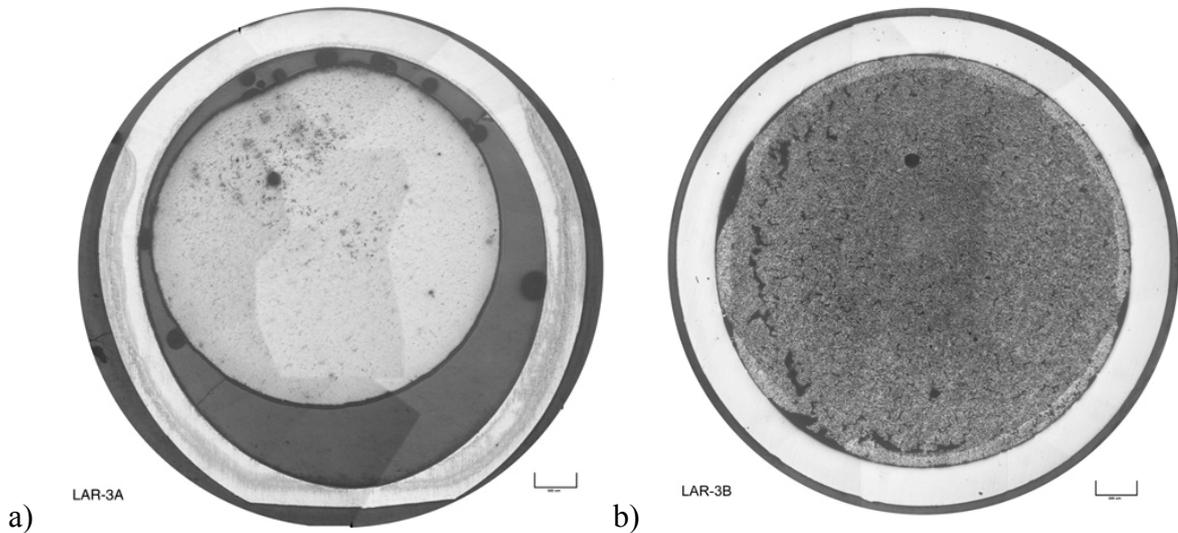


Fig. 2. Transverse cross-sectional metallography montages of U-29Pu-4Am-2Np-30Zr samples a) Mount LAR-3A irradiated to $0.42 \times 10^{21} \text{ f/cm}^3$ (6.4 at.%) burnup showing developing porosity and swelling and b) Mount LAR-3B irradiated to $6.0 \times 10^{20} \text{ f/cm}^3$ (8.9 at.%) burnup showing fuel fully swollen leading to fuel-cladding contact and initial formation of fuel restructuring with central dense zone and porous annular zone

Results

Preliminary postirradiation hot cell examinations of AFC-1 irradiation tests were completed for eleven metallic alloy transmutation fuel rodlets. The preliminary conclusions are summarized below:

1. No rodlet failures were observed in the actinide-bearing metallic fuel forms irradiated to

4-8 at.%.

2. The irradiation swelling and fission gas release of metallic alloy transmutation fuel compositions Pu-TRU-40Zr and U-xPu-TRU-yZr ($x=25-34$; $y = 20-40$) is similar to that of U-xPu-10Zr ($x=0-26$).
3. The threshold burnup of metallic alloy transmutation fuels to exhibit significant swelling and fission gas release is $\sim 0.6 \times 10^{21}$ f/cm³.

References

1. Hayes S. L., Hilton B. A., Meyer M. K., Chang G. S., Ingram F. W., Pillon S., Schmidt N., Leconte L. and Haas D., "U. S. Test Plans for Actinide Transmutation Fuel Development," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 87: 353, American Nuclear Society Winter Meeting, Washington, DC, 17-21 November 2002.
2. Hilton B., Porter D., Hayes S., "Postirradiation Examination of AFCI Nitride and Oxide Transmutation Fuels," *Embedded Topical Meeting on Nuclear Fuels and Structural Materials for the Next Generation Nuclear Reactors*, Reno, Nevada, 4-8 June 2006.
3. Hilton B. A., Hayes S. L., Meyer M. K., Crawford D. C., Chang G. S., Ambrosek R., "The AFC-1Æ and AFC-1F Irradiation Tests of Metallic and Nitride Fuels for Actinide Transmutation," *Embedded Topical Meeting on Advanced Nuclear Energy Systems (GLOBAL 2003)*, New Orleans, Louisiana, 16-20 November 2003.

STUDIES OF THE CORROSION OF MATERIALS BY LEAD BISMUTH EUTECTIC (LBE) AT UNLV, USA

A. L. Johnson, J. W. Farley, D. Koury, and B. Hosterman
 University of Nevada, Las Vegas, USA (Allen.Johnson@unlv.edu)

This paper will review the work investigating the corrosion of materials by oxygen controlled LBE conducted at UNLV and elsewhere in the US, focusing on the efforts the Johnson/Farley group. The effects of composition and surface modification on LBE corrosion were examined. Austenitic stainless steels (316 and D9) (exposed at IPPE, Russia) will be highlighted. Studies of the effects of silicon in iron-silicon alloys (exposed to LBE at Idaho National Laboratory, USA) and aluminum in steels (exposed in the DELTA loop, Los Alamos National Laboratory, USA) in LBE corrosion will be discussed. Theoretical descriptions of the corrosion mechanism (based on the available space model) and new characterizations using Raman spectroscopy will be mentioned. Work in progress with radiation enhanced LBE exposures will be outlined.

References

1. Johnson, A.L. in *Proc. of The 6th Int. Meeting on Nucl. Appl. of Accel. Tech. (AccApp'03)*, *Amer. Nucl. Soc.*, 2004 ISBN: 0-89448-676-4.
2. Johnson, A.L in *J. Nuclear Materials*, **328**, 88-94 (July 2004)
3. Johnson, A.L. in *J. Nuclear Materials*, **350**, 221-231 (2006)
4. Hosemann, P. in *J. Nuclear Materials*, **381**, 211-215 (2008)
5. Johnson, A.L. in *J. Nuclear Materials*, **350**, 221-231 (2006)
6. Hosemann, P. in *J. Nuclear Materials*, **373**, 246-253 (2008)

7. Hosemann, P. in *J. Nuclear Materials*, **375**, 323-330 (2008)

THE EFFECT OF LOW DOSE NEUTRON IRRADIATION ON THE TENSILE AND IMPACT PROPERTIES OF A SERIES OF TITANIUM ALLOYS.

Pierre Marmy*

*SMA, SCK•CEN, Boeretang 200, 2400 Mol, Belgique (pierre.marmy@sckcen.be)

Structural materials used in the first wall of fusion reactors or in any type of nuclear power device will become activated and will represent an environmental hazard during their storage. Titanium is the natural metallic element having the fastest radioactive decay. Binary or ternary titanium alloys can be designed to keep this basic property and at the same time improve the mechanical properties of pure titanium. The most widely used titanium alloy is Ti6Al4V. This metastable alpha-beta alloy suffers from structural instabilities when exposed to radiations. Vanadium precipitates are generated deteriorating the ductility and inducing brittleness. [1, 2]. The situation is better with alpha alloys. A few available results indicate that the resistance to irradiation is improved compared to alpha- beta alloys [3]. Nevertheless the unique industrial alpha alloy available Ti5Al2.5Sn suffers also from phase instabilities and is not an excellent low activation material due to the presence of aluminium [2].

In this study, a series of simple ternary and binary alloys have been developed in the laboratory, based on the substitution of Al by Zr. Since the mechanical strength of titanium is strongly dependent on the forging process, a beta anneal heat treatment has been given to all alloys in order to have a better comparison perspective. The tensile and impact properties before and after irradiation to low dose, have been followed together with the properties of pure titanium.

Alpha and alpha-beta industrial alloys have the best strength but show poor low temperature impact properties after irradiation. Pure titanium has good impact properties after irradiation but has a relatively low strength. As expected, the impact strength correlates well with the strength. The impact properties deteriorate rapidly with irradiation hardening.

The results indicate that the most promising composition is a binary alloy with about 5% Zr.

References

1. Marmy, P. and T. Leguey, *Impact of irradiation on the tensile and fatigue properties of two titanium alloys*. Journal of Nuclear Materials, 2001. **296**: p. 155-164.
2. Tähtinen, S., P. Moilanen, B.N. Singh, and D.J. Edwards, *Tensile and fracture toughness properties of unirradiated and neutron irradiated titanium alloys*. Journal of Nuclear Materials, 2002. **307-311**: p. 416-420.
3. Kozhevnikov, O.A., N.B. Odintsov, A.M. Parshin, S.A. Fabritziev, and T.A. Jakovleva, *Neutron irradiation influence on hydride generation and distribution mechanism in titanium alpha alloys*. Physics of Material Damage and Radiation Material Science, 1979. **1-9**(Nuclear Science and Technique Problems): p. 71-74.

MATERIAL'S CHALLENGES FOR TRAVELING WAVE REACTORSK. D. Weaver¹, T. Ellis¹, J. R. Gilleland¹ and F. A. Garner²¹TerraPower, LLC, Bellevue WA USA²Radiation Effects Consulting, Richland WA USA

TerraPower, a private company, is developing and engineering a novel reactor called a Traveling Wave Reactor (TWR). The TWR exploits the "breed and burn" principle first proposed in 1958 by Russian scientist S. Feinberg as a way to extract more of the energy in uranium than can be reached in thermal reactors. Like all fast reactors, TWRs could significantly reduce enrichment requirements, but unlike many other fast reactor concepts, TWRs do not require reprocessing in order to achieve high energy utilization. TWRs use depleted or natural uranium as their primary fuel and require only a small amount of enriched uranium at start-up. A TWR core with a 60-year operating life, for example, would require as little as 7% of the separative work units (SWUs) that an LWR with equivalent electrical generation would consume. The TWR therefore would never need refueling. The longevity of a TWR core depends on the size of the initial charge of natural or depleted uranium and on the fuel burn-up achieved during reactor operation.

Last year a conceptual design was completed of a 3,000 MWt metal-fuel, sodium-cooled TWR plant. The conceptual design of a smaller (1,200 MWt) demonstration TWR labeled TP-1 will be completed this year. TP-1 is slated for beginning of operation in 2020. In addition, an aggressive fuels and materials development program has been initiated to answer issues associated with this class of reactor.

As a consequence of the TWR strategy the cladding and duct materials will be exposed to very high neutron exposures, exceeding 400 dpa. TP-1 envisions the use of ferritic martensitic alloys as the major structural material. A review will be presented of materials issues for TWRs and the actions being taken to address these issues.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ
ГАЗОВОЙ ПОРИСТОСТИ В U-Мо ТОПЛИВЕ ОТ УСЛОВИЙ
ОБЛУЧЕНИЯ**

С.А. Аверин, В.Л. Панченко, О.А. Голосов

ОАО «ИРМ», г. Заречный, Россия (irm@irmatom.ru)

Для исследовательских реакторов с топливом низкого обогащения по урану-235 перспективным является U-Мо дисперсионное топливо. В процессе облучения в топливе происходит образование пористости за счет выделения ГПД. Послереакторными исследованиями облученного U-Мо/Al дисперсионного топлива выявлено, что его стабильное поведение в реакторных условиях зависит от способности U-Мо сплава удерживать в себе газообразные продукты деления. Поэтому важно исследовать морфологию образующихся пор и закономерности изменения их количественных характеристик от параметров облучения.

Методами растровой электронной микроскопии и количественного стереометрического анализа [1] исследованы параметры пористости дисперсионного U-Мо/Al топлива после облучения до эквивалентных выгораний 93 % в исследовательском реакторе ИВВ-2М (г. Заречный).

При проведении растровых электронно-микроскопических исследований отдельно во вторичных и отраженных электронах, было установлено, что поры имеют кристаллографическую огранку, соответствующую октаэдру, и определена толщина слоя, которая формирует контраст от пор. Параметры пористости рассчитывались с учетом толщины поверхностного слоя, в котором формируется контраст от пор.

Минимальная пористость наблюдается в топливных частицах (ТЧ) с минимальным выгоранием. Поры преимущественно образуются по границам зерен топлива. С увеличением выгорания распределение пор становится равномерным по всему объему частиц топлива, размер пор возрастает. Параметры пористости зависят не только от выгорания, но и от скорости деления топлива и температуры облучения. Установлено, что удельный объем газовых пор возрастает с выгоранием до максимума и дальнейшее его снижение совпадает с началом критического формоизменения твэла, связанного с началом образования «вздутия» оболочек твэлов. Таким образом, удельный объем пор в частицах топлива можно использовать в качестве критериального параметра для определения граничных условий безопасной эксплуатации твэлов.

Литература

1. Салтыков С.А. *Стереометрическая металлография*. - М.: Металлургия, 1970.- 376 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНОУПРОЧНЕННОЙ ОКСИДАМИ СТАЛИ EUROFER ODS ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ ДО 32 СНА

А.А. Алеев, С.В. Рогожкин, А.Г. Залужный, Н.А. Искандаров, А.А. Никитин, Н.Н. Орлов,
М.А. Козодаев

*Государственный Научный Центр Российской Федерации -
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, Москва, Россия
(Andrey.Aleev@itep.ru)*

Разрабатываемые в настоящее время дисперсно-упрочненные оксидами стали являются перспективными конструкционными материалами ядерных и термоядерных реакторов нового поколения. Более высокие механические свойства и радиационная стойкость по сравнению с ферритно-мартенситными сталями в значительной мере обусловлены наличием в матрице дисперсных и чрезвычайно стабильных оксидных частиц размерами начиная с нескольких нанометров.

В данной работе проведены томографические атомно-зондовые исследования необлученной и облученной стали ODS EUROFER (9%-CrWVTa) с добавлением 0.5% массовой доли частиц Y_2O_3 . Облучение проводилось в реакторе БОР-60 при 330°C до повреждающей дозы равной 32 сна. Исследования показали, что в исходном состоянии имеется значительная концентрация ($\sim 2 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$) кластеров, обогащенных атомами иттрия, кислорода, ванадия и азота. Средние размеры этих кластеров составляют 1.5-3 нм.

Атомно-зондовые образцы для облученного состояния изготавливались из половинок после Шарпи теста проводимого при двух температурах: 330°C и 550°C. Анализ облученного состояния показал, что воздействие облучения приводит к изменению химического состава обнаруженных в исходном состоянии оксидных частиц. В них преимущественно наблюдались атомы иттрия и кислорода, незначительное обогащение

хромом, и не наблюдались ванадий и азот. Концентрация иттрия и кислорода в матрице увеличилась в разы под облучением. Плотность частиц составила порядка $5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Таким образом, проведенное исследование показало, что наномасштабное состояние дисперсно-упрочненной оксидами стали EUROFER ODS является достаточно стабильным при дозах облучения 32 сна, хотя происходят изменения состава элементов тонкой структуры.

Работа выполнена при поддержке госкорпорации Росатом и при частичной поддержке РФФИ (грант 08-02-01448-а).

ТЕРМИЧЕСКИ И РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В МОДЕЛЬНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЯХ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

¹⁾ В.И.Воронин, ^{1,2)} И.Ф.Бергер, ¹⁾ В.В.Сагарадзе, ¹⁾ Б.Н.Гощицкий

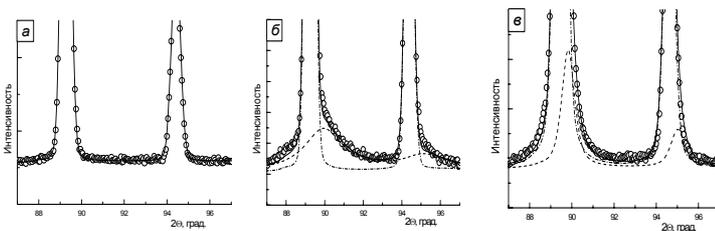
¹⁾ Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия (voronin@imp.uran.ru)

²⁾ Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург

В докладе рассмотрены преимущества использования дифракции нейтронов по сравнению с рентгеновскими или электронно-микроскопическими методами для исследования структурных дефектов и микронапряжений, выделения новых мелкодисперсных частиц (наночастиц) в объемных материалах после термического или радиационного воздействия на примере образцов сталей 40X4Г18Ф2, H26X5T3 и Fe65Cr4Ni15Mo3Ti. Образцы были состарены при температурах 600°C и 700°C в течение 1, 6 и 12 часов и/или облучены быстрыми нейтронами при температуре ~80°C.

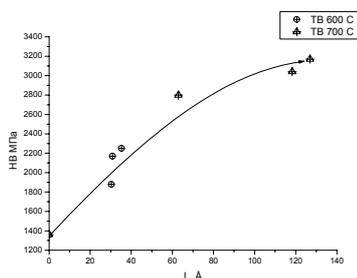
Показано, что процессы происходящие при старении и облучении быстрыми нейтронами во многом сходны. Так после старения в образцах 40X4Г18Ф2 на подошвах пиков возникают диффузные максимумы, обусловленные выпадением карбида ванадия

(рис.1). Облучение увеличивает объем VC. Такие же процессы наблюдаются в H26X5T3 и Fe65Cr4Ni15Mo3Ti, но выпадает фаза Ni₃Ti. Найдены зависимости параметров решетки от времени старения и флюенса быстрых нейтронов. Из анализа профиля



линий получены данные о размерах выделяющихся частиц и величинах микронапряжений, возникающих при этом в объеме исходной матрицы. Дана интерпретация взаимосвязи выпадающих частиц и их объема с величинами микронапряжений на основе расчета мощности дефектов, используя классификацию

Кривоглаза [1]. На основе экспериментальных данных найдена корреляция между размером выделений и изменением твердости НВ в исследованных сталях (рис.2).



1. М.А. Кривоглаз «Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах», Киев, Наукова думка, 1983, 407 стр.

СТРУКТУРНАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ В СПЛАВЕ U-6Nb И УСЛОВИЯ ЕЕ УСТРАНЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ АУСТЕНИТНОГО ЗЕРНА

Ю.Н. Зуев*, В.В. Сагарадзе**, С.В. Бондарчук*, А.Е. Шестаков*, И.Л. Святков*

**Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ, Снежинск*

***Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург*

В совместных исследованиях ИФМ и ВНИИТФ на сплаве U-6Nb была обнаружена структурная наследственность, заключающаяся в том, что при нагреве под закалку или нормализацию в процессе α - γ превращения восстанавливается размер, форма и ориентация зерен высокотемпературной γ -фазы. Восстановление крупных аустенитных зерен является причиной появления крупнокристаллических участков излома и снижения механических свойств при 20⁰С. С помощью одной термообработки ранее не удавалось измельчить крупное исходное зерно высокотемпературной фазы. В сплаве U-6Nb, как и в сплавах титана, рекристаллизация от фазового наклепа не развивалась. С целью устранения структурной наследственности были предложены четыре основных режима предварительной обработки исходно крупнозернистых образцов: холодная деформация α -фазы, ее рекристаллизация, проведение эвтектоидного распада и старения мартенсита. После нагрева до 1000⁰С часть образцов подвергали эвтектоидному распаду при 500-600⁰С, часть образцов закачивали в воде на мартенсит и подвергали 10ч. старению при 600⁰С, часть закаленных образцов деформировали на 20-50% и рекристаллизовали в α -состоянии при 600⁰С. Обработанные таким образом образцы нагревали до 700-1000⁰С и определяли условия измельчения исходного аустенитного зерна. Заметное измельчение зерна высокотемпературной γ -фазы (в 5-10 раз) наблюдали при использовании холодной деформации, рекристаллизации в α -состоянии и эвтектоидного распада. Можно ожидать, что устранение структурной наследственности с измельчением зерна позволит изменить механизм пластической деформации U-6Nb и повысить сопротивление зарождению и развитию трещин при ударно-волновом нагружении.

СТРУКТУРНЫЕ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ НАПЛАВКИ НА КОРПУСНУЮ РЕАКТОРНУЮ СТАЛЬ

Ю.Н. Зуев*, С.М. Новгородцев*, В.В. Сагарадзе**, Н.В. Катаева**, И.Л. Святков*,
Е.А. Шестакова*

**Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ, Снежинск*

***Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург*

С помощью световой и электронной микроскопии исследовано изменение структуры как наплавки из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T, так и основного материала корпуса реактора из стали 12ХГМФА. Структурные исследования наплавленного слоя из нержавеющей стали показали наличие в аустенитной структуре небольшого количества дельта-феррита в виде тонких прослоек по границам зерен и субзерен. Исследование на сканирующем электронном микроскопе фирмы JEOL с проведением пошагового микроанализа на различные легирующие элементы позволили обнаружить в литой наплавке внутризеренную ликвацию по хрому и никелю. Концентрация хрома локально

изменяется по зерну от 20 до 17,8 мас.%, никеля – от 10,5 до 9 %, марганца – от 1,2 до 2,1 %. Сохранение дендритной ликвации объясняется тем, что при выполнении наплавки не было проведено высокотемпературного гомогенизирующего отжига.

Был выполнен анализ глубины взаимного проникновения легирующих элементов в переходном слое от аустенитной наплавки (сталь 12X18H10T) к мартенситоподобной структуре конструкционной стали 12ХГМФА в процессе наплавки. При пошаговом микроанализе через каждые 3 мкм переходной зоны были определены концентрации Fe, Cr, Ni, Mn. Эта переходная зона размером 33 мкм распространяется примерно на равные расстояния от границы наплавки, как в сторону нержавеющей стали, так и в сторону конструкционной стали. Это обстоятельство необходимо учитывать, так как в обедненной хромом и никелем переходной зоне нержавеющей стали образуется мартенсит, ухудшающий пластические характеристики стали. Эта зона имеет примерно состав стали X12H7Г1, в которой мартенситная точка находится в районе 100 – 200 °С и при охлаждении наплавки реализуется мартенситное превращение.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 3074.2).

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БН-600 НА ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОСТИ И ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ ЧС68 И ЭК164.

А.В. Козлов¹⁾, И.А. Портных¹⁾, Е.Н.Щербаков¹⁾, В.С. Шихалев¹⁾, П.И. Яговитин, Н.М. Митрофанова²⁾, О.И.Иванова²⁾

¹⁾ ОАО «ИРМ», Заречный, Россия (irm@irmatom.ru)

²⁾ ОАО ВНИИНМ, Москва, Россия

Приведены результаты исследований физико-механических свойств стали ЧС68, являющейся штатным материалом оболочек твэлов реактора БН-600, и стали ЭК164, предлагаемой в качестве более радиационно-стойкого материала. В исходном состоянии удельное электросопротивление стали ЭК164 на ~5 % выше, чем у стали ЧС68, а модуль Юнга на столько же ниже. Наибольшее различие из физических свойств наблюдается у коэффициента Пуассона: у стали ЭК164 его величина составляет ~0,17, а у стали ЧС68 – около 0,30.

После облучения в реакторе БН-600 до повреждающих доз ~78 сна электросопротивление обеих сталей существенно увеличивается, а модули упругости уменьшаются. В качестве характеристик исходного состояния при анализе изменений физико-механических свойств (ФМС) использованы значения, полученные на участках оболочек твэлов, облученных при температуре 370 °С до дозы ~0,5 сна. Величина изменений ФМС образцов из стали ЭК164 меньше, чем у образцов из стали ЧС68. Основной вклад в изменение электросопротивления и модулей упругости дает распухание, которое у стали ЭК164 значительно меньше, чем у стали ЧС68. Относительные изменения ФМС хорошо описываются формулами, полученными в ранее разработанной двухкомпонентной модели [1]:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{5 \cdot S}{4 \cdot S + 6} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = \frac{1}{(1+S)^2} - 1, \quad (2)$$

где $\Delta R, \Delta E$ - изменения электросопротивления и модуля Юнга;

R_0, E_0 - электросопротивление и модуль Юнга стали в исходном состоянии;

S - набухание.

Величина коэффициента Пуассона у оболочек разных твэлов различается и практически не изменяется с повреждающей дозой. Отмечена корреляция между значением коэффициента Пуассона и величиной набухания оболочек твэлов обеих сталей.

Литература

1. Kozlov A.V., Shcherbakov, E.N., Averin, S.A., Garner, F.A. The Effect of Void Swelling on Electrical Resistance and Elastic Moduli in Austenitic Steels // *Effects of Radiation on Materials*, ASTM STP 1447. 2004. P. 66-67.

МЕХАНОАКТИВАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНО-ОКИСЛЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТРИЦ КАК МЕТОД СОЗДАНИЯ РЕАКТОРНЫХ ДУО-СПЛАВОВ НОВОГО КЛАССА

В.В. Сагарадзе, К.А. Козлов, Н.В. Катаева, В.А. Шабашов, А.В. Литвинов,
Н.Ф. Вильданова

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

Механическое легирование в последние годы привлекает всё большее внимание специалистов, работающих в области конструирования материалов для атомной энергетики, в том числе, жаропрочных дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) сталей и сплавов, устойчивых к высокотемпературному набуханию при облучении быстрыми нейтронами. Традиционное использование в качестве носителей кислорода оксидов иттрия с высокой энергией межатомной связи не всегда технологически выгодно и требует значительно большего времени обработки в шаровых мельницах для их растворения в стали, чем при использовании малоустойчивых оксидов железа (например, гематита Fe_2O_3). Установлено, что деформация оксидов железа в смеси с металлами, обладающими высоким сродством к кислороду (Ti, Y, Zr), а также со сталями, легированными химическим активными металлами, протекает с активным растворением исходных оксидов железа и формированием пересыщенных твердых растворов и вторичных упрочняющих наноксидов элементов матрицы. Однако этот метод можно ещё более упростить, если проводить предварительное поверхностное окисление мелкодисперсного порошка железа или стали с образованием на поверхности частиц оксидной пленки, а затем путем деформации растворять ее в стальной матрице.

Окисленные порошки железа и легированных сталей подвергали интенсивной деформации в мельнице в течение 4...16 ч в атмосфере аргона для растворения поверхностных оксидов в матрицах железа и сталей. Скомпактированные сдвигом под давлением диски подвергали отжигу при температурах 750, 900 и 1100⁰С (30 мин) с целью получения наноразмерных упрочняющих оксидов железа. С увеличением температуры отжига наряду с образованием оксидов железа происходит уменьшение плотности дислокаций, рекристаллизация ферритной матрицы и увеличение размера зерен. При этом частицы оксидов железа становятся более ясно видимыми на фоне рекристаллизованной

матрицы. Частицы остаются очень мелкими даже при нагреве до 1100°C . Средний размер частиц составляет 3,1 нм, а их концентрация равна $2,8 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$, что достаточно для значительного повышения прочности и жаропрочности исходных металлических матриц.

Работа поддержана проектами РФФИ (№ 10-03-00113, 10-02-90408), МНТЦ (проект № 3074.2) и Президиума УрО РАН (проект № 10-2-12-БЯ).

ВЛИЯНИЕ СЖИМАЮЩИХ И РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАДИАЦИОННОЕ РАСПУХАНИЕ И ДЕФОРМАЦИЮ ПОЛЗУЧЕСТИ В АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ X18H10T

Е.И. Макаров, В.С. Неустроев, С.В. Белозеров, З.Е. Островский

ОАО «Государственный научный центр научно-исследовательский институт атомных реакторов», г. Димитровград-10, Россия (Evgeny_t86@inbox.ru)

Обоснование длительного проектного срока эксплуатации ядерных реакторов типа ВВЭР и продление его и далее требует изучения закономерностей изменения структуры и свойств конструкционных материалов, облученных нейтронами при условии эксплуатации, характерных для внутрикорпусных устройств (ВКУ) этих реакторов. Эксперименты по изучению влияния растягивающих напряжений на свойства и структуру материала проводились в ОАО «ГНЦ НИИАР» [1], России и в зарубежных странах, но влияние сжимающих напряжений практически не исследовалось. Кроме того, необходимо было проверить сохраняются ли известные закономерности и зависимости деформации радиационной ползучести от типа напряжений.

В настоящей работе рассмотрено влияние сжимающих и растягивающих напряжений на радиационное распухание и деформацию ползучести в сталях X18H10T. Газонаполненные образцы сложной формы, изготовленные из стали X18H10T, были облучены в реакторе BOR-60 до повреждающей дозы свыше 30 смещений на атом при температуре $420\text{--}450^{\circ}\text{C}$. В оболочках облученных образцов одновременно создавались сжимающие, растягивающие напряжения и одновременно облучались образцы, в которых эти напряжения практически отсутствовали.

Также приведены результаты измерений диаметра и длины облученных газонаполненных образцов. Обнаружено увеличение обоих размеров, проведен сравнительный анализ корреляции изменения диаметра и длины, по его результатам распухание трубки-свидетеля достигло 9%.

Для получения достоверных результатов влияния напряжений на распухание и ползучесть использовали металлографию, трансмиссионную электронную микроскопию (ТЭМ), определение механических свойств. Проведено сравнение влияния сжимающих, растягивающих и «нулевых» напряжений на распухание, параметры вакансионной пористости и ползучесть стали 08X18H10T. Результаты можно использовать для проверки моделей влияния напряжений разного типа на радиационные распухание и ползучесть.

Литература:

1. Neustroev V.S., Shamardin V.K. Radiation Creep and Swelling of Austenitic 16Cr-15Ni-3Mo-Nb Steel Irradiated in the Reactor BOR-60 at 350 and 420°C // *Effects of Radiation on Materials: 16th International Symposium, ASTM STP 1175*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993. P.816-823.

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СТАЛЕЙ ЭК164 И ЧС68 ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ В РЕАКТОРЕ БН-600.

А.М. Мосин¹⁾, М.В. Евсеев¹⁾, И.А. Портных¹⁾, А.В. Козлов¹⁾, Н.М. Митрофанова²⁾,
О.И. Иванова²⁾

¹⁾ *ОАО «ИРМ», Заречный, Россия (irm@irmatom.ru)*

²⁾ *ОАО ВНИИНМ, Москва, Россия*

В настоящее время актуальной задачей в атомной энергетике является достижение высокого выгорания топлива в реакторах на быстрых нейтронах. Для этого используются твэлы с оболочками из аустенитной стали ЧС68, изготовленной по усовершенствованной технологии на МСЗ, а также твэлы с оболочками из разработанной во ВНИИНМ новой аустенитной стали ЭК164.

В данной работе были исследованы оболочки твэлов из стали ЧС68 и ЭК164 после эксплуатации в реакторе БН-600 в течение 560 -572 эфф. сут., до максимального выгорания 9,1 -9,7% т.а. и достижения повреждающей дозы на оболочку до 82,4 сна.

Определены механические свойства при температурах 20, 400, 600 °С и температуре эксплуатации исследованных участков оболочек твэлов. Представлены изменения диаметров и распухание по длине твэлов. Также использованы результаты металлографических исследований и фрактографии поверхности разрушения после механических испытаний образцов оболочек из различных по расположению в активной зоне участков.

Показано, что максимальное распухание и изменение диаметра в центре активной зоны оболочек твэлов из стали ЧС68 в полтора-два раза выше по сравнению со сталью ЭК164 при идентичных режимах облучения.

Определение механических свойств проводилось как с использованием традиционной методики одноосного растяжения кольцевых образцов, так и по новой методике испытаний трубчатых образцов внутренним давлением пластичного заполнителя. При определении механических свойств стали ЧС68 на кольцевых образцах оболочки из области центра активной зоны зафиксирована нулевая пластичность и низкие значения прочности. Исследования механических свойств твэлов методом внутреннего давления показывают более высокие значения прочности и отличную от нуля пластичность. Фрактографические исследования показывают, что характер поверхности разрушения преимущественно транскристаллитный, при небольших увеличениях может быть отнесен к квазисколу. При больших увеличениях фасетки скола имеют мелкочашечный рельеф.

По совокупности результатов механические свойства стали ЭК164 после высокодозного облучения выше, чем стали ЧС68.

АТОМНО-ЗОНДОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОМАСШТАБНОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ ODS EUROFER ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Н.Н. Орлов, С.В. Рогожкин, А.А. Алеев, А.А. Никитин, А.Г. Залужный, Т.В. Кулевой,
Р.П. Куйбида, Б.Б. Чалых

Государственный Научный Центр Российской Федерации - Институт Теоретической и Экспериментальной Физики, Москва, Россия (Nikolay.N.Orlov@gmail.com)

В настоящее время, для анализа радиационной стойкости перспективных реакторных материалов, активно проводятся имитационные эксперименты, с использованием различных модельных воздействий. Известно, что наиболее быстрым способом создания радиационных повреждений в исследуемом материале является облучение пучками низкоэнергетичных тяжелых ионов. При облучении материалов ионами таких энергий образование радиационных дефектов происходит неоднородно, поэтому в таких экспериментах облучаются образцы для микроскопических исследований, с последующим изучением их микроструктуры. Настоящая работа посвящена обработке имитационных экспериментов по облучению образцов для томографической атомно-зондовой микроскопии.

Проведены первые эксперименты по облучению образцов перспективной стали ядерных и термоядерных реакторов ODS EUROFER ионами Fe^{+2} с энергией 150 кэВ до различных повреждающих доз (≤ 13 сна). Облучение проводилось на линейном ускорителе ТИПр (ИТЭФ). Сталь ODS Eurofer дисперсно упрочнена оксидами иттрия и содержит высокую концентрацию ($\sim 10^{24} \text{ м}^{-3}$) наноразмерных (2-4 нм) кластеров. Анализ расположения различных химических элементов в исследованных объемах облученной стали ODS EUROFER выявил изменение состава наноразмерных кластеров. При увеличении повреждающей дозы происходит уменьшение концентраций O, N и V, увеличение концентрации Mn, а размер и плотность кластеров близки к соответствующим значениям необлученного состояния. Сравнение полученных результатов с данными для стали ODS EUROFER, облученной в реакторе БОР-60 до дозы 32 сна, показывает соответствие наномасштабных изменений стали ODS EUROFER при тяжелоионном и нейтронном облучении.

Работа выполнена при поддержке госкорпорации Росатом и при частичной поддержке РФФИ (грант 08-02-01448-а).

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИАЦИОННОЙ ПОРИСТОСТИ, СФОРМИРОВАВШЕЙСЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ БН-600 В МАТЕРИАЛЕ ОБОЛОЧЕК ИЗ СТАЛЕЙ ЭК164 И ЧС68

И.А. Портных¹⁾, А.В. Козлов¹⁾, Н.М. Митрофанова²⁾, О.И.Иванова²⁾

¹⁾ ОАО «ИРМ», Заречный, Россия (irm@irmatom.ru)

²⁾ ОАО ВНИИНМ, Москва, Россия

В настоящее время в качестве перспективной стали для обеспечения достижения максимального выгорания топлива рассматривается аустенитная сталь ЭК164-ИД х.д. Для оценки эффективности ее использования в реакторе БН-600 в течение 560 эффективных суток проведена эксплуатация комбинированной ТВС, с твэлами, оболочки которых

изготовлены из новой стали ЭК164-ИД х.д. и из штатной стали ЧС68-ИД х.д.

В работе рассмотрены характеристики пористости, сформировавшейся при облучении в реакторе БН-600 до максимальной повреждающей дозы 77 сна в материале оболочек из стали ЭК164-ИД х.д. Для сравнения исследовались образцы необлученной стали ЭК164-ИД х.д. той же плавки, что и исследованные твэлы, и образцы из области нижней газовой полости различных твэлов. Установлено, что существуют различия дислокационной структуры и фазового состава необлученного образца и образцов из области нижней газовой полости твэлов.

Образцы исследованных твэлов соответствовали трем температурным диапазонам облучения: низкотемпературному, среднетемпературному и высокотемпературному. Построены гистограммы распределения пор по размерам, которые описывались в виде суммы унимодальных логнормальных распределений, соответствующих порам различного типа. Параллельно исследовались образцы тех же температурных диапазонов твэла с оболочкой из стали ЧС68-ИД х.д., эксплуатировавшегося в составе той же ТВС что и твэлы с оболочками из стали ЭК164-ИД х.д. На образцах стали ЧС68-ИД х.д. из всех температурных диапазонов также определялись характеристики пористости.

Проведено сравнение полученных характеристик пористости двух сталей в одних и тех же температурных диапазонах. В обеих сталях с ростом температуры облучения увеличивается средний размер пор, но в стали ЧС68-ИД х.д. он выше, чем в стали ЭК164-ИД х.д. Для определения распухания наряду с электронной микроскопией использовался метод гидростатического взвешивания. Установлено, что величина пористости и распухание образцов стали ЧС68-ИД х.д. в полтора и более раз выше, чем у образцов стали ЭК164-ИД х.д., облученных в идентичных условиях.

ЗАХВАТ ВОДОРОДА НА НАНОРАЗМЕРНЫЕ ЧАСТИЦЫ ОКИСИ ИТТРИЯ В ODS-СТАЛЯХ

Г.А. Распопова, В.Л. Арбузов

*Институт физики металлов Уральского отделения Российской Академии Наук,
Екатеринбург, Россия, (raspopova@imp.uran.ru)*

Ферритные хромистые стали, упрочненные дисперсными оксидами иттрия (oxide dispersion strengthened-ODS), обладают необходимыми свойствами в качестве материалов для тепловыделяющих элементов реакторов на быстрых нейтронах. Технология получения ODS-сталей обеспечивает формирование в них большого количества стоков точечных дефектов.

Для изучения поведения водорода в этих сталях в условиях облучения и для определения факторов, влияющих на захват водорода, взяты стали ODS1 и ODS5 и модельный сплав FeCr, соответственно, с 10, 13.4 и 10.8 масс. % Cr. Стали были получены методом спекания под давлением предварительно измельченных железа, феррохрома и (в стали ODS5) окисла Y_2O_3 . Сплав FeCr выплавлен из карбонильного железа и феррохрома.

В работе изучали радиационно-индуцированную сегрегацию дейтерия в образцах сталей и сплава с помощью ядерной реакции $D(d,p)T$, которая обеспечила совмещение во времени и пространстве процессов имплантации и измерения концентрации имплантированного дейтерия в облучаемых объемах. Глубину анализа определяли длиной проективного пробега дейтрона с энергией 700 кэВ в анализируемых материалах (~3.7 мкм). С учетом глубинного разрешения используемой ядерной реакции (~0.5 мкм) она

составила ~ 4 мкм. Интенсивность облучения находилась на уровне 1×10^{13} ион·с⁻¹·см⁻².

Были измерены дозовые зависимости средней концентрации имплантированного дейтерия и захвата дейтерия α в облученных объемах сравниваемых образцов. Параметр α определяли как долю всего имплантированного дейтерия, захваченного в этих объемах.

Использованная схема подготовки образцов, проведения измерений и анализа полученных результатов [1-3] позволила разделить захват дейтерия на радиационно-индуцированные (РЛ) и исходные (частицы окислов ~ 5 нм в диаметре и дефекты спекания) ловушки и определить емкость последних.

Показано, что частицы окиси иттрия сохраняют высокую эффективность как стоки точечных дефектов при всех изученных дозах имплантации дейтерия. Установлено, что в ходе облучения происходит уменьшение роли исходных ловушек в общем захвате имплантированного дейтерия, что связано как с заполнением этих ловушек, так и с достижением высокой плотности РЛ в облученных объемах и подавлением захвата дейтерия на исходные ловушки. При дозах облучения-имплантации более 1.5×10^{17} см⁻² все исходные ловушки (дисперсные окислы и дефекты спекания) насыщаются водородом и их роль как ловушек водорода нивелируется.

Литература

1. Распопова Г.А., Арбузов В.Л. *ФММ*. **107**, № 1, 63(2009)
2. Арбузов В.Л., Распопова Г.А., Сагарадзе В.В. и др. *ФММ*. **108**, № 1, 81(2009)
3. Распопова Г.А., Арбузов В.Л. *ВАНТ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение* (**93**), 14(2009)

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

С.В. Рогожкин, А.А. Алеев, А.Г. Залужный, М.А. Козодаев, Н.А. Искандаров, А.
А. Никитин, Н.Н. Орлов

*Государственный научный центр Российской Федерации – Институт Теоретической и
Экспериментальной Физики, Москва, Россия (Sergey.Rogozhkin@itep.ru)*

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 структурные наноразмерные особенности вызывают изменение макроскопических свойств (например, набухание, 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 атомно-масштабных фазово-структурных особенностей многокомпонентных материалов, развиваемым в последнее время, является томографическая атомно-зондовая микроскопия.

В ИТЭФ накоплен значительный опыт атомно-масштабных исследований свойств конструкционных материалов, 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 (сварные швы корпуса ВВЭР-440); - исследование дисперсионно твердеющих ферритно-мартенситных сталей (ЭК-181, Eurofer 97, ...); - исследование дисперсно-упрочненных оксидами сталей (ODS Eurofer, сталей российских разработок); - исследование радиационной стойкости конструкционных материалов ядерной техники в имитационных экспериментах с использованием ионных пучков. Цель настоящей работы дать обзор исследований проводящихся в ИТЭФ в настоящее время.

Работа выполнена при поддержке госкорпорации Росатом и при частичной поддержке РФФИ (грант 08-02-01448-а).

АНОМАЛЬНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ И РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ И НОВЫЕ ПУТИ СОЗДАНИЯ УПРОЧНЯЕМЫХ ОКСИДАМИ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ

В.В. Сагардзе

Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург

Известно, что в процессе облучения быстрыми нейтронами Fe-Cr-Ni сплавов имеет место миграция точечных дефектов на стоки (границы зерен или субзерен), что приводит к обогащению приграничных участков никелем (обратный эффект Киркендала). Подобные приграничные сегрегации никеля (до 2-10% от объема сплава) появляются и при интенсивной холодной деформации. Нами впервые [1] было обнаружено диффузионное перераспределение никеля в сплаве Fe-12Cr-30Ni с обогащением никелем (до 50%) границ вновь образовавшихся при деформации нанозерен и фрагментов. Приграничное обогащение никелем объясняется перемещением на стоки деформационно-индуцированных точечных дефектов. Образование деформационно-индуцированных сегрегаций позволяет предсказывать формирование атомных сегрегаций в сплавах без использования реакторного облучения.

Показано, что в процессе нейтронного облучения при 340К в реакторе ИВВ-2М имеет место растворение мелких частиц Ni₃Ti, Ni₃Al, Ni₃Si в каскадах смещения в аустенитной матрице. При сильной холодной (300 K) деформации ($\epsilon \sim 6$) также обнаружено [2] растворение частиц Ni₃Ti (Al, Si, Zr) в аустените. Как показали расчеты, растворение интерметаллидов Ni₃Ti в аустенитной Fe-Ni-Ti матрице при холодной деформации может происходить при деформационно-индуцированном переводе атомов Ni и Ti в междоузельные положения и их дрейфе в поле напряжения движущихся дислокаций с энергией активации 0,2-0,3 Эв.

Исследования аномального низкотемпературного деформационно-индуцированного растворения оксидов Fe₂O₃ и Y₂O₃ в стальной матрице при механическом легировании позволили определить новые пути получения дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) жаропрочных реакторных сталей. В частности, была показана возможность оксидного упрочнения чистого железа при его взаимодействии с воздухом без введения традиционных и дорогих легирующих элементов.

Работа поддержана проектами РФФИ (№ 10-03-00113, 10-02-90408), МНТЦ (проект № 3074.2) и Президиума УрО РАН (проекты № 10-2-12-БЯ, 09-М-23-2004).

1. Завалишин В.А., Дерягин А.И., Сагардзе В.В. ФММ, 1993, т. 75, №2, с. 90-99.
2. Сагардзе В.В. МиТОМ. 2008, №9 (639), с. 19-27.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ РЕАКТОРА БН-600

М.В. Баканов, В.В. Мальцев, Н.Н. Ошканов, В.В. Чуев
(Белоярская АЭС)

Проектные характеристики активной зоны (АкЗ) первого типа (01) реактора БН-600 по ряду причин не были достигнуты в начальный период эксплуатации. Выгорание топлива ограничивалось 7,2%-ми тяжелых атомов (т.а.) и повреждающей дозой 44 смещения на атом (сна). Основной причиной являлось значительное радиационное формоизменение элементов тепловыделяющих сборок (ТВС), регулирующих органов системы управления и защиты (РО СУЗ) и деградация служебных свойств конструкционных материалов (КМ), из которых элементы изготавливались. Достижение проектных величин выгорания топлива осуществлялось поэтапно. В 1987 г. проведена первая модернизация активной зоны (01М) с увеличением выгорания топлива до 8,3% т.а. (максимальная повреждающая доза 54 сна). В 1993 г. закончена вторая модернизация активной зоны (01М1) на проектное выгорание топлива 10% т.а. (повреждающая доза - 75 сна). В период 1995-2003г.г. проведены испытания свыше тысячи штатных ТВС на повышенные, переход на которую осуществлён в 2004-2005 г. С 2006 г. реактор устойчиво работает с активной зоной третьей модернизации (01М2) выгорания топлива до ~11% т.а. (повреждающая доза - 82 сна) в зоне.

Эволюция АкЗ осуществлялась по результатам испытаний в реакторе БН-600 ряда конструкционных материалов сборок разного типа и исследованиям их работоспособности после облучения в защитных камерах Белоярской АЭС, СФ НИКИЭТ/ИРМ, НИИАР и ФЭИ. В настоящей работе представлен обзор основных результатов по исследованию конструкционных материалов экспериментальных и штатных ТВС, полученных в процессе внедрения материалов для изготовления элементов реакторных сборок активных зон БН-600 с целью повышения выгорания топлива.

ВЫСОКОДОЗНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЯЭУ В РЕАКТОРЕ БОР-60

Шамардин В.К., Покровский А.С.
(ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, Ульяновская обл.).

Мировой «ренессанс» атомной энергетики связывают не только с планируемым в ближайшие 10 лет строительством новых блоков АЭС (по расчётам французских специалистов около 180 блоков), но и продлением проектных сроков уже эксплуатируемых с 30 до 40 и 60 лет. В связи с этим в последние 10-15 лет в реакторе БОР-60 были выполнены целый ряд международных программ (эксперимент «Самара» в реакторе СМ и эксперимент «Борис» в реакторе БОР-60) по облучению и последующим

послереакторным исследованиям материалов внутрикорпусных устройств (ВКУ) реакторов PWR до повреждающей дозы ≈ 100 сна. Выполнены также промежуточные по дозе облучения и послереакторные испытания физико-механических свойств и изучение склонности к коррозионному растрескиванию отечественных аустенитных нержавеющей сталей, используемых при изготовлении элементов ВКУ реакторов ВВЭР .

В рамках совместных работ JNC(Япония)-НИИАР были разработаны, изготовлены, проконтролированы и затем облучены в реакторе БОР-60 твель с оболочками из 9 %Cr и 12%Cr ODS сталей . К настоящему времени облучены до максимального выгорания $\approx 15\%$ т.а. и находятся в процессе исследований две ТВС (максимальная повреждающая доза на оболочке ≈ 75 сна).

Целью международных программ

- ARBOR 1,2, (“Associated Reactor Irradiation in BOR 60”) с Исследовательским центром в Карлсруэ (Германия);

- ALTAIR с центром в Сакле (Франция);

было облучение до максимальной повреждающей дозы 70 сна перспективных малоактивируемых материалов для проектов будущих термоядерных реакторов и реакторов-дожигателей актинидов

Цель настоящего доклада привлечь внимание исследователей к некоторым наиболее важным (по мнению авторов) инновационным результатам работ последнего времени , полученным на базе реактора БОР-60 , с целью использования полученного опыта и результатов, их развития и возможного продолжения работ на материалах ,разрабатываемых в России. Некоторые результаты перечисленных экспериментов безусловно могут составить весомую часть базы данных для будущих российских проектов АЭС а также в части подготовки новых долгосрочных материаловедческих программ .

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ДЕФОРМАЦИОННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ СПЛАВОВ Zr-Nb-(Fe,Sn,O) ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ

В.Н.Шишов

ОАО «ВНИИНМ имени академика А.А.Бочвара», Москва, Россия

shishovv@bochvar.ru

Представлен обзор работ по влиянию состава, режимов термообработки и нейтронного облучения на микроструктуру и свойства сплавов Zr-Nb и Zr-Nb-Fe (Sn, O). Поведение сплавов в реакторе зависит от их состава и микроструктуры и даже небольшие изменения состава и режима термомеханической обработки приводят к существенным изменениям свойств в результате эволюции состава выделений и матрицы. Разработка нового поколения сплавов системы Zr-Nb-Fe (Sn, O), которые показывают повышенное сопротивление деформации радиационного роста (ДРР), радиационно-термической ползучести (РТП) и коррозии, требует детального изучения их микроструктуры в процессе изготовления изделий и ее изменения при нейтронном облучении.

Основные явления при облучении включают образование радиационно-индуцированных повреждений (формирование а- и с- компонентных дислокационных петель) и перераспределение легирующих элементов между выделениями вторых фаз и

матрицей. Показано влияние частиц, содержащих Zr, Nb и особенно Fe, на свойства сплавов под действием облучения. Описаны взаимосвязи между составом, микроструктурой и радиационным ростом (формоизменением) сплавов Zr-Nb-Fe-Sn.

Повышение содержания железа свыше предела растворимости в Zr-1Nb сплавах ведет к снижению ДРР и РТП и к упрочнению сплава в результате выхода атомов железа из частиц фазы Лавеса в матрицу. Фаза Лавеса при этом трансформируется из ГПУ в ОЦК типа β -Nb. Исходные частицы β -Nb в Zr-Nb сплавах при облучении обедняются ниобием (или обогащаются цирконием), при этом в матрице наблюдается выделение радиационно-индуцированных мелкодисперсных частиц, обогащенных ниобием. Приведены характерные микроструктуры, иллюстрирующие радиационные повреждения в циркониевых сплавах, нестабильность выделений, эволюцию структурно-фазового состояния, характеристики радиационного роста.

ОСОБЕННОСТИ КОРРОЗИИ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО И ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНОГО КЛАССОВ – МАТЕРИАЛОВ ЧЕХЛОВ ОТРАБОТАВШИХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК РЕАКТОРА БН-350

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

Приведены результаты комплексного исследования состояния поверхностей стенки шестигранных чехлов отработавших тепловыделяющих сборок (ТВС) и масштабы коррозионной повреждаемости нержавеющей сталей аустенитного (12X18H10T, 08X16H11M3) и ферритомартенситного классов (12X13M2БФР), облученных в процессе эксплуатации в реакторе БН-350 до высоких (~80 сна) повреждающих доз при сравнительно низких температурах и скоростях набора дозы, и выдержанных в водном хранилище более 20 лет.

Образцы представляли собой пластины размерами 5×5×2 мм, вырезанные из участков грани, расположенных на различных уровнях от центра активной зоны реактора (0, -500, -900, -1200 мм) и получивших различные дозы облучения при эксплуатации. Исследования осуществляли методами оптической металлографии (Neophot-2), измерения микротвердости (ПМТ-3), просвечивающей (JEM100CX) и растровой электронной микроскопии («Amrey-1200»).

Оказалось, что наиболее сильно прокорродировали внутренние поверхности стенки стальных чехлов. Наличие бурой окраски и многочисленных трещин глубиной до 50 мкм свидетельствует о том, что изнутри защитный слой рыхлый и состоит, главным образом, из трехвалентного оксида железа (Fe_2O_3). С внешней стороны чехла поверхностный слой более плотный, не осыпается и имеет черную окраску. Различие в степени коррозионного поражения нержавеющей сталей установлено также по высоте чехла ТВС. Наиболее интенсивно подвержены коррозии участки материала, находившиеся в центре активной зоны реактора. Установлен межкристаллитный характер коррозионного повреждения внутренней поверхности стенки чехла экранной ТВС Н 214 (I) (ст. 12X18H10T) на отметке +75 мм от центра ЦАЗ, где повреждения особенно заметны. Определен элементный состав областей материала вблизи язвенных образований в необлученных и облученных сталях.



III. Современные проблемы физики сильно коррелированных d- и f-электронных систем

Тематика секции обусловлена необходимостью проведения систематических, многосторонних исследований актинидов и их сплавов, в том числе, делящихся, свойства которых определяются, в первую очередь, особенностями электронной структуры и дефектами, наведенными самооблучением. Эти материалы, относящиеся к системам с сильными электронными корреляциями, слишком сложны, чтобы можно было ограничиться фрагментарным сведениями, полученными из тех или иных физических, физико-механических, металлографических или динамических экспериментов, выполненных на нескольких, более или менее случайно выбранных образцах. Именно, поэтому в Программу секции включены доклады, посвящённые исследованию свойств делящихся актинидов и их модельных аналогов, находящихся в различных термодинамических состояниях, механизмов фазовых превращений в них, выявлению особенностей их электронных состояний, взаимосвязи кристаллической структуры, электронных и магнитных свойств актинидов и их соединений, проблемам их старения, радиационной стабильности, отклика на динамические и ударные внешние воздействия.

HIGH-FIELD MAGNETIC AND MAGNETOACOUSTIC ANOMALIES IN URANIUM INTERMETALLIC ANTIFERROMAGNETS

A.V. Andreev*, Y. Skourski**, S. Yasin**, S. Zherlitsyn**, J. Wosnitza**

**Joint Laboratory for Magnetic Studies, Institute of Physics ASCR and Charles University, Na Slovance 2, 18221 Prague 8, The Czech Republic (a.andreev@seznam.cz)*

***Hochfeld-Magnetlabor Dresden (HLD), Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, 01314, Germany*

In the present work, we report on recent collaborative studies of the magnetism and magnetoacoustics of several uranium intermetallic antiferromagnets (AF) in pulsed magnetic fields up to 60 T. All studies were performed on the single crystals grown by the Czochralski method in a tri-arc furnace.

UCu_{0.95}Ge has $T_N = 48$ K and the magnetic moments are in the basal plane of the hexagonal lattice. The metamagnetic transitions (MT) to the forced ferromagnetic (FF) state occurs in the field of 38 T applied along the c -axis. The sound velocity and the sound attenuation exhibit well-pronounced anomalies at the transitions, both the spontaneous at T_N and the field-induced to the FF state. In the paramagnetic state, both acoustic characteristics show large frequency-dependent changes revealing the presence of unusual relaxation processes of a non-magnetic origin.

UIrGe has $T_N = 16$ K. It exhibits a large magnetic anisotropy with the hard direction along the a axis of the orthorhombic structure. Along the b and c axes, the MT towards the FF phase is observed at 21 and 14 T, respectively. The sound velocity displays an anomaly of 1×10^{-4} at T_N . The MT along the b and c axis are accompanied by a lattice softening with a sound-velocity change of about 1.5×10^{-3} . Thus, the MTs affect the sound velocity much stronger than the spontaneous AF ordering.

UCo₂Si₂ has $T_N = 82.5$ K. The U magnetic moments are aligned along the c axis of the tetragonal lattice. In magnetic fields applied along this axis, we observed the MT in 45 T (at 1.4 K). The MT is extremely sharp but exhibits a very small hysteresis. Magnetization gain upon the MT corresponds roughly to 1/3 of the U magnetic moment. We can suppose that the state above the MT is ferrimagnetic with the +-+ arrangement of the magnetic moments. The ultrasound measurements confirm the transition and show its rather complicated temperature evolution.

U₂Ni₂Sn has $T_N = 26$ K. In fields applied along the c axis of the tetragonal lattice, three metamagnetic transitions are observed at 30, 40 and 52 T. The U magnetic moment reaches 0.7 μ_B in 60 T without any trend to saturation. High-field measurements along the a axis are planned to determine type of the magnetic anisotropy.

NEUTRON SCATTERING STUDIES OF MAGNETIC DYNAMICS IN Pnictide SUPERCONDUCTORS

Alexandre IVANOV

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

Spin excitation spectra are studied by inelastic neutron scattering in the 122-ferropnictide superconductors and compared with the first-principles calculations. The studied samples of BaFe_{1.85}Co_{0.15}As₂ and BaFe_{1.9}Ni_{0.09}As₂ exhibit neither static magnetic phases nor structural

phase transitions. It is shown that in both the normal and superconducting (SC) states, the magnetic spectrum lacks the three-dimensional screw symmetry around the $[1/2 \ 1/2 \ L]$ axis that is implied by the crystal space group. This is revealed both in the ‘in-plane’ anisotropy of the normal- and SC-state spin dynamics and in the ‘out-of-plane’ dispersion of the spin-resonance mode. It is concluded that this effect originates from the higher symmetry of the magnetic Fe-sublattice with respect to the crystal itself so that the inelastic neutron scattering signal inherits the symmetry of the unfolded Brillouin zone (BZ) of the Fe sublattice. The in-plane anisotropy is temperature independent and can be qualitatively reproduced in normal-state density-functional-theory calculations without invoking a symmetry-broken “nematic” ground state that was previously proposed as an explanation for this effect. Below the SC transition, the energy of the magnetic resonant mode E_{res} , as well as its intensity and the SC spin gap, inherit the normal-state intensity modulation along the out-of-plane direction L with a period twice larger than expected from the body-centered-tetragonal BZ symmetry. The amplitude of this modulation decreases at higher doping, providing an analogy to the splitting between even and odd resonant modes in bi-layer cuprates. It is demonstrated that at odd L a universal linear relationship $E_{\text{res}} = 4.3 k_{\text{B}}T_{\text{c}}$ holds for all the studied Fe-based superconductors, independent of their carrier type. Its validity down to the lowest doping levels is consistent with weaker electron correlations in ferropnictide compounds as compared to the underdoped cuprates.

STUDIES OF NEUTRON ELASTIC AND INELASTIC DIFFUSE SCATTERING IN SINGLE CRYSTALS

Jiri Kulda

Institut Laue-Langevin, BP 156X, 38042 Grenoble Cedex 9, France

The presence of defects in the regular periodic order of a crystal lattice is reflected by a modification of the intensity, position and shape of the δ -function like Bragg peaks of the original structure and sometimes accompanied by an additional signal appearing at other positions in the reciprocal space. While the effects concerning directly the Bragg peaks are frequently investigated, the supplementary signal, apart of superstructure reflections revealing the appearance of additional order, is subject of less attention. The main reason probably being interpretation difficulties arising from ambiguities in relation between experimental data and predictions of existing theoretical models [1]. It is also important to realize that in the X-ray case, generally more accessible and more favorable in terms of Q -resolution and intensity, at any temperature the measured diffuse scattering intensity contains in addition to defect scattering also the integral over the whole spectrum of lattice vibrations, themselves eventually affected by the presence of lattice defects.

In this sense the case of neutron scattering is more favourable due to the readily available energy analysis, which permits to separate the static and dynamic components of the response with a reasonable efficiency. Recent developments of the neutron three-axis spectrometers (TAS), boosting their performance both by massive beam focusing and by implementation of arrays of analyzer/detector channels have provided access to very efficient data collection schemes. Maps of diffuse scattering over several Brillouin zones can be collected in less than an hour from crystals of a modest size ($\approx 10^{-1} \text{ cm}^3$). Moreover, the flat-cone geometry [2] can be employed to map response in nonequatorial planes, permitting to carry out systematic surveys over three-dimensional intervals in reciprocal space.

In this lecture, we will mainly concentrate on fundamentals of diffuse scattering

phenomenology and on experimental possibilities offered by the ILL *FlatCone* [3] multianalyzer, illustrated by examples in diverse fields ranging from relaxor ferroelectrics to quantum magnetism. We shall also give an outlook into energy-resolved polarized neutron diffuse scattering.

References

- [1] M.A. Krivoglaz, *X-ray and neutron diffraction in nonideal crystals*, Springer, Berlin, 1995
- [2] R. Born, D. Hohlwein, *Z. Phys.* B74, 547 (1989)
- [3] M. Kempa, B. Janousova, J. Saroun et al., *Physica B* 385-386, 1080 (2006)

PLUTONIUM PROPERTIES IN MULTIPLE INTERMEDIATE VALENCE MODEL

A. Mirmelstein*, O. Kerbel*, E. Clementyev***

*Division of Experimental Physics, RFNC-VNIITF, Snezhinsk, Russia (mirmelstein@mail.ru)

**Laboratory of Neutron Research, Institute of Nuclear Research RAS, Moscow, Russia

***Institute of Superconductivity and Solid State Physics, Russian Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

The ground state issue in plutonium metal is one of the central problems in modern solid state physics. In order to explain high value and weak temperature dependence of magnetic susceptibility of α - and δ -Pu, we assumed Pu to be in the multiple intermediate valence (MIV) state, in which fluctuations occur not between two (as in ordinary intermediate valence (IV) systems), but between three electronic configurations with valence states 4+, 3+, and 2+ [1,2]. Using modified Fermi-liquid relations valid for the ordinary IV systems, in terms of the MIV model it is possible to describe the experimentally observed behavior of magnetic susceptibility and electronic (more precisely, magnetic) specific heat of α - and δ -Pu, as well as to explain significant difference of their atomic volumes [1]. Besides, the MIV model gives reasonable estimate of the entropy change associated with the $\alpha \rightarrow \delta$ structural phase transition [1].

Furthermore, the temperature dependence of linear thermal expansion coefficient (TEC) $\alpha(T)$ can be calculated using the classical relation:

$$\alpha(T) = [\gamma C_V^{ph}(T) + \Gamma C_{mag}(T)] / 3B_T(T), \quad (1)$$

where $B_T(T)$ is the isothermal bulk modulus, $C_V^{ph}(T)$ is the Debye phonon specific heat, $C_{mag}(T)$ is the magnetic specific heat calculated in terms of the MIV model, γ and Γ are the lattice and magnetic Grüneisen parameters, respectively. We show that in general Eq. (1) reproduces main features of thermal expansion of Pu, including anomalously high TEC of α -Pu and “invar” effect observed in the fcc Pu-Ga alloys.

We also discuss a microscopic approach to describe thermal expansion of Pu which allows to estimate temperature variation of the effective Pu valence.

This work has been performed under the auspices of the Russian State Corporation "Rosatom".

References

- 1. A. Mirmelstein et al., *JETP Letters* **90**, 485 (2009).

2. E. Clementyev and A. Mirmelstein, *JETP* **109**, 128 (2009).

STUDIES OF SPIN DYNAMICS IN GEOMETRICALLY FRUSTRATED MAGNETS AT CNCS, ORNL

A. Podlesnyak*, G. Ehlers**, M. Frontzek**, K. Conder***, E. Pomjakushina*** and S. Barilo****

* *Neutron Scattering Science Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge TN, USA (podlesnyakaa@ornl.gov)*

** *Neutron Scattering Science Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge TN, USA*

*** *Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland*

**** *Institute of Solid State & Semiconductor Physics BAS, 220121 Minsk, Belarus*

The Cold Neutron Chopper Spectrometer (CNCS) at the Spallation Neutron Source in Oak Ridge is a flexible and versatile direct-geometry multi-chopper time-of-flight spectrometer that provides both good energy and Q resolution at low incident neutron energies (1-50 meV). Two high-speed choppers, one to shape the neutron pulse from the moderator and a second to cut down the pulse length at the sample position, provide an adjustable energy resolution, ranging from $\sim 1.2\%$ to $\sim 10\%$ of the incident energy. The secondary flight path, with a length of 3.5 m, has a highly pixilated detector covering scattering angles between -50° and $+135^\circ$ in the scattering plane and $\pm 16^\circ$ perpendicular to the scattering plane. The detector array with a total solid angle of 1.7 sr consists of 400 two meter long tubes filled with ^3He gas.

The instrument has been operating since May 2009 with external users. Looking back over a little more than one year of user operation, it can be concluded that CNCS offers excellent intensity and resolution for inelastic and quasielastic neutron scattering experiments in the thermal and cold energy ranges. A wide range of scientific fields has already been covered, most notably in studies of collective excitations in single crystal samples (spin waves and phonons), magnetic nanoparticles, and diffusive processes in soft matter. The instrument promises to become a workhorse for the neutron scattering community for quasielastic and inelastic scattering experiments. This presentation highlights a few examples including spin dynamics in spatially frustrated multiferroic CuCrO_2 and magnetic excitations in lightly hole-doped $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$.

Construction of CNCS was funded by DOE grant DE-FG02-01ER45912. Research at Oak Ridge National Laboratory's Spallation Neutron Source was sponsored by the Scientific User Facilities Division, Office of Basic Energy Sciences, U. S. Department of Energy.

НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ КАРКАСНО-КЛАСТЕРНЫХ БОРИДОВ f- И d- МЕТАЛЛОВ

П.А. Алексеев¹⁾, В.Н.Лазуков¹⁾, Ж.-М. Миньо²⁾, К.С.Немковский³⁾

¹⁾ РИЦ «Курчатовский институт» Москва, РФ (paval@issph.kiae.ru)

²⁾ Laboratoire Leon Brillouin, CEA-CNRS, CEA/Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France

³⁾ Juelich Centre for Neutron Science, Forschungszentrum Juelich, Germany

Соединения типа MV_x , где $x \geq 6$, относятся к т. н. высшим боридам и формируются на основе трехмерной решетки из борных кластеров B_6 или B_{12} , в пустотах которой и располагаются атомы металла (М). Представлен обзор экспериментальных исследований динамики решетки в каркасно-кластерных системах MV_{12} ($M=Yb, Lu, Zr$), выполненных методом рассеяния нейтронов в сочетании с расчетами на основе феноменологической модели силового взаимодействия Борна-Кармана и расчетами *ab initio* [1-3].

Обнаружено принципиальное сходство между системами типа MV_6 и MV_{12} . На дисперсионных кривых имеются протяженные плоские участки, высокоэнергетическая часть спектра связана с динамикой собственно борных кластеров, граничная энергия спектров лежит в области 130-160 мэВ. Используя подход, аналогичный методу изотопного контраста, удалось выделить парциальные плотности фононных состояний для редкоземельных додекаборидов. Особенности фононных спектров были проанализированы с точки зрения простых модельных представлений и оказались связанными с иерархичностью взаимодействий, когда самым слабым является взаимодействие М-М, а самым сильным – В-В. Отличие масштабов достигает 10^2 [1,2].

Выполнены *ab initio* расчеты [3] фононных дисперсионных кривых и плотности состояний на основе метода функционала плотности в рамках LDA-приближения. Получено хорошее согласие с экспериментом в области частот борных колебаний, но заметные расхождения для некоторых низкоэнергетических мод, где важен вклад металлических (с электронами f- и d- типа) ионов.

Исследованы проявления в динамике кристаллической решетки эффектов сильных корреляций для редкоземельных соединений, а также перехода в сверхпроводящее состояние в ZrV_{12} . Обнаружена взаимосвязь между низкоэнергетическими фононами в YbV_{12} и спектром возбуждений f-электронов, трансформирующимся при переходе системы в немагнитное основное состояние со спиновой и зарядовой щелями.

1. K.S.Nemkovski, P.A.Alekseev, J.-M.Mignot, A.V.Rybina, F.Iga, T.Takabatake, N.Yu.Shitsevalova, Yu.B.Paderno, V.N.Lazukov, E.V.Nefeodova, N.N.Tiden, I.P.Sadikov, *J. Sol. Stat. Chem.* **179** (2006) 2895.

2. А.В.Рыбина, П.А.Алексеев, К.С.Немковский, Е.В.Нефедова, Ж.-М.Миньо, Ю.Б.Падерно, Н.Ю.Шицевалова, Р.Бюли, *Кристаллография* **52** (2007) 800.

3. A.V. Rybina, K.S. Nemkovski, P.A. Alekseev, J.-M. Mignot, E.S. Clementyev, M.Jonson L.Capogna, A.V. Dukhnenko, A.V. Lyashenko, V.V. Filippov, *Phys. Rev. B* **82**, 024302, (2010)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ ВИЛЬЯМСОНА – ХОЛЛА К АНАЛИЗУ УШИРЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ МАКСИМУМОВ НЕЛЕГИРОВАННОГО ОБЕДНЁННОГО КРУПНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УРАНА ПОСЛЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ 20-50 ГПА.

А.Е. Шестаков, Е.А. Козлов, И.В. Артамонов, А.Р. Нургалеев, И.В. Подгорнова,
Е.А. Шестакова

*Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики им. акад.
Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия, i.v.artamonov@vniitf.ru*

Данная работа выполнена с целью отработки применения методики Вильямсона-Холла для изучения прошедших взрывное нагружение и сохранённых образцов из материалов с кристаллической решёткой низкой симметрии. Использовались диски диаметром около 20мм и толщиной 3мм из нелегированного обеднённого крупнокристаллического урана. Образцы были подвергнуты нагрузке импульсами (20ГПа, 1,4мкс), (30ГПа, 0,9мкс) и (50ГПа, 0,5мкс). Ударные амплитуды и длительности импульсов нагрузки создавались на образцах из урана при торможении на них пластин из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, имевших различную подлётную скорость и толщину. Реализованные режимы нагружения обеспечили за время регистрации высокоскоростную одноосную деформацию в области исходной α -фазы.

Реализованные на сохранённых образцах состояния урана отличались не только амплитудой и длительностью импульса ударной нагрузки, но и величиной деформации, температурой ударного разогрева и уровнем остаточных температур.

Воздействие на образцы привело к изменениям микроструктуры (в том числе и плотности дислокаций, которая связана с величиной микроискажений кристаллической решётки) как непосредственно при ударно-волновом нагружении, так и в процессе остывания от остаточных температур при атмосферном давлении.

Экспериментально показано, что по отношению к исходному состоянию уровень микроискажений решётки увеличился и закономерно изменяется в соответствии с режимами нагружения. Не выявлено изменения величины микроискажений кристаллической решётки по сечению образцов в их центральной части. Измельчение кристаллитов урана до размеров $<0,1\mu\text{м}$ при всех режимах нагружения не обнаружено.

НЕМОНОТОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕПЛОЁМКОСТЬ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ СВЕРХПРОВОДНИКА $\text{BaPb}_{0.75}\text{Bi}_{0.25}\text{O}_3$.

Д.А. Балаев^{***}, А.А. Дубровский^{***}, С.И. Попков^{**}, К.А. Шайхутдинов^{***},
О.Н. Мартыанов^{***}, М.И. Петров^{*}

^{*} - *Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, 660036, Красноярск, Россия. E-mail:
smp@iph.krasn.ru*

^{**} – *Сибирский Федеральный Университет, 660041, Красноярск, Россия.*

^{***} – *Институт Катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия.*

Для выяснения механизмов, определяющих немонотонное поведение и гистерезис магнитосопротивления $R(H)$ сверхпроводника $\text{BaPb}_{0.75}\text{Bi}_{0.25}\text{O}_3$ ($T_C \approx 11.3\text{K}$), целенаправленно исследованы транспортные свойства (зависимости $R(T)$, $R(H)$ в различных плотностях транспортного тока и диапазоне магнитных полей до 65 кОе) и низкотемпературная теплоёмкость в магнитных полях до 90 кОе. Характер гистерезисных зависимостей $R(H)$ $\text{BaPb}_{0.75}\text{Bi}_{0.25}\text{O}_3$ аналогичен тому, что наблюдается на гранулярных ВТСП, однако, в отличие от классических ВТСП систем, полевая ширина гистерезиса магнитосопротивления поликристаллического $\text{BaPb}_{0.75}\text{Bi}_{0.25}\text{O}_3$ зависит от транспортного тока. Это указывает на то, что хотя механизмы, ответственные за гистерезис магнитосопротивления в этих объектах идентичны (влияние магнитного потока, захваченного в сверхпроводящих областях на эффективное поле в джозефсоновских прослойках), в случае $\text{BaPb}_{0.75}\text{Bi}_{0.25}\text{O}_3$ транспортный ток может существенно влиять на диамагнитный отклик сверхпроводника. Обнаружено значительное влияние транспортного тока на величину поля, при котором зависимости $R(H)$ демонстрируют максимум и проявляют гистерезисные свойства. Такое поведение может быть адекватно интерпретировано в рамках модели пространственно неоднородного состояния сверхпроводник-диэлектрик, предложенной в работе Горбачевича и др. [1]. Немонотонное поведение величины C/T (C – теплоемкость) от магнитного поля, обнаруженное в настоящей работе, также согласуется с выводами данной модели [2].

Литература.

1. А.А. Горбачевич, Ю.В. Копаев, И.В. Токатлы, *Письма ЖЭТФ*, **52**(2), 736 (1990).
2. Д.А. Балаев, А.А. Дубровский, С.И. Попков, К.А. Шайхутдинов, О.Н. Мартянов, М.И. Петров, *ЖЭТФ*, том 137, выпуск 4, стр. 664-674 (2010).

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРАНОВЫХ ОБОЛОЧЕК ПОСЛЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ, С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ЦВЕТОВОГО КАРТИРОВАНИЯ

Д.А. Беляев, Ю.Н. Зуев, Е.А. Козлов, И.В. Подгорнова, И.Л. Святков
РФЯЦ ВНИИТФ им. ак. Е.И. Забабахина

Представлены результаты измерений макро-, микротвердости и геометрических характеристик повреждений на поверхности меридионального сечения оболочек из урановых сплавов, сохраненных после взрывного нагружения различной интенсивности. Проведен анализ и выявлены закономерности в распределениях измеренных величин с применением подхода, заключающегося в генерации и изучении цветowych карт.

Применяемый подход позволяет выполнять совместный анализ различных данных, имеющих пространственное распределение, и потенциально может быть использован в любых материаловедческих исследованиях, в которых имеется необходимость изучения пространственного распределения физических величин.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СОХРАНЕННОГО ОБРАЗЦА ИЗ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО УРАНА

С.В. Бондарчук, Ю.Н. Зуев, И.В. Подгорнова, Д.А.Беляев

Федеральное государственное унитарное предприятие Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е.И.Забабихина

Как известно, измельчение зерна в поликристаллическом материале приводит к росту его прочностных свойств. Во ВНИИНМ путем многократной экструзии с промежуточными рекристаллизационными отжигами были получены цилиндрические заготовки мелкозернистого урана. Полученный экспериментальный материал в статических и динамических (при скорости деформации $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$) испытаниях [1] продемонстрировал прочностные свойства, в два раза превышающие аналогичные характеристики крупнозернистого литого урана, изготовленного в соответствии с действующим отраслевым стандартом. Однако эксперименты по взрывному нагружению не показали соответствующий рост откольной прочности при скорости деформации $\sim 10^5 \text{ с}^{-1}$. Задачей настоящей работы являлось получение данных о структуре и механизмах разрушения сохраненного клинового образца и сравнение со структурой исходного состояния. Металлографические исследования проводились методами оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ), фрактографические исследования поверхности разрушения – методом РЭМ.

Структура материала в исходном состоянии представляет собой равноосное зерно размером 3 – 5 мкм, однако, присутствует относительно небольшая доля (до $\sim 10\%$) нерекристаллизованных зерен, имеющих поперечный размер до 150 мкм и толщину до 30 мкм и ориентированных перпендикулярно оси заготовки.

Включения оксикарбонитридов в исходных заготовках имеют размер 10 ± 4 мкм, объемная доля оксикарбонитридной фазы $1,7 \pm 0,2\%$. Значения микротвердости материала отличаются в сечениях, параллельных оси заготовки, и перпендикулярном ей. В поперечном сечении микротвердость имеет значение $320 \pm 20 \text{ кг/мм}^2$, в продольных же сечениях значение микротвердости составляет $280 \pm 20 \text{ кг/мм}^2$.

Для изучения поведения нового материала в условиях высокоскоростной деформации был проведен опыт по взрывному нагружению клинового образца. В результате нагружения в образце образовались 3 структурные зоны в виде слоев, параллельных поверхности нагружения. 1-я зона имеет толщину $\sim 0,8$ мм и отличается повышенной микротвердостью и дефектностью структуры; структура 2-й зоны подобна структуре исходного состояния; для третьей зоны характерно большое количество трещин и наличие локальных участков с высокой микротвердостью. Параметры включений оксикарбонитридов соответствуют таковым для исходных заготовок – размер включений составляет 9 ± 3 мкм, объемная доля включений в материале $\sim 1,9\%$.

Фрактографическое исследование показало, что разрушение образца происходило в 2 этапа: сначала происходило зарождение множества трещин по смешанному механизму квазискол + отрыв, затем перемычки между соседними трещинами были разрушены по механизму образования и слияния микропор.

Литература

1. Е.А.Козлов, В.И.Таржанов, Д.Г.Панкратов, И.В.Теличко Динамическая сдвиговая откольная прочности предварительно квазистатически экструдированного мелкозернистого урана и сплава U-0,3%Mo. Доклады академии наук, 2009, том 424,

МАРГАНЦЕВЫЙ ОКСИД $Pb_3Mn_7O_{12}$ СО СМЕШАННОЙ ВАЛЕНТНОСТЬЮ ИОНОВ МАРГАНЦА: СТРУКТУРА, МАГНИТНЫЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Н.В. Волков*, Е.В. Еремин*, К.А. Саблина*

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

Продолжают интенсивно изучаться марганцевые оксиды, в которых путем замещений можно варьировать соотношение между ионами марганца с различной валентностью и, таким образом, вносить кардинальные изменения в их магнитные и электрические свойства. К таким соединениям относится и $Pb_3Mn_7O_{15}$ (Mn^{3+}/Mn^{4+}). В наших первых работах приведены магнитные, диэлектрические и калориметрические свойства монокристаллов $Pb_3Mn_7O_{15}$. Обнаружены аномалии в температурной зависимости намагниченности при $T_1 = 160$ К, $T_2 = 70$ К и $T_3 = 20$ К [1], хорошо согласующиеся с аномалиями в температурной зависимости теплоемкости [2]. T_1 соответствует возникновению ближнего магнитного порядка, T_2 – температура перехода в состояние, характерное для “слабого ферромагнетика”, при T_3 происходит перестройка антиферромагнитной структуры. Учитывая большое число неэквивалентных позиций ионов Mn, магнитная структура должна быть довольно сложной, что и подтверждается нейтронными исследованиями. Температурные зависимости действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости обнаруживают релаксационное поведение в температурном диапазоне 110 – 180 К, что связано с процессами упорядочения Mn^{3+} и Mn^{4+} ионов в кристалле [3]. Интерпретацию всех полученных данных мы проводили, исходя из гексагональной пространственной группы $R\bar{6}_3/mcm$. Недавно были проведены структурные исследования образцов на синхротроне высокого разрешения в интервале температур 15-295 К [4]. Результаты однозначно описываются орторомбической структурой с пространственной группой $Pnma$ во всем температурном интервале. Дополнительно проведенные рентгеновские исследования, показали, что при повышении температуры $Pb_3Mn_7O_{15}$ трансформируется из орторомбической структуры (пр. группа $Pnma$) в гексагональную (пр. группа $R\bar{6}_3/mcm$). Используя теоретико-групповой анализ, мы установили общие закономерности изменений в структуре и выявили особенности поведения атомов при фазовом переходе.

(Работа поддержана Программой ОФН РАН 5.1, проектом СО РАН № 101)

Литература

1. Volkov N.V. et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 055217 (2008)
2. Volkov N.V. et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **20**, 445214 (2008)
3. Volkov N.V. et al., *J. Phys.: Condens. Matter* **22**, 375901 (2010)
4. Rasch J.C.E. et al., *J. Sol. St. Chem.* **182**, 1188 (2009)

МАГНЕТИЗМ И ВАЛЕНТНАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ В КВАЗИБИНАРНЫХ СИСТЕМАХ

Е.С.Клементьев^{1,2}, П.А.Алексеев², В.Н.Лазуков², А.В.Мирмельштейн³, А.В.Грибанов⁴,
А.А. Ярославцев⁵

¹ Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия (e_clementyev@mail.ru)

² РИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³ РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, Россия

⁴ Московский Государственный Университет им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

⁵ НИЯУ Московский Инженерно-Физический Институт, Москва, Россия

Основное состояние и валентность церия были исследованы в квазибинарных системах $Ce_x(Gd,Pr)_{1-x}Ni$ при помощи измерений магнитных свойств, нейтронной дифракции, рентгеновской спектроскопии поглощения. Формирование основного состояния в цериевых интерметаллидах происходит в результате сложной конкуренции следующих взаимодействий: РККИ, гибридизации 4f электронов церия, взаимодействия с кристаллическим электрическим полем. Были получены явные свидетельства в пользу сильного влияния частично делокализованных 4f электронов Ce на магнитное упорядочение подрешеток Gd и Pr в $Ce(Pr,Gd)Ni$. CeNi является промежуточно-валентной системой с необычными магнитными свойствами [1]. Физические свойства ионов Ce в квазибинарных соединениях на основе CeNi сильно зависят от химического замещения [2]. Ферромагнетики GdNi и PrNi фундаментально отличаются по механизму магнитного упорядочения, в первом случае механизм обычный, во втором упорядочение связано с появлением мягкой моды в спектре магнитных возбуждений [3]. В то время как Ce валентно нестабилен, ионы Gd и Pr обладают хорошо локализованными магнитными моментами в интерметаллидах RNi. Все эти соединения кристаллизуются в структурный тип CгВ с пространственной группой $Cmcm$ и демонстрируют полную растворимость в твердых растворах при замещении Ce/Gd/Pr. Магнитные свойства квазибинарных систем на основе RNi (DC намагниченность и AC магнитная восприимчивость) были измерены при $1.8K < T < 300K$ на установке PPMS. Магнитная дифракция нейтронов измерена при $2K < T < 50K$. Валентность церия была изучена при помощи L_3 -XANES спектроскопии при температурах от $10K < T < 300K$, L_3 спектры Ce были получены в HASYLAB (Германия) и в КЦСИИТ (Москва). Обсуждаются зависимость валентности церия от температуры и химического давления. Полученные данные демонстрируют сильное влияние электронов церия на локализованный магнетизм в соединениях $(Pr,Gd/Ce)Ni$. Вероятнее всего, данный эффект вызван вкладом 4f электронов Ce в обменное взаимодействие.

1. E. S. Clementyev, J.-M. Mignot, P. A. Alekseev *et al.*, *Phys. Rev. B*, 61 (2000) 6189 .
2. A. Mirmelstein, E. Clementyev, V. Voronin, *et al.*, *J. Alloys. & Comp.* 444-445 (2007) 281.
3. E.S.Clementyev, P.A.Alekseev, P.Allenspach, *et al.*, *Physica B* 350, 83 (2004).

ОБОБЩЕННАЯ ТЕОРИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СРЕДНЕГО ПОЛЯ В СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

М.В. Садовский*

**Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия (sadovski@iep.uran.ru)*

Основы теории динамического среднего поля (DMFT). Недостатки и ограничения DMFT. Общая схема DMFT+ Σ приближения. Применения DMFT+ Σ подхода: особенности электронной дисперсии в сильно коррелированных системах, “кинки” электронной природы и роль электрон - фононного взаимодействия. Переход Мотта - Андерсона в неупорядоченных системах, эволюция плотности состояний, оптическая проводимость, фазовая диаграмма. Учет эффектов нелокальности - введение масштаба длины в DMFT. Псевдощелевые флуктуации: спектральная плотность и плотность состояний, динамическая проводимость. Электронная структура “реальных” ВТСП оксидов меди в схеме LDA+DMFT+ Σ .

НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО $(\text{La}_{0.5}\text{Eu}_{0.5})_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$: ВОЗМОЖНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО РАЗОГРЕВА НОСИТЕЛЕЙ

К.А. Шайхутдинов***, С.И. Попков***, Д.А. Балаев***, С.В. Семенов*, А.А. Быков*, А.А. Дубровский***, Н.В. Сапронова*, Н.В. Волков***

**Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, г. Красноярск, Россия, e-mail:*

smp@iph.krasn.ru

***Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия*

В работе проведено подробное исследование температурной эволюции вольт-амперных характеристик (ВАХ) монокристаллического манганита лантана $(\text{La}_{0.5}\text{Eu}_{0.5})_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ в широком диапазоне (до 1 А) аппаратурных токов. Основной целью работы было изучение влияния транспортногo тока и приложенного электрического поля на электросопротивление данного материала, т.е. возможности реализации механизма разрушения зарядового упорядочения в диэлектрических областях, возникающих в результате фазового расслоения манганитов. Было обнаружено, что ВАХ характеризуются участком с отрицательным дифференциальным сопротивлением, т.е. эффектом «токового переключения». Ниже температуры перехода металл-диэлектрик $(\text{La}_{0.5}\text{Eu}_{0.5})_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ на ВАХ наблюдался гистерезис. Однако подробный анализ влияния внутреннего саморазогрева образца с привлечением экспериментальных данных по теплопроводности показал, что ВАХ подобного вида могут быть объяснены в рамках концепции неравновесного разогрева электронного газа [1].

Литература

1. К.А. Shaykhtudinov, S.I. Popkov, D.A. Balaev, S.V. Semenov, A.A. Bykov, A.A. Dubrovskiy, N.V. Sapronova, N.V. Volkov, *Physica B* **405**, 4961 (2010).

ОСОБЕННОСТИ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ОБРАЗЦОВ ИЗ УРАНА, СОХРАНЁННЫХ ПОСЛЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ.

А.Е. Шестаков, И.В. Артамонов

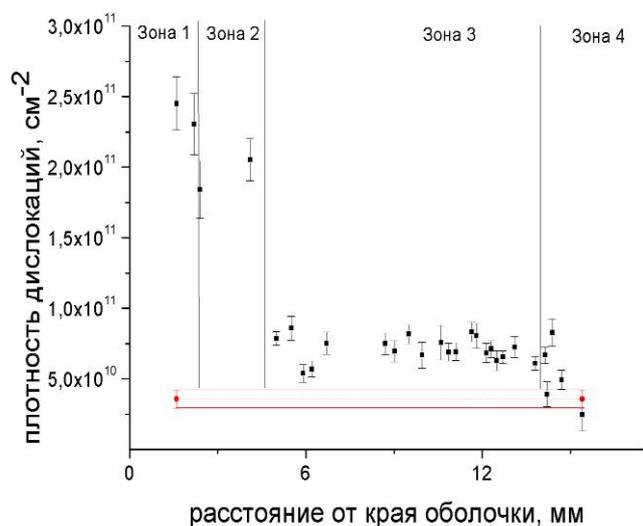
*Российский федеральный ядерный центр всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, Россия, г. Снежинск
(a.e.shestakov@vniitf/ru)*

Одним из важнейших аспектов безопасности сложной современной техники является устойчивость систем и конструкций к воздействию взрывных (ударных) нагрузок. Однако, в некоторых случаях, проведение реальных испытаний невозможно. Это вынуждает проводить виртуальные испытания, расчетно-теоретически моделируя процессы, идущие при различных режимах, в том числе и при ударно-волновом нагружении (УВН). Дальнейшее совершенствование моделей, движущееся по пути учета процессов, идущих на микроуровне, требует данных об изменении микроструктуры объектов при УВН. Дифракция рентгеновского излучения позволяют получить данные о кристаллической решетке и зафиксировать изменения, происходящие на таком масштабном уровне.

Получены данные о дислокационной структуре сферических урановых образцов после ударно-волнового нагружения. Использована рентгенодифракционная (РД) методика,

основанная на анализе уширения дифракционных максимумов. Полученные результаты свидетельствует об увеличении плотности дислокаций в материале сохранённых образцов по сравнению с исходным состоянием. Выявлена зависимость плотности дислокаций от координаты по радиусу сферы.

Проведено сопоставление результатов исследования дислокационной структуры сохранённых образцов и образцов с известной термомеханической историей. Отмечены особенности дислокационной структуры.



ПОЛИМОРФИЗМ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В КРИСТАЛЛАХ С ОЦК РЕШЕТКОЙ

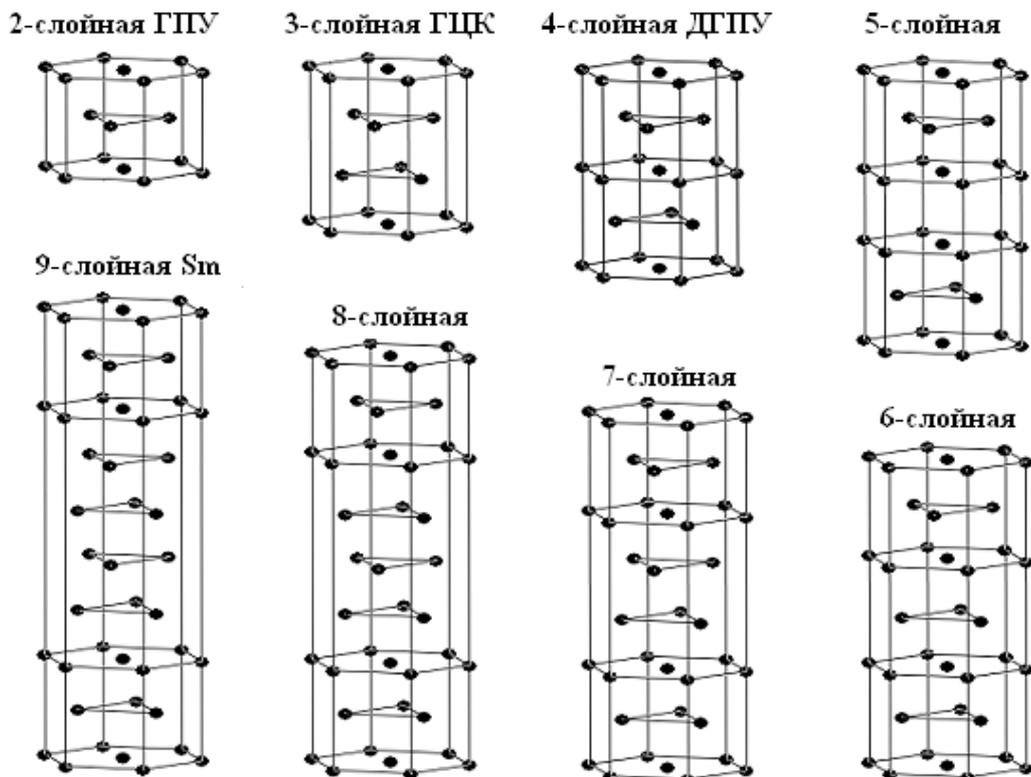
А.Е. Шестаков *, В.Е. Архипов **, Ф.А. Кассан-Оглы **

*Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

** Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург, felix.kassan-ogly@imp.uran.ru Россия

На основе псевдоспинового гамильтониана Изинга, описывающего кооперативные колебания плоскостей атомов в двуйном потенциале, при учете взаимодействий между ближайшими и вторыми соседями построена теория одиночных структурных фазовых превращений из ОЦК структуры в ГЦК, ГПУ, ДГПУ и каскадов фазовых переходов [1]. Рассчитана картина высокотемпературного диффузного рассеяния, а также совместная перестройка исходных Брэгговских рефлексов и эволюция диффузного рассеяния в Брэгговские рефлексы при переходах в низкотемпературные фазы [2]. Развитый подход объясняет существующие переходы и предсказывает новые переходы в другие плотноупакованные структуры (см. рисунок). Обсуждается возможность обобщения теории на множественные полиморфные превращения в кристаллах с высокотемпературной структурой сфалерита.

Работа выполнена при поддержке Проекта УрО РАН, № 10-2-39-ЯЦ.



Литература

1. Кассан-Оглы Ф.А., Архипов В.Е., Шестаков А.Е., *ФММ*, **109**, 608 (2010)
2. Kassan-Ogly F.A., Naish V.E. and Sagaradze I.V., *Phase Transitions*, **49**, 89 (1994).



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.

STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF LiF AFTER VARIOUS TYPE OF IRRADIATION

Elsaid M. Abdelshakour

Physics department, college of science, Aljouf university, 2014 Kingdom of Saudi Arabia

The paper presented microhardness measurements for pure lithium fluoride (LiF) implanted with Ar, Kr and Xe at doses ranged from 10⁹ up to 10¹² ion/cm². Measurements were also performed for the microhardness after irradiation by electron and gamma rays. The data exhibited a large increase of microhardness of LiF using heavy ions in comparison with the unimplanted and irradiated samples with electrons and gamma rays. The influence of annealing the samples on the microhardness is also studied. The obtained results were interpreted according to the formation of F-centers in LiF.

ВЛИЯНИЕ НЕСТЕХИОМЕТРИИ И ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ ЛАНТАНОВЫХ МАНГАНИТОВ

Т.И. Арбузова*, С.В. Наумов, В.Л. Арбузов, С.Е. Данилов

**ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, С.Ковалевской, 18 (naumov@imp.uran.ru)*

В манганитах на основе LaMnO₃ структурные, зарядовые и электронные неоднородности играют ключевую роль в эффекте колоссального магнитосопротивления (CMR). Стехиометрический LaMnO₃ является орбитально упорядоченным антиферромагнетиком А-типа. При отклонении от стехиометрического состава или легировании двухвалентными ионами Ca, Sr, Ba появляется намагниченность, обусловленная ферромагнитными Mn³⁺- Mn⁴⁺ взаимодействиями. CMR-эффект в парамагнитной области нельзя объяснить одним механизмом двойного обмена, поэтому во всех моделях рассматривается присутствие поляронов. Согласно [1] выше T_C могут сохраняться коррелированные и некоррелированные наномасштабные поляроны. В коррелированных поляронах с орбитальным упорядочением SE-типа локальный ферромагнитный порядок вызван двойным обменом за счет делокализации e_g – электронов ионов Mn³⁺. Такие поляроны могут существовать только в орторомбической фазе. Некоррелированные поляроны образуются вблизи дефекта во всех кристаллографических фазах.

Нестехиометрические образцы LaMnO_{3+δ} являются непроводящими при всех температурах. Однако наряду с АФМ фазой А-типа могут существовать FM области нового E-типа, аналогичные SE-фазе, поэтому в них возможен эффект CMR [2]. Магнитные измерения в парамагнитной области нестехиометрических и легированных манганитов могут дать информацию о корреляции состав – структура – свойства. Облучение электронами может привести к локальным структурным изменениям без изменения состава образцов.

В работе исследованы магнитные свойства исходных и облученных электронами нестехиометрических составов LaMnO_{3+δ} и легированных манганитов в области 80K<T<650K. Образцы с разным содержанием ионов Mn⁴⁺ и симметрией кристаллической решетки получены путем дополнительного отжига при разных температурах (от T=1100°C

до $T=650^{\circ}\text{C}$) с последующей закалкой.

При уменьшении T отжига симметрия решетки изменялась от орторомбической до ромбоэдрической. Концентрация ионов Mn^{4+} оценивалась по объему элементарной ячейки. При увеличении числа Mn^{4+} ферромагнитная температура Кюри повышалась от $T_C=122\text{ K}$ до $T_C=186\text{ K}$, что связано с увеличением числа пар $\text{Mn}^{3+}-\text{Mn}^{4+}$. В образцах с малым содержанием Mn^{4+} аномалия в поведении температурной зависимости обратной восприимчивости в области $T=500-600\text{ K}$ связана со структурным переходом $O'(c/\sqrt{2}<a<b) \rightarrow O(a<c/\sqrt{2}<b)$. В ромбоэдрических образцах этот переход сдвигается в область более низких температур $T<200\text{ K}$. Температурные зависимости $1/\chi(T)$, полевые зависимости намагниченности и высокие значения эффективного магнитного момента указывают на присутствие некоррелированных магнитных поляронов по модели Varma вплоть до 620 K . Электронное облучение дозой $\Phi=5\cdot 10^{18}\text{ эл/см}^2$ в нестехиометрических $\text{LaMnO}_{3+\delta}$ приводит к уменьшению T_C на $2-6\text{ K}$. В проводящем $\text{La}_{0,67}\text{Ba}_{0,33}\text{MnO}_3$ переход вблизи $T_C=338\text{ K}$ размывается, что указывает на неоднородное распределение дефектов. Возможной причиной изменения магнитных свойств облученных манганитов является смещение ионов кислорода со своих позиций, изменение расстояний и углов связи $\text{Mn}-\text{O}-\text{Mn}$, влияющих на сверхобмен и двойной обмен.

Работа выполнена в рамках программы научного сотрудничества УрО РАН и СО РАН и программы ОФН РАН „Физика новых материалов и структур“.

Литература

1. E. Dagotto. *New Journal of Physics*, **7**, 67 (2005)
2. T.Hotta, M.Moraghebi, A.Feiguin, et.al. *cond/mat* 0211049v2, 1 (2003)

ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ GaAs И GaN ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С.М.Дубровских, О.В.Ткачѳв, В.П.Шукайло
РФЯЦ-ВНИИТФ, г.Снежинск, Россия (dep5@vniitf.ru)

Исследовано влияние гамма-нейтронного излучения на кинетику, интенсивность и спектр электролюминесценции светодиодов, вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики. Исследован отжиг облучѳнных светодиодов при разной температуре и токах, протекающих через структуру.

В качестве образцов для исследования были взяты светодиоды на основе структуры GaN/InGaN с пиковой длиной волны $\sim 480\text{ нм}$ изготовленные РФЯЦ-ВНИИТФ и светодиоды AL108AM на основе структуры AlGaAs/GaAs с пиковой длиной волны $\sim 845\text{ нм}$ промышленного изготовления.

Наиболее существенно облучение влияет на кинетику и интенсивность свечения образцов. Показано, что чувствительность к радиационному воздействию интенсивности свечения GaN-светодиодов на два порядка меньше светодиодов GaAs.

Анализ на основании уравнения кинетики неравновесных носителей заряда в активной области прибора удовлетворительно описывает экспериментальные результаты.

Экспериментально показано преобладание инжекционного отжига для GaN-светодиодов. Эффект имеет пороговый характер и проявляет себя при плотности тока

более 2 А/см². Температурный отжиг не наблюдали, нагрев облучённых образцов до 130 °С приводил к уменьшению интенсивности свечения.

Литература

1. Сошников И.П., Лундин В.В., Усиков А.С., и др. Особенности формирования внедрений InGaN в матрице GaN при выращивании методом VOCVD. *ФТП*, т.34, вып.6, (2000).

ОБРАЗОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ И НАНОЧАСТИЦ В КРИСТАЛЛАХ ФТОРИДА ЛИТИЯ ПРИ ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ

Э.М. Ибрагимова, М.А. Муссаева, М.У. Каланов

Институт Ядерной Физики, Ташкент, Узбекистан (e-mail: ibragimova@inp.uz)

Давно известно [1], что при радиолитизе ионных щелочно-галогидных кристаллов сначала образуются одиночные пары Френкеля, а затем по мере накопления и взаимодействия образуются агрегаты вакансий галогена и наноразмерные коллоидные частицы металла, с которыми связано широкополосное поглощение 2.3-3.3 эВ. Нами было показано [2], что в γ -облученных дозой 10⁸ Р кристаллах LiF с ориентацией {100} образуются нанокристаллиты LiOH со средним размером 28 нм, при этом двойникование решетки изменяется.

Методами рентгеновской дифракции и оптического поглощения исследован процесс образования наноструктуры и наночастиц в кристаллах LiF со сколом (100) при сухом ⁶⁰Со-гамма-облучении в интервале доз 10⁵-10⁸ Р при мощности дозы 530 Р/с и 300 К. Впервые обнаружено, что при дозе 10⁶ Р оптическая плотность полосы поглощения 250 нм F-центров достигает D>3, что характерно для переходов с переносом заряда, и она расщепляется на симметричный дублет узких резонансов, похожих на поверхностные плазмоны наночастиц s¹-металлов [3]. Согласно теории Ми-Ганса цилиндрические наностержни поддерживают две плазмонные моды: продольная может смещаться в ИК-сторону, а поперечная в УФ, частоты которых зависят от a/b размеров наночастиц [3]. Наибольшая концентрация F-центров 3,3·10¹⁷ см⁻³, соответствует среднему расстоянию между ними ~ 14 нм, когда обменное взаимодействие эффективно. С ростом дозы до 10⁷ Р продольный 280 нм и поперечный 220 нм резонансы достигают D~4, они разделены фотонной щелью с D=0, что свидетельствует об упорядочении F-центров. Полоса поглощения M-центров (дивакансий) 450 нм расщепляется на триплет при дозе >10⁷ Р, когда образуются наночастицы Li_n (λ=380 нм) и наблюдается лазерная генерация. В случае LiF скопление дефектов на двойниках обеспечивает их упорядочение и сборку наностержней Li_n. Наблюдаемый когерентный оптический отклик сверхрешетки M-центров и наночастиц металла в LiF представляет интерес для нелинейной оптики и нанофотоники.

Литература

1. Lushchik A., Lushchik Ch., Schwartz K., Vasil'chenko, Papaleo R., Sorokin M., Neumann R. And Trautmann C., *Phys. Rev. B* **76**, 054114 (2007).

2. Мусаева М.А., Ибрагимова Э.М., Каланов М.У., Муминов М.И., *Физ. Тverd. Тела* **48**, 2170 (2006)

3. Nanoparticles – Building blocks for nanotechnology. Ed. Vincent Rotello. Springer Science-Business Media Inc. NY (2004) pp.173-200.

СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ НИТРИДА ГАЛЛИЯ, ОБЛУЧЕННЫХ РЕАКТОРНЫМИ НЕЙТРОНАМИ

А.В. Корулин, М.А. Барков, В.М. Бойко, С.С. Веревкин, А.И. Калюканов, Н.Г. Колин,
Д.И. Меркурисов, Т.Н. Харитоновна, В.А. Чевычелов
ФГУП «НИФХИ им. Л.Я. Карпова, г. Обнинск. Эл. почта: ngkolin48@mail.ru

Рассмотрено влияние облучения большими флюенсами реакторных нейтронов ($\Phi = 1,5 \cdot 10^{17} \div 8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$) и последующих термообработок в интервале температур $100 \div 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ на электрофизические свойства и период решетки эпитаксиальных слоев GaN, выращенных на подложке Al_2O_3 .

Показано, что с ростом флюенса нейтронов до $(1 \div 2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ удельное электрическое сопротивление материала увеличивается до значений около $10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (рис 1а) за счет образовавшихся радиационных дефектов (РД) [1], а при дальнейшем увеличении флюенса, удельное сопротивление, проходя через максимум, уменьшается до значений $2 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при 300°C , что объясняется появлением прыжковой проводимости по перекрытым оболочкам областей разупорядочения. Период решетки с ростом флюенса нейтронов до $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ увеличивается на 0,38 % (рис 2а) при практически неизменном параметре a . Термообработка облученных образцов до 1000°C (рис 1б, 2б) не приводит к полному восстановлению периода решетки и электрофизических свойств материала.

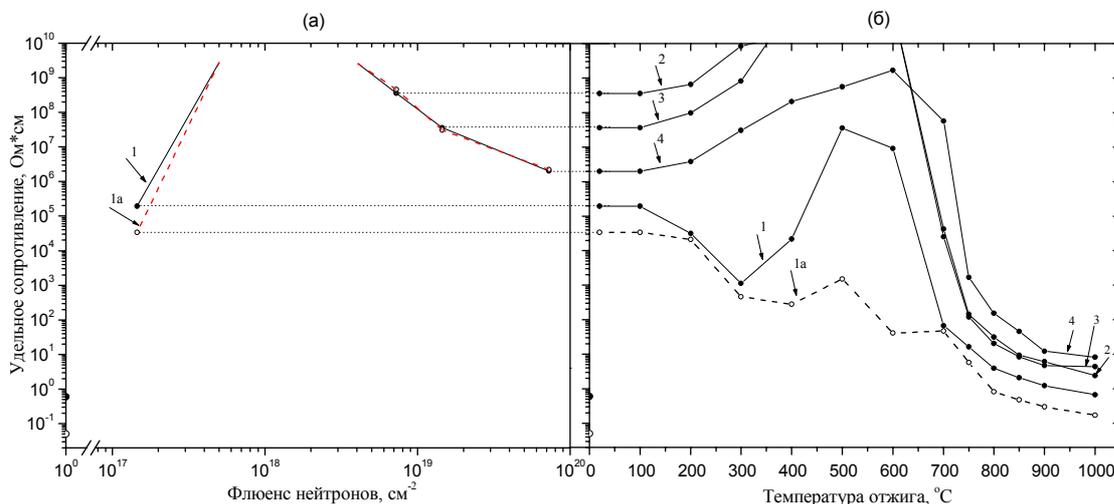


Рис. 1: (а) - Зависимость удельного электрического сопротивления эпитаксиальной пленки GaN от флюенса полного спектра реакторных нейтронов (а) и температуры отжига (б) для образцов с различной исходной концентрацией носителей заряда n . Соотношение плотностей потоков тепловых и быстрых нейтронов в зоне облучения $\Phi_T/\Phi_B=1$. На оси приведены значения ρ для исходных образцов.

(а): n , $[\text{см}^{-3}]$: 1 $\neq 10^{15}$, 1а $\neq 10^{17}$

(б): n , $[\text{см}^{-3}]$: 1, 2, 3, 4 $\neq 10^{15}$; 1а $\neq 10^{17}$; $\Phi_T \neq 10^{18}$, $[\text{см}^{-2}]$: 1, 1а – 0,15; 2 – 7,3; 3 – 15; 4 – 80

Исследовалось также влияние концентрации исходной легирующей примеси кремния на механизмы образования и отжига радиационных дефектов в GaN, облученном реакторными нейтронами. Наблюдаются три основные стадии отжига радиационных дефектов: $100 \div 300$ °С, $300 \div 700$ °С, $700 \div 1000$ °С.

Сделан вывод о том, что наличие примесей в материале, независимо от способа их введения (при выращивании или в результате ядерного легирования), влияет на характер образования и отжига радиационных дефектов в облученных нейтронами эпитаксиальных пленках GaN. Показано, что при относительно низких температурах (до 800°С) отжиг РД в легированных образцах происходит более эффективно, а при температурах выше 800°С – менее эффективно, чем в нелегированных образцах. Кроме того, на полноту отжига радиационных дефектов в эпитаксиальных пленках GaN отрицательно влияют как наличие большой концентрации примесей в материале, так и высокие значения концентрации радиационных дефектов (т.е. более высокие флюенсы нейтронов), что объясняется образованием в материале при облучении и при последующих термообработках большого количества термостабильных радиационных дефектов, не отжигающихся вплоть до 1000°С.

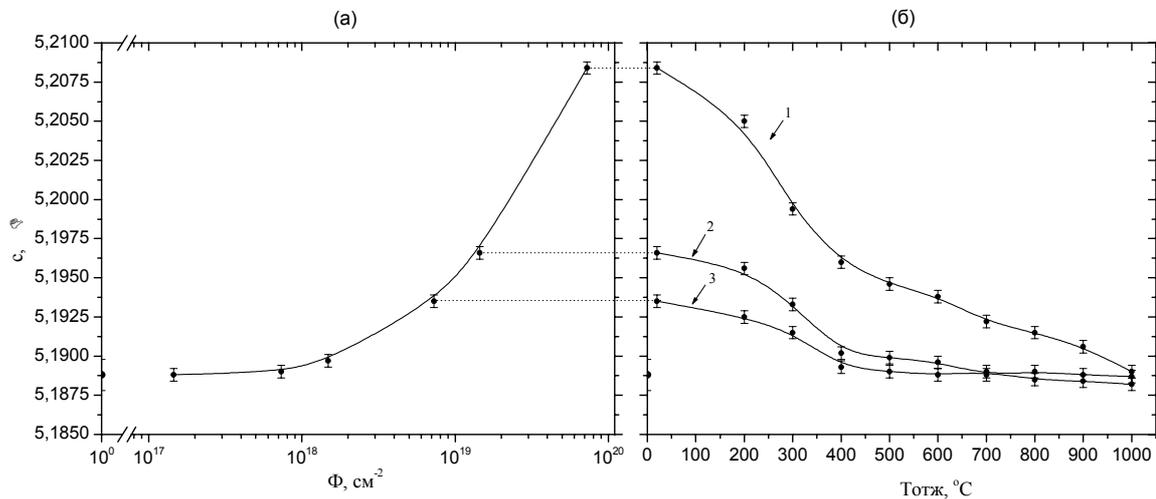


Рис. 2. Зависимость периода решетки c эпитаксиальной пленки GaN от флюенса полного спектра реакторных нейтронов (а) и температуры отжига (б) для нелегированных образцов с исходной концентрацией носителей заряда n , [см^{-3}]: 10^{15} . На оси приведены значения c для исходных образцов.

(б) - $\Phi_T \cong 10^{18}$, [см^{-2}]: 1 – 80 ; 2 – 15 ; 3 – 7,3

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта МНТЦ №3870.

Литература

1. A.Y. Polyakov, N.B. Smirnov, A.V. Govorkov, A.V. Markov, S.J. Pearton, N.G. Kolin, D.I. Merkurisov, V.M. Boiko, Cheul-Ro Lee, In-Hwan Lee, Fast Neutron Irradiation Effects in undoped n-GaN Films, J. Vac. Sci. Technol. B25(2), 436-442 (2007).

ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ (100) ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 21 МЭВ С ПОМОЩЬЮ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

С. В. Краевский, Ю.В. Половинкина, С. В. Рогожкин, А.Г. Залужный
Государственный Научный Центр Российской Федерации
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия
(skraevsky@mail.ru)

Исследование взаимодействия высокоэнергетичных частиц с твёрдым телом привлекает к себе большой интерес (см. например [1]). Известно, что при высоких энергиях налетающих частиц (> 1 МэВ/нуклон) основные энергетические потери связаны с взаимодействием налетающих ионов с электронной подсистемой. Выделяющаяся при этом энергия может приводить к образованию в объёме облучаемого материала областей с нарушенной структурой - треков [2]. По некоторым данным образование треков в кремнии возможно только при потерях, превышающих 35 кэВ/нм [3]. Исследования, проведенные при значительно меньших линейных потерях энергии (при облучении ионами C^{6+} с энергией 1.2 ГэВ), показали, что на поверхности облученного кремния образуются островки нанометровых размеров [4].

В настоящей работе проведены исследования изменений морфологии поверхности монокристаллического кремния облученного протонами с энергией 21 МэВ. Методом атомно-силовой микроскопии на поверхности облученных образцов обнаружены островки нанометровых размеров, причем в ряде случаев они образуют локальные скопления (в которых плотность наностроек на 1-2 порядка отличается от среднего значения). Показано, что формирование обнаруженных радиационно-индуцированных изменений поверхности кремния является пострадиационным температурно-активируемым явлением. Эти изменения являются следствием отжига дефектов, образовавшихся при облучении кремния.

Работа выполнена при поддержке госкорпорации Росатом и при частичной поддержке РФФИ (грант 08-02-01448-а).

Литература

1. Ф.Ф. Комаров, *УФН* 173 (2003) 1287—1318.
2. А.Р. Челядинский, В.С. Вариченко, А.М. Зайцев, *ФТТ*, 40 (1998) 1627.
3. A. Dunlop, G. Jaskierowicz, S. Della-Nerga, *NIM B* 146 (1998) 302—308.
4. T.S.Balashov, A.A.Golubev, M.A.Kozodaev, A.D.Fertman, S. V. Rogozhkin, V.I. Turtikov, *Micro- and Nanoelectronics, Proceedings of SPIE* 2006, v. 6260, 626008.

**ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И
ТЕРМОБАРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И
ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ГЕЙСЛЕРА НА ОСНОВЕ X-Y-
Z (X = Co, Ni; Y = Cr, Mn; Z = Ga, Al, Sn)**

В.В.Марченков¹, К.А. Фомина¹, Е.И. Шредер¹, Э.В. Галошина¹, В.П. Дякина¹,
Н.И. Коуров¹, И.В. Медведева¹, В.П. Пилюгин¹, Е.Б. Марченкова¹, В.Г. Пушин¹,
Т.В. Дьячкова², А.П. Тютюнник², Ю.Г. Зайнуллин², R. Wang³, С.Р. Yang³, Н.В. Weber⁴

¹ *Институт физики металлов, 620041, Екатеринбург, Россия (march@imp.uran.ru)*

² *Институт химии твердого тела, 620990, Екатеринбург, Россия*

³ *Faculty of Physics and Electronics Technology, Hubei University, 430062, Wuhan, China*

⁴ *Atominstut, Vienna University of Technology, 1020, Vienna, Austria*

В последние годы большое внимание уделяется исследованию сплавов Гейслера и гейслероподобных сплавов, вследствие наблюдаемого в них управляемого магнитным полем и температурой эффекта памяти формы, полуметаллического состояния, гигантского магнитокалорического эффекта и других функциональных свойств [1, 2].

Мы исследовали структуру, оптические, электрические, магнитные и гальваномагнитные свойства некоторых из сплавов Гейслера на основе X-Y-Z (X = Co, Fe; Y = Cr, Mn; Z = Ga, Al, Sn), находящихся в упорядоченном (исходные образцы) и разупорядоченном (деформированные образцы) состояниях. Упорядоченное состояние достигалось посредством отжига после литья. Разупорядочение образцов осуществлялось путем интенсивной пластической деформации кручением под давлением в наковальнях Бриджмена и путем термобарической обработки сплавов.

Согласно полученных нами результатов, интенсивная пластическая деформация и термобарическая обработка приводят к уменьшению размеров зерен и, как следствие, к существенным изменениям их оптических, электрических, магнитных и гальваномагнитных свойств. Структура сплавов при этом сохраняется. Полученные результаты обсуждаются в рамках существующих теоретических представлений.

Работа выполнена при частичной поддержке Австрийской академии наук и Фонда естественных наук Китая (грант № 10911120055/A0402).

Литература

1. Васильев А. Н. , Бучельников В. Д. , Такаги Т. , Ховайло В. В. , Эстрин Э. И. , *УФН* **173**, 577 (2003)
2. Ирхин В.И., Кацнельсон М.И., *УФН* **164**, 705 (1994)

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРО- И МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$

И.В. Медведева¹, В.В. Марченков¹, Е.Б. Марченкова¹, Т.В. Дьячкова², А.П. Тютюнник,
Ю.Г. Зайнуллин, С.Р. Yang³, S. S. Chen³, К. Ваернер⁴, К.А. Фомина¹

¹ *Институт физики металлов, 620041, Екатеринбург, Россия (march@imp.uran.ru)*

² *Институт химии твердого тела, 620990, Екатеринбург, Россия*

³ *Faculty of Physics and Electronic Technology, Hubei University, Wuhan 430062, P. R. China*

⁴ *Institute of Physics, University of Goettingen, 37077 Goettingen, Germany*

Ортоманганиты $\text{R}_{1-x}\text{D}_x\text{MnO}_3$ (R-редкоземельный, D-щелочноземельный металл) привлекают большой интерес в связи с их возможным использованием в качестве рабочих элементов в устройствах оперативной памяти. Их магнито- и электрорезистивные свойства могут быть использованы как для чтения, так и для хранения информации. Поскольку электронные транспортные свойства керамических манганитов сильно зависят от размеров зерен и межзеренных границ [1], то было изучено влияние микроструктуры, изменяющейся при термобарической обработке, на электро- и магнито-резистивные свойства.

Поликристаллический образец $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ подвергался термобарической обработке при квазигидростатическом давлении 9 ГПа и температуре 1000 °С в течение 10 минут с последующей закалкой до комнатной температуры и в жидкий азот. Результаты рентгеновского анализа и сканирующей электронной микроскопии показали, что хотя обработанные образцы и сохранили орторомбическую псевдоперовскитную структуру, однако, длины и углы связей Mn-O-Mn и , соответственно, параметры решетки немного изменились. Такие особенности микроструктуры, как размер зерна и межкристаллитные границы также существенно изменились. Так средний размер области когерентного рассеяния, который можно оценить с помощью рентгеновских данных, уменьшился с 90 нм до 60 нм.

Закалка при высоком давлении привела к значительным изменениям температурной зависимости сопротивления. Величина сопротивления увеличилась на два порядка, а температура перехода металл-изолятор уменьшилась на 50-100 К в образцах $\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, обработанных при высоком давлении и высокой температуре. Кроме того, в этих образцах наблюдались большие значения электро- (700%) и магнито-резистивного (30%) эффектов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-02-92205) и фонда естественных наук Китая (гранты No.10774040 и No.10911120055).

Литература

1. Yang C.P., Chen S.S., Zhou Z.H., Xu L.F., Wang H., Fu J.H., Morchshakov V., Baerner K., *J.Appl.Phys.* **101**, 063909-1-4 (2007)

СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ РАДИАЦИОННО- МОДИФИЦИРОВАННОГО МОНОКРИСТАЛЛА $Ti_{50}Ni_{47}Fe_3$

В.Д. Пархоменко, С.Ф. Дубинин, В.И. Максимов

Институт физики металлов Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия
parkhomenko@imp.uran.ru

Методом дифракции тепловых нейтронов исследовано, при температурах 78К и 295К, структурное состояние монокристалла $Ti_{50}Ni_{47}Fe_3$ облученного быстрыми нейтронами ($F=2.5 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$) при температуре 340К. Выбор сплава этого состава обусловлен поисками радиационно-стойкого материала с эффектом «памяти формы». Установлено, что данный сплав после облучения сохраняет кристаллическое состояние, в то время как исследованный нами ранее кристалл $Ti_{49}Ni_{51}$ после аналогичного облучения полностью переходит в аморфное состояние. Несмотря на то, что основной структурный мотив кристалла после воздействия облучения сохраняется, мартенситные превращения в нем не происходят. Сделаны оценки радиационной стойкости кристаллов данного класса.

Работа выполнена по плану РАН (тема №01.2.006 13394), при частичной поддержке Минобрнауки РФ (контракт № 02.518.11.7119) и в рамках программ фундаментальных исследований: ОФН РАН «Нейтронные исследования структуры вещества и фундаментальных свойств материи», проект № 09-Т-2-1012 УрО РАН; Программа междисциплинарных проектов фундаментальных исследований, выполняемых в УрО РАН в 2009—2011 гг., проект № 09-М-23-2004 УрО РАН”.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОРАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ В ЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ

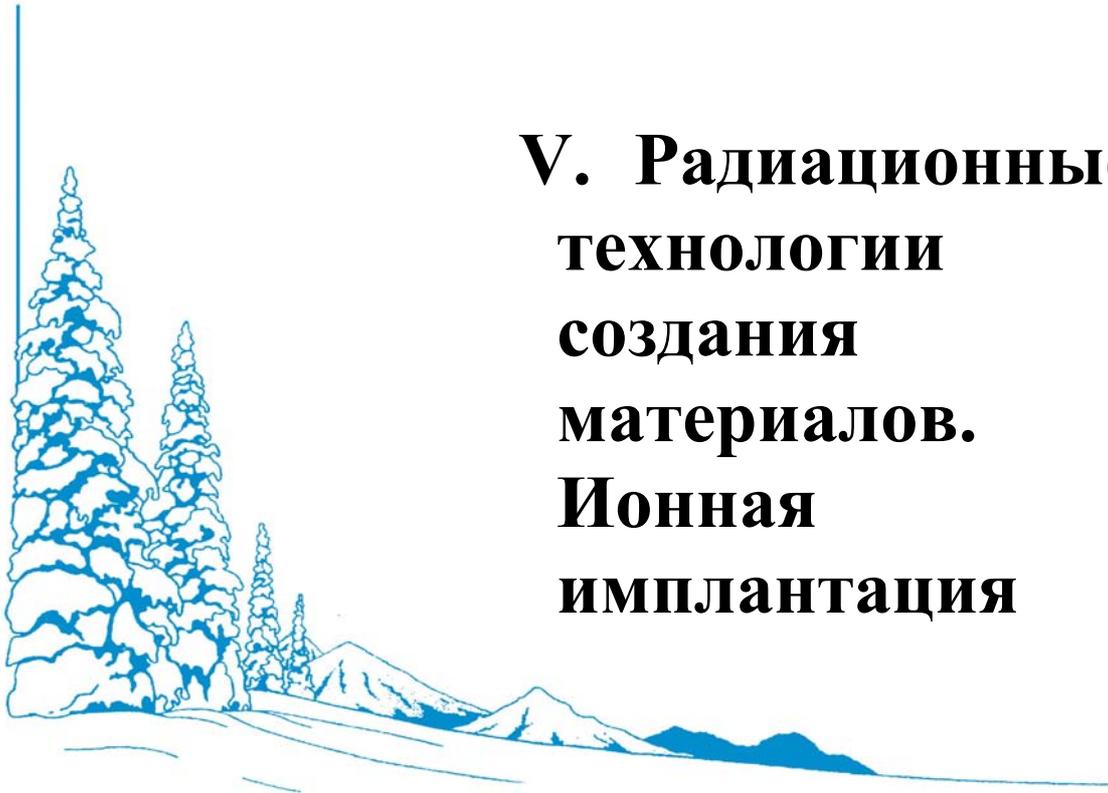
Махкамов Ш., Каримов М., Турсунов Н.А., Махмудов Ш.А., Саттиев А.Р.
Институт ядерной физики АН РУз, Ташкент, Узбекистан (natur@inp.uz)

Изучены процессы формирования примесно-дефектных комплексов в кремнии, легированном быстро диффундирующими примесями меди и палладия.

Из анализа полученных результатов показано, что в легированных образцах наличие примесей меди и палладия приводит к изменению упругой энергии кристалла и образованию примесных скоплений вокруг микродефектов. Увеличение концентрации палладия до $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ или флюенса нейтронов выше 10^{17} см^{-2} приводит к распаду примесных скоплений, уменьшению размеров ядра микродефектов и перестройке атомов палладия с последующим встраиванием их в цепочку в виде иглы.

Введение примеси меди в кремнии приводит к формированию низкоразмерных дефектных комплексов с размерами 5 – 10 мкм, последующим встраиванием их в композиции, растущие в виде дерева, размеры которых достигают 70 – 100 мкм и зависят от направления кристалла [100], [110] или [111].

Обсуждается возможный механизм формирования низкоразмерных дефектных комплексов с участием примесных и радиационных дефектов и типы квазихимических реакций, протекающих в легированном кремнии при термической и радиационной обработках.



V. Радиационные технологии создания материалов. Ионная имплантация

В Программу Семинара включена секция с целью ознакомить участников с последними разработками в области радиационного материаловедения по методам получения новых функциональных материалов, в том числе обладающих наноструктурой. Будут представлены работы по созданию наноструктур методом радиационного модифицирования, в частности, с помощью ионной имплантации, а также ударно-волнового воздействия.

РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СПЛАВАХ ГЕЙСЛЕРА Cu_2MnAl И Ni_2MnGa

Н.Ю.Богданов, В.С.Хмелевская

ИАТЭ НИЯУ «МИФИ», Обнинск, Россия, khmel@iate.obninsk.ru, bogdanovnj@mail.ru

Сплавы Гейслера представляют собой интерметаллиды, в которых наблюдаются ферромагнитные свойства, хотя элементы сплава (например, в классическом сплаве Гейслера Cu_2MnAl) не являются ферромагнетиками. Магнитные свойства в этих сплавах есть результат происходящих в них фазово-структурных превращений, при этом важную роль играет расстояние между атомами с нескомпенсированными спинами.

В данной работе исследовались изменение свойств и структуры этих сплавов при ионном облучении. При облучении сплавов Cu_2MnAl и Ni_2MnGa ионами аргона было обнаружено сильное возрастание намагниченности. Одновременно были зарегистрированы изменения дифракционной картины, подобные наблюдавшимся ранее в металлических твёрдых растворах [1, 2]. В твердых растворах ионное облучение приводит к образованию нанокластерной структуры и сильному изменению механических и электрофизических свойств. Поскольку в сплавах Гейслера облучение привело и к изменению формы рентгеновских линий, и к изменению намагниченности, было сделано предположение об образовании в них схожей нанокластерной структуры.

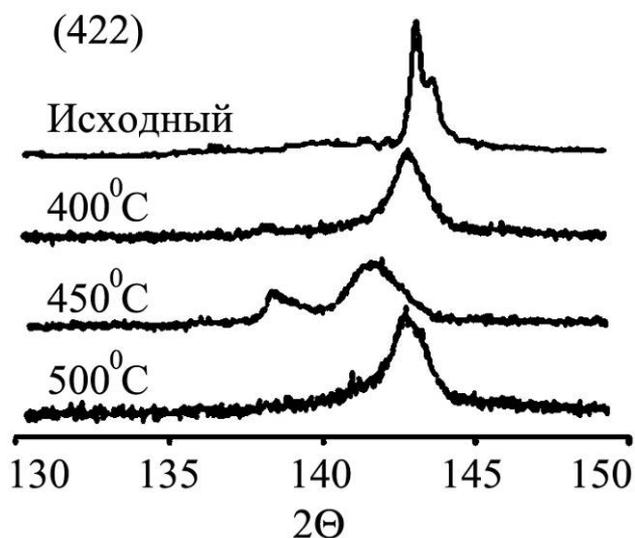


Рис.1. Дифракционная линия (422) сплава Cu_2MnAl , исходная и после облучения (Ar^+ , 30 кэВ) при различной температуре мишени

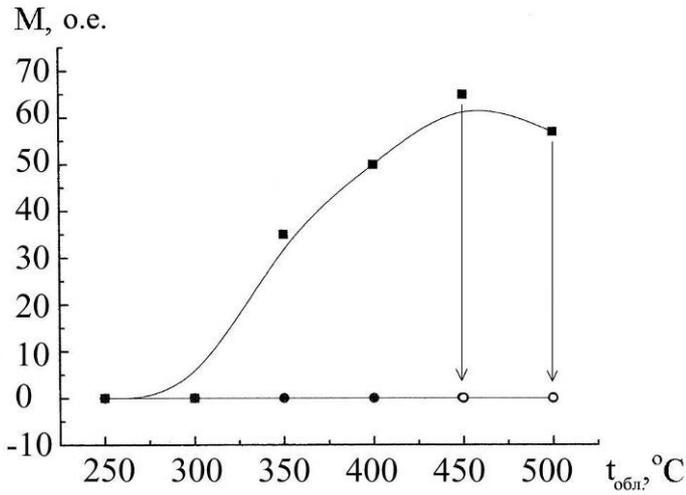


Рис.2. Изменение намагниченности сплава Cu_2MnAl (относительные единицы) в зависимости от температуры облучения (Ar^+ , 30 кэВ) при различной температуре мишени

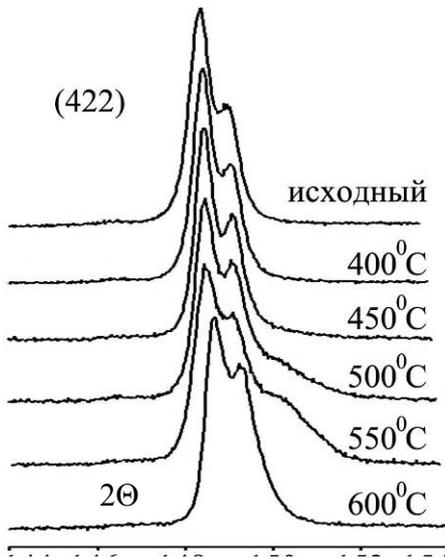


Рис.3. Дифракционная линия (422) сплава Ni_2MnGa , исходная и после облучения (Ar^+ , 30 кэВ) при различной температуре мишени

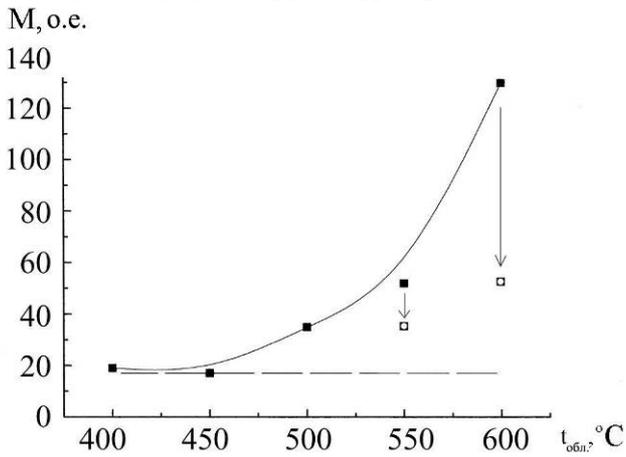


Рис.4. Изменение намагниченности сплава Ni_2MnGa (относительные единицы) в зависимости от температуры облучения (Ar^+ , 30 кэВ) при различной температуре мишени

В сплаве Cu_2MnAl при температуре мишени 450°C линия (422) оказывается раздвоенной с достаточно большим угловым расстоянием между компонентами. Некоторые изменения формы линии видны и при температурах 400°C и 500°C . Одновременно с изменениями рентгеновской дифракции сильно возрастает намагниченность сплава, достигая максимума при температуре 450°C . Образовавшееся состояние материала является метастабильным и разрушается в процессе вакуумного отжига при температуре, равной температуре мишени во время облучения. На рис.2, 4 стрелками показано изменение намагниченности облученных образцов в процессе пострадиационных отжигов. Подобные, хотя и не идентичные, изменения при облучении были получены для сплава Ni_2MnGa . Сходство регистрируемых дифракционных изменений и изменений свойств материала в сплавах Гейслера, с одной стороны, и в металлических твердых растворах, с другой стороны, указывает на сходство происходящих в материалах структурных изменений. Изменение намагниченности в сплавах Гейслера может быть объяснено тем, что в решетке образуются кластеры с симметрией, отличной от симметрии матрицы. При этом могут происходить изменения расстояний между атомами с нескомпенсированным спином. Это может приводить к изменению обменного взаимодействия и изменению намагниченности материала.

Список литературы.

1. Кластерные структуры в ГЦК материалах при высоких уровнях радиационного повреждения / В.С. Хмелевская, Н.В. Куликова, А.В. Накин, В.Г. Малышкин // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. - 1999.- Приложение к №2. - С.83-88.

2. Хмелевская В.С., Богданов Н.Ю., Кордо М.Н. Радиационно-индуцированное структурирование в сплавах на основе никеля // *Физика и химия обработки материалов*. - 2008. - №2. - С.14-18.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ АЛЮМИНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

П.В. Быков, Д.Г. Шайсултанов, В.Я. Баянкин

Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск (less@fti.udm.ru)

В начале прошлого века было показано, что состояние поверхности – наличие царапин, надрезов, следов обработки и т.п., а также топология и состав поверхности, определяет многие свойства твердых тел, начиная от их внешнего вида и заканчивая прочностными характеристиками. Модифицирование поверхностного слоя приводит к изменению свойств металлических материалов. На сегодняшний день разработаны сотни способов обработки поверхности: термомеханические, химические, и т.д. Одним из методов, активно развивающимся в последнее десятилетие, является ионно-лучевое легирование. Целенаправленно выбирая атомы легирующей примеси и режимы облучения, с помощью метода ионной имплантации можно обеспечить широкую гамму полезных свойств поверхностных слоев материалов: повышение предела прочности, текучести, ударной вязкости, трещиностойкости, коррозионной, износостойкости и т.п. [1, 2]. По сравнению с традиционными методами химико-термической обработки, ионная имплантация позволяет в десятки раз сократить время и резко понизить температуру обработки, производить селективную обработку отдельных участков детали. Существенным преимуществом метода является отсутствие проблем адгезии между модифицированным

слоем и объемом материала, характерных для способов нанесения различного рода покрытий.

В данной работе исследовано влияние облучения ионами алюминия с энергией 80 кэВ дозой 10^{17} ион/см² и плотностью тока в импульсе 2,5 мА/см² на морфологию поверхности, структуру и состав поверхностных слоев нержавеющей стали 08X18H10T. Показано изменение структурно-фазового состояния и состава поверхностных слоев под действием ионной бомбардировки.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 09-П-2-1026

Литература

1. Легостаева Е.В., Шаркеев Ю.П. *Трение и износ.* **23**, (5), 529 (2002)
2. Плешивцев Н.В., Красиков Е.А. *Металлы.* (4), 98, (1995)

ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ, ИЗМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ МАРГАНЦА

В.Л. Воробьёв, П.В. Быков, В.Я. Баянкин

Физико-технический институт УрО РАН, Ижевск (less@fti.udm.ru)

Одним из направлений в современном машиностроении является поверхностное упрочнение сравнительно дешевых сталей и сплавов для изготовления деталей машин и механизмов, работающих в сложных условиях. Это обеспечивает экономию дорогостоящих высоколегированных сталей и сплавов и удешевляет само изделие. Одним из методов, активно развивающимся в настоящее время, является ионно-лучевое и ионно-плазменное легирование поверхности. Целенаправленно выбирая легирующий элемент и режимы облучения, с помощью метода ионной имплантации можно обеспечить широкую гамму полезных свойств поверхностных слоев материалов: повышение пределов прочности и текучести, ударной вязкости, трещиностойкости, сопротивления коррозии и износостойкости и т.п. [1, 2]. Широко исследуются и используются методы ионной и ионно-плазменной обработки сильноточными пучками [3]. Однако в ряде случаев использование интенсивной ионной или ионно-плазменной обработки поверхности приводит к деградации свойств материала основы вследствие высоких температур, при которых осуществляется подобное воздействие.

В данной работе исследовано влияние облучения ионами марганца с энергией 45 кэВ дозой $5 \cdot 10^{16}$ ион/см² и скоростью набора дозы 10 – 50 мкА/см² на механические свойства, морфологию поверхности и состав поверхностных слоев углеродистой стали Ст.3сп. Показано немонотонное изменение микротвердости и усталостной прочности в зависимости от скорости набора дозы и сглаживание поверхности под действием ионной бомбардировки.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Президиума РАН № 09-П-2-1026

Литература

1. Легостаева Е.В., Шаркеев Ю.П. *Трение и износ*. **23**, (5), 529 (2002)
2. Плешивцев Н.В., Красиков Е.А. *Металлы*. (4), 98, (1995)
3. Диденко А. Н., и др. *ФизХОМ*. (5), 14, (1991)

ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ОБРАБОТКА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Губернаторов*, Ю.Н. Драгошанский*, Т.С. Сычева*, В.А. Ивченко**

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

**Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Известно, что магнитные свойства магнитомягких материалов можно изменять, используя на заключительной стадии их производства термомагнитную или ионно-лучевую обработки (ТМО или ИЛО) [1,2].

Представляет интерес комбинированное применение ТМО и ИЛО.

Установлено, что в ОЦК сплаве Fe-3 вес. % Si электромагнитные потери уменьшаются на 10% после ИЛО+ТМО, а магнитострикция остается неизменной. Если указанные операции провести в обратном порядке (ТМО+ИЛО), то магнитострикция увеличивается с $1.5 \cdot 10^6$ до $16 \cdot 10^6$, а электромагнитные потери $P_{0,7/1000}$ повышаются с 12.8 до 31 Вт/кг, оставаясь при этом на допустимом уровне.

Причиной влияния ИЛО на снижение электромагнитных потерь в первом случае может быть то, что ИЛО существенно повышает низкотемпературную подвижность атомов и тем самым способствует рафинированию объемов сплава в зонах колебания границ магнитных доменов при ТМО. В «чистых» по дефектам объемах магнитная доменная структура становится более совершенной и дестабилизированной.

Во втором случае ИЛО повышает дефектность сплава. В результате в поверхностном слое появляются сжимающие напряжения и растягивающие напряжения в остальном объеме. Сжимающие напряжения изменяют магнитную доменную структуру: возникает система мелких доменов с поперечной намагниченностью (90-градусные домены). Это обеспечивает максимум магнитострикционных деформаций образца при его перемагничивании во время эксплуатации. Растягивающие напряжения придают материалу магнитную мягкость. Так как при ИЛО прорабатываются поверхностные слои, то, изменяя параметры ИЛО и толщину обрабатываемого материала, можно получить необходимое сочетание электромагнитных потерь и магнитострикции.

Таким образом, применение комбинированной обработки, включающей ТМО и ИЛО, позволяет управлять свойствами материалов в широких пределах, в том числе эксплуатационными свойствами магнитомягких материалов.

Работа выполнена при частичной поддержке интеграционного проекта с ИФМ-ИЭ УрО РАН № 09-И-2-2002.

Литература

1. Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филиппов Б.Н. *Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей*. Наука, Москва, 1992, с. 271

2. Соколов Б.К., Губернаторов В.В., Драгошанский Ю.Н. и др. *ФММ.* **89**, 32 (2000)

ВЛИЯНИЕ ДОЗЫ ЛАЗЕРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СЕГРЕГАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ФОЛЬГАХ Ni₅₀Cu₅₀ С НАПЫЛЕННЫМ СЛОЕМ Al

Жихарев А.В., Климова И.Н., Баянкин В.Я.

Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск (less@fti.udm.ru)

Методы обработки металлических материалов концентрированными потоками энергии составляют одно из наиболее перспективных направлений современного материаловедения. В частности бурное развитие лазерной техники в последнее время способствовало применению лазеров для обработки металлических материалов с целью направленного изменения их элементного состава и структурно-фазового состояния поверхностных слоев. Перспективность такой технологии обусловлена возможностью создания различных новых поверхностных структур с улучшенными физико-химико-механическими свойствами при использовании относительно простого оборудования в несложных технологических процессах. Причем открывается возможность создавать такие различные неравновесные поверхностные сплавы, которые невозможно получить традиционными методами металлообработки [1].

В данной работе рассматривается влияние лазерного воздействия на изменение микротвердости и сегрегационные процессы в поверхностных слоях фольг Ni₅₀Cu₅₀ с напыленным с одной стороны Al в зависимости от числа импульсов лазера. Результаты получены методами рентгеноэлектронной спектроскопии, сканирующей зондовой микроскопии и измерениями микротвердости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-02-96039_урал).

[1] Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский Ю. *Ионная и лазерная имплантация металлических материалов.* – М.: Энергоиздат, 1991 – 240 с.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Ag⁺ НА МИКРОСТРУКТУРУ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СПЛАВА D16 В РАЗЛИЧНОМ ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ

В.В. Овчинников*, А.А. Клепикова*, Н.В. Гущина*, Ф.Ф. Махинько*,

Л.И. Кайгородова**, С.М. Можаровский***, А.В. Филиппов***

**Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (sheter@ier.uran.ru)*

***Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

****Каменск-Уральский металлургический завод, г. Каменск-Уральский, Россия*

Объектом исследования являлись образцы алюминиевого сплава D16 системы Al-Cu-Mg-Mn толщиной 3 мм, которые подвергались воздействию пучков ускоренных ионов Ag⁺ (E = 40 кэВ, j = 400 мкА/см², D = 2,5·10¹⁵–10¹⁷ см⁻², соответствующее время облучения 1-40 с) в холоднодеформированном и закаленном состояниях. Максимальная температура

непрерывного нагрева образцов ионными пучками не превышала 450°C (без выдержек при постоянных температурах).

Металлографическое и электронно-микроскопическое исследование исходных и облученных образцов сплава показало, что облучение ускоренными ионами Ar^+ дозой 10^{17} см^{-2} (время обработки 40 с, $T_{\text{max}} \sim 450^\circ\text{C}$) холоднодеформированного сплава Д16 способствует протеканию процессов рекристаллизации: во всем объеме образца наблюдается формирование новых рекристаллизованных зерен. Структура, формирующаяся при облучении указанной дозой близка к той, которая образуется в ходе нагрева под закалку (нагрева и выдержки при 495°C в течение 20 мин перед операцией закалки).

При облучении закаленного сплава Д16 дозой $2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в сечении, параллельном облученной поверхности на расстоянии 150 мкм от нее, наблюдается формирование ячеистой дислокационной структуры. Повышение дозы облучения способствует возрастанию степени ее однородности, сужению границ ячеек и возрастанию их диаметра. Кроме того, происходит практически полное растворение интерметаллидов кристаллизационного происхождения $Al_6(CuFeMn)$ речной формы. В объеме образца действие облучения на структуру сплава менее значительно: облучение не вызывает образования ячеистой структуры и растворения частиц фазы $Al_6(CuFeMn)$. В то же время, установлено влияние облучения на состав упрочняющей фазы, выделяющейся при распаде пересыщенного твердого раствора: в необлученном сплаве в процессе естественного старения выделяется метастабильная фаза θ'' (зоны ГП2) на основе фазы $CuAl_2$, в облученном - зоны ГПБ на основе фазы $Mg_2Al_5Cu_5$.

Работа выполнена при поддержке Уральского отделения РАН (грант молодых ученых и аспирантов «Влияние облучения ионами Ar^+ средних энергий на структуру и свойства сплавов системы Al-Cu-Mg в холоднодеформированном и закаленном состояниях», 2010 г.).

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРА РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЧИСТОЙ ПЛАТИНЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ И ИОНАМИ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

Е.В. Медведева*, В.А. Ивченко*, А.В. Козлов**, Т.А. Белых***, С.С. Александрова*

* Учреждение Российской академии наук Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (lena_p@bk.ru)

** ОАО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия

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

В работе приведены результаты изучения атомной структуры и пространственного распределения радиационных повреждений (вакансий и их комплексов, радиационно-индуцированных нанопор и т.д.) в объеме чистой (99,99 %) платины, подвергнутой различным типам облучения (нейтронному и ионному) методом полевой ионной микроскопии (ПИМ). Потенциальные возможности ПИМ позволяют в атомном масштабе проводить прямое прецизионное изучение радиационных повреждений кристаллической решетки материала, идентифицировать поры сколь угодно малых размеров, вплоть до единичных вакансий и их скоплений, устанавливать их концентрацию, размеры, форму, распределение в объеме облученного материала, изменение указанных параметров в

зависимости от флюенса облучения и т.д.

Облучение игольчатых образцов платины, проводилось ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ до флюенсов $F=1018$ ион/см² и плотностью ионного тока $j=200$ мкА/см² ($T=300^\circ C$). Для изучения дефектов, образовавшихся при нейтронной бомбардировке, платиновые образцы облучались в реакторе ИВВ-2М при температуре ~ 310 К до флюенса быстрых ($E > 0,1$ МэВ) нейтронов $6,7 \times 10^{17}$ см⁻².

Облучение платины нейтронами до флюенса $6,7 \times 10^{17}$ см⁻² привело к формированию в ней дефектной структуры, для которой характерна повышенная концентрация единичных точечных дефектов и их комплексов. Получена количественная информация о пространственном распределении вакансионных комплексов в зависимости от их кратности на межзеренной границе и в объеме облученного материала.

В процессе изучения структуры Pt, облученной до $F=1018$ ион/см², в приповерхностном объеме наблюдали скопления пор, наполненных атомами аргона. Установлено, что концентрация газонаполненных пор по глубине облученного металла изменяется в линейно-убывающей зависимости $y = -0,084x + 5,154$. Данные численные значения коэффициентов были рассчитаны только для условий выполненного эксперимента.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг, ГК № П750 от 20 мая 2010 г.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРОКАТАННЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ ФОЛЬГ ВСЛЕДСТВИЕ ЭФФЕКТА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ПРИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ.

Новосёлов А.А., Баянкин В.Я., Гильмутдинов Ф.З.

Отдел физики и химии поверхности ФТИ УрО РАН, Ижевск, Россия, less@fti.udm.ru

Цель: Решение фундаментальной проблемы формирования нанометровых композиционных слоев с заданными физико-химическими свойствами в металлических системах при ионном и электронном облучении.

Применяемые методы: ионно-лучевое и импульсное электронно-лучевое воздействие, исследование и контроль методами рентгеновской фотоэлектронной и оже-электронной спектроскопии, атомной силовой микроскопии, вторично-ионной масс-спектрометрии.

Полученные результаты:

Проведены исследования элементного состава поверхностных слоев прокатанных фольг $Cu_{80}Ni_{20}$ после облучения ионами Ag^+ и B^+ при различной энергии ионов и интегральной дозе облучения. Измерения показали, что с облученной стороны изменение микротвердости фольг в зависимости от параметров облучения коррелируют с изменением концентрации бора в поверхностном слое. Изменение дозы облучения вызывает гораздо более существенное изменение микротвердости (как и элементного состава), чем изменение энергии ионов. Исследование состава с необлученной стороны выявили, что в результате ионной имплантации происходит перераспределение компонентов материала (меняется отношение концентрации атомов меди и никеля), несмотря на то, что толщина фольг на несколько порядков превышает расчетную глубину изменения состава и структуры материала в результате ионной имплантации.

По нашему мнению, это связано с исходно неравновесным состоянием образцов после прокатки. Ионная имплантация вызывает самораспространяющиеся структурные изменения: при облучении мишени падающие ионы создают локальные термические пики. Очевидно, избыток энергии вызывает генерацию ударных волн, при этом энергия, уносимая волнами, достаточна для трансформации исходной дефектной структуры материала, в том числе инициацией цепных реакций (связанных с разблокировкой дислокаций, аннигиляцией разных типов дефектов). В результате на необлученной стороне фольги мы видим перераспределение компонентов материала вследствие сцепления атомов определенного сорта с возникшими в процессе ионной имплантации потоками дефектов.

Таким образом, ионно-лучевая обработка металлических систем при соответствующем подборе параметров может быть использована для направленной модификации тонкомерных изделий для создания сверхтонких поверхностных слоев заданного состава, структуры и топографии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-02-96039_урал)

ВОЗДЕЙСТВИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ Ag^+ НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВ КАРБОНИЛЬНОГО ЖЕЛЕЗА Р-20 И ВК

В.В. Овчинников*, Ф.Ф. Махинько*, Н.В. Гущина*, И.В. Окулов*, Н.В. Сдобнов**,
А.В. Федяй**

**Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (chemer@iep.uran.ru)*

***ООО «Синтез ПКЖ, г. Дзержинск, Россия*

Карбонильное железо представляет собой малодисперсные частицы чистого металлического железа размером от 0,5 до 25 мкм. Средний насыпной вес составляет от 3 до 4,5 г/см³. Порошки карбонильного железа используются для производства изделий по технологии инжекционного формования (МИМ-технология), а также в традиционной порошковой металлургии. Благодаря своей мелкой структуре они являются отличным сырьём для производства высокоточных деталей сложной формы, обладающих высокой плотностью, повышенной прочностью и хорошими магнитными свойствами. При производстве карбонильного железа большое внимание уделяется вопросам стабильности структуры и состава выпускаемых порошков, а также повышению уровня электротехнических свойств.

В работе проведена ионно-лучевая обработка порошков карбонильного железа двух марок Р-20 и ВК. Облучение порошков непрерывными пучками ионов Ag^+ с энергией 30 кэВ проводилось на установке ПУЛЬСАР, оснащенной ионным источником на основе тлеющего разряда с холодным полым катодом. Из пучка ионов Ag^+ круглого сечения с помощью коллиматора вырезался ленточный пучок сечением 20×100 мм², под которым перемещался лоток с порошком со скоростью 4 м/с. Толщина слоя облучаемого порошка, насыпанного на поверхность лотка из нержавеющей стали, была сравнима со средним размером его частиц. В ходе облучения варьировалась плотность ионного тока $j = 100 - 300$ мкА/см² и доза облучения $D = 10^{15} - 10^{17}$ см⁻².

Карбонильное железо указанных марок, подвергнутое облучению, было использовано для получения кольцевых сердечников методом холодного прессования. На подготовленные сердечники наносились обмотки медного провода марки ПЭВ диаметром 0,4 мм. Величины индуктивности и добротности катушки индуктивности измерялись с

помощью RCL–метра Hioki 3532-50, и по значениям индуктивности проводился расчет магнитной проницаемости в широком диапазоне частот. Величины потерь энергии в сердечнике определялись из В-Н зависимостей в диапазоне частот от 10 до 500 кГц и индукциях от 8 до 50 мТ. Измерения проводились на установке высокой точности УВТ 82-А-93 Уральского института метрологии.

В результате проведенных исследований установлено, что ионно-лучевая обработка порошков карбонильного железа при определенных параметрах облучения повышает его намагниченность насыщения на 1,8 % и обеспечивает 5-10-кратное увеличение добротности катушек индуктивности для радиоэлектроники с сердечником из композита «диэлектрик – карбонильное железо» в диапазоне частот 10 – 500 кГц.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (ГК № П650 от 19 мая 2010 г.).

ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РАДИАЦИОННОМУ ПОРООБРАЗОВАНИЮ В СПЛАВАХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПУЧКАМИ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

В.В. Овчинников*, В.В. Сагарадзе**, Н.Л. Печеркина**, Ф.Ф. Махинько*

**Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (cheter@ier.uran.ru)*

***Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Целью многих современных исследований процессов распухания в модельных и реакторных материалах является снижение величины распухания в ГЦК аустенитных сталях до уровня ОЦК ферритных и феррито-мартенситных сталей с сохранением преимуществ аустенита в механических свойствах.

В связи с проблемой вакансионного распухания реакторных материалов представляет интерес моделирование этого процесса с использованием ионного облучения.

В настоящей работе предпринята попытка получения эффекта радиационного распухания в исходно деформированных никельсодержащих ГЦК сплавах Fe₆₉Ni₃₁ и ЧС-68 с использованием ускоренных ионов Ag⁺ с энергией 20 кэВ. Температура облучения поддерживалась равной 650°C, что соответствовало пику распухания никельсодержащих ГЦК сплавов при облучении ионами Kг⁺ (1,5 МэВ). Требуемая температура облучения обеспечивалась за счет энергии излучения нагревателя, состоящего из спирали и рефлектора, и одновременным действием ионного пучка. В отсутствие пучка температура мишени (образца 8×8 мм² толщиной 20 мкм) составляла ~200°C. Образец был подвешен в вакууме на тонких нитях с низкой теплопроводностью таким образом, что его теплообмен с окружающей средой осуществлялся только излучением. Неоднородность поля температур по поверхности и по толщине образца не превышала 1 К. Доза облучения 5·10¹⁷ ион/см² соответствовала повреждающей дозе >200 сна.

Электронно-микроскопические исследования показали, что после облучения в сплавах Fe₆₉Ni₃₁ и ЧС-68 наблюдаются поры, имеющие линейные размеры от 10 до 100 нм, их объемная доля составляет не менее 2-3 %. Поры имеют четкую огранку, некоторые из них вытянуты в определенных кристаллографических направлениях и имеют протяженность до 100 нм.

Таким образом, установлено, что облучение ионами Ag⁺ с энергией 20 кэВ при дозе облучения 5·10¹⁷ ион/см² и температуре 650°C приводит к поровому распуханию сплавов Fe₆₉Ni₃₁ и ЧС-68.

Показано, что с привлечением известной методики одностороннего травления образцов до указанной толщины, облучение ионами низких энергий может оказаться весьма эффективным для оценочных исследований стойкости модельных и реакторных материалов к радиационному распуханию.

Работа выполнена в рамках Соглашения о сотрудничестве УрО РАН с БАЭС (проект № 10-2-47-БЯ).

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СВЕЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛЕЗА, ЦИРКОНИЯ И ВОЛЬФРАМА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ Ar^+ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

В.В. Овчинников, В.И. Соломонов, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько

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

Образцы чистого железа (99.99 Fe), вольфрама (99.96 W) и циркония облучали в вакууме при остаточном давлении $< 10^{-5}$ мм рт. ст. непрерывными пучками ионов Ar^+ при изменении энергии ионов от 5 до 20 кэВ и плотности ионного тока от 50 до 150 мкА/см². Спектр свечения мишеней измерялся многоканальным фотоприемником на базе дифракционного спектрографа ОС-12 и ПЗС-линейки в диапазоне от 360 до 850 нм. Световой поток от облучаемого образца в фотоприемник передавался по многожильному кварцевому световоду, приемный конец которого был установлен на расстоянии 1 см от края образца и направлен на поверхность образца под углом 60°.

В спектрах всех мишеней присутствуют две широкие полосы планковского теплового излучения. Первая полоса с максимумом при длине волны λ_{m1} , изменяющейся в пределах приблизительно от 500 до 570 нм, соответствует *равновесному* планковскому излучению приповерхностной плазмы. Максимум второй полосы при длине волны λ_{m2} расположен в ИК области. Эта полоса проявляется лишь в виде ее коротковолнового крыла и обусловлена тепловым излучением мишени, интегрально нагретой воздействием пучка.

На фоне этих широких полос во всех спектрах наблюдается значительно более узкие полосы *неравновесного* излучения, некоторые из этих полос хорошо соответствуют излучению атомов облучаемых металлов, а также излучению атомов аргона. Эти полосы наиболее отчетливо проявляются при ускоряющем напряжении менее 10 кВ. Для идентификации остальных полос необходимы дополнительные исследования.

В предположении о достижении квазиравновесного состояния в области термических пиков (thermal spikes), возникающих в результате термализации плотных каскадов атомных смещений и являющихся источниками приповерхностной плазмы, с использованием закона смещения Вина, получены оценки значений температуры в области термических пиков для различных металлов. Эта температура, в зависимости от материала мишени и параметров облучения, изменяется в пределах от 5000 до 6000 °С.

Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными молекулярно-динамических расчетов с использованием программы SRIM [1] для соответствующих значений энергий ионов и масс мишеней. Рост интенсивности ИК крыла излучения для всех трех металлов коррелирует с увеличением энергии ионов, плотности ионного тока, дозы облучения и соответствуют интегральному разогреву мишеней.

Работа выполнена в рамках Соглашения о сотрудничестве УрО РАН с РФЯЦ ВНИИТФ (проект № 10-2-48-ЯЦ).

1. Biersack J.P., Haggmark L.G. Nucl. Instr. & Meth. 1980. 174. 257.

НАНОСОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВЫСОКОДОЗНЫМ ИОННЫМ ОБЛУЧЕНИЕМ

В.С.Хмелевская

*Национальный исследовательский университет (МИФИ), Институт атомной
энергетики (Обнинск)*

При структурном исследовании металлических материалов (чистых металлов и сплавов — модельных и промышленных), облученных высокодозными ионными пучками, было обнаружено формирование особых аномальных состояний вещества. Состояния возникают в некотором определенном интервале радиационных параметров (доз, температур мишени и интенсивностей потока); при изменении природы или энергии ионов область существования состояний сдвигается по шкале радиационных параметров.

Данный эффект наблюдался при облучении материалов в ионных ускорителях и плазменных установках при различных энергиях и природе ионов; можно полагать, что он является универсальным.

Главные свойства состояний:

- возникают в узком интервале радиационных параметров;
- имеют кластерную нанокристаллическую морфологию (структура зарегистрирована методами трансмиссионной и сканирующей электронной микроскопии);
- возникновение состояний сопровождается значительными изменениями свойств, относящихся как к ионной, так и к электронной подсистемам металла;
- тестовым признаком, по которым состояния могут быть идентифицированы и распознаны, являются изменения рентгеновской дифракционной картины облученных образцов.

Состояния зарегистрированы в материалах с различной кристаллической решеткой — твердых растворах и промышленных сплавах систем Fe-Ni, Fe-Cr-Ni, Cu-Ni (ГЦК кристаллическая решетка), Fe-Cr, V-Ti-Cr (ОЦК решетка), Zr (ГПУ кристаллическая решетка).

Можно предположить, что целенаправленное формирование подобных состояний позволит развить новый способ радиационного модифицирования материалов.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННО-ИММЕРСИОННОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И ОСАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

И.А. Цыганов*, А. Колич**

**Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия*

(zyganov@fromru.com)

***Исследовательский центр Дрезден-Россендорф, Дрезден, Германия*

В данной работе анализируются структурно-фазовые превращения и свойства покрытий тройной системы Ti-N-O, полученных с помощью плазменно-иммерсионной ионной имплантации и осаждения металлов, ПИИИО (англ. название метода –Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition, PIID). В используемом методе плазма металла образуется при испарении материала катода электрическим дуговым разрядом в режиме постоянного тока и фильтруется от макрочастиц посредством изогнутого магнитного фильтра. Ионы из плазмы ускоряются к поверхности субстрата при приложении отрицательного напряжения к подложке. Таким образом, в процессе ПИИИО объединены ионная имплантация и осаждение, что способствует хорошей адгезии получаемых покрытий. При этом возможна обработка сложных трехмерных объектов. Оксиды и/или нитриды титана формируются путем подачи в вакуумную камеру вблизи подложки кислорода и/или азота, соответственно. Метод ПИИИО позволяет получать плотные покрытия с различными свойствами в зависимости от параметров обработки.

Фазовый состав пленок сильно зависит от отношения парциальных давлений рабочих газов в вакуумной камере. В случае подачи чистого азота на дифрактограммах присутствуют пики, характерные для TiN с ГЦК-решеткой. При дополнительной подаче кислорода в камеру с отношением парциальных давлений газов $p(O_2)/p(N_2) = 1/3$ пики TiN смещаются в сторону больших углов, что свидетельствует о сжатии решетки из-за внедрения кислорода. При равных парциальных давлениях N_2 и O_2 наблюдаются широкие дифракционные пики, которые соответствуют смеси фаз ГЦК-TiN и ГЦК-TiO. Как показывают результаты Оже-электронной спектроскопии, при отношении парциальных давлений газов $p(O_2)/p(N_2) = 1/3$ и $p(O_2) = p(N_2)$ основным компонентом полученных пленок является аморфная фаза TiO₂. Кристаллизация этой аморфной фазы в аллотропические модификации TiO₂ рутил и анатаз начинается при более высоком парциальном давлении кислорода $p(O_2)/p(N_2) = 3/1$. При подаче чистого O₂ образуется смесь кристаллических фаз, состоящая преимущественно из рутила с примесью анатаза.

Полярная компонента поверхностной энергии и гидрофобность зависят от элементного состава и степени аморфности покрытия. Самой высокой твердостью и улучшенной биосовместимостью обладает оксинитридное покрытие состава TiN_{0.4}O_{1.6}.



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.

MATERIALS CHOICES FOR THE FLEXIBLE MYRRHA IRRADIATION FACILITY.

Pierre Marmy, Serguei Gavrilov, Rafael Fernandez and Peter Baeten
SMA, SCK•CEN, Boeretang 200, 2400 Mol, Belgique (pierre.marmy@sckcen.be)

MYRRHA [1] is designed as a multi purpose irradiation facility for radio-isotopes production, reactor materials irradiation studies and nuclear fuel developments. It will also be the first of the art Accelerator Driven System (ADS) to be constructed in the world. It will serve as a demonstrator for the transmutation of radioactive waste in a high power (100MW) subcritical core cooled with lead-bismuth eutectic (LBE). For this purpose, it will be connected to a proton accelerator delivering a beam of 2.5 mA at 600 MeV.

The physical damage processes taking place during operation into the liquid metal cooled MYRRHA system have been identified to be swelling, irradiation creep, corrosion in LBE, radiation embrittlement, creep, fatigue, LBE embrittlement and stress corrosion cracking. Degradation of mechanical properties is due to the combined action of LBE and radiation damage. Based on the open literature and from previous sodium cooled fast reactors expertise the following list of materials has been chosen as candidate materials, pointing out that the final chemical composition will be determined on a latter stage: the austenitic steel 15-15Ti, also denominated D9 in the US, the austenitic steel 316 L and finally the ferritic martensitic steel T91.

The materials selected [2] in the different reactor components have been chosen taking into account the following factors, as received mechanical and physical properties, fabricability and materials availability, materials database qualification in nuclear environment and degradation of properties by irradiation and LBE.

Safe operation of the components is possible if the materials limits are not transgressed. Nevertheless the materials limits need to be validated by urgent R&D, especially in the domain of corrosion where long term results are missing and in the domain of fatigue where results are scarce.

References

1. Abderrahim, H.A., et al., *Myrrha Technical Description*, O.b.o.M. Team, Editor. 2008, SCK-CEN, 2400 Mol.
2. Marmy, P., *MYRRHA Structural Materials Choices Study*. 2010, SCK CEN, Centre d'étude de l'énergie nucléaire, Report I-187. p. 1-83.

ДИФФУЗИЯ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Г.В. Гаранин, В.В. Ларионов, Е.А. Склорова, И.П. Чернов
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск,
 Россия, larvv@sibmail.com*

Обычно рассматривается диффузия водорода в металлах отдельно под действием ионизирующего и отдельно акустического излучения. При этом возникновение акустического излучения при радиационном воздействии используется для анализа структуры наводороженных металлов, т.е. применяется в качестве инструментального

метода изменения дефектов. В данной работе показано, что при акустической эмиссии, возникающей под действием ионизирующего излучения, происходит усиление диффузии водорода, причем как на восходящей ветви акустического сигнала, так и на его нисходящей (затухающей) ветви /1/. Таким образом, возникает аномальная нелинейная диффузия водорода в титане и стали. Уравнения, описывающие изучаемые процессы, получены на основе теории Гольцова-Смирнова /2/. Приведена схема экспериментальной установки *in situ* для изучения процессов диффузии в рассматриваемых условиях и обсужден механизм переноса водорода на основе взаимодействия излучения с водородной подсистемой металлов. Для установления корреляции между величиной энергии ионизирующего излучения в наводороженных металлах и их акустическими свойствами проанализирована зависимость диэлектрической проницаемости гидридов рассматриваемых металлов от их состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зырянова, А.В., Можяев В.Г. Условия поступательного виброперемещения малых объектов под воздействием импульсов различной формы // *ЖТФ*. – 2009. – Т. 79. – №. 11. – С.77–85.
2. Смирнов, Л.И. Перенос атомов внедрения // *ФММ*. 2000. – Т. 89. – №4.– С. 10–14.

ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТОВЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ КОНВЕРТОРА НЕЙТРОННОЙ МИШЕНИ

Е.И. Жмуриков*, И.В. Савченко**, С.В. Станкус**, П.В.Логачёв*, Л. Тецchio***

* *Институт ядерной физики им. Н.М. Будкера С О РАН, г. Новосибирск*

** *Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе С О РАН, г. Новосибирск*

*** *Laboratori Nazionali di Legnaro - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Legnaro, Italy*
E-mail: evg.zhmurikov@gmail.com

Ключевые слова: теплопроводность, теплоёмкость, графит, изотоп графита ^{13}C

Проведены измерения теплофизических характеристик промышленных графитов, традиционно используемых в ядерной технике, таких как МПГ-6 или CGD от SGL Carbon Group, а также впервые синтезированного графитового композита на основе изотопа углерода ^{13}C . Измерения проводились в диапазоне температур от комнатной до 1400°C методом лазерной вспышки на установке LFA-427 фирмы Netzsch (Германия). Эти результаты сопоставлены с полученными ранее данными рентгеноструктурного анализа и высокоразрешающей электронной микроскопии, и могут быть использованы в тепловых расчётах конструкции графитовой мишени нейтронного конвертора с использованием программы ANSYS

ИЗМЕНЕНИЕ НАНОМАСШТАБНОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Н.А. Искандаров, А.А. Никитин, А.А. Алеев, С.В. Рогожкин, А.Г. Залужный
Государственный научный центр Российской Федерации Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва (iskandarov@itep.ru)

Жаропрочные малоактивируемые стали являются перспективными материалами ядерных и термоядерных реакторов нового поколения. В России особое внимание уделяется 12%-ной хромистой ферритно-мартенситной стали ЭК-181, обладающей повышенной жаропрочностью, существенно превосходящей характеристики зарубежных аналогов при температурах до 700 °С [1-2]. Считается, что улучшение механических свойств, может быть обеспечено формированием в процессе термической обработки наноразмерных особенностей структуры (различного вида кластеров, предвыделений) [1-2]. Томографические атомно-зондовые исследования ферритно-мартенситной стали ЭК-181 показали [3], что после традиционной термической обработки в матрице формируются кластеры размерами ~ 3 нм, обогащенные ванадием, хромом и азотом. Дальнейшее улучшение свойств стали ЭК-181 связывается с уменьшением размеров дисперсных частиц. Это, в свою очередь, требует уточнения режимов термической обработки данного материала. Для выбора целенаправленного пути совершенствования термообработки, необходима информация о наномасштабном состоянии, формируемым на различных стадиях термических обработок. Для исследования твердого раствора стали ЭК-181 на наномасштабном уровне в настоящее время получило широкое применение томографическая атомно-зондовая микроскопия.

Целью настоящей работы является изучение изменения наномасштабного состояния стали ЭК-181 методом томографической атомно-зондовой микроскопии в зависимости от режимов термической обработки: - заводской отжиг при 800-850°С; - закалка при 1100°С, 40 мин; воздух; - закалка при 1100 °С, 40 мин; воздух + отпуск при 720 °С, 3 ч; воздух; - закалка при 1100 °С, 40 мин + термоциклирование 810°С, 30 мин + отпуск при 720 °С, 1 ч.

Работа выполнена при поддержке госкорпорации Росатом и при частичной поддержке РФФИ (грант 08-02-01448-а).

Литература

1. Леонтьева-Смирнова М. В., Иолтуховский А. Г., Чернов В. М., Колобов Ю. Р., Козлов Э. Н., *ВАНТ, Материаловедение и новые материалы*, **2(63)**, 142, (2004).
2. Леонтьева-Смирнова М. В., Агафонов А. Н., Ермолаев Г.Н. и др., *Перспективные материалы*, **6**, 40 (2006)
3. Рогожкин С.В., Агеев В.С., Алеев А.А., Залужный А.Г., Леонтьева-Смирнова М.В., Никитин А.А., *Физика металлов и металловедения*, **6(108)**, 612 (2009)

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ НАНОЛЮМИНОФОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЙ

В.С.Кортов, Ю.Г.Устьянцев, С.В.Звонарев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, г. Екатеринбург, Россия (v.kortov@mail.ustu.ru)

Интерес к свойствам наноразмерных материалов стимулировал интенсивное изучение особенностей свечения нанолюминофоров. В настоящее время исследования сконцентрировались на двух основных направлениях. Первое из них связано с поиском эффективных нанолюминофоров для светоизлучающих устройств. Второе направлено на создание высокодозных люминесцентных детекторов ионизирующих излучений.

В докладе рассмотрены фундаментальные особенности нанолюминофоров, обусловленные их структурным состоянием. Отмечено влияние на характеристики свечения нанолюминофоров высокой концентрации поверхностных центров захвата, а также квантово-размерных ограничений. Повышение вероятности рекомбинаций носителей заряда внутри наночастиц и уменьшение количества безизлучательных переходов приводят к росту интенсивности люминесценции. В результате нанолюминофоры являются перспективными материалами для создания светотехнических устройств на основе ультрафиолетовых светодиодов. В этом случае нанолюминофоры играют роль конверторов УФ-излучения в видимый свет.

Особенности люминесценции наноструктурных материалов определяют также ряд новых свойств, важных при детектировании излучений. Среди них увеличение выхода люминесценции при высокодозном облучении и повышение радиационной стойкости, обусловленное интенсивным стоком образующихся в наночастицах радиационных дефектов на их многочисленных границах. В результате замедляется процесс накопления радиационных дефектов, и следовательно, деградация свойств люминесцентных детекторов при высокодозном облучении.

В докладе приводятся описанные в литературе и полученные авторами результаты исследований люминесцентных и дозиметрических свойств нанолюминофоров различного состава при регистрации гамма-излучения, электронных и ионных пучков высокой плотности. Проведено сравнение указанных свойств коммерческих и наноразмерных образцов термолюминесцентных детекторов. Отмечена перспективность использования нанолюминофоров в качестве высокодозных дозиметров.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ В АЗОТИРОВАННЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ Fe-Cr СПЛАВАХ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В.А. Шабашов*, С.В. Борисов**, В.В. Сагарадзе*, А.В. Литвинов*, А.Е. Заматовский*, К.А. Ляшков*, Н.Ф. Вильданова*, В.И. Воронин

**Институт физики металлов УрО РАН, Екатеринбург*

***Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург*

В настоящее время активное развитие получили исследования по разработке азотсодержащих высокопрочных сталей и сплавов в качестве конкурентов нержавеющей стали, содержащим дефицитные никель и марганец. К такого рода системам относится

система Fe-Cr-N. В работе [1] подробно исследованы равновесные фазовые диаграммы системы Fe-Cr-N и влияние азота на процессы структурообразования и физико-химические свойства этих сплавов. Азотирование поверхности сплавов этой системы создает условия для модификации структуры при последующей деформационной и термической обработках.

В данной работе рассмотрено влияние содержания хрома на фазовый состав и структуру Fe и Fe-Cr сплавов (Fe-4Cr, Fe-20Cr и Fe-22Cr) в поверхностных областях, азотированных ионно-плазменным методом. Показано, что по мере увеличения содержания хрома азотирование приводит к росту количества азота в сплавах и замене азотистого аустенита и нитридов γ' -Fe₄N и ε -Fe_xN на CrN. Образующиеся нитриды являются субмикроструктурными, что облегчает последующее растворение их в процессе деформационно-индуцированных превращений нитридов и образования твердых растворов азота и хрома в матрице α Fe.

Проведено исследование влияния характера структуры матрицы и сформированных ионно-плазменным методом нитридов на процессы механоактивированных фазовых превращений, кинетику образования твердых растворов и наноструктурирование.

Работа поддержана проектами РФФИ № 10-03-00113 и Президиума УрО РАН № 10-2-12-БЯ).

1. Костина М.В., Банных О.А., Блинов В.М., Дымов А.В., *Материаловедение*, **2**, 35 (2001)

ИЗУЧЕНИЕ МАРТЕНСИТНОГО γ - α' ПЕРЕХОДА ПРИ СЖАТИИ ОБРАЗЦОВ ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ СТАЛИ 12X18H10T

Мережко М.С., Максимкин О.П., Гусев М.Н., Токтогулова Д.А.

Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан (merezko.mihail@gmail.com)

Приведены и обсуждаются результаты экспериментов, направленных на изучение кинетики фазового бездиффузионного γ - α' превращения в нержавеющей стали 12X18H10T в процессе одноосного сжатия и, для сравнения, растяжения.

Стальные образцы цилиндрической формы аустенизировали (1050°C, 30 минут), а затем облучали в активной зоне исследовательского реактора ВВР-К при температуре ~80°C до максимального флюенса нейтронов $1,4 \cdot 10^{19}$ н/см². Проводили механические испытания на растяжение и сжатие со скоростью 0,5 мм/мин при комнатной температуре. В процессе пошаговой пластической деформации регистрировали количество мартенситной α' -фазы, индуцируемой в образце, а также изменение его геометрических размеров.

В результате экспериментов построены диаграммы сжатия и растяжения в координатах «истинные» напряжения – локальные «истинные» деформации», а также кривые деформационной зависимости мартенситной α' -фазы.

Обработка полученных данных позволила определить следующие величины, характеризующие параметры γ - α' перехода в необлученной и облученной нейтронами стали:

- «истинные» значения критических напряжений и деформаций, соответствующих началу образования α' -мартенсита в процессе деформации;
- параметры в уравнении, описывающем кинетику мартенситного γ - α' превращения;
- значения критической плотности механической работы, необходимой для индуцирования γ - α' перехода.

Анализируется роль полей внутренних напряжений в процессах зарождения и накопления мартенситной α' -фазы в метастабильных нержавеющей сталях, облученных нейтронами.

О КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОМ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА ПО СЕЧЕНИЮ МОЩНЫХ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ

В.В. Овчинников*, С.В. Овчинников *, Ф.Ф. Махинько*, А.А. Повзнер**

*Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия (chemer@ier.uran.ru)

**Уральский государственный технический университет, г. Екатеринбург, Россия

Определение *плотности ионного тока* ($\text{мкА}/\text{см}^2$) или (с точностью до множителя, равного заряду ионов) *потока ионов* (называемого также флаксом, $\text{ион}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$), равного скорости набора *дозы* или *флюенса*, является сложной задачей. Использование для этой цели цилиндра Фарадея с электродом, на который подается отрицательный потенциал, отсекающий вторичные электроны, выбиваемые ионами из мишени, является эффективным лишь для малых плотностей тока. При повышенных плотностях ионного тока возможно образование проводящей плазмы внутри цилиндра Фарадея, что искажает измерения.

Для определения плотности ионного тока могут быть использованы достаточно сложные экспериментальные схемы [1], которые для каждого конкретного типа источника ионов могут быть предложены и реализованы лишь профессиональными специалистами в области электрофизических измерений.

Следует отметить также, что в некоторых случаях погрешность измерения флакса может быть обусловлена перезарядкой части ионов. При этом разогрев мишени может наблюдаться в отсутствие соответствующего роста плотности ионного тока за счет присутствия в потоке частиц нейтральных атомов, вследствие эффекта перезарядки.

На основе анализа процессов, сопровождающих внедрение ускоренных ионов в вещество, и особенностей решения одномерной задачи теплопроводности в определенных граничных условиях, предложен калориметрический метод определения флакса ускоренных частиц и некоторых других параметров. Основываясь на законах сохранения энергии и Стефана-Больцмана, в условиях *мониторинга температуры* зондов удается получить систему асимптотических уравнений (при $t \rightarrow 0$ и $t \rightarrow \infty$), позволяющих (с учетом получаемых экспериментально малых поправок на распыление и увеличение массы мишени за счет внедрения ионов) определить целый ряд параметров процесса. А именно, удастся определить коэффициент поглощения материалом мишени энергии пучка ионов, коэффициент распыления и лучеиспускательную способность (степень черноты) материала мишени, а также измерить плотность ионного тока (флаксы ускоренных частиц) по сечению пучка ионов.

Работа выполнена в рамках Соглашения о сотрудничестве УрО РАН с БАЭС (проект

№ 10-2-47-БЯ).

1. Гаврилов Н. В., Каменецких А. С. Журнал технической физики. 2006. Т. 76. Вып. 6. С. 32-37.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ВАКАНСИЙ И ПОР В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ ПО ДАННЫМ ВРАФ

В.И.Графутин¹, А.Г.Залужный¹, Е.П.Прокопьев^{1,2}

ФГУП ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики им.
А.И.Алиханова, ул. Б.Черемушкинская, 25, 117259, Москва, Россия
Московский государственный институт электронной техники (МИЭТ), Зеленоград,
проезд 4806, д. 5, 124498, Москва, Россия
(e-mail: eprokopiev@mail.ru)

В работах [1-5] на основании исследований сталей реактора ВВЭР-440 показано, что при нейтронных флюенсах $\approx 10 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ все позитроны захватываются дефектами. При этом определенное время жизни позитронов в этих дефектах относительно аннигиляции составляет величину 250-260 ps. Такому времени жизни должны соответствовать дефекты с радиусами $\approx 2-3 \text{ \AA}$ (то есть с диаметрами 5-6 \AA) [3,4]. Авторы [3-5] делают вывод, что под действием нейтронного облучения образуются небольшие вакансионные кластеры из 5-6 вакансий. Отметим, что оценки размеров дефектов, определенных из результатов измерений углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ), дают примерно те же значения величин размеров.

Литература

1. V. Slugen. *What kind of information we can obtain from positron annihilation spectroscopy?* EUR - Scientific and Technical Research Series; ISSN 1018-5593. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. 2006 – 94 pp.
2. Q. Deng, Y. Jean // *Macromolecules*. 1993. V.26. P.30.
3. В.И.Графутин, Е.П.Прокопьев, Ю.В.Фунтиков. Развитие методов позитронной аннигиляционной спектроскопии для определения размеров нанобъектов в пористых системах, дефектных материалах и наноматериалах. Physics-Online.ru/ Обсуждение современных проблем в мире физики/ Блог. Прокопьев Евгений Петрович. Рубрика: Химическая физика, физическая химия и материаловедение http://www.physics-online.ru/php/paper.phtml?jrnid=null&paperid=8127&option_lang=rus
4. P. Hautojärvi, L. Pöllönen, A. Vehanen, J. Yli-Kauppila, *J. Nucl. Mater.* 114 (1983) 250.
5. J.Cizek, F.Becvar, I.Prochazka // *Nucl. Instrum. And Meth. Phys. Res.* 2000. V.A450. P.325-337.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАРТЕНСИТНОГО $\gamma \rightarrow \alpha'$ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛИ 12Х18Н10Т, ОБЛУЧЕННОЙ ТЕПЛОВЫМИ И БЫСТРЫМИ НЕЙТРОНАМИ, ДЕФОРМИРОВАННОЙ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Рубан С.В., Максимкин О.П., Гусев М.Н.

Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан (rubanserg@gmail.com)

Известно, что характеристики многих физико-механических свойств реакторных аустенитных нержавеющей сталей и их поведение при нагружении во многом определяются кинетикой $\gamma \rightarrow \alpha'$ перехода в процессе пластической деформации. Это обстоятельство особенно важно учитывать при проведении работ по транспортировке отработавших тепловыделяющих сборок реакторов на этапе их декомиссии.

В настоящей работе изучали фазово-структурные изменения, индуцированные холодной деформацией в стали 12Х18Н10Т (МТО состояние) – материале шестигранного чехла отработавшей тепловыделяющей сборки быстрого реактора БН-350 (ЦЦ-19, «-160 мм», $T_{\text{обл}}=370^\circ\text{C}$, 55 сна), а также в аналогичной стали в аустенизированном состоянии (1050°C , 30 мин), подвергнутой нейтронному облучению в исследовательском реакторе ВВР-К ($4 \cdot 10^{18}$; $1,9 \cdot 10^{19}$; $9 \cdot 10^{19}$ н/см², $T_{\text{обл}} < 80^\circ\text{C}$).

Необлученные и облученные плоские стальные образцы деформировали при температурах 20, -20, -60, -100°C пошагово регистрируя изменение магнитных свойств и геометрических размеров образцов. В результате построены кривые зависимости «истинных» напряжений и количества образовавшейся α' -фазы (M_f) от «истинных» деформаций (ϵ). Это дало возможность, в частности определить «истинные» критические параметры начала образования α' -фазы.

Полученные экспериментальные данные анализировали, используя уравнение Людвигсона-Бергера. Определены значения коэффициентов в этом уравнении для различных условий облучения и испытания. Показано, что параметры автокаталитичности и склонности стали к мартенситному превращению в сильной степени зависят от температуры растяжения. Настоящие результаты сопоставлены с полученными ранее [1,2].

Литература

1. Максимкин О.П., Садвокасов Д.Х. Кинетика мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения, индуцированного деформацией в стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами. *Препринт ФТИ НАН РК* (1997). с.31

2. Максимкин О.П., Налтаев А.С., Бердалиев Д.Т. Кинетика развития мартенсита деформации в нержавеющей стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами. *Вестник КазНУ серия «физическая»* (2008) стр. 58-67

ИЗУЧЕНИЕ МАРТЕНСИТНОГО $\gamma \rightarrow \alpha'$ ПРЕВРАЩЕНИЯ В НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T, ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ И ДЕФОРМИРУЕМОЙ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

С.В. Рыбин, О.П. Максимкин, Д.А. Токтогулова, М.Н. Гусев.
Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан

В последнее время в реакторном материаловедении большое внимание уделяется изучению мартенситных (прямых и обратных) превращений, протекающих в нержавеющей аустенитных сталях под воздействием нейтронного потока, температур и градиентов напряжений. Известно также, что низкие температуры испытания и облучение высокоэнергетичными частицами интенсифицируют фазовые превращения.

В этой связи выявление закономерностей и особенностей $\gamma \rightarrow \alpha'$ -перехода при низкотемпературной деформации метастабильных хромоникелевых сталей представляет определенный интерес.

В настоящей работе приведены результаты изучения мартенситного превращения в облученной нейтронами ($\max \Phi t = 2 \cdot 10^{20}$ н/см², $E > 0,1$ МэВ) реакторной стали 12X18H10T в процессе ее деформирования при отрицательных (до -100°C) температурах (Т), с использованием метода измерения электросопротивления (R).

Миниатюрные стальные образцы после аустенизации (1050°C , 30 мин) облучали в реакторе ВВР-К при $T < 80^\circ\text{C}$. Затем необлученные (исходные) и облученные нейтронами образцы деформировали при различных отрицательных температурах на универсальной испытательной машине «Instron-1195» в специально созданной низкотемпературной камере. Текущие экспериментальные данные, полученные в ходе эксперимента, автоматически регистрировались с помощью ПК.

В результате получены зависимости $R=f(T)$ и $R=f(\Phi t)$, анализ которых позволил установить параметры мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращения при различных условиях растяжения облученной нейтронами стали. Обсуждаются механизмы структурно – фазовых превращений в облученных метастабильных нержавеющей сталях в процессе низкотемпературной деформации.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ СТАЛИ 12X18H10T И АРМКО-ЖЕЛЕЗА, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ

Д.А. Токтогулова, О.П. Максимкин, М.Н. Гусев, М.С. Мережко
Институт Ядерной Физики, Алматы, Казахстан (diana@inp.kz)

Есть все основания полагать, что изменение прочности и пластичности конструкционных реакторных материалов при эксплуатации в температурном интервале $200-600^\circ\text{C}$ во многом определяются процессами динамического деформационного старения (ДДС) – взаимодействием примесных и легирующих атомов с подвижными дислокациями. Как правило, ДДС сопровождается появлением на деформационной кривой зубчиков, связанных с макролокализацией деформации.

Ранее были установлены некоторые закономерности и особенности явления ДДС в железе, нержавеющей стали 12X18H10T и высоконикелевом сплаве ЧС-43

(03X20H45M4БРЦ), облученных в исследовательском реакторе ВВР-К[1]. Настоящая работа выполнена в развитии этих исследований.

Плоские образцы ($10 \times 3.5 \times 0.3$ мм) облучали в реакторе ВВР-К до максимального флюенса нейтронов $1.4 \cdot 10^{19}$ н/см² ($E > 0.1$ МэВ). Механические испытания на растяжение проводили со скоростью $8.3 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹ в диапазоне температур 20-700°C. Часть экспериментов сопровождалась видеозаписью с целью изучения особенностей локализации деформации при ДДС.

Выявлены две температурных области ДДС в облученной нейтронами нержавеющей стали 12X18H10T — 200-400°C и 425-625°C, в которых зубчатость различается по типу и интенсивности. В низкотемпературной области наблюдается уменьшение интенсивности ДДС вследствие облучения.

Установлено, что нейтронное облучение армко-железа привело к уменьшению эффекта охрупчивания в диапазоне температур протекания процессов ДДС и подавлению зубчатости на кривых течения тем сильнее, чем выше флюенс.

Рассмотрена эволюция микроструктуры облученного армко-железа в ходе деформационного упрочнения и обсуждаются механизмы ДДС в облученных материалах.

[1] Сакбаев М.Ж. *Динамическое деформационное старение железа и некоторых железохромоникелевых сплавов, подвергнутых радиационному воздействию*, Автореф.дисс...к.ф.-м.н., Алматы, 1994, 22с.

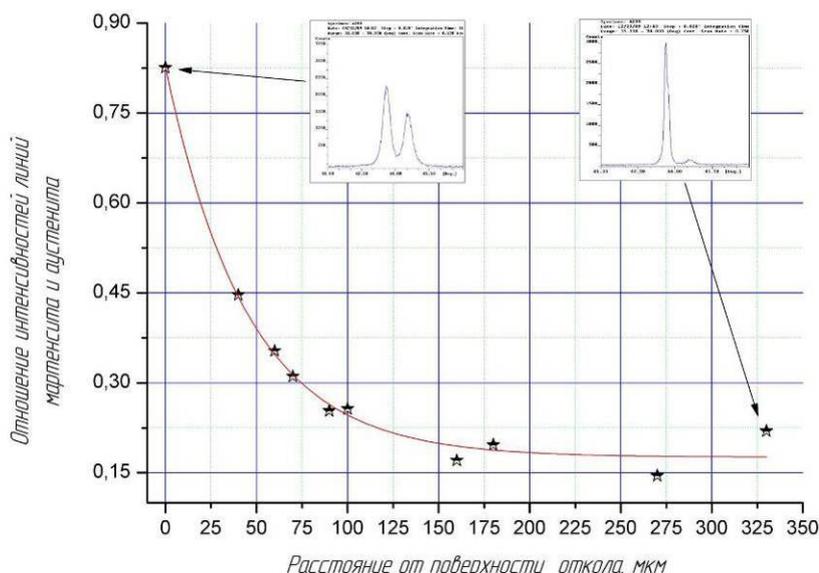
ЛОКАЛИЗАЦИЯ МАРТЕНСИТА ВБЛИЗИ ОТКОЛА ПРИ УВН НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12X18H10T

К.Г. Топорищев, Ю.Н. Зуев, И.Л. Святков, А.Е. Шестаков, А.В. Павленко
Российский федеральный ядерный центр всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия
(dep5@vniitf.ru).

Сталь 12X18H10T широко применяется в РФЯЦ-ВНИИТФ. Сочетание механических характеристик стали, таких как прочность, пластичность и ударная вязкость, её технологичность (свариваемость, коррозионная стойкость, и т.п.) делают её весьма привлекательной при изготовлении ампул для хранения и испытания токсичных и делящихся материалов. Данная сталь активно использовалась во взрывных экспериментах.

Работа выполнена с целью выявления на микроуровне изменений в стали 12X18H10T происходящих при ударно-волновом нагружении (УВН).

Изложены результаты рентгенографического исследования распределения мартенсита деформации в образцах из нержавеющей стали 12X18H10T претерпевших откол при ударно-волновом нагружении. Для исследования распределения содержания мартенсита по глубине выбранного образца был проведен послойный рентгеноструктурный анализ со стороны откола. Обнаружена локализация мартенсита деформации вблизи поверхности откола. Сделаны оценки толщины слоя, в котором происходит локализация.



Литература

1. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. *Специальные стали. Учебник для вузов.* М.: Металлургия, 1985, 408 с.
2. Шаскольская М.П., «Кристаллография», *Высшая школа. Второе издание, перераб. и доп.* – М.: Высш. шк., 1984. – 376 с.
3. А. Гинье. «Рентгенография кристаллов», *теория и практика.* Перев. с французского Е.Н. Беловой, С.С. Квитки, В.П. Тарасовой под ред. академика Н.В. Белова. Гос. изд. физ-мат. литературы. Москва 1961, 604 с.
4. Г. Липсон, Г. Стипл «Интерпретация порошковых рентгенограмм». Перевод с английского Е.Н. Беловой и Г.П. Литвинской под ред. Н.В. Белова. Издат. «МИР» Москва 1972.

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ И ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЛИ 12Х18Н10Т ПОСЛЕ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ЛЕГКОГАЗОВОЙ ПУШКЕ

И.В. Торопов, Д.А. Беляев, Ю.Н. Зуев, Н.В. Иванова, А.В. Павленко И.Л. Святков, Е.А. Шестакова

Российский федеральный ядерный центр всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, Россия, г. Снежинск (dep5@vniitf.ru)

Проведено металлографическое и фрактографическое исследование образцов из нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т с различной термомеханической историей (в исходном состоянии, после термической обработки и после ударно-волнового нагружения), сохранных после ударного нагружения на газовой пушке. Определен фазовый состав материала образцов в исходном состоянии (аустенит, остаточный феррит и включения карбида титана); после термообработки, сопровождавшейся измельчением зерна (аустенит и включения); после ударно-волнового нагружения (аустенит, включения и мартенсит деформации). Установлено, что разрушение материала после ударно-волнового нагружения имеет

преимущественно вязкий характер и осуществляется по механизму зарождения и слияния микропор.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТЯЖЕЛЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ.

Р.Р. Фазылов, Ю.Н. Долинский, Е.А. Шестакова, Ю.Н. Зуев.
РФЯЦ-ВНИИТФ, Россия

В процессе работы реактора деления с жидкосолевой активной зоной (ЖСР) прогнозируется образование значительных количеств трития. Для контроля оборота трития, обладающего высокой подвижностью, химической и радиационной активностью, необходимы знания о его поведении в конструкционных материалах и фторидных расплавах.

В настоящее время в рамках проекта МНТЦ #3749 выполнена первая серия экспериментов в этом направлении. Проведены измерения скорости проникновения дейтерия из газовой фазы через плоские образцы никелевых сплавов ХН80МТЮ (Россия) и EM721 (CNRS, Франция).

Определены коэффициенты проницаемости, диффузии и растворимости дейтерия в данных сплавах в диапазоне температур 473...1123°K при давлении дейтерия 0,14... 89,8 кПа. Показано, что температурная зависимость коэффициентов проницаемости и диффузии дейтерия в сплаве ХН80МТЮ имеет арениусовский вид с отклонением в области температур 723...823°K.

Для понимания обнаруженного явления выполнены исследования структурного состояния сплавов до и после экспериментов по водородопроницаемости, результаты которых так же приводятся в данной работе.

ОБЛУЧЕНИЕ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ МОЩНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

В.Ф. Балакирев*, В.В. Крымский**, Н.А. Шабурова***
Институт металлургии УрО РАН (г. Екатеринбург)

***Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*
(kvv@susu.ac.ru)

****Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*
(sarnata34@rambler.ru)

Регулировать свойства готового металлов можно уже на начальных стадиях приготовления – с помощью внешнего воздействия на расплав. Известно, что, варьируя режимы и методы обработки расплава, можно в широких пределах изменять структуру и свойства металла.

Технологические процессы производства металлических расплавов связаны с переводом исходных материалов в расплавленное состояние и последующую кристаллизацию системы. Традиционно, исследователи большее внимание уделяют именно второй стадии, т.е. поиску оптимальных условий кристаллизации. Попытки же

воздействия на металл на стадии расплава ограничиваются лишь дополнительным легированием и рафинированием, с целью оптимизации состава и удаления вредных примесей. В работе предлагается способ внешнего воздействия на расплав, обеспечивающий получение литого металла с повышенным комплексом свойств.

В качестве внешнего физического воздействия на расплав в работе рассматривается обработка мощными наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ).

Воздействие на расплавы металлов высокоэнергетическими электромагнитными импульсами – новое, мало исследованное направление. Впервые в мире с 1996 г. действие высокоэнергетических электромагнитных импульсов на различные вещества изучалось в Южно-Уральском государственном университете. Использовались генераторы с импульсной мощностью более 1 МВт при длительности импульса 1 нс. Генераторы имеют малые габариты и вес. Потребляемая мощность менее 100 Вт.

Обработку расплавов проводили на установке, схема которой приведена на рис. 1.

В проводимых экспериментах использовался генератор НЭМИ типа GNP со следующими характеристиками: длительность импульса 0,5 нс, амплитуда более 8 кВ, мощность в одном импульсе более 1 МВт, частота повторения импульсов до 1000 Гц. Генератором (1) создавался однополярный импульс тока. Один электрод (2) генератора погружался в тигель с расплавом, а второй закреплялся на корпусе тигля.

Воздействие ЭМИ на расплав осуществляли погружением излучателя (4) в расплав металла (6).

Воздействию подвергались расплавы, как черных – сталь 20Л, 20ГЛ, чугун СЧ 20, низкокремистый чугун с 3,7 мас.% С, так и цветных металлов – меди, оловянной бронзы, алюминия, промышленных силуминов, цинковых сплавов, свинцово-цинковых и т.д. [1, 2, 3]. Во всех проводимых исследованиях помимо изменений структуры и свойств металла были и некоторые изменения химического состава металла [2, 4].

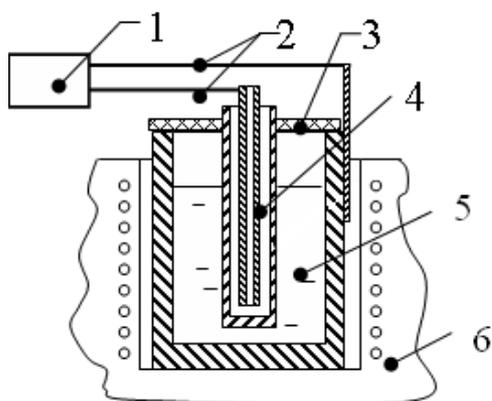


Рис. 1. Схема установки для обработки металлических расплавов:

НЭМИ:

- 1 – генератор НЭМИ;
- 2 – провода;
- 3 – асбестовая крышка;
- 4 – излучатель;
- 5 – тигель с расплавом;
- 6 – нагревательная печь сопротивления

Результаты большинства проведенных независимых исследований металлов и сплавов хорошо согласуются друг с другом и однозначно свидетельствуют о положительном влиянии электромагнитного импульсного воздействия на структуру и свойства готового металла. Однако следует заметить, что последующие термообработки литого металла нивелируют результаты импульсного воздействия.

Работа авторов является продолжением работ обозначенного направления и посвящена изучению воздействия электромагнитных импульсов на расплавы свинца и легкоплавких сплавов.

Электромагнитное воздействие на расплав свинца проводилось на приведенной выше установке. Длительностью импульсного воздействия на расплав свинца была различной – 0, 15, 30 и 60 минут.

Исследование микроструктуры, проводимое растровым электронным микроскопе JEOL JSM-6460LV показало:

1) Фазовый состав образцов одинаковый и представлен следующими фазами: свинцовистой матрицей, кристаллами сурьмы, выделившимися по границам свинцовых зерен, сульфидными (Cu, As, Sb, S)- и PbS- фазами.

2) В микроструктуре образцов имеются некоторые характерные отличия. В образце, не подвергнутом электромагнитному воздействию, преобладают неравновесные выделения эвтектических кристаллов сурьмы, которые в некоторых участках микрошлифа образуют сплошную сетку по границам зерен. Сульфидные включения сравнительно крупные, компактные и неравномерно распределены по поверхности микрошлифа.

В остальных образцах наблюдается снижение доли эвтектических выделений кристаллов сурьмы, которые становятся дисперсными. Отмечено повышение доли сульфидных включений в структуре.

Для необработанного импульсами образца характерно наличие ликвации по основным примесным элементам (Sb, Cu, As). Вследствие этого, в отдельных областях металла концентрация этих элементов достигает эвтектического состава и происходит образование неравновесной эвтектики.

Исследование влияние электромагнитной обработки расплавов легкоплавких сплавов показало следующее.

Исследуемые сплавы 38 % Pb – 62% Bi и 32% Pb – 50% Bi – 18% Sn были приготовлены в лабораторных условиях из технически чистых компонентов. После расплавления всех компонентов расплав перемешивался, и отливалась контрольная проба для анализа химического состава. Далее половина расплава разливалась в алундовый тигель, вторая половина каждого сплава – подвергалась воздействию электромагнитных импульсов в течение 10 минут, затем также бралась проба на химический состав, остатки металла заливались в алундовый тигель.

Микроструктура образцов исследовалась на полированных нетравленных шлифах.

Характерные микроструктуры сплавов показаны на рисунках 2, 3.

Согласно диаграмме состояний Pb-Bi сплав относится к заэвтектическим. Фазовый состав заэвтектических сплавов в системе Pb-Bi представлен двумя фазами – первичными кристаллами висмута, кристаллизующимися из жидкой фазы и двойной свинцово-висмутовой эвтектикой, кристаллизующейся при 125°C. Количество свинцово-висмутовой эвтектики в структуре указанного сплава при равновесной кристаллизации должно составлять порядка 70%, а первичных кристаллов висмута – 30%.

Исследования микроструктуры необработанного импульсами образца показали, что количество эвтектики в структуре образца не превышает 45-50%, соответственно первичных кристаллов висмута – 50-55%. Отмеченное соотношение фаз свидетельствует о протекании неравновесной кристаллизации, обусловленной, по всей видимости, ускоренным охлаждением.

Характерным отличием микроструктуры сплава, обработанного импульсами в расплавленном состоянии, является заметно меньшее количество первичных кристаллов висмута. Количество первичных кристаллов висмута не превышает 5%.

Следовательно, в случае сплава, облученного электромагнитными импульсами можно говорить о протекании равновесной кристаллизации.

На рис. 3 показаны характерные микроструктуры сплавов системы Pb-Bi-Sn.

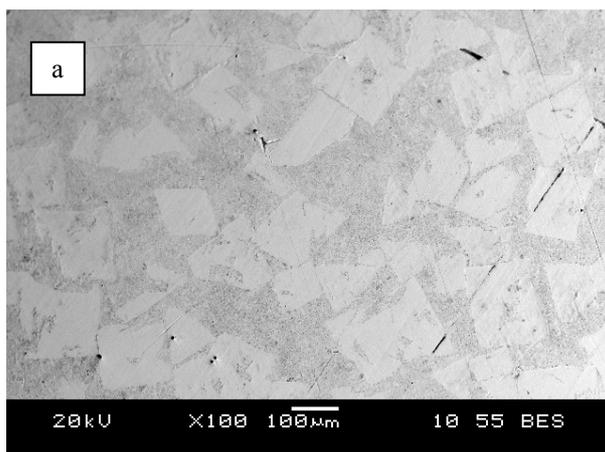
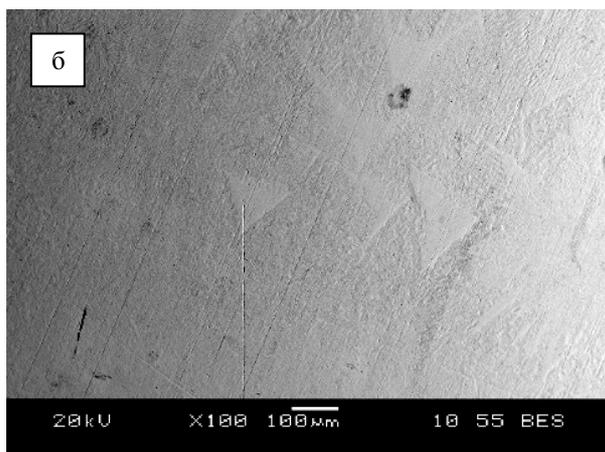


Рис. 2 – Микроструктура образца необлученного (а) и облученного (б) двухкомпонентного 38 % Pb – 62% Bi сплава



Как исходный, и обработанный мощными электромагнитными импульсами образец содержат в структуре 3 фазы – первичные кристаллы висмута, окаймленные двойной оловянно-висмутовой эвтектикой, тройная свинцово-оловянно-висмутовая эвтектика располагается на периферии.

В микроструктуре сплавов наблюдается существенное различие в количестве фаз. В структуре обработанного сплава практически отсутствуют первичные кристаллы висмута, заметно снижается количество двойной эвтектики.

Для исследуемых сплавов проводились измерения плотности методом трехкратного взвешивания. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения плотности исследуемых сплавов

Образец	Плотность, г/см ³
Сплав Pb-Bi, исходный	10,421
Сплав Pb-Bi, обработанный НЭМИ	10,537
Сплав Pb-Bi-Sn, исходный	9,779
Сплав Pb-Bi-Sn, обработанный НЭМИ	9,905
Чистый свинец, исходный	11,132
Чистый свинец, обработанный НЭМИ с течение 15 минут	10,934

Чистый свинец, обработанный НЭМИ в течение 30 минут	10,482
Чистый свинец, обработанный НЭМИ в течение 60 минут	11,080

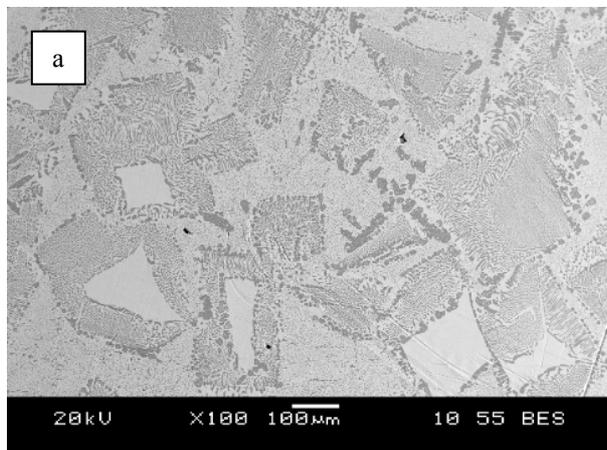
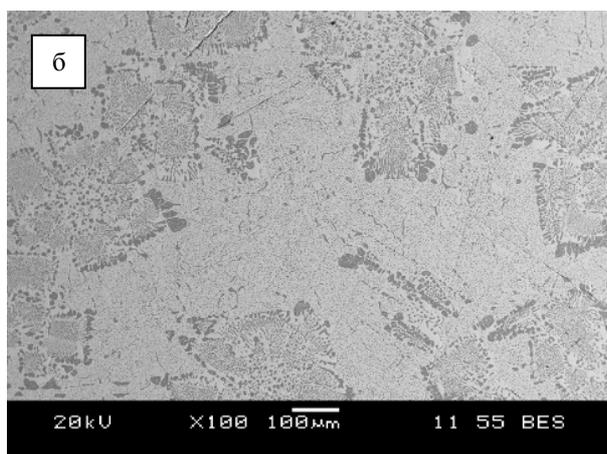


Рис. 3 – Микроструктура образца необлученного (а) и облученного (б) трехкомпонентного сплава



Сравнение твердости свинцовых образцов показало (табл. 2):

Таблица 2

Значение твердости литых свинцовых образцов

№ образца	Средняя твердость, НВ
Чистый свинец, исходный	11,6
Чистый свинец, обработанный НЭМИ с течение 15 минут	12,6
Чистый свинец, обработанный НЭМИ в течение 30 минут	10,9
Чистый свинец, обработанный НЭМИ в течение 60 минут	13,4

Таким образом, по результатам проведенного исследования можно заключить, что воздействие на расплав свинца и легкоплавких сплавов мощными наносекундными электромагнитными импульсами способствует развитию равновесной кристаллизации во всем объеме металла, измельчению структуры и улучшению свойств металла. Что

подтверждает результаты проведенных ранее экспериментов.

НИР проводится в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Литература

1. Ри Э.Х., Ри Хосен, Дорофеев С.В., Якимов В.И. *Влияние облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на ее строение, процессы кристаллизации, структурообразование и свойства литейных сплавов.* – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 177 с.
2. Балакирев В.Ф., Крымский В.В., Кулаков Б.А., Ри Хосен. *Электроимпульсные нанотехнологии* / под ред чл.-корр. РАН Л.А. Смирнова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009.
3. Шабурова Н.А. *Формирование структуры и свойств литейных алюминиевых сплавов под влиянием деформационных и электроимпульсных воздействий: дисс. канд. техн. наук.* – Челябинск: 2007. – 176 с.
4. В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, Н.А. Шабурова *Электромагнитное облучение расплавов / Тезисы докладов восьмого международного уральского семинара «Радиационная физика металлов и сплавов».* – Снежинск. 2009. – С. 29-31.

ЭФФЕКТ ОС ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14 МЭВ НА КНИ СБИС СТАТИЧЕСКОГО ОЗУ.

Е.Ю. Шамаев, А.П. Степовик, В. П. Шукайло

Российский Федеральный Ядерный центр – Всероссийский НИИ Технической Физики, 456770 Россия, Снежинск, Челябинская обл. а.я. 245 (dep5@vniitf.ru)

При взаимодействии нейтронов с энергией 14 МэВ с полупроводником образуются локальные области выделения энергии. В связи с развитием современной микроэлектроники по пути уменьшения геометрических размеров отдельных активных элементов, локальная область выделения энергии становится сопоставимой по размерам с активной областью интегрального транзистора. Вследствие этого, нейтроны с энергией 14 МэВ могут вызывать одиночный сбой (ОС) в цифровых ИМС, то есть переключение логического состояния ячеек памяти, триггеров и логических вентилей цифровых ИМС, связанное с генерацией относительно большого локального заряда в активной области прибора.

Наиболее вероятным механизмом взаимодействия нейтронов с энергией 14 МэВ и кремния является образование первично-выбитых атомов (ПВА). В этом процессе присутствуют также и пороговые ядерные реакции, но их сечение взаимодействия незначительно.

Образующиеся ПВА имеют среднюю энергию порядка 960 кэВ и линейную потерю энергии (ЛПЭ) около $6 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2 / \text{мг}$.

Целью данной работы было исследование эффекта ОС в БИС КНИ статического ОЗУ (СОЗУ) при воздействии на них нейтронов с энергией 14 МэВ. Полученные результаты подтверждают, что нейтроны с энергией 14 МэВ вызывают ОС.

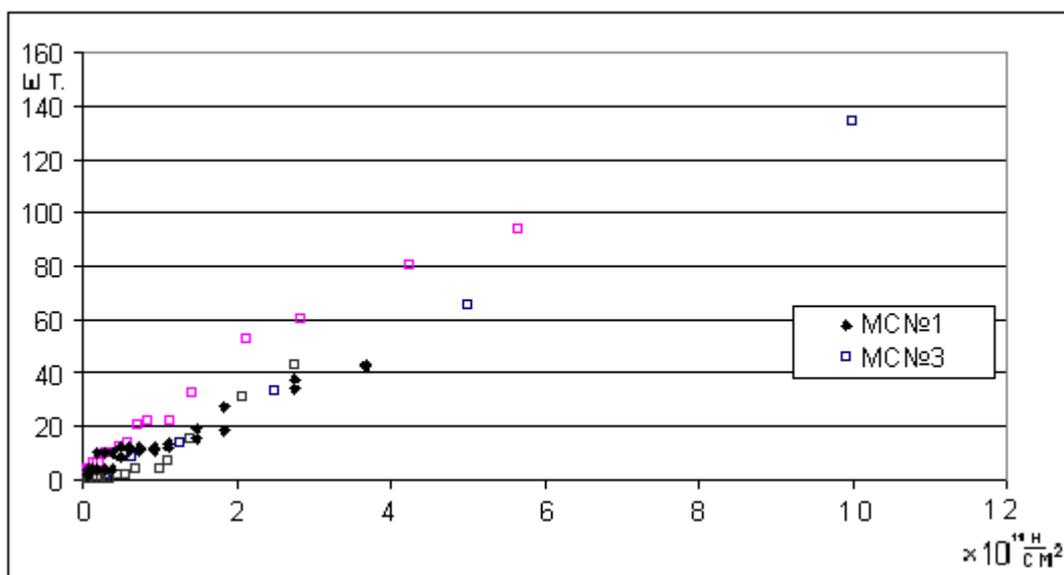


Рисунок 1 – Зависимости количества сбоев СОЗУ от величины флюенса при облучении нейтронами с энергией 14 МэВ, полученные в нескольких экспериментах.

На рисунке 1 представлены зависимости количества ОС от флюенса нейтронов с энергией 14 МэВ, полученные в разных экспериментах. Разброс значений на начальном участке зависимостей носит стохастический характер. При больших значениях флюенса характеристики начинают сходиться.

В работе также представлена оценка возможного количества ОС от флюенса 14 МэВ нейтронов.

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДО И ПОСЛЕ КОРРОЗИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Е.А. Шестакова *, В.Г. Субботин*, В.В. Сагарадзе**, А.И.Суренков***,
 С.М.Новгородцев*, И.В. Торопов*, Д.А. Беляев*
 *РФЯЦ-ВНИИТФ, г.Снежинск, Россия
 **ИФМ, г.Екатеринбург
 ***РНЦ-Курчатовский институт, г.Москва

Как известно, в настоящее время наблюдается повышение интереса к жидкосолевым ядерно-энергетическим системам, имеющим преимущества перед традиционными системами по таким параметрам, как эффективность использования природных ресурсов ядерного топлива, замыкание ядерного топливного цикла, повышение КПД, решение проблем нераспространения и т.п. Одним из важнейших вопросов при создании такого рода систем является выбор материалов, совместимых с жидкосолевыми композициями и их «живучестью» в процессе эксплуатации.

Для получения требуемой информации были проведены сравнительные исследования изменений структурного состояния некоторых сплавов на основе никеля, перспективных для использования в жидкосолевых системах, до и после экспозиции в расплавно-солевых композициях. В настоящей работе представлены результаты металлографического, фрактографического и элементного (микрорентгеноспектрального) анализа сплавов ХН80М-ВИ, ХН80МТЮ, ХН80МТВ, ЕМ721 в исходном состоянии и после коррозионных

испытаний, проведённых в солях LiF - NaF и LiF - UF_4 при температуре 700°C . На основании полученных данных сделан предварительный вывод о преимуществе сплава ХН80МТЮ с точки зрения коррозионной устойчивости.



VII. Рабочий семинар МНТЦ

Проведение семинара позволит организовать широкую дискуссию и обсуждение представленных работ, уточнить программы дальнейших исследований, установить творческие связи и определить круг проблем, которые потенциально могут стать основой новых совместных исследований, в том числе, по проектам МНТЦ. Одной из задач семинара является, при условии выделения финансирования от МНТЦ, обсуждение предложений по проектам из базы данных МНТЦ (получившим одобрение без финансирования), представляющих потенциальный интерес для реализации в интересах ядерной энергетики и наноматериаловедения.

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НЕЙТРОННОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЙ НА РАДИАЦИОННУЮ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

Арбузов В.Л.*, Гощицкий Б.Н.*, Данилов С.Е.*, Зуев Ю.Н.***, Карькин А.Е.*, Сагардзе В.В.*

**Институт Физики Металлов УрО РАН, Екатеринбург, Россия. (arbuzov@imp.uran.ru)*

***РФЯЦ ВНИИТФ, Снежинск, Россия*

Методами электросопротивления, электронной микроскопии и методом измерения мех. свойств при низкотемпературном (77 К) электронном и нейтронном облучениях исследованы накопление и отжиг радиационных дефектов в аустенитной стали 16Cr15Ni3Mo1Ti являющейся перспективной в качестве реакторного радиационно-стойкого материала в насыщенном водородом до 300ат. ppm состоянии и в ненасыщенном состоянии.

Проанализировано влияние водорода и низкотемпературного (77 К) нейтронного и электронного облучения на механические свойства и остаточное электросопротивление аустенитной стали. Получено, что насыщение водородом приводит к увеличению предела текучести. Облучение быстрыми нейтронами также увеличивает предел текучести. Водород практически не оказывает влияния на радиационное упрочнение, но сказывается на приросте остаточного электросопротивления.

Перекрытие каскадов смещения при облучении начинается при флюенсе больше, чем $1,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Наблюдается практически линейная связь между приростом предела текучести $\Delta\sigma_{0,2}$ и корнем квадратным из прироста остаточного электросопротивления (концентрации накопленных радиационных дефектов) $\Delta\rho^{1/2}$ при всех флюенсах нейтронов и электронов. Это свидетельствует о том, что вклад от радиационных дефектов в остаточное электросопротивление не зависит от того распределены они гомогенно или находятся в области каскадов смещения, даже когда достигнуто перекрытие каскадов.

Проведен анализ влияния каскадов смещений и гомогенно распределенных свободных пар Френкеля на физико-механические свойства аустенитной стали 16Cr15Ni3Mo1Ti.

Работа поддержана проектом МНТЦ № 3074.2, проектом РФФИ № 11-02-00224 и проектами Президиума УрО РАН № 09-М-23-2004 и № 10-2-05 ЯЦ.

НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ МИКРО- И МАКРОНАПРЯЖЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАРЕЮЩИХ СПЛАВАХ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОГО И РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ.

В.И.Бобровский

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

Проект МНТЦ #3074.2 направлен на изучение микро- и макронапряжений в образцах радиационно-стойких сталей, используемых в ядерных реакторах. В ходе выполнения проекта запланировано комплексное исследование образцов изучаемых материалов. При

этом в качестве основного метода исследований выбрана нейтронная дифракция высокого разрешения, позволяющая измерять как микронапряжения, возникающие при облучении или распаде твердого раствора (с образованием интерметаллидов, карбидов, радиационных кластеров и других выделений) в заданных объемах образца, так и напряжения в сварочном шве. Центральной задачей настоящего проекта является измерение внутренних микронапряжений в объеме образцов из радиационно-стойких сталей при образовании, росте и коагуляции дисперсных частиц второй фазы, существенно влияющих на порообразование.

Для целей проекта был подготовлен необходимый набор образцов. Проведены их термообработка, аттестация состава и структуры. Проведено электронно-микроскопическое и нейтронографическое исследование микронапряжений в образцах состаренной стали 40X4Г18Ф2, Х16Н15М3Т1 и Н26Х5Т3. Помимо этого с помощью нейтронографии высокого разрешения исследованы макро- и микронапряжения в исходном состоянии (до нейтронного облучения) в образцах корпусной стали реактора ВВЭР (феррит марки 12ХГМФАА).

Обнаружена большая разница в структурном механизме интерметаллидного и карбидного старения сталей Н26Х5Т3 и 40Х4Г18Ф2.

Выполнены исследования действия электронного и нейтронного облучения на радиационно-индуцированные структурно-фазовые превращения в сплаве Fe-Ni-Ti при температурах облучения 320-340 К. Получены дозовые зависимости изменения микронапряжений при образовании вакансионных кластеров в аустенитном сплаве Fe-Ni в процессе облучения быстрыми нейтронами и электронами при 340 К.

Участие в Проекте позволило объединить усилия исследователей из Института физики металлов УрО РАН (Екатеринбург), Лаборатории Нейтронной Физики Объединенного Института Ядерных Исследований (Дубна) и Российского Федерального Ядерного Центра – Всероссийского Научно-Исследовательского Института технической Физики (Снежинск).

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕШЕТКИ И ЭЛЕКТРОННЫХ СПЕКТРОВ ПЛЕНОК n -GaN НА САПФИРЕ ПРИ РЕАКТОРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

В.Н. Брудный*, Н.Г. Колин**, А.В. Кособуцкий***

* *Национальный исследовательский Томский госуниверситет, Томск, Россия*

** *Обнинский филиал НИФХИ им. Л.Я. Карпова, Обнинск, Россия*

*** *Кемеровский госуниверситет, Кемерово, Россия*

(brudnyi@mail.tsu.ru)

Реальные условия выращивания пленок нитридов на подложках приводят к появлению растягивающих и сжимающих одноосных и двухосных (биаксиальных) упругих напряжений. Дополнительным внутренним напряжениям также способствует высокая концентрация радиационных дефектов в облученных нитридах. Все это обуславливает высокий интерес к изучению влияния внешнего гидростатического давления и анизотропных упругих напряжений растяжения/сжатия на структурные и электронные параметры полупроводниковых нитридов A^3N .

В работе систематически исследовано влияние внешнего гидростатического давления до 40 ГПа; одноосной деформации растяжения и сжатия вдоль гексагональной оси c при

учете релаксации кристаллической решетки вдоль оси a ; а также двухосной деформации растяжения и сжатия в плоскости основания элементарной ячейки (0001) от -10 до 10 ГПа при учете релаксации кристаллической решетки вдоль оси c на значения структурных параметров решетки a , c и u , длины валентных связей, энергии зонной структуры и положение уровня локальной зарядовой нейтральности (УЛЗН) в n -GaN вюрцитной структуры

Проведены измерения параметров решеток в гетероструктуре n -GaN/Al₂O₃ при облучении реакторными нейтронами потоками до $7.25 \cdot 10^{19}$ см⁻². Выявлено увеличение параметра c до 0.38% в пленке n -GaN при практической неизменности параметра a в GaN и Al₂O₃. Показано, что в облученной пленке n -GaN величина напряжения растяжения вдоль оси c достигает 1.5 GPa, тогда как в базальной плоскости элементарной ячейки величина напряжения сжатия близка 0.5 GPa. Растяжение пленки n -GaN вдоль гексагональной оси приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны и понижению уровня локальной зарядовой нейтральности в GaN на 37 мэВ и 22 мэВ соответственно по отношению к их значениям в исходной пленке n -GaN на сапфире. На основе этих данных были вычислены коэффициенты давления ширины запрещенной зоны и УЛЗН в GaN. В интервале температур 100-1000⁰С изохронного отжига исследовано восстановление структурных параметров пленки n -GaN и изменения упругих напряжений в облученной реакторными нейтронами гетероструктуры n -GaN/Al₂O₃.

ВАНАДИЕВЫЙ СПЛАВ, ПЛАКИРОВАННЫЙ ФЕРРИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ - МАТЕРИАЛ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

С.Н. Вотинков

ОАО «ВНИИИМ» им. А.А. Бочвара, Москва, Россия, kolotush@bochvar.ru

INVESTIGATION OF MOLTEN-SALT FLUORIDE SYSTEMS FOR INNOVATIVE NUCLEAR POWER ENGINEERINGS

А.Л. Жеребцов

Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ, Снежинск

ИССЛЕДОВАНИЯ РФЯЦ-ВНИИТФ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК И ТРИТИЕВЫХ СИСТЕМ

Ю.Н. Зуев

Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ, Снежинск

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ, И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ (ФЛАКСА) НА ОХРУПЧИВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ

Е.А. Красиков

РНИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, (ekrasikov@mail.ru)

Ускоренное облучение не позволяет получить консервативную оценку охрупчивания материалов корпусов реакторов с водой под давлением, вызываемого формированием меднообогатённых преципитатов при низких флаксах нейтронов в области до плато. Рассогласование мнений по проблеме влияния флакса нейтронов на радиационную повреждаемость материалов корпусов реакторов объясняется присутствием в кинетике охрупчивания колебательного компонента. Результат зависит не только от флакса, но и от флюенса.

Предлагается интерпретация влияния плотности потока быстрых нейтронов на радиационное охрупчивание материалов корпусов реакторов как результата конкуренции стимулированного облучением формирования меднообогатённых выделений и их распада вследствие бомбардировки нейтронами (каскадного растворения).

В итоге, проявление фактора флакса в зависимости от достигнутого флюенса нейтронов возможно как позитивного, негативного или нулевого эффекта охрупчивания относительно нормативной зависимости, полученной при высоких плотностях нейтронного потока.

РАДИАЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ НЕЙТРОНАМИ, ИОНАМИ, ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ, НЕТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПРОБЛЕМА БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

В.В. Овчинников

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

В работах Института электрофизики Уральского Отделения Российской Академии Наук (ИЭФ УрО РАН) зарегистрировано явление радиационного инициирования взрывных фазовых превращений в метастабильных средах, в частности, в метастабильных металлах и сплавах, вследствие рекордно высокой скорости выделения энергии в области плотных каскадов атомных столкновений, порядка скорости выделения энергии (Дж/атом/с) при ядерном взрыве. Эффекты наблюдаются при облучении модельных и реакторных материалов нейтронами и ускоренными ионами. Установлено, что указанные явления не связаны с образованием радиационных дефектов и массопереносом. Их причиной являются коллективные радиационно-динамические эффекты, не рассматривавшиеся ранее. На основе имеющихся данных может быть предсказано резкое увеличение скорости старения расщепляющихся материалов в условиях внешнего облучения. Исследование обнаруженных процессов является актуальным как с точки зрения разработки нетрадиционных методов модификации свойств материалов, так и с

точки зрения безопасности ядерных энергетических установок.

Основной целью проекта МНТЦ № 2228 является экспериментальное и теоретическое исследование радиационно-динамических эффектов: инициируемых облучением быстротекущих процессов и фазовых превращений, подобных явлениям горения и детонации, при облучении нейтронами, осколками деления и тяжелыми ионами в метастабильных металлах и сплавах, в том числе радиационнотойких сталях и сплавах, в связи с проблемой безопасности ядерных реакторов и разработкой принципиально новых радиационных методов модификации свойств материалов.

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ СОЗДАНИЯ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ ЦИРКОНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АКТИВНЫХ ЗОН АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ

В.Н. Шишов

ОАО «ВНИИНМ имени академика А.А.Бочвара», Москва, Россия

shishovv@bochvar.ru

+

Указатель авторов

- A**
Andreev A.V. 47
Abdelshakour Elsaid M. 63
- B**
Baerner K. 70
Baeten Peter 91
Barashev A.V. 4
Barilo S. 50
Busby J.T. 24,25
Byun T.S. 24
- C**
Chen S. S. 70
Clementyev E. 49
Conder K. 50
- D**
Druzhkov A.P. 3
Dudarev S.L. 3
- E**
Ehlers G. 50
Ellis T. 30
- F**
Farley J.W. 28
Fernandez Rafael 91
Flinn J.E. 23
Frontzek M. 50
- G**
Garner F.A. 23,30
Gavrilov Serguei 91
Gilleland J.R. 30
Golubov S.I. 4
Greenwood L.R. 23
Griffiths M. 23
Gussev M.N. 24
- H**
Hackett M.J. 25
Hall M.M. 23
Hayes S.L. 25
Hilton B.A. 25
Hosterman B. 28
- I**
IVANOV Alexandre 47
- J**
Johnson A.L. 28
- K**
Kerbel O. 49
Koury D. 28
Kulda Jiri 48
Kurennykh Tatiana E. 5
- M**
Marmy Pierre 29,91
Miller M.K. 25
Mirmelstein A. 49
- N**
Nikolaev A.L. 3
Nikolaev Alexander L. 5,6
- P**
Podlesnyak A. 50
Pomjakushina E. 50
Porter D.L. 25
- S**
Skourski Y. 47
Stoller R.E. 4
- T**
Tecchio L. 92
- W**
Wang R. 69
Was G.S. 25
Weber H.W. 69
Weaver K.D. 30
Wosnitza J. 47
- Y**
Yang C.P. 69,70
Yasin S. 47
- Z**
Zherlitsyn S. 47
-
- A**
Аверин С.А. 30
Алеев А.А. 31,38,40,93
Александрова С.С. 81
Алексеев П.А. 51,56
Арбузов В.Л. 10,11,15, 39,63,113
Арбузова Т.И. 63
Артамонов И.В. 52,58
Архипов В.Е. 59
- Б**
Баканов М.В. 42
Балаев Д.А. 52,57
Балакирев В.Ф. 102
Барков М.А. 66
Баянкин В.Я. 77,78,80, 82
Белозеров С.В. 36
Белых Т.А. 81
Беляев Д.А. 53,54,101, 108
Бергер И.Ф. 32
Бобровский В.И. 113
Богданов Н.Ю. 75
Бойко В.М. 66
Бондарчук С.В. 33,54
Борисов С.В. 94
Брудный В.Н. 114
Быков А.А. 57
Быков П.В. 77,78
- В**
Веревкин С.С. 66
Вильданова Н.Ф. 35,94
Волков Н.В. 55,57
Воробьев В.Л. 78
Воронин В.И. 32,94
Вотинов С.Н. 7,115
- Г**
Галошина Э.В. 69
Гаранин Г.В. 91
Гильмутдинов Ф.З. 82
Голосов О.А. 30
Горбатов О.И. 9
Горностырев Ю.Н. 9, 11,19
Гощицкий Б.Н. 32,113
Графутин В.И. 97
Грибанов А.В. 56
Губернаторов В.В. 79
Гусев М.Н. 16,95,98,99
Гущина Н.В. 80,83,85
- Д**
Давлетшин А.Э. 10
Данилов С.Е. 11,63,113
Долинский Ю.Н. 102
Драгошанский Ю.Н. 79
Дружков А.П. 15
Дубинин С.Ф. 71
Дубровский А.А. 52,57
Дубровских С.М. 64
Дьячкова Т.В. 69,70
- Дякина В.П. 69
- Е**
Евсеев М.В. 37
Еремин Е.В. 55
- Ж**
Жеребцов А.Л. 115
Жихарев А.В. 80
Жмуриков Е.И. 92
- З**
Зайнуллин Ю.Г. 69,70
Залужный А.Г. 31,38, 40,68,93,97
Заматовский А.Е. 94
Звонарев С.В. 94
Зуев Ю.Н. 33,53,54,100, 101,102,113,115
- И**
Ибрагимова Э.М. 14,65
Иванова Н.В. 101
Иванова О.И. 34,37,38
Ивченко В.А. 79,81
Искандаров Н.А. 31,40, 93
- К**
Казанцев В.А. 11
Кайгородова Л.И. 80
Каланов М.У. 3,65
- Калюканов А.И. 66
Каримов М. 71
Карькин А.Е. 113
Кассан-Оглы Ф.А. 59
Катаева Н.В. 33,35
Клементьев Е.С. 56
Клепикова А.А. 80
Клименов В.А. 12
Климова И.Н. 80
Козлов А.В. 34,37, 38,81
Козлов Е.А. 52,53
Козлов К.А. 35
Козодаев М.А. 31, 40
Колин Н.Г. 66,114
Колич А. 87
Колотушкин В.П. 7
Коржавый П.А. 9
Кортов В.С. 94
Корулин А.В. 66
Кособуцкий А.В. 114
Коуров Н.И. 69
Краевский С.В. 68
Красиков Е.А. 116
Крымский В.В. 102
Кузнецов А.Р. 11, 19
Куйбида Р.П. 38
Кулевой Т.В. 38

- Л**
 Лазуков В.Н. 51,56
 Ларионов В.В. 91
 Литвинов А.В. 35, 94
 Логачёв П.В. 92
 Лысова Г.В. 16
 Ляшков К.А. 94
- М**
 Мальцев В.В. 42
 Макаров Е.И. 36
 Максимкин О.П. 16,44,
 95,98,99
 Максимов В.И. 71
 Максимов С.Е. 14
 Мальцев В.В. 42
 Мамонтов А.П. 12
 Мартыанов О.Н. 52
 Марченков В.В. 69,70
 Марченкова Е.Б. 69,70
 Махинько Ф.Ф. 80,83,
 84,85,96
 Махамов Ш. 71
 Махмудов Ш.А. 71
 Медведева Е.В. 81
 Медведева И.В. 69,70
 Мережко М.С. 95,99
 Меркурисов Д.И. 66
 Миньо Ж-М. 51
 Мирмельштейн А.В. 56
 Митрофанова Н.М. 34,
 37,38
 Можаровский С.М. 80
 Молодцов В.Л. 16
 Мосин А.М. 37
 Муссаева М.А. 65
- Н**
 Наумов С.В. 63
 Немковский К.С. 51
 Неустроев В.С. 36
 Никитин А.А. 31,38,40,
 93
 Новгородцев С.М. 33,
 108
 Новосёлов А.А. 82
 Нургалеев А.Р. 52
- О**
 Овчинников В.В. 80,83,
 84,85,96,116
 Овчинников С.В. 96
 Окатов С.В. 11
 Оксенгендлер Б.Л. 14
 Окулов И.В. 83
 Орлов Н.Н. 31,38,40
 Островский З.Е. 36
 Ошканов Н.Н. 42
- П**
 Павленко А.В. 100,101
 Панченко В.Л. 30
 Парфенов А.А. 7
 Пархоменко В.Д. 71
 Перминов Д.А. 15
 Петров М.И. 52
 Печенкин В.А. 16,19
 Печеркина Н.Л. 84
 Пилюгин В.П. 69
 Повзнер А.А. 96
 Подгорнова И.В. 52,53,
 54
 Покровский А.С. 42
 Половинкина Ю.В. 68
 Попков С.И. 52,57
 Портных И.А. 34,37,38
 Прокопьев Е.П. 97
 Пушин В.Г. 69
- Р**
 Распопова Г.А. 39
 Рогожкин С.В. 31,38,
 40,68,93
 Романов В.А. 17
 Рыбин С.В. 99
 Рубан А.В. 9
 Рубан С.В. 98
 Русакова А.В. 16
- С**
 Саблина К.А. 55
 Савченко И.В. 92
 Сагарадзе В.В. 19,32,
 33,35,41,84,94,108,
 113
- О**
 Садовский М.В. 57
 Сапронова Н.В. 57
 Саттиев А.Р. 71
 Святов И.Л. 33,53,
 100,101
 Сдобнов Н.В. 83
 Семенов С.В. 57
 Сивак А.Б. 17
 Сивак П.А. 17
 Склярова Е.А. 91
 Смирнов Е.А. 18
 Соломонов В.И. 85
 Станкус С.В. 92
 Старилов С.А. 19
 Степанов В.А. 20
 Степанов И.А. 19
 Степовик А.П. 107
 Субботин В.Г. 108
 Суренков А.И. 108
 Сычева Т.С. 79
- Т**
 Токтогулова Д.А. 95,99
 Топорищев К.Г. 100
 Торопов И.В. 101,108
 Ткачёв О.В. 64
 Тураева Н.Н. 14
 Турсунов Н.А. 71
 Турубарова Л.Г. 44
 Тютюнник А.П. 69,70
- У**
 Устьянцев Ю.Г. 94
- Ф**
 Фазылов Р.Р. 102
 Федяй А.В. 83
 Филиппов А.В. 80
 Фомина К.А. 69,70
- Х**
 Харитонов Т.Н. 66
 Хмелевская В.С. 20,75,
 86
- Ц**
 Цыганов И.А. 87
- Ч**
 Чалых Б.Б. 38
 Чевычелов В.А. 68
 Чернов В.М. 17
 Чернов И.П. 91
 Чернова А.Д. 16
 Чуев В.В. 42
- Ш**
 Шабашов В.А. 35,
 94
 Шабурова Н.А. 102
 Шайсултанов Д.Г.
 77
 Шайхутдинов К.А.
 52,57
 Шамаев Е.Ю. 107
 Шамардин В.К. 42
 Шестаков А.Е. 33,
 52,58,59,100
 Шестакова Е.А. 33,
 52,101,102,108
 Шихалев В.С. 34
 Шишкина О.С. 18
 Шишов В.Н. 43,117
 Шмаков А.А. 18
 Шредер Е.И. 69
 Шукайло В.П. 64,
 107
- Щ**
 Щербаков Е.Н. 34
- Я**
 Яговитин П.И. 34
 Яровчук А.В. 44
 Ярославцев А.А. 56