

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ НИЯУ МИФИ

**НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ –  
Жизненный цикл материалов:  
старение и деградация материалов  
в процессе эксплуатации ЯЭУ**

Материалы  
13-й Международной школы-конференции  
для молодых ученых и специалистов

*Москва, 17 – 21 октября 2016 г.*

Москва 2016

УДК 621.039.531 (06)

ББК 31.46в6

М43

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ – ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ МАТЕРИАЛОВ: СТАРЕНИЕ И ДЕГРАДАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯЭУ. Материалы 13-й Международной школы-конференции для молодых ученых и специалистов. Москва, 17 – 21 октября 2016 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2016, 136 с.

В настоящем сборнике представлены аннотации лекций и докладов, а также программа школы-конференции. Материалы подготовлены преподавателями, научными сотрудниками, аспирантами и студентами НИЯУ МИФИ, учеными и специалистами Госкорпорации «Росатом», образовательных, академических, научных и научно-производственных организаций России и зарубежных стран, активно сотрудничающих с университетом. Рассматриваются вопросы старения материалов оборудования ядерных объектов и радиационной деградации ядерного топлива, а также системы диагностики состояния и свойств материалов.

Сборник предназначен ученым, аспирантам и студентам старших курсов, интересующихся тематикой представленных в нем научных направлений.

Подготовлено в рамках Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Ответственные за выпуск:

Б.А. Калинин, Г.Н. Елманов, Д.П. Шорников

Аннотации лекций и докладов получены до 01.10.2016, одобрены программным комитетом и издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2288-2

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2016

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

### *Сопредседатели:*

Першуков В.А.      ГК «Росатом»  
Стриханов М.Н.    НИЯУ МИФИ

### *Заместитель:*

Калин Б.А.            НИЯУ МИФИ

### *Секретарь:*

Шорников Д.П.      НИЯУ МИФИ

Беззубцев В.С.      АО Росэнергоатом  
Гарнер Френк        REC (США)  
Дуб А.В.              ГК «Росатом»  
Глаговский Э.М.     ИПЯТ НИЯУ МИФИ  
Корогодин В.И.      ГК «Росатом»  
Карпюк Л.А.          АО ВНИИНМ  
Лавренюк П.И.        Топливная компания ТВЭЛ  
Пономарев Л.И.      АО ВНИИНМ  
Потапов В.В.         ВНИИ АЭС  
Рисованный В.Д.     ГК «Росатом»  
Салихов С.В.          Минобрнауки  
Смирнов В.П.          ГК «Росатом»  
Троянов В.М.          АО Росэнергоатом  
Ханинен Ханну        Aalto University (Финляндия)  
Шорт Майкл           МІТ (США)  
Штрoмбах Я.И.        НИЦ «Курчатовский институт»

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

### *Председатель:*

Калин Б.А.            НИЯУ МИФИ

### *Секретарь:*

Шорников Д.П.      НИЯУ МИФИ

Ганченкова М.Г.      НИЯУ МИФИ  
Гурович Б.А.          НИЦ «Курчатовский институт»  
Долгов А.Б.            ТК ТВЭЛ  
Карзов Г.П.            ЦНИИ КМ «Прометей»  
Крицкий В.Г.          АО «НИАЭП» - «АСЭ»  
Марголин Б.З.         ЦНИИ КМ «Прометей»  
Марков Д.В.            АО ИРМ  
Новиков В.В.          АО ВНИИНМ  
Русанов А.Е.          АО "ГНЦ РФ - ФЭИ"  
Рязанов А.И.          НИЦ «Курчатовский институт»  
Сарычев Г.А.          НИЯУ МИФИ  
Тихомиров Г.В.        НИЯУ МИФИ

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПРОГРАММА .....                                                                                  | 5  |
| АННОТАЦИИ ЛЕКЦИЙ .....                                                                           | 19 |
| АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ .....                                                                         | 47 |
| СЕКЦИИ 1-2. Старение материалов оборудования ЯЭУ.<br>Деградация конструкционных материалов ..... | 47 |
| СЕКЦИЯ 3. Ядерная составляющая топлива .....                                                     | 85 |
| СЕКЦИЯ 4. Методы исследования и моделирования<br>материалов .....                                | 91 |

## CONTENTS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| PROGRAM .....                                                                                        | 14 |
| ABSTRACTS OF LECTURES .....                                                                          | 19 |
| ABSTRACTS OF REPORTS .....                                                                           | 47 |
| SECTIONS 1-2. Ageing of materials of the NPP equipment.<br>Degradation of structural materials ..... | 47 |
| SECTION 3. Nuclear fuel component .....                                                              | 85 |
| SECTION 4. Methods of research and modeling of materials .....                                       | 91 |

## **ПРОГРАММА**

**17 октября**

- 14<sup>00</sup> – 19<sup>00</sup>** Прием и регистрация участников школы-конференции  
**16<sup>00</sup> – 20<sup>00</sup>** Круглый стол с участием российских и зарубежных лекторов

**18 октября**

- 9<sup>00</sup> – 10<sup>00</sup>** Регистрация участников  
**10<sup>00</sup> – 10<sup>10</sup>** Открытие

### **Секция 1 «Старение материалов оборудования ЯЭУ»**

**10<sup>10</sup> – 10<sup>30</sup>** Корогодин В.И. (ГК «Росатом») Конструкционные материалы ядерной энергетики: современные вызовы и ресурсное обеспечение устойчивости развития

**10<sup>30</sup> – 11<sup>10</sup>** Дуб А.В. (АО «Наука и инновации») От 30 до 100. Материаловедческое и технологическое обеспечение увеличения сроков эксплуатации корпусных материалов

**11<sup>10</sup> – 11<sup>50</sup>** Потапов В.В. (АО ВНИИАЭС) Опыт продления ресурса энергоблоков АЭС ВВЭР

**Перерыв 11<sup>50</sup> – 12<sup>10</sup>**

**12<sup>10</sup> – 12<sup>40</sup>** Калинин Б.А. (НИЯУ МИФИ) Инновационные направления обеспечения безопасности АЭС (топливо, материалы)

**12<sup>40</sup> – 13<sup>20</sup>** Семишкин В.П. (АО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск) Управление старением конструкций, систем и элементов реакторов типа ВВЭР

**13<sup>20</sup> – 14<sup>00</sup>** Крицкий В.Г. (АО «НИАЭП»-«АСЭ», г. Санкт-Петербург) Управление старением при проектировании АЭС

**Обед 14<sup>00</sup> – 15<sup>00</sup>**

**15<sup>00</sup> – 16<sup>00</sup>** Марголин Б.З. (ГНЦ ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», г. Санкт-Петербург) Физико-механическое моделирование процессов разрушения и прогнозирование свойств облученных материалов корпусов и внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР

**16<sup>00</sup> – 16<sup>40</sup>** Гурович Б.А. (НИЦ «Курчатовский институт») Дegradация структуры и свойств материалов ВКУ после длительной эксплуатации и влияние температуры восстановительного отжига для продления срока службы

**Перерыв 16<sup>40</sup> – 17<sup>00</sup>**

**17<sup>00</sup> – 17<sup>40</sup>** Скоробогатых В.Н., Козлов П.А. (ГНЦ "НПО ЦНИИТ-МАШ") Современные жаропрочные материалы для энергетического оборудования, работающего под давлением в условиях воздействия ползучести

**17<sup>40</sup> – 18<sup>20</sup>** Peter Hosemann (University of California Berkeley, USA) Advanced nuclear materials testing and characterization

**18<sup>20</sup> – 19<sup>00</sup>** Круглый стол с участием российских и зарубежных лекторов

**Стендовая сессия 15<sup>00</sup> – 18<sup>20</sup>**

**19 октября**

**Секция 2 «Деградация конструкционных материалов»**

**10<sup>00</sup> – 10<sup>40</sup>** Максимкин О.П., Яровчук А.В., Рофман О.В., Турубарова Л.Г., Кислицин С.Б., Диков А.С. (ИЯФ НЯЦ, Республика Казахстан) Старение и коррозия конструкционных материалов, облученных нейтронами в атомных реакторах БН-350 и ВВР-К

**10<sup>40</sup> – 11<sup>20</sup>** Рязанов А.И. (НИЦ «Курчатовский институт») Современные проблемы радиационной ползучести и гелиевого охрупчивания облучаемых конструкционных материалов для атомных и термоядерных реакторов

**11<sup>20</sup> – 12<sup>00</sup>** Чернов И.И.<sup>1</sup>, Стальцов М.С.<sup>1</sup>, Калинин Б.А.<sup>1</sup>, И.А.Богачев И.А.<sup>1</sup>, Гусева Л.Ю.<sup>1</sup>, Коршунов С.Н.<sup>2</sup> (<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ, <sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт») Некоторые проблемы водорода в реакторных конструкционных материалах

**Перерыв 12<sup>00</sup> – 12<sup>20</sup>**

**12<sup>20</sup> – 13<sup>00</sup>** Козлов А.В., Портных И.А. (АО ИРМ, г. Заречный) Механизмы влияния нейтронного облучения при различных температурах на физико-механические свойства аустенитных сталей

**13<sup>00</sup> – 13<sup>40</sup>** В.В. Углов<sup>1,2,3</sup>, В.М. Анищик<sup>1</sup>, Г.Е. Ремнев<sup>2</sup>, Н.Т. Квасов<sup>1,2</sup>, В.И. Шиманский<sup>1,2</sup>, И.В. Сафронов<sup>1</sup> (<sup>1</sup>БГУ, г. Минск, <sup>2</sup>ТПУ, г. Томск, <sup>3</sup>НИЯУ МИФИ, г. Москва) Особенности радиационных процессов и явлений в наноконпозиционных покрытиях

**Обед 13<sup>40</sup> – 14<sup>40</sup>**

**14<sup>40</sup> – 15<sup>20</sup>** Печенкин В.А. (АО "ГНЦ РФ - ФЭИ", г. Обнинск) Изменение свойств конструкционных материалов под облучением: роль радиационно-индуцированной сегрегации

**15<sup>20</sup> – 16<sup>00</sup>** Фрэнк А. Гарнер<sup>1,2</sup>, Лин Шао<sup>1</sup>, Майкл Шорт<sup>3</sup>, Михайло Б. Толёчко<sup>4</sup>, Виктор Н. Воеводин<sup>5</sup> (<sup>1</sup>Texas A&M University, <sup>2</sup>REC, <sup>3</sup>MIT, <sup>4</sup>Pacific Northwest National Laboratory USA, <sup>5</sup>ХФТИ, г. Харьков, Украина) Использование облучения собственными ионами для прогнозирования вакансионного набухания кандидатных феррито-мартенситных сплавов и их ДУО-вариантов при очень высоких дозах облучения

**16<sup>00</sup> – 16<sup>40</sup>** Неустров В.С., Белозёров С.В., Жемков И.Ю., Макаров Е.И., Маркелов Д.Е. (АО "ГНЦ НИИАР", г. Димитровград) Закономерности и взаимосвязи радиационных явлений в аустенитных сталях, облученных до высоких повреждающих доз

**Перерыв 16<sup>40</sup> – 17<sup>00</sup>**

**17<sup>00</sup> – 18<sup>00</sup> Доклады слушателей:**

1. А.С. Диков<sup>1,2</sup>, С.Б. Кислицин<sup>1,2</sup>, И.И. Чернов<sup>1</sup> (<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ; <sup>2</sup> ИЯФ РК, г. Алматы, Республика Казахстан) Влияние температуры испытаний на механические свойства аустенитных сталей X18H10T и X16H11M3, облученных быстрыми нейтронами в реакторе БН-350

2. Е.А.Кулешова<sup>1,2</sup>, А.С.Фролов<sup>1</sup>, Д.А.Мальцев<sup>1</sup>, Е.В.Крикун<sup>1</sup>, Д.А.Журко<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», <sup>2</sup> НИЯУ МИФИ) Радиационное охрупчивание стали 15Х2НМФА класс 1 в результате низкотемпературного облучения

3. Н.С.Сабуров, В.А.Маркелов, А.Ю.Гусев, С.А.Бекренев, И.А.Шелепов (ВНИИНМ им. А.А. Бочвара) Пороговые условия для замедленного гидридного растрескивания оболочек твэлов из сплавов циркония

**18<sup>00</sup> – 19<sup>00</sup>** Круглый стол с участием российских и зарубежных лекторов

**Стендовая сессия 14<sup>40</sup> – 18<sup>00</sup>**

**20 октября**

**Секция 2 «Деградация конструкционных материалов»  
(продолжение)**

**10<sup>00</sup> – 10<sup>50</sup>** Malcolm Griffiths (Canadian Nuclear Laboratories) Mechanisms of Irradiation Creep in Reactor Core Materials

**10<sup>50</sup> – 11<sup>40</sup>** Short Michael (MIT, USA) The Wigner Energy Spectral Fingerprints of Radiation Damage

**11<sup>40</sup> – 12<sup>00</sup>** Доклады слушателей:

Ю.А.Перлович<sup>1</sup>, М.Г.Исаенкова<sup>1</sup>, В.А.Фесенко<sup>1</sup>, О.А.Крымская<sup>1</sup>, Г.П.Кобылянский<sup>2</sup>, Ю.Д.Гончаренко<sup>2</sup> (<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ, Москва; <sup>2</sup>ГНЦ НИИАР, г. Димитровград) Влияние высокодозного нейтронного облучения на субструктуру оболочечных труб из циркониевых сплавов

**Перерыв 12<sup>00</sup> – 12<sup>20</sup>**

**Секция 3 «Ядерная составляющая топлива»**

**12<sup>20</sup> – 13<sup>00</sup>** Савченко А.М., Карпюк Л.А., Поздеев М.В., Юферов О.И., Кулаков Г.В., Шамин Д.В., Лебедев М.Ю. (АО ВНИИНМ) Новая технологическая платформа на базе композитного топлива

**13<sup>00</sup> – 13<sup>20</sup>** Тарасов Б.А., Шорников Д.П., Никитин С.Н., Тенишев А.В. (НИЯУ МИФИ) Разработка композиции «топливо-оболочка» на основе таблеточного металлического ядерного топлива с заданной пористостью

**13<sup>20</sup> – 14<sup>00</sup>** Доклады слушателей:

1. И.И. Коновалов, М.С. Тарасова, Б.А. Тарасов (НИЯУ МИФИ) Расчетное определение пределов работоспособности твэлов с плотным топливом

2. А.Б. Круглов, В.Б. Круглов, П.Г. Стручалин, В.С. Харитонов (НИЯУ МИФИ) Контроль теплофизических свойств твэлов с плотным топливом

**Обед 14<sup>00</sup> – 15<sup>00</sup>**

#### **Секция 4 «Методы исследования и моделирования материалов»**

**15<sup>00</sup> – 15<sup>40</sup>** Стариков С.В. (ОИВТ РАН) Многомасштабное компьютерное моделирование свойств материалов ядерной техники

**15<sup>40</sup> – 16<sup>30</sup>** Janelle Wharry (Purdue University) TEM in situ mechanical testing techniques for ion irradiated materials

#### **16<sup>30</sup> – 17<sup>00</sup> Доклады слушателей:**

1. Е.А.Кулешова<sup>1,2</sup>, Б.А.Гурович<sup>1</sup>, З.В.Букина<sup>1</sup>, Д.А.Мальцев<sup>1</sup>, С.В.Федотова<sup>1</sup>, А.С.Фролов<sup>1</sup>, Г.М.Жучко<sup>1</sup> (<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», <sup>2</sup>НИЯУ МИФИ) Оценка вклада упрочняющего механизма в эффект флакса при ускоренном облучении сталей корпусов реакторов ВВЭР-1000 методами атомно-зондовой томографии и трансмиссионной электронной микроскопии

2. Е.А.Кулешова<sup>1,2</sup>, Д.А.Мальцев<sup>1</sup>, А.С.Фролов<sup>1</sup>, Д.В.Сафонов<sup>1,2</sup>, Г.М.Жучков<sup>1</sup> (<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», <sup>2</sup>НИЯУ МИФИ) Структурные и фрактографические исследования темплетов, вырезанных из КР энергоблока №4 НВАЭС, для оценки его текущего состояния

#### **Перерыв 17<sup>00</sup> – 17<sup>20</sup>**

#### **17<sup>20</sup> – 18<sup>20</sup> Доклады слушателей (продолжение):**

3. В.А. Жителев, М.В. Куприенко, А.А. Исаев, Ф.Н. Крюков, Е.А. Звир, А.В. Строзжук, Г.Д. Нуруллина (ГНЦ НИИАР, г. Димитровград) Эмиссионная гамма-томография негерметичной ЭТВС реактора БОР-60

4. Е.И.Макаров, В.С.Неустров, С.В.Белозёров, Д.Е.Маркелов, А.В.Обухов (ГНЦ НИИАР, г. Димитровград) Влияние напряжений на деформацию ползучести и набухание газонаполненных образцов из стали 08X18H10T, облученных в реакторе БОР-60

5. В.И. Пастухов<sup>1,2,3</sup>, С.А. Аверин<sup>1,3</sup>, В.Л. Панченко<sup>1,3</sup>, И.А. Портных<sup>1</sup>, П.Д. Фрэйяр<sup>4</sup>, Л.А. Джануци<sup>5</sup>, Ф.А. Гарнер<sup>3,6</sup> (<sup>1</sup>ИРМ, г. Заречный Свердловской области; <sup>2</sup>УФУ, Екатеринбург, <sup>3</sup>НИЯУ МИФИ, Москва; <sup>4</sup>Westinghouse Electric Company, Pittsburgh PA, USA ; <sup>5</sup>L.A. Giannuzzi & Associates LLC, Fort Myers, FL, USA; <sup>6</sup>Radiation Effects Consulting LLC, Richland WA, USA) Применение обратно рассеянных электронов для получения широкоформатных изображений пор, образованных при нейтронном или ионном облучении конструкционных сталей

6. А.В. Андросов<sup>1</sup>, В.И. Выбыванец<sup>1</sup>, Е.Г. Колесников<sup>1</sup>, В.С. Сериков<sup>1</sup>, Е.С. Солнцева<sup>1</sup>, П.А. Степанчиков<sup>1</sup>, И.М. Русских<sup>2</sup>, Е.Н. Селезнев<sup>2</sup> (<sup>1</sup>НИИ НПО «ЛУЧ», Подольск; <sup>2</sup>ИРМ, г. Заречный) Обоснование методологии ампульных испытаний

**18<sup>00</sup> – 19<sup>00</sup>** Круглый стол с участием российских и зарубежных лекторов

#### **Стендовая сессия 15<sup>00</sup> – 18<sup>00</sup>**



**21 октября**

**10<sup>00</sup> – 12<sup>00</sup> Доклады слушателей:**

1. Н.В. Волков<sup>1</sup>, Б.А. Калинин<sup>1</sup>, И.В. Олейников<sup>1</sup>, Н.В. Сысоева<sup>2</sup> (<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ, <sup>2</sup> Научно-технический институт межотраслевой информации, Москва) Применение инфракрасной спектроскопии для анализа оксидных пленок, выращенных на поверхности оболочек из сплава ЭП10

2. Б.А. Калинин<sup>1</sup>, Н.В. Волков<sup>1</sup>, Р.А. Валиков<sup>1</sup>, А.С. Яшин<sup>1</sup>, Д.Н. Игнатьев<sup>2</sup> (<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ, Москва, <sup>2</sup> НИИ НПО «Луч», г. Подольск) Легирование приповерхностных слоев оболочек твэлов из сплава ЭП10 на зубчатой основе с целью повышения сопротивления высокотемпературному окислению

3. А.С. Усеинов<sup>1</sup>, Е.В. Гладких<sup>1</sup>, М.Д. Бутюто<sup>1</sup>, В.Н. Решетов<sup>2</sup>, А.А. Русаков<sup>1</sup> (<sup>1</sup> ФГБНУ ТИСНУМ, г. Троицк; <sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, Москва) Современные отечественные приборы и методики для комплексной диагностики механических свойств материалов

4. С.В. Рогожкин, А.А. Никитин, О.А. Корчуганова (<sup>1</sup> ИТЭФ НИЦ «Курчатовский институт», <sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, Москва) Микроструктура титанового сплава Ti-5Al-4V-2Zr после термического старения при 450°C

5. Н.А. Искандаров<sup>1,2</sup>, С.В. Рогожкин<sup>2,1</sup>, А.А. Лукьянчук<sup>1,2</sup>, О.А. Разницын<sup>1,2</sup>, А.С. Шутов<sup>1,2</sup>, А.Г. Залужный<sup>2,1</sup>, М.В. Леонтьева-Смирнова<sup>3</sup> (<sup>1</sup> ГНЦ РФ - ИТЭФ НИЦ «Курчатовский институт», <sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, <sup>3</sup> ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, Москва) Изменение наномасштабного состояния ферритно-мартенситной стали ЭК-181 при термическом старении

6. А.В. Назаров<sup>1</sup>, А.А. Михеев<sup>2</sup>, А.Г. Залужный<sup>1</sup> (<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ, <sup>2</sup> Московский государственный университет дизайна и технологий, Москва) Моделирование роста нанопор в металлах с ГЦК структурой

7. Д.Н. Демидов<sup>1</sup>, А.Б. Цепелев<sup>2</sup> (<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ, <sup>2</sup> ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, Москва) Влияние облучения и примесей на скорость роста гелиевых пузырьков в границах зёрен ферритных сталей

**10<sup>00</sup> – 14<sup>00</sup>** Круглый стол с участием российских и зарубежных лекторов

**Перерыв 12<sup>00</sup> – 12<sup>20</sup>**

**12<sup>20</sup> – 14<sup>00</sup>** Подведение итогов, закрытие школы-конференции

**15<sup>00</sup> – 17<sup>00</sup>** Экскурсия в НИЯУ МИФИ

## СТЕНДОВЫЕ СЕССИИ 18 и 19 ОКТЯБРЯ

### Секции 1-2 «Старение материалов оборудования ЯЭУ» и «Деградация конструкционных материалов»

1. Г.Н. БАКШУТОВА, В.С. НЕУСТРОЕВ. Изучение температурной зависимости характеристик механических свойств стали X18H10T, облученной в реакторе СМ-3.

2. Б.С. ВОЛОСКОВ, В.М. ЧЕРНОВ. Исследование усталостного разрушения ферритно-мартенситных 12%-ых хромистых сталей ЭП-823 и ЭК-181, и сплава V-4Ti-4Cr.

3. П.С. ДЖУМАЕВ, Е.М. МАЛИЕВА, В.Л. ЯКУШИН. Влияние предварительной обработки на трибологические характеристики хромистых сталей ЭП823 и И ЭК181.

4. М.Г. ИСАЕНКОВА, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, Я.А. БАБИЧ, В.А. ШУЛОВ, Д.А. ТЕРЯЕВ. Изменение структуры поверхностных слоев изделий из сплава ВТ18У в результате облучения сильноточным импульсным электронным пучком.

5. М.Г. ИСАЕНКОВА, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, В.В. НОВИКОВ, Д.И. ЖУК, А.В. ГРИГОРЬЕВ, М.Н. САБЛИН. Зависимость ориентации гидридов от послойной неоднородности кристаллографической текстуры в опытной трубе из сплава Э635.

6. А.О. МАЗАЕВ. Охрупчивание стальных дистанционирующих решеток в результате длительной эксплуатации в составе ТВС реактора РБМК-1000.

7. И.Д. НИКОЛАЕВА, М.С. СТАЛЬЦОВ, И.И. ЧЕРНОВ, Б.А. КАЛИН, И.А. БОГАЧЕВ, Л.Ю. ГУСЕВА, М.В. ДРОЖЖИНА, А.А. БЕЛЯЕВ, А.Г. ТИЩЕНКО, С.Н. КОРШУНОВ. Влияние концентрации оксида иттрия на формирование гелиевой пористости в ферритно-мартенситной ДУО стали.

8. Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, П.Л. ДОБРОХОТОВ, А.К. АМАНОВА. Влияние предшествующей деформации на текстуру и субструктуру оболочечных труб из ферритно-мартенситной стали.

9. Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, О.А. КРЫМСКАЯ, Н.С. МОРОЗОВ, И.В. РЯХОВСКИХ, Т.С. ЕСИЕВ. Зависимость склонности к коррозионному растрескиванию стальных труб от послойной текстурной неоднородности.

10. Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, В. А. ФЕСЕНКО, П.Л. ДОБРОХОТОВ. Послойная неоднородность текстуры и субструктуры в оболочечных трубах из ферритно-мартенситной стали.

11. К.Е. ПРИХОДЬКО, Б.А. ГУРОВИЧ, М.М. ДЕМЕНТЬЕВА, Д.А. КОМАРОВ, Л.В. КУТУЗОВ. Особенности изменения микроструктуры и элементного состава тонких пленок оксида меди под действием протонного облучения.

12. Н.В. СТЕПАНОВ, П.С. ДЖУМАЕВ, В.Л. ЯКУШИН, М.В.ЛЕОНТЬЕВА-СМИРНОВА, И.А.НАУМЕНКО, Г.А.БИРЖЕВОЙ, О.Э.ЛЕВИН. Влияние обработки потоками импульсной плазмы на коррозионную стойкость твэльных труб из ферритно-мартенситных сталей типа X12 в жидком свинце.

13. В.В. УГЛОВ, С.В. ЗЛОЦКИЙ, В.А. СКУРАТОВ, Э. ВЕНДЛЕР. Радиационные эффекты в нанокристаллическом покрытии TiZrN, облученном высокоэнергетическими ионами.

14. В.В. УГЛОВ, В.И. ШИМАНСКИЙ, Е.Л. КОРЕНЕВСКИЙ, JACQUES O'CONNEL Структурно-фазовое состояние многослойных пленок AlN/SiNx после ионного облучения и термического воздействия.

15. В.П. ФИЛИППОВ, А.Б. БАТЕЕВ. Влияние реакторного облучения на состояние олова в оксидных пленках циркониевого сплава Zr-0.76%Fe-1.6%Sn.

16. В.П. ФИЛИППОВ, В.Г. КИРИЧЕНКО. Рост и сегрегация интерметаллических фаз в сплавах циркония.

17. А.Б. ЦЕПЕЛЕВ, И.М. МИЛЯЕВ, В.Н. ПИМЕНОВ, В.С. ЮСУПОВ, В.Н. МЕЛЬНИКОВ, А.И. МИЛЯЕВ. Влияние электронного облучения на кинетику распада твердого раствора и коэрцитивную силу магнитотвердого сплава Fe-Cr-Co.

18. А.В. ШУЛЬГА. Особенности старения и деградации коррозионно-стойких сталей, полученных методом консолидации быстрозакаленных порошков, при высокотемпературных выдержках.

19. В.М. ЧЕРНОВ, К.А. МОРОЗ. Влияние повреждающего облучения на низкотемпературное охрупчивание металлов

### **Секция 3 «Ядерная составляющая топлива»**

1. В.В. МИХАЛЬЧИК, А.В. ТЕНИШЕВ, Д.П. ШОРНИКОВ, Р.С. КУЗЬМИН. Особенности испарения мононитрида урана.

2. С.Н.НИКИТИН, Б.А. ТАРАСОВ, Д.П. ШОРНИКОВ. Взаимодействие металлического ядерного топлива с материалами оболочки твэла.

3. Р.С. КУЗЬМИН, А.В. ТЕНИШЕВ, В.В. МИХАЛЬЧИК, Д.П. ШОРНИКОВ. Закономерности образования твердого раствора (U,Gd)O<sub>2</sub> при спекании таблеток оксидного ядерного топлива.

4. Б.А. ТАРАСОВ, И.И. КОНОВАЛОВ. Некоторые перспективы применимости силицидов урана в качестве ядерного топлива ВВЭР.

## СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ 20 ОКТЯБРЯ

### Секция 4 «Методы исследования и моделирования материалов»

1. И.А. АНТОШИНА, Р.К. ВИШЕРАТИН, В.А. СТЕПАНОВ, П.А. ХАЙМОВИЧ. Кристаллизация металлических стекол после интенсивной пластической деформации.

2. М.А. АРСЕНТЬЕВ, С.В. ВАСИЛЬЕВА, А.О. МЕРКУШКИН, А.Ю.РАШКОВСКИЙ, А.С.СМОЛЯНСКИЙ. Фрактальная сорбция и строение частиц гамма-облученного дисперсного политетрафторэтилена.

3. В.В.ВАСИЛЕНКО, В.И.ПОЛЬСКИЙ, П.С.ДЖУМАЕВ, В.Н.ПЕТРОВСКИЙ, В.Л.ЯКУШИН. Поверхностное упрочнение низколегированных конструкционных сталей методом лазерной наплавки.

4. Я.С. ВОЛОДИН, И.В. ЕРШОВА, А.В. НАЗАРОВ. Моделирование атомной структуры в окрестности нанопор в ОЦК металлах.

5. Н.А. ГОЛОВИН, М.Л. ТАУБИН, А.А. ЯСКОЛКО. Особенности формирования двухслойной структуры фольг вольфрама и тантала.

6. В.И.ГРАФУТИН, И.А.ЕВСТЮХИНА, В.П.КОЛОТУШКИН, В.Ю.МИЛОСЕРДИН, А.Ю.МИЩЕНКО, С.Г.РУДАКОВ, А.Л.УДОВСКИЙ, Ю.В.ФУНТИКОВ, А.С.ШАРАПОВ. Исследование изменения знака параметра ближнего порядка и электронной плотности в сплавах на основе железа.

7. Г.Н.ЕЛМАНОВ, П.С.ДЖУМАЕВ, Е.А.ИВАНИЦКАЯ, Т.Л. МИЩЕНКО, А.Н.СУЧКОВ. Формирование микроструктуры соединения при диффузионной пайке никеля и железа борсодержащими сплавами-припоями в условиях оплавления границ зерен.

8. И.В.ЕРШОВА, А.В.НАЗАРОВ. Моделирование влияния давления на концентрацию междоузельных атомов в металлах с ОЦК структурой.

9. Р.А. ИБРАГИМОВА, М.Г. ГАНЧЕНКОВА, В.А. БОРОДИН. Ab-initio моделирование коррозии феррито-мартенситной стали ЭП-823.

10. А.А. ИВАННИКОВ, Б.А. КАЛИН, А.Н. СУЧКОВ, Д.М. БАЧУРИНА, М.А. ПЕНЯЗЬ. Влияние температурно-временных параметров пайки на формирование структуры соединений реакторных коррозионностойких сталей, полученных с использованием никелевых борсодержащих припоев.

11. А.А. ИВАННИКОВ, О.Н. СЕВРЮКОВ, И.Е.ЛЮБЛИНСКИЙ, А.В.ВЕРТКОВ, М.А.ПЕНЯЗЬ, В.Е.МИСНИКОВ, Ю.О.КОЧНОВ. Применение технологии пайки молибдена со сталью 12X18N10T для капиллярных систем внутрикамерных элементов токамаков.

12. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, В.А.ФЕСЕНКО, М.Д. ГРИЦКЕВИЧ. Особенности текстуробразования в листах из однофазных и многофазных сплавов на основе титана при их пластической деформации и термообработке.

13. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, В.В.НОВИКОВ, О.А.КРЫМСКАЯ, А.В.ГРИГОРЬЕВ. Зависимость анизотропии свойств циркониевых труб от их кристаллографической текстуры.

14. Б.А. КАЛИН, О.Н. СЕВРЮКОВ, А.А. ИВАННИКОВ, М.А. ПЕ-  
НЯЗЬ, И.В. ФЕДОТОВ, Д.М. БАЧУРИНА. Исследование прочностных  
характеристик соединений из реакторных коррозионностойких сталей,  
полученных с помощью быстрозакалённых сплавов-припоев на основе  
системы Ni-Si-Be.

15. И.В.КОЗЛОВ, Г.Н.ЕЛМАНОВ, П.С.ДЖУМАЕВ,  
О.В.ЕМЕЛЬЯНОВА. Изучение структурных особенностей компо-  
зиционных микропроводов на основе кобальта.

16. В.Н.КОЛОКОЛЬЦЕВ, В.Ф.ДЕГТЯРЕВ, И.В.БОРОВИЦКАЯ,  
П.В.СИЛИН, В.Я. НИКУЛИН, Е.Н.ПЕРЕГУДОВА. Фиксация напряжен-  
ного состояния стеклянных пластинок при нанесении тонких пленок на  
установке Плазменный фокус.

17. С.В.КОРОВИН, П.А.СИВАК, А.Б.СИВАК. Эффективность дисло-  
каций как стоков радиационных дефектов в ГЦК кристалле Ru.

18. Б.П.МИХАЙЛОВ, А.Б.МИХАЙЛОВА, В.Ф.ШАМРАЙ,  
И.В.БОРОВИЦКАЯ. Деградация и восстановление сверхпроводящих па-  
раметров ВТСП лент под воздействием механических нагрузок и термо-  
обработки

19. Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, О.А. КРЫМСКАЯ,  
Д.И.ЖУК, Д.З.МАМЕДОВ. Моделирование пластической деформации  
материала ячеек дистанционирующей решетки в процессе штамповки.

20. Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, П.Л. ДОБРОХОТОВ,  
С.Д.СТОЛБОВ, И.О.БАННЫХ. Влияние послойной текстурной неоднор-  
одности горячекатаных листов ферритной стали на анизотропию их ме-  
ханических свойств после термоупрочнения.

21. Д.В. ПОСОХОВ, В.С. КУЗЬМИН. Разработка перовскито-  
подобного материала на основе алюминия для иммобилизации радиоак-  
тивных отходов в режиме технологического горения методом СВ-  
синтеза.

22. И.С. САЕНКО, А.Л. УДОВСКИЙ, О.Б. ФАБРИЧНАЯ. Термоди-  
намическое моделирование диаграммы состояния системы Fe-Y.

23. Л.В. СЕЛЕЗНЕВА, А.В. НАЗАРОВ. Взаимное влияние углерода и  
вакансии на миграцию точечных дефектов в  $\alpha$ -железе.

24. А.В. ТЕНИШЕВ, Р.С. КУЗЬМИН, М.Е. МАТВЕНОВ,  
В.В. МИХАЛЬЧИК, Д.П. ШОРНИКОВ. Особенности измерения нести-  
хиометрии диоксида урана методом термогравиметрии.

25. А.Л. УДОВСКИЙ, Д.А. ВАСИЛЬЕВ. Проявление ферро - анти-  
ферромагнитного фазового перехода в метастабильных сплавах богатых  
Cr в виде немонотонных температурных зависимостей теплоемкости  
двухфазных сплавов системы Fe-Cr.

26. А.Л. УДОВСКИЙ, М.В. КУПАВЦЕВ. Применение трехподреше-  
точной модели для расчетов структурных и термодинамических свойств  
 $\sigma$ - фазы в системе Fe-V.

## **PROGRAM**

### **17 October**

**14<sup>00</sup> – 19<sup>00</sup>** Reception and registration of participants of the School-Conference

**16<sup>00</sup> – 20<sup>00</sup>** Round table with the participation of Russian and foreign lecturers

### **18 October**

**9<sup>00</sup> – 10<sup>00</sup>** Registration of participants

**10<sup>00</sup> – 10<sup>10</sup>** Opening of the School-Conference

#### **Section 1 «Ageing of materials of the NPP equipment»**

**10<sup>10</sup> – 10<sup>30</sup>** V.I. Korogodin (SC "Rosatom") Structural materials of the nuclear power engineering: modern challenges and supply of resources for sustainable development

**10<sup>30</sup> – 11<sup>10</sup>** A.V. Dub (JSC "Science and Innovations") From 30 to 100. Material science and technological support for increasing the service life of hull materials

**11<sup>10</sup> – 11<sup>50</sup>** V.V. Potapov (JSC VNIIAES) Experience of increasing the service life of VVER NPP power units

#### **Coffee Break 11<sup>50</sup> – 12<sup>10</sup>**

**12<sup>10</sup> – 12<sup>40</sup>** B.A. Kalin (NRNU MEPhI) Innovative directions for ensuring the NPP safety (fuel, materials)

**12<sup>40</sup> – 13<sup>20</sup>** V.P. Semishkin (JSC OKB "GIDROPRESS") Control of aging the structures, systems and components of the VVER reactors

**13<sup>20</sup> – 14<sup>00</sup>** V.G. Kritsky (JSC "NIAEP"- "ASE") Aging control in the design of NPPs

#### **Lunch break 14<sup>00</sup> – 15<sup>00</sup>**

**15<sup>00</sup> – 16<sup>00</sup>** B.Z. Margolin (FSUE CRISM "Prometey") Physicomechanical modeling of the destruction processes and predicting the properties of irradiated materials of VVER reactor vessels and internals

**16<sup>00</sup> – 16<sup>40</sup>** B.A. Gurovich (NRC "Kurchatov Institute") Degradation of the structure and properties of reactor internals materials after long-term operation and the effect of recovery annealing temperature on increasing their service life

#### **Coffee Break 16<sup>40</sup> – 17<sup>00</sup>**

**17<sup>00</sup> – 17<sup>40</sup>** V. Skorobogatikh, P. Kozlov (SRC RF "NPO TSNIITMASH") Modern heat-resistant materials for power equipment working under pressure in conditions of creep

**17<sup>40</sup> – 18<sup>20</sup>** Peter Hosemann (University of California Berkeley) Advanced nuclear materials testing and characterization

**18<sup>20</sup> – 19<sup>00</sup>** Round table with the participation of Russian and foreign lecturers

#### **Poster session 15<sup>00</sup> – 18<sup>20</sup>**

**19 October**

**Section 2 «Degradation of structural materials»**

**10<sup>00</sup> – 10<sup>40</sup>** O.P. Maksimkin, A.V.Y arovchuk, O.V.Rofman, L.G. Turubarova, S.B. Kislitsin, A.S. Dikov (INP RK, Almaty, Kazakhstan) Aging and corrosion of structural materials irradiated by neutrons in BN-350 and VVR-K nuclear reactors

**10<sup>40</sup> – 11<sup>20</sup>** A.I. Ryazanov (NRC "Kurchatov Institute") Modern problems of the radiation creep and helium embrittlement of irradiated structural materials for nuclear and thermonuclear reactors

**11<sup>20</sup> – 12<sup>00</sup>** I.I. Chernov<sup>1</sup>, M.S. Staltsov<sup>1</sup>, B.A. Kalin<sup>1</sup>, I.A. Bogachev<sup>1</sup>, L.Y. Guseva<sup>1</sup>, S.N. Korshunov<sup>2</sup> (<sup>1</sup>NRNU MEPhI, <sup>2</sup>NRC "Kurchatov Institute") Some problems of hydrogen in reactor structural materials

**Coffee Break 12<sup>00</sup> – 12<sup>20</sup>**

**12<sup>20</sup> – 13<sup>00</sup>** A.V. Kozlov, I.A.Portnykh (JSC "IRM", Zarechny) Mechanisms of the effect of neutron irradiation at various temperatures on the physico-mechanical properties of austenitic steels

**13<sup>00</sup> – 13<sup>40</sup>** V.V. Uglov<sup>1,2,3</sup>, V.M. Anishchik<sup>1</sup>, G.E. Remnev<sup>2</sup>, N.T. Kvasov<sup>1,2</sup>, V.I. Shymanski<sup>1,2</sup>, I.V. Safronov<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk; <sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk; <sup>3</sup>MEPHI, Moscow) Features of the radiation processes and phenomena in nanocomposite coatings

**Lunch break 13<sup>40</sup> – 14<sup>40</sup>**

**14<sup>40</sup> – 15<sup>20</sup>** V.A. Pechenkin (JSC "SRC RF FEI", Obninsk ) Changing the properties of structural materials under irradiation: the role of radiation-induced segregation

**15<sup>20</sup> – 16<sup>00</sup>** Frank A. Garner<sup>1,2</sup>, Lin Shao<sup>1</sup>, Michael Short<sup>3</sup>, Mychailo B. Toloczko<sup>4</sup> And Victor N. Voyevodin<sup>5</sup> (<sup>1</sup>Texas A&M University, <sup>2</sup>REC, <sup>3</sup>MIT, <sup>4</sup>Pacific Northwest National Laboratory, USA; <sup>5</sup>Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov Ukraine) Use of charged particle irradiation to study neutron-induced void swelling of reactor structural materials

**16<sup>00</sup> – 16<sup>40</sup>** Neustroev V., Belozеров S., Zhemkov I., Makarov E., Markelov D. (JSC "SRC RIAR", Dimitrovgrad) Regularities and relationships of radiation phenomena in austenitic steels irradiated to high damaging doses

**Coffee Break 16<sup>40</sup> – 17<sup>00</sup>**

**17<sup>00</sup> – 18<sup>00</sup> Reports:**

1. A.S. Dikov<sup>1,2</sup>, S.B. Kislitsin<sup>1,2</sup>, I.I. Chernov<sup>1</sup> (<sup>1</sup> NRNU MEPhI, Russia; <sup>2</sup> INP RK, Almaty, Kazakhstan) *Effect of test temperature on the mechanical properties of austenitic Cr18Ni10Ti and Cr16Ni11Mo3 steels, irradiation by fast neutrons*

2. E.A.Kuleshova<sup>1,2</sup>, A.S.Frolov<sup>1</sup>, D.A.Maltsev<sup>1</sup>, E.V.Krikun<sup>1</sup>, D.A.Zhurko<sup>1</sup> (<sup>1</sup>NRC "Kurchatov Institute", <sup>2</sup>NRNU MEPhI) *Radiation embrittlement of 15H2NMFA class 1 steel under the low-temperature irradiation*

3. N.S. Saburov, V.A. Markelov, A.U. Gusev, S.A. Bekrenev, I.A. Shelepov (A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials) *The threshold conditions of the delayed hydride cracking in zirconium alloys*

**18<sup>00</sup> – 19<sup>00</sup>** Round table with the participation of Russian and foreign lecturers

**Poster session 14<sup>40</sup> – 18<sup>00</sup>**

**20 October**

## **Section 2 « Degradation of structural materials» (continuation)**

**10<sup>00</sup> – 10<sup>50</sup>** Dr. Malcolm Griffiths (Canadian Nuclear Laboratories) *Mechanisms of Irradiation Creep in Reactor Core Materials*

**10<sup>50</sup> – 11<sup>40</sup>** Short Michael (MIT) *The Wigner Energy Spectral Fingerprints of Radiation Damage*

**11<sup>40</sup> – 12<sup>00</sup>** **Reports:**

Yu.A.Perlovich<sup>1</sup>, M.G.Isaenkova<sup>1</sup>, V.A.Fesenko<sup>1</sup>, O.A.Krymskaya<sup>1</sup>, G.P.Kobylyanskiy<sup>2</sup>, Yu.D.Goncharenko<sup>2</sup> (<sup>1</sup>NRNU MEPhI, <sup>2</sup>JSC "SRC RIAR") *Influence of high-neutron irradiation on substructure of cladding tubes from zirconium alloys*

**Coffee Break 12<sup>00</sup> – 12<sup>20</sup>**

## **Section 3 «Nuclear fuel component»**

**12<sup>20</sup> – 13<sup>00</sup>** A.M.Savchenko, L.A.Karpyuk, M.V.Pozdeev, O.I.Uferov, G.V.Kulakov, D.V.Shamin, M.Y.Lebedev (JSC VNIINM) *New technological platform based on composite fuel*

**13<sup>00</sup> – 13<sup>20</sup>** B.A.Tarasov, D.P.Shornikov, S.N.Nikitin, A.V.Tenishev (NRNU MEPhI) *The development of composition "fuel-cladding" based for pellets metal fuel with fixed porosity*

**13<sup>20</sup> – 14<sup>00</sup>** **Reports:**

1. I. I. Konovalov, M.S. Tarasova, B.A. Tarasov (NRNU MEPhI) *calculated definition of the performance limits of fuel elements with a dense fuel*

2. A.B. Kruglov, V.B. Kruglov, P.G. Struchalin, V.S. Kharitonov (NRNU MEPhI) *The control of thermophysical properties of fuel rods with dense fuel*

**Lunch break 14<sup>00</sup> – 15<sup>00</sup>**

## **Section 4 « Methods of research and modeling of materials »**

**15<sup>00</sup> – 15<sup>40</sup>** S.V. Starikov (JIHT RAS) *Multiscale computer modeling of the properties of materials for nuclear engineering*

**15<sup>40</sup> – 16<sup>30</sup>** Prof. Janelle Wharry (Purdue University) *TEM in situ mechanical testing techniques for ion irradiated materials*



### **16<sup>30</sup> – 17<sup>00</sup> Reports:**

1. E.A.Kuleshova<sup>1,2</sup>, B.A.Gurovich<sup>1</sup>, Z.V.Bukina<sup>1</sup>, D.A.Maltsev<sup>1</sup>, S.V.Fedotova<sup>1</sup>, A.S.Frolov<sup>1</sup>, G.M.Zhuchkov<sup>1</sup> ( <sup>1</sup>NRC "Kurchatov Institute", <sup>2</sup>NRNU MEPhI) Assessment of the hardening mechanism contribution to flux effect of VVER-1000 RPV steels under accelerated irradiation by APT and TEM

2. E.A.Kuleshova<sup>1,2</sup>, D.A.Maltsev<sup>1</sup>, A.S.Frolov<sup>1</sup>, D.V.Safonov<sup>1,2</sup>, G.M.Zhuchkov<sup>1</sup>(<sup>1</sup>NRC "Kurchatov Institute", <sup>2</sup>NRNU MEPhI) Structural and fractographic study of templets cut out from RPV of Novovoronezh NPP power unit №4 for current state evaluation

### **Coffee Break 17<sup>00</sup> – 17<sup>20</sup>**

### **17<sup>20</sup> – 18<sup>20</sup> Reports (continuation):**

3. V.A. Zhitelev, M.V. Kuprienko, A.A. Isaev, F.N. Kryukov, E.A. Zvir, A.V. Stozhuk, And G.D. Nurullina (JSC "SSC RIAR", Dimitrovgrad) Gamma emission tomography of a BOR-60 untight EFA

4. E. Makarov, V. Neustroev, S. Belozero, D. Markelov, A. Obukhov (JSC "SSC RIAR", Dimitrovgrad) Effect of stress on irradiation-induced creep and swelling of FE-18CR-10NI-TI steel pressurized specimens irradiated in the BOR-60 reactor

5. V.I.Pastukhov<sup>1,2,3</sup>, S.A.Averin<sup>1,3</sup>, V.L.Panchenko<sup>1,3</sup>, I.A.Portnykh<sup>1</sup>, P.D.Freyer<sup>4</sup>, L.A.Giannuzzi<sup>5</sup>, F.A.Garner<sup>3,6</sup> (<sup>1</sup>JSC "INM", Zarechny, <sup>2</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg, <sup>3</sup>NRNU MEPhI, <sup>4</sup>Westinghouse Electric Company, Pittsburgh PA, USA, <sup>5</sup>L.A. Giannuzzi & Associates LLC, Fort Myers, FL, USA, <sup>6</sup>Radiation Effects Consulting LLC, Richland WA, USA) Application of backscatter electrons for large area imaging of cavities produced by neutron or ion irradiation of structural steels

6. A.V.Androso<sup>1</sup>, V.I.Vybyvanets<sup>1</sup>, E.G.Kolesnykov<sup>1</sup>, V.S.Serikov<sup>1</sup>, E.S.Solntseva<sup>1</sup>, P.A.Stepanchikov<sup>1</sup>, I.M.Russkikh<sup>2</sup>, E.N.Seleznev<sup>2</sup> (<sup>1</sup>FSUE SRI SIA "LUCH", Podolsk, <sup>2</sup>JSC "INM", Zarechny) Ampoul test methodology

**18<sup>20</sup> – 19<sup>00</sup>** Round table with the participation of Russian and foreign lecturers

### **Poster session 15<sup>00</sup> – 18<sup>00</sup>**

**21 October**

**10<sup>00</sup> – 12<sup>00</sup> Reports:**

1. N. V. Volkov<sup>1</sup>, B.A. Kalin<sup>1</sup>, I.V. Oleinikov<sup>1</sup>, N.V. Sysoeva<sup>2</sup> ( <sup>1</sup>NRNU MEPhI, <sup>2</sup>“Scientific-technical institute of interbranch information”) IR-spectrometry application for analysis of oxide films grown on the claddings surface from E110 alloy

2. B.A. Kalin<sup>1</sup>, N.V. Volkov<sup>1</sup>, R.A. Valikov<sup>1</sup>, A.S. Yashin<sup>1</sup>, D.N. Ignatiyev<sup>2</sup> ( <sup>1</sup>NRNU MEPhI, <sup>2</sup>FSUE SRI SIA "LUCH", Podolsk) Surface layer allowing of fuel claddings from E110 alloy on spongy base to increase high-temperature corrosion resistance

3. A.S. Useinov<sup>1</sup>, E.V. Gladkih<sup>1</sup>, M.D. Butylo<sup>1</sup>, V.N. Reshetov<sup>2</sup>, A.A. Rusakov<sup>1</sup> ( <sup>1</sup>FSBI TISNCM, Troitsk, <sup>2</sup>NRNU MEPhI) Modern domestic devices and methods for complex diagnostics of material properties

4. S.V. Rogozhkin, A.A. Nikitin, O.A. Korchuganova (SSC «Institute for Theoretical and Experimental Physics» of NRC “Kurchatov Institute”) Nanostructure of titanium alloy Ti-5Al-4V-2Zr and its response on thermal aging at 450 °C

5. N.A. Iskandarov<sup>1,2</sup>, S.V. Rogozhkin<sup>2,1</sup>, A.A. Lukyanchuk<sup>1,2</sup>, O.A. Raznitsyn<sup>1,2</sup>, A.S. Shutov<sup>1,2</sup>, A.G. Zaluzhnyi<sup>2,1</sup>, M.V. Leontieva-Smirnova<sup>3,2</sup> ( <sup>1</sup>SSC «Institute for Theoretical and Experimental Physics» of NRC “Kurchatov Institute”, <sup>2</sup>NRNU MEPhI, <sup>3</sup>A.A. Bochvar High-Technology Scientific Research Institute for Inorganic Materials (VNIINM)) Evolution of rusfer EK-181 ferritic-martensitic steel nanoscale structure under aging

6. V.V. Uglov<sup>1,2,3</sup>, V.I. Shymanski<sup>1,4</sup>, E.L. Korenevski<sup>1</sup>, J.O'connel<sup>4</sup> ( <sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus; <sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk; <sup>3</sup>MEPhI, Moscow; <sup>4</sup>Nelson Mandela University, Port Elizabeth, South Africa) Structure and phase composition of multilayered AlN/SiN<sub>x</sub> films after ion irradiation and thermal annealing

7. A.V. Nazarov<sup>1</sup>, A.A. Mikheev<sup>2</sup>, A.G. Zaluzhnyi<sup>1</sup> ( <sup>1</sup>NRNU MEPhI <sup>2</sup>Moscow State University of Design and Technology) Simulation of nanovoid growth in FCC metals

8. D. N. Demidov <sup>1</sup>, A.B. Tsepelev <sup>1, 2</sup>( <sup>1</sup>NRNU MEPhI, <sup>2</sup> IMET RAS, Moscow) Effects of radiation and impurities on the rate growth of helium bubbles in the grain boundaries of ferritic steels

**10<sup>00</sup> – 14<sup>00</sup>** Round table with the participation of Russian and foreign lecturers

**Coffee Break 12<sup>00</sup> – 12<sup>20</sup>**

**12<sup>20</sup> –14<sup>00</sup>** Summarizing, closing of the School-Conference

**15<sup>00</sup> –17<sup>00</sup>** Excursion to NRNU MEPhI

АННОТАЦИИ ЛЕКЦИЙ  
ABSTRACTS OF LECTURES

КОРОГОДИН В.И.  
*ГК «Росатом», г. Москва, Россия*

## **КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ И РЕСУРСНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАЗВИТИЯ**

В докладе приводятся оценки конкурентоспособности атомной энергетики по сравнению с другими масштабными энерготехнологиями и перспективы ее развития в ближайшие десятилетия. На основе анализа накопленного опыта, задач повышения конкурентоспособности и обеспечения экологической приемлемости выделены приоритетные направления применения новых радиационно стойких материалов с точки зрения эффектов, достигаемых на жизненном цикле атомных электростанций и ядерного топлива.

V.I. KOROGODIN  
*SC "Rosatom", Moscow, Russia*

## **STRUCTURAL MATERIALS OF THE NUCLEAR POWER ENGINEERING: MODERN CHALLENGES AND SUPPLY OF RESOURCES FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT**

Estimations of the competitiveness of nuclear power in comparison with other large-scale energy technologies and prospects for its development in the coming decades are presented in the report. Based on an analysis of the accumulated experience, the problems of increasing the competitiveness and ensuring the environmental acceptability, priority directions of the use of new radiation-resistant materials in terms of the effects to be achieved during the life cycle of nuclear power plants and nuclear fuel have been determined.

**В.В.ПОТАПОВ, А.М.ЛОГИНОВ В.А.ИЛЬИН**  
*АО «Всероссийский научно-исследовательский институт  
по эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»),  
г. Москва, Россия*

## **ОПЫТ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС ВВЭР**

Продление энергоблоков АЭС в настоящее время актуально во многих странах мира, использующих атомную энергию. Возможность продления обеспечивается тем, что конструирование оборудования и трубопроводов (проектирование для строительных конструкций) выполнялось с определенным консерватизмом, и выполненным значительным объемом модернизаций на стадии эксплуатации. Возможность продления подтверждается опытом эксплуатации энергоблоков АЭС.

При продлении энергоблока необходимо оценивать старение критических элементов АЭС. К критическим элементам относятся элементы, важные для безопасности, целостность и работоспособность которых определяет надежность и срок эксплуатации АЭС в целом, а также элементы, отказ которых может привести к гораздо большим экономическим потерям, чем затраты на их контроль и диагностику. Помимо прочего к ним относятся элементы, замена которых при эксплуатации невозможна или экономически неоправдана.

Контроль старения включает наблюдение и регистрацию параметров, характеризующих изменение свойств объектов, необходимых для выполнения своих функций, и контроль уровня надежности элемента в процессе эксплуатации. К мероприятиям, по контролю старения относятся:

- неразрушающий и разрушающий контроль;
- техническое освидетельствование;
- мониторинг параметров эксплуатации;
- проведение оценки и прогнозирование ресурсных характеристик элементов энергоблоков АЭС.

АО «ВНИИАЭС» обладает большим опытом научно-практических работ по управлению старением элементов АЭС, накопленным в рамках выполнения работ по продлению срока службы энергоблоков АЭС с ВВЭР и представленным в данной статье.

V.POTAPOV, A.LOGINOV, V.ILIN  
*All-Russia Research Institute of Nuclear Power Plant Operation  
(JSC «VNIIAES»), Moscow, Russia*

## **LIFETIME EXTENSION EXPERIENCE FOR NPP WITH VVER**

Lifetime extension of NPP power units is an actual issue for many countries which are using nuclear power all over the world. The possibility of lifetime extension is provided by designing equipment and pipelines with certain conservatism and also deep modernization during operation. Lifetime extension possibility has been confirmed by NPP operation experience.

During lifetime extension it is crucial to evaluate ageing of NPP critical elements. Among NPP critical elements are the ones which are important for safety of operation. The integrity and working ability of these elements define the NPP operation period and its reliability. Also elements are included in that class which failure can lead to much bigger economical losses in comparison with costs on their inspection and diagnostics. Besides elements are included in the class which cannot be changed during operation or this change is not economical reasonable.

Ageing inspection includes supervision and registration of parameters which are connected with objects' properties defining fulfillment of their functions and checking of elements reliability during operation.

Ageing inspection measures include:

nondestructive and destructive testing;

technical examination;

monitoring of operation parameters;

evaluation and predicting of lifetime parameters of NPP elements.

JSC «VNIIAES» (Whole Russia research and development institute for nuclear power plants operation) has got much experience in research and practical approach to management of NPP elements' ageing which has been acquired while extension lifecycle activities of NPP with VVER were done. The part of experience is provided in this article.

Б.А.КАЛИН

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

## **ИННОВАЦИОННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС (ТОПЛИВО, МАТЕРИАЛЫ)**

В Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» проводятся поисковые исследования по разработке ядерного топлива, устойчивого к авариям (толерантное топливо – ТТ), и по прогнозированию старения и деградации свойств материалов (СД) – направления повышения безопасности ядерных реакторов.

Специфика разработки ТТ состоит в повышении устойчивости оболочек ТВЭлов ТВС реакторов типа ВВЭР к пароциркониевой реакции в аварийных условиях и в направлении повышения теплопроводности и совместимости с оболочкой  $\text{UO}_2$ . Основными направлениями по оболочкам ТВЭлов являются модифицирование структурно-фазового состояния во внешнем слое оболочки и разработке износостойких покрытий. В части топливной композиции разрабатывается технология получения двухзонных таблеток  $\text{UO}_2$  с радиальным распределением микроструктуры, обогащения и распределения выгорающих элементов (в ТВЭгах).

При разработке научных основ прогнозирования старения материалов использованы методы научного обобщения данных, составление объектно-тематического электронного банка оцененных данных, построение моделей процессов старения и деградации материалов.

B.A.KALIN

*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia*

## **INNOVATIVE DIRECTIONS OF ENSURING THE SAFETY OF NPPS (FUEL, MATERIALS)**

The National Nuclear Research University "MEPhI" conducts exploratory research on developing nuclear fuel stable to accidents (tolerant fuel (TT)) and forecasting the aging and degradation of the properties of materials, i.e. the direction of improving the safety of nuclear reactors.

The specificity of developing tolerant fuel consists in increasing the stability of the fuel claddings of VVER reactors to the zirconium-steam reaction under accident conditions and in the direction of increasing the thermal conductivity and compatibility of  $\text{UO}_2$  with the cladding. The main directions of solving this problem are modification of the structural-phase state in the outer layer of the cladding and development of wear-resistant coatings. As to the fuel composition, the technology is being developed for production of two-zone  $\text{UO}_2$  pellets with a radial distribution of the microstructure, enrichment and distribution of burnable elements (in TVEGs).

When developing scientific bases for predicting the aging of materials, methods of the scientific generalization of data, creation of an object-thematic electronic bank of estimated data, and development of models for the processes of materials aging and degradation have been used.



В.П.СЕМИШКИН, А.В.БОГАЧЕВ, А.В.МЕРКУН

*Акционерное общество опытно-конструкторское бюро «Гидропресс»,  
г. Подольск, Московская область, Россия*

## **УПРАВЛЕНИЕ СТАРЕНИЕМ КОНСТРУКЦИЙ, СИСТЕМ И КОМПОНЕНТОВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ВВЭР**

Изложены основные подходы к управлению старением (ресурсом) конструкций, систем и компонентов (КСК) реакторной установки (РУ) с ВВЭР-1000/1200, разработанные в АО ОКБ «Гидропресс» для этапа проектирования. В методологии управления старением использована Российская и зарубежная нормативная документация и отражен опыт проектирования в АО ОКБ «Гидропресс» РУ с ВВЭР-1000/1200. Методология управления старением основана на проектной документации, на результатах диагностики и мониторинга старения КСК в процессе эксплуатации. В основу управления старением РУ положен принцип сохранения работоспособности КСК важных для безопасности посредством комплекса организационных и технических мер по контролю и уменьшению негативных процессов таких, как различные виды деградации свойств материалов, в том числе повреждений и отказов.

V.P.SEMISHKIN, A.V.BOGACHEV, A.V.MERKUN

*Joint Stock Company Experimental Design Bureau «Gidropress»,  
Podolsk, Russia*

## **AGEING MANAGEMENT OF STRUCTURES, SYSTEMS AND COMPONENTS OF REACTOR PLANT WITH VVER**

The basic approaches are presented to ageing (service life) management of structures, systems and components (SSC) of the reactor plant (RP) with VVER-1000/1200, developed in OKB “Gidropress” for the design stage. In the methodology of ageing management the Russian and foreign regulatory documentation is applied and the experience in designing the RP with VVER-1000/1200 in OKB “Gidropress” is mentioned. The methodology of ageing management is based on the design documentation, results of diagnostics and monitoring of SSC ageing during operation. The basis of ageing management is the principle of maintaining the operability of SSC important to safety by application of a complex of organizational and technical measures on monitoring and reducing the negative processes, such as various kinds of degradation of material properties, including damages and failures.

**В.Г. КРИЦКИЙ**

*Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «АТОМПРО-ЕКТ», г. Санкт-Петербург, Россия*

## **УПРАВЛЕНИЕ СТАРЕНИЕМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ АЭС**

Технический проект включает в себя: физические расчеты; теплогидравлические расчеты; расчетное обоснование прочности оборудования.

В процессе проектирования и конструирования используются схемные и конструкционные методы обеспечения надёжности систем. Схемные методы включают в себя: анализ прототипов; создание схем с минимально необходимым числом элементов, применение резервирования, разработку схем, не допускающих опасных последствий отказов их элементов, оптимизацию последовательности работы элементов схемы, предварительный расчёт надёжности проектируемой схемы. При этом учитываются:

- результаты НИОКР;
- использование референтных данных с других ядерных объектов;
- материалы и механизмы старения.

Составляется программа управления старением в период проектирования и эксплуатации ядерного объекта.

**V.G.KRITSKY**

*Joint Stock Company Scientific Research and Design Institute for Energy Technologies «ATOMPROEKT», St. Petersburg, Russia*

## **AGEING MANAGEMENT WHILE DESIGNING NPP**

Basic design includes: physical calculations, thermohydraulic calculations; design-basis justification of equipment reliability.

During design and manufacturing scheme-oriented and construction-oriented system reliability technologies are used. The scheme-oriented ones include prototype analysis; generation of systems with minimum required element number, use of redundancy, development of systems that prevent hazardous consequences in case of element failures; optimization of system element operation sequence; preliminary calculation of system under design reliability. Doing so the following to be considered:

- R&D results;
- Use of reference data obtained at other nuclear facilities;
- Ageing materials and mechanisms.

Ageing management program shall be prepared for design and operation phases of nuclear facility.

Б.З.МАРГОЛИН

*Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей», г. Санкт-Петербург, Россия*

## **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ОБЛУЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСА И ВНУТРИКОПУСНЫХ УСТРОЙСТВ ВВЭР**

Рассмотрены механизмы разрушения ферритных и аустенитных сталей на различных масштабных уровнях, начиная от радиационных дефектов (нано- и микро- уровни) и заканчивая элементами конструкций АЭС – корпусом реактора и внутрикорпусными устройствами. Большое внимание уделяется установлению «мостов» между повреждениями на различных масштабных уровнях. Базируясь на физических механизмах повреждения и разрушения, сформулированы локальные критерии хрупкого и вязкого разрушения облучаемых материалов в терминах механики деформируемого твердого тела. На основе локальных критериев разработаны физико-механические модели разрушения, которые при известном напряженно-деформированном состоянии у вершины трещины позволяют рассчитывать критериальные значения параметров механики разрушения, в частности,  $K_{JC}(T)$  и  $J_C(F)$ . Представлена широкая верификация разработанных физико-механических моделей.

B.Z.MARGOLIN

*Central Research Institute of Structural Materials "Prometey",  
St. Petersburg, Russia*

## **THE PHYSICAL-AND-MECHANICAL MODELING OF FRACTURE PROCESSES AND PREDICTION OF PROPERTIES OF IRRADIATED MATERIALS OF RPV AND INTERNALS FOR WWER**

Fracture mechanisms of ferritic and austenitic steels are considered on various scales from radiation defects (nano- and micro- scales) to NPP equipment components – reactor pressure vessels and the internals. To link damages on different scales the bridges are established as follows: nano-scale → micro-scale, micro-scale → mezo-scale and mezo-scale → macro-scale. On the basis of physical mechanisms of damage and fracture the local criteria of brittle and ductile fracture of irradiated steels are formulated on the mezo-scale in terms of solid mechanics, and the physical-and-mechanical fracture models are developed. For known stress-and-strain fields near the crack tip the developed models allow the prediction of fracture mechanics parameters, in particular,  $K_{JC}(T)$  and  $J_C(F)$ . Wide verification of the developed physical-and-mechanical fracture models is presented.

Б.А.ГУРОВИЧ  
НИИ «Курчатowskiй институт», г. Москва, Россия  
E-mail: malt\_ber@mail.ru

## **ДЕГРАДАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ВКУ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ОТЖИГА ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ**

К особенностям эксплуатации материалов ВКУ, в первую очередь, выгородки реактора относятся высокие повреждающие дозы и обусловленный поглощением  $\gamma$  - квантов и нейтронов высокий уровень температур в массиве выгородки. Поскольку температуры и повреждающие дозы в сечениях выгородки реактора имеют большие градиенты, возможно возникновение больших внутренних напряжений, которые могут оказаться сопоставимыми с пределом текучести материалов ВКУ.

В этой связи для продления срока службы реакторов ВВЭР-1000 до 60 и более лет необходимо изучение механизмов деградации их свойств и обоснование прочностных характеристик материалов ВКУ

В данной работе проведены комплексные исследования структуры и свойств аустенитных сталей после облучения в реакторах БОР-60 и ВВЭР-1000.

Показано, что облучение сталей аустенитного класса приводит к образованию дислокационных петель, пор, размеры и плотность которых зависят от дозы и температуры облучения, и к выделению вторичных фаз (G-фазы, карбидов титана и  $\alpha$ -феррита). Кроме того, воздействие облучения обуславливает перераспределение содержания химических элементов по границам зерен, что проявляется в уменьшении концентрации хрома и увеличении концентрации никеля на границах зерен и в прилегающей к границе области матрицы.

Установлена корреляция между изменением структурно-фазового состояния сталей и изменением механических свойств под облучением.

Предложен способ восстановления механических свойств облученных аустенитных сталей путем восстановительного отжига, обеспечивающего возврат механических свойств до уровня, близкого к исходному состоянию.

Проведены структурные исследования аустенитных сталей после облучения до повреждающих доз, соответствующих эксплуатации в 60 лет, и последующих восстановительных отжигов по различным режимам.

B.A.GUROVICH  
*National Research Center «Kurchatov institute», Moscow, Russia*  
E-mail: malt\_ber@mail.ru

## **MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES DEGRADATION OF RPV INTERNAL MATERIALS AFTER LONG-TERM OPERATION AND ANNEALING TEMPERATURE INFLUENCE ON ITS RECOVERY DEGREE FOR LIFETIME EXTENSION**

The features of baffle ring operation are primarily high damaging doses (up to 60 dpa for lifetime) and the high temperature level in the baffle ring interior volume (up to  $\sim 400^{\circ}\text{C}$ ) due to gamma rays and neutron absorption. Significant temperature and damaging dose gradients throughout the height and cross section of the baffle ring lead to considerable internal stresses which may be comparable to the yield strength of baffle ring materials.

Thus to extend the lifetime of VVER-1000 reactors up to 60 years or more it is necessary to study the properties and structure degradation mechanisms of baffle ring materials and to substantiate their strength characteristics.

This paper performs a complex study of structural state and properties of 18Cr-10Ni-Ti austenitic stainless steel after irradiation in BOR-60 research reactor and in VVER-1000 light water reactor.

Austenitic steels irradiation is shown to lead to formation of dislocation loops, pores, which size and density depend on the irradiation dose and temperature, and the secondary phase precipitation (G-phases, titanium carbide and  $\alpha$ -ferrite). In addition, irradiation causes a redistribution of chemical elements along the grain boundaries, which is manifested in chromium concentration decrease and nickel concentration increase at the grain boundaries.

The correlation between the changes in the internal structural-phase state and the mechanical properties changes under irradiation is shown.

The mode of structural-phase state and mechanical properties recovery annealing is suggested providing the mechanical properties level almost corresponding to the initial state.

Structural studies of 18Cr-10Ni-Ti austenitic stainless steel after irradiation up to damaging doses corresponding to 60 years operation and subsequent recovery annealing on various modes are performed.

**В.Н.СКОРОБОГАТЫХ, П.А.КОЗЛОВ**

*Акционерное общество «Научно – производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»», г. Москва, Россия*

**СОВРЕМЕННЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ,  
РАБОТАЮЩЕГО ПОД ДАВЛЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Рост рабочих параметров (температуры и давления) современных теплоэнергетических установок, произошедший в последние десятилетия напрямую связан с разработкой и внедрением новых жаропрочных материалов, обеспечивающих надежную эксплуатацию энергооборудования при повышенных температурах на протяжении всего ресурса (до 200 тыс. часов). В рамках лекции будут рассмотрены этапы развития и материаловедческие подходы при разработке жаропрочных материалов для трубопроводов с рабочей температурой до 650 °С и более.

**V.SKOROBOGATYKH, P.KOZLOV**

*Joint Stock Company «Research - Production Association «Central Research Institute of Technology Engineering» (JSC «RPA «CNIITMASH»»,  
Moscow, Russia*

**MODERN CREEP-RESISTANT MATERIALS FOR ENERGY  
POWER EQUIPMENT OPERATING UNDER THE PRESSURE  
AT ELAVATED TEMPERATURES**

Increasing operating parameters (e.g. temperature and pressure) of power plants observed last decades were connected with development of new creep resistance materials that able to provide safe operation on lifecycle of equipment. In this lecture will address the stages of development of creep-resistant materials and approaches for their development for application in pipelines with an operating steam temperature up to 650°C and more.

О.П.МАКСИМКИН, А.В.ЯРОВЧУК, О.В.РОФМАН,  
Л.Г.ТУРУБАРОВА, С.Б.КИСЛИЦИН, А.С.ДИКОВ  
*Институт ядерной физики, г. Алматы, Республика Казахстан*

## **СТАРЕНИЕ И КОРРОЗИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ В АТОМНЫХ РЕАКТОРАХ БН-350 И ВВР-К**

Анализируются результаты исследований состояния стенок чехлов отрабатывших тепловыделяющих сборок реактора БН-350, а также оболочек стержней автоматического регулирования реактора ВВР-К. Объектами исследований являлись нержавеющие стали 12Х18Н10Т, 08Х16Н11М3 и 12Х13М2БФР, облученные до 80 сна, после нахождения в воде (10 лет) и длительного (14 лет) «сухого» хранения, а также алюминиевый сплав САВ-1. Образцы исследовали методами механических испытаний, металлографии и магнитометрии. Выполнено электронно-микроскопическое изучение структуры и элементного состава «обедненных» приграничных зон. Обсуждаются экспериментальные данные по ползучести сталей при 350-400°С. Приводятся также результаты исследований по влиянию нейтронного облучения на коррозию САВ-1, подвергнутого «естественному» старению.

О.П.МАКСИМКИН, А.В.ЯРОВЧУК, О.В.РОФМАН,  
Л.Г.ТУРУБАРОВА, С.Б.КИСЛИЦИН, А.С.ДИКОВ  
*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Republic of Kazakhstan*

## **AGEING AND CORROSION OF STRUCTURAL MATERIALS IRRADIATED WITH NEUTRONS IN BN-350 AND VVR-K NUCLEAR REACTORS**

There were analyzed results of studies on conditions of spent FA' shrouds from BN-350 and automatic control rod shells from the VVR-K reactors. The objects of research were stainless steels (0.12C-18Cr-10Ni-Ti, 0.08C-16Cr-11Ni-3Mo and 0.12C-13Cr-2Mo-Nb-V-B), irradiated to 80 dpa and stored in water environment (10 years) and in "dry" conditions (14 years), and SAV-1 aluminium alloy. The samples were studied by mechanical testing, metallography and magnetometry. Electron microscopy of microstructure and elements composition of denuded zones were presented. Experimental data of creep tests performed at 350-400°C were given. There was also studied the effect of neutron irradiation on corrosion of "naturally" aged SAV-1 alloy.

А.И.РЯЗАНОВ

*НИИ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия*

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИАЦИОННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ГЕЛИЕВОГО ОХРУПЧИВАНИЯ ОБЛУЧА- ЕМЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АТОМНЫХ И ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

Радиационная стойкость конструкционных материалов атомных и термоядерных реакторов под действием облучения нейтронами и быстрыми заряженными частицами определяется многими физическими явлениями и более важными из них являются радиационная ползучесть и гелиевое охрупчивание. Радиационная ползучесть зависит от многих физических величин, включая исходную микроструктуру, химический состав материалов, температуру облучения, каскадную эффективность, скорость образования точечных радиационных дефектов, образования кластеров радиационных дефектов (дислокационных петель, пор и выделений), которые образуются под действием облучения материалов нейтронами и быстрыми заряженными частицами. Влияние этих параметров на радиационную ползучесть обсуждается здесь с учетом последних теоретических моделей и экспериментальных результатов, полученных под действием нейтронного и ионного облучений для атомных и термоядерных реакторов. Физические механизмы гелиевого охрупчивания облучаемых материалов обсуждаются также в этом докладе, включая пластическую деформацию материалов с гелием, зарождение и рост гелиевых пор под действием облучения с учетом и без учета приложенных напряжений.

Представленные здесь теоретические и экспериментальные результаты позволяют понять физические механизмы явлений радиационной ползучести и гелиевого охрупчивания в конструкционных материалах для атомных и термоядерных реакторов.



A.I.RYAZANOV  
*NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia*

**MODERN PROBLEMS OF RADIATION CREEP AND  
HELIUM EMBRITTLEMENT IN IRRADIATED  
STRUCTURAL MATERIALS FOR FISSION AND  
FUSION REACTORS**

The radiation resistance of fission and fusion structural materials under neutron and fast charged particle irradiations is determined by many physical phenomena and more important of them are irradiation creep and helium embrittlement. The radiation creep depends on many physical values including: initial microstructure, chemical composition of materials, irradiation temperature, cascade efficiency, generation rate of point radiation defects, nucleation of radiation defect clusters (dislocation loops, voids and precipitates) under neutron and fast particle irradiations in materials. The influence of these parameters on the irradiation creep is discussed here based on theoretical models and obtained experimental data under neutron and fast particle irradiations for fission and fusion reactors.

The physical mechanisms of helium embrittlement of irradiated materials are considered here too including plastic deformation of irradiated materials with helium atoms, helium release from deformed materials, nucleation and growth helium bubbles under applied stress and without it in irradiated materials and other processes.

The presented here theoretical and experimental results allow clarifying the physical mechanisms of irradiation creep and helium embrittlement phenomena in structural materials for fission and fusion reactors.

И.И.ЧЕРНОВ<sup>1</sup>, М.С.СТАЛЬЦОВ<sup>1</sup>, Б.А.КАЛИН<sup>1</sup>,  
И.А.БОГАЧЕВ<sup>1</sup>, Л.Ю.ГУСЕВА<sup>1</sup>, С.Н.КОРШУНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва, Россия*

## **НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДОРОДА В РЕАКТОРНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ**

В работе освещены некоторые проблемы водорода в основных реакторных конструкционных материалах активных зон. Рассмотрены циркониевые сплавы, стали, ванадиевые сплавы, а также синергетическое действие водорода и гелия на радиационную стойкость. Отдельное внимание уделено собственным экспериментальным результатам по исследованию влияния химического состава и структурно-фазового состояния реакторных сталей и ванадиевых сплавов на захват и удержание водорода.

I.I.CHERNOV<sup>1</sup>, M.S.STALTSOV<sup>1</sup>, B.A.KALIN<sup>1</sup>,  
I.A.BOGACHEV<sup>1</sup>, L.Y.GUSEVA<sup>1</sup>, S.N.KORSHUNOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## **SOME PROBLEMS OF HYDROGEN IN REACTOR STRUCTURAL MATERIALS**

The paper highlights some problems of hydrogen in the main structural materials of reactor cores. Zirconium alloys, steels, vanadium alloys, as well as the synergistic effect of hydrogen and helium in the radiation resistance are considered. Special attention is focused to their own experimental results on the influence of chemical composition and structural-phase state of reactor steels and vanadium alloys on trapping and retention of hydrogen.

А.В.КОЗЛОВ, И.А.ПОРТНЫХ  
*АО «Институт реакторных материалов»,  
г. Заречный Свердловская область, Россия*

## **МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ**

Аустенитные стали широко используются в качестве элементов конструкций активных зон ядерных реакторов. При этом для установления параметров безопасной эксплуатации внутриреакторных конструкций (температур, характеристик потока нейтронов, ресурса) необходимо прогнозирование радиационно-индуцированных изменений физико-механических свойств материалов, из которых они состоят.

Целью сообщения является иллюстрация на примере аустенитных сталей того, каким образом с использованием моделей радиационно-индуцированных структурных изменений можно прогнозировать изменение их физико-механических свойств в широком диапазоне температур облучения.

A.V.KOZLOV, I.A.PORTNYKH  
*JSC «Institute of Nuclear Materials», Zarechny, Sverdlovsk region, Russia*

## **MECHANISMS OF THE EFFECT OF NEUTRON IRRADIATION AT DIFFERENT TEMPERATURES ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS**

Austenitic stainless steels are widely used as structural elements of nuclear reactor cores. It is necessary to predict radiation-induced changes in physical and mechanical properties of materials to set safe operation parameters (temperatures, neutron flux characteristics, service life) for in-core structures.

The paper aims to show the possibility to predict changes in physical and mechanical properties in a wide range of irradiation temperatures using radiation-induced structural changes by the example of austenitic stainless steels.

В.В. УГЛОВ<sup>1,2,3</sup>, В.М. АНИЩИК<sup>1</sup>, Г.Е. РЕМНЕВ<sup>2</sup>,  
Н.Т. КВАСОВ<sup>1,2</sup>, В.И. ШИМАНСКИЙ<sup>1,2</sup>, И.В. САФРОНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Томский политехнический университет, Томск, Россия*

<sup>3</sup>*НИЯУ МИФИ, Москва, Россия*

## **ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ И ЯВЛЕНИЙ В НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЯХ**

В данной работе предлагается новая концепция создания наноконпозиционных покрытий, представляющих собой нанокристаллические частицы нитридов переходных металлов (Ti, Zr), инкорпорированных в аморфную матрицу нитрида кремния ( $a\text{-SiN}_x$ ), а также многослойные структуры с чередующимися кристаллическим и аморфными слоями, обладающих повышенной радиационной стойкостью. Данные структуры были сформированы магнетронным распылением соответствующих мишеней и подвергнуты последующему облучению ионами  $\text{Xe}^{2+}$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{He}^+$ , имплантированные дозы которых достигают  $10^{17} \text{ см}^{-2}$ .

Результаты электронномикроскопических исследований позволили установить кластеризацию имплантированных ионов, инициируемую постимплантационным высокотемпературным отжигом ( $800^\circ\text{C}$ ), которая происходит преимущественно в аморфной фазе. В работе предлагается теоретическая модель описания радиационных повреждений в отдельной наночастице, которая является характерным структурным элементом всего наноконпозиционного материала,

V.V. UGLOV<sup>1,2,3</sup>, V.M. ANISHCHIK<sup>1</sup>, G.E. REMNEV<sup>2</sup>,  
N.T. KVASOV<sup>1,2</sup>, V.I. SHYMANSKI<sup>1,2</sup>, I.V. SAFRONOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

<sup>3</sup>*MEPHI, Moscow, Russia*

## **FEATURES OF THE RADIATION PROCESSES AND PHENOMENA IN NANOCOMPOSITE COATINGS**

In the present work we propose a new concept of nanocomposite (transition metals Ti, Zr nitride particles incorporated into amorphous  $a\text{-SiN}_x$  matrix) and multilayers (crystalline and amorphous layers) coatings producing as promising radiated resistant materials. The main idea of the work is connected with producing of a large number of the structural defects like grain boundaries and interphase boundaries that are effective absorbed primary and secondary defects formed after irradiation. The coatings for the experimental research were made by magnetron sputtering of the components and irradiated with  $\text{Xe}^{2+}$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{He}^+$  ions with the dose up to  $10^{17} \text{ cm}^{-2}$ .

Results of transmission electron microscopy showed clustering of the implanted ions initiated by the post-implantation annealing ( $800^\circ\text{C}$ ) realized in the amorphous phase. A theoretical model of radiation damages in a single nanoparticle as a structural element of nanocomposite is proposed.

**В.А.ПЕЧЕНКИН**

*ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского,  
г. Обнинск, Россия*

## **ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ: РОЛЬ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЙ СЕГРЕГАЦИИ**

Представлен обзор исследований по влиянию радиационно-индуцированной сегрегации (РИС) на изменение свойств конструкционных материалов под облучением. Рассмотрены механизмы РИС и ее влияния на фазовый состав, набухание, охрупчивание и другие радиационные явления в сплавах. Разработаны физические модели и методы расчета РИС возле основных объектов микроструктуры (границ зерен и образца, сталях в условиях реакторного и ускорительного облучения. Показано, что изучение РИС и образования радиационно-индуцированных фаз является необходимым этапом разработки новых радиационно-стойких сплавов.

**V.A.PECHENKIN**

*State Scientific Center of Russian Federation – the Institute for Physics &  
Power Engineering, Obninsk, Russian Federation*

## **MODIFICATION OF STRUCTURAL MATERIALS PROPERTIES UNDER IRRADIATION: EFFECT OF RADIATION-INDUCED SEGREGATION**

A review is presented on the effect of radiation-induced segregation (RIS) on structural materials properties under irradiation. Mechanisms of RIS and its impact on phase stability, swelling, corrosion, embrittlement and other radiation phenomena are considered. Physical models and numerical methods of RIS calculation near the main microstructural features such as grain boundaries, specimen surfaces, precipitates, voids, dislocations in austenitic and ferritic-martensitic steels are elaborated under reactor and accelerator irradiation. It is shown that investigation of RIS and radiation-induced precipitation is a necessary stage of advanced radiation –resistant alloys development.

**ФРЭНК А. ГАРНЕР<sup>1,2</sup>, ЛИН ШАО<sup>1</sup>, МАЙКЛ ШОРТ<sup>3</sup>,  
МИХАЙЛО Б. ТОЛЁЧКО<sup>4</sup>, ВИКТОР Н. ВОЕВОДИН<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>*Техасский университет А&М, г. Колледж-Стейшн штата Техас, США*

<sup>2</sup>*Консалтинг «Радиационные Эффекты», г. Ричланд  
штата Вашингтон, США*

<sup>3</sup>*Массачусетский технологический институт, г. Кембридж штата Мас-  
сачусетс, США*

<sup>4</sup>*Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория,  
г. Ричланд штата Вашингтон, США*

<sup>5</sup>*Харьковский физико-технический институт,  
г. Харьков, Украина*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ СОБСТВЕННЫМИ ИОНАМИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВАКАНСИОННОГО РАСПУХАНИЯ КАНДИДАТНЫХ ФЕРРИТО- МАРТЕНСИТНЫХ СПЛАВОВ И ИХ ДУО-ВАРИАНТОВ ПРИ ОЧЕНЬ ВЫСОКИХ ДОЗАХ ОБЛУЧЕНИЯ**

Отсутствие реакторов для проведения испытаний материалов при большом потоке нейтронов усложняет разработку и испытание новых кандидатных сплавов для передовых концепций реактора. Эта проблема особенно остро стоит для сплавов на основе ферритных и феррито-мартенситных систем и, особенно, для ДУО-вариантов этих сплавов. Одним из подходов к преодолению этой проблемы является использование облучения собственными ионами при ускоренных скоростях повреждения.

Работа, представленная в этом докладе, проводилась и продолжает проводиться в двух местах. Первое место - это г. Харьков на Украине, а второе – Техасский университет А&М. Хотя в Харькове и Техасском университете А&М используются различные методики облучения и процедуры сбора данных, эти два вида деятельности хорошо скоординированы и служат для усиления и ускорения прогресса в обеих лабораториях.

Работа подразделена на две основные категории. Первая категория сфокусирована на изучении самой методики облучения ионами для оценки обоснованности использования ионов вместо нейтронов. В этой категории внимание сосредоточено на определении влияния нейтронно-нетипичных аспектов ионного облучения и на разработке методик для приложений, в которых обычно используются нейтроны. Многие из этих исследований сосредоточены на относительно простых сплавах и на чистом железе. Будут представлены результаты, показывающие последние идеи, полученные при изучении влияния растривования пучка, введенных

междоузельных атомов, поверхностных эффектов и ускоренных скоростей смещения атомов. Успех усилий в ионно-нейтронной корреляции будет обобщен для сплавов, для которых имеются данные по влиянию нейтронного облучения.

Вторая категория, в которой преследуются две цели, включает в себя детальное исследование широкого спектра коммерческих и разрабатываемых сплавов различного состава и с различными технологиями их получения. Первая преследуемая цель в каждой лаборатории включает в себя ряд разнообразных сплавов, которых облучают до очень высоких значений сна, порядка 500-1000 сна, так чтобы можно было сравнить эти сплавы исходя из их стойкости к распуханию без усложнения условий облучения. Вторая цель состоит в том, чтобы использовать полученные результаты по сравнению сплавов для определения параметров составов и технологических условий получения сплавов, которые приводят к увеличению их стойкости к распуханию. Затем усилия будут направлены на работу с разработчиками сплавов для объединения найденных параметров при создании новых кандидатных сплавов с последующим их ионным облучением, чтобы определить, насколько будет эффективным использование этих сплавов в реакторах при достижении ими превосходной стойкости к распуханию. Будет приведен ряд успешных результатов такого подхода, а также будут даны рекомендации разработчикам сплавов, на что следует сосредоточить свои усилия при производстве сплавов с большей стойкостью к распуханию.

FRANK A. GARNER<sup>1,2</sup>, LIN SHAO<sup>1</sup>, MICHAEL SHORT<sup>3</sup>,  
MYCHAILO B. TOLOCZKO<sup>4</sup> AND VICTOR N. VOYEVODIN<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Texas A&M University, College Station TX USA*

<sup>2</sup>*Radiation Effects Consulting, Richland WA USA*

<sup>3</sup>*Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA USA*

<sup>4</sup>*Pacific Northwest National Laboratory, Richland WA USA*

<sup>5</sup>*Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov Ukraine*

## **USE OF SELF-ION IRRADIATION TO FORECAST THE VOID SWELLING BEHAVIOR OF CANDIDATE FERRITIC- MARTENSITIC ALLOYS AND THEIR ODS VARIANTS AT VERY HIGH DOSES**

The lack of high flux test reactors complicates the development and confirmation testing of new candidate alloys for advanced reactor concepts. This problem is particularly acute for alloys based on the ferritic and ferritic-martensitic systems, and especially for oxide dispersion strengthened variants of these alloys. One approach to surmount this problem is to use self-ion irradiation at accelerated damage rates.

The work described in this report has been and continue to be conducted at two locations. The first is at Kharkov in the Ukraine and the second is at Texas A&M university. While using different irradiation techniques and data acquisition procedures, the two activities are well-coordinated and serve to reinforce and accelerate the progress at both laboratories.

The work falls into two general categories. The first category focuses on examining the ion irradiation technique itself to evaluate the validity of using ions as surrogates for neutrons, focusing on determining the impact of neutron-atypical aspects of ion irradiation and developing techniques for neutron-relevant applications. Many of these studies focus on relatively simple alloys and pure iron. Results will be presented showing recent insights gained on effects of beam rastering, injected interstitials, surface effects and accelerated rates of atomic displacement. The success of Ion-neutron correlation efforts will be summarized for alloys where neutron data are available.

The second category involves detailed exploration of a wide range of commercial and developmental alloys of varying compositional and fabrication complexity with two goals being pursued. The first goal at each laboratory involves a series of diverse alloys that are irradiated to very high dpa levels, sometimes 500-1000 dpa, so that a alloy-to-alloy comparison can be made of their swelling resistance without the complication of variations in irradiation conditions. The second goal is to use the results of the alloy-to-alloy comparisons to identify those compositional and fabrication variables that lead to increasing swelling resistance, and then to work with alloy developers to incorporate those variables into new alloy candidates, followed by ion irradiation to test the effectiveness in producing superior resistance. A number of successful results of this approach will be presented along with guidelines for alloy developers on where to focus their efforts to produce more swelling-resistant alloys.



В.С.НЕУСТРОЕВ, С.В.БЕЛОЗЁРОВ,  
И.Ю.ЖЕМКОВ, Е.И.МАКАРОВ, Д.Е.МАРКЕЛОВ  
*Акционерное общество «Государственный научный центр –  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов»,  
г. Димитровград, Ульяновская область, Россия*

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

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

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

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

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

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

V.NEUSTROEV, S.BELOZEROV,  
I.ZHEMKOV, E.MAKAROV, D.MARKELOV  
*Joint Stock Company «State Scientific Center - Research Institute  
of Atomic Reactors», Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia*

## **MAIN DEPENDENCIES AND INTERCONNECTION OF RADIATION PHENOMENA IN AUSTENITIC STEELS IRRADIATED TO HIGH DAMAGING DOSES**

During long-term operation of the reactor there is a need in the evaluation of the properties of materials irremovable elements and structures of the reactor, made usually of austenitic corrosion-resistant steels based IN. Long-term operation of various designs in difficult and harsh conditions, like prolonged active life, is not only one of the so-called "disease" and several related bouquet "diseases" that can accelerate the completion of the process operation of the elements.

Historically, in material science "youth" (1960-1970-ies) were mainly staged optimization experiments for the selection of the most radiation-resistant materials for reactor applications. Radiation effects were studied already in these developing new materials and therefore behind the scenes is always the aim was to compare the one or the other radiation phenomena for different materials.

Thus, the basic laws were studied in radiation phenomena: radiation swelling and creep, hardening and embrittlement, change of microstructure and phase stability. Radiation effects have been identified, worsening the radiation resistance of structural materials (reducing the service life of components and structures).

In the present study presents an analysis of dependencies of radiation phenomena and the current state of the new studies, paying attention primarily to the effect of duration of exposure (dose rate) on the properties and structure of irradiated steels.

The author discusses the relationship of radiation swelling and creep, and the influence of the microstructure on the physical and mechanical properties of the steels irradiated with neutrons.

А.М.САВЧЕНКО, Л.А.КАРПЮК, М.В.ПОЗДЕЕВ,  
О.И.ЮФЕРОВ, Г.В.КУЛАКОВ, Д.В.ШАМИН, М.Ю.ЛЕБЕДЕВ  
*Высокотехнологический научно-исследовательский институт неоргани-*  
*ческих материалов им. А.А.Бочвара, г. Москва, Россия*

## **НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЛАТФОРМА НА БАЗЕ КОМПОЗИТНОГО ТОПЛИВА**

Для обеспечения качественного скачка в разработке твэлов нового поколения и для повышения конкурентоспособности на рынке производства электроэнергии предлагается перейти от твэла контейнерного типа, к твэлу дисперсионного типа (композитное топливо на основе высокоплотных урановых сплавов с матрицей из циркониевых сплавов - METMET). На основе METMET топлива композитное U-PuO<sub>2</sub> топливо может быть изготовлено (аналог MOX), в котором урановые сплавы и порошок из диоксида плутония имеют раздельное распределение. Вследствие этого при переработке делящийся плутоний высокого качества может быть отделен от неделящегося без растворения и химической переработки топлива. Это может облегчить замыкание топливного цикла и значительно снизить количество радиоактивных отходов. Таким образом, новая концепция применения композитного топлива в тепловых и быстрых реакторах может в будущем заменить существующий в настоящее время подход, основанный на применении таблеточного топлива из диоксида урана и MOX топлива.

A.M.SAVCHENKO, L.A.KARPYUK, M.V.POZDEEV,  
O.I.UFEROV, G.V.KULAKOV, D.V.SHAMIN, M.Y.LEBEDEV  
*A.A. Bochvar High-Technology Scientific Research Institute for Inorganic*  
*Materials (VNIINM), Moscow, Russia*

## **NOVEL TECHNOLOGICAL PLATFORM BASED ON COMPO- SITE FUEL WITH CLOSING FUEL CYCLE**

A possibility is considered for use in thermal and fast reactors in place of the base container type UO<sub>2</sub> or MOX fuel, the dispersion type fuel elements (composite of high uranium content metallic fuel with Zr alloy matrix). On the basis of METMET fuel composite U-PuO<sub>2</sub> fuel (an analogue of MOX) can be fabricated where depleted uranium alloy and dioxide plutonium powder have initially separate arrangement. Due to this while reprocessing one can separate of newly generated fissile plutonium from burnt one without chemical processes, which simplifies the closing of the nuclear fuel cycle. Therefore novel concept on the base of composite fuel for thermal and fast reactors can practically replace the existing one based on dioxide uranium and MOX fuel.

Б.А.ТАРАСОВ, Д.П.ШОРНИКОВ,  
С.Н.НИКИТИН, А.В.ТЕНИШЕВ

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

## **РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИИ «ТОПЛИВО-ОБОЛОЧКА» НА ОСНОВЕ ТАБЛЕТОЧНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА С ЗАДАННОЙ ПОРИСТОСТЬЮ**

В рамках настоящей работы изготовлены экспериментальные таблетки из порошков сплавов уран-молибден и уран-цирконий путем электроимпульсного прессования. Получены сердечники с открытой пористостью в диапазоне 15-25 %. Показано, что использование ЭИП метода существенно упрощает получение таблеток, т.к. позволяет использовать порошок с размером частиц от 5 мкм до 3 мм. Проведено определение теплопроводности топливных таблеток, что позволило провести теплофизические расчеты твэла реактора БН, показано, что температура в центре топливного столба из пористых сплавов U-Mo или U-Zr не превышает 650 °С. Для обоснования работоспособности пористого топлива в реакторах БН проведены диффузионные испытания таблеток со сталью ферритно-мартенситного класса, легированной алюминием, ванадиевыми сплавами, а также свинцом.

В.А.TARASOV, D.P.SHORNIKOV,  
S.N.NIKITIN, A.V.TENISHEV

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **THE DEVELOPMENT OF COMPOSITION «FUEL- CLADDING» BASED FOR PELLETS METAL FUEL WITH FIXED POROSITY**

In this paper has been proposed to create a fuel having a residual porosity, which serves as an effective channel for the output of the gas fission products. The experimental fuel pellets was made from powders of alloys of U-Mo and U-Zr by electric pulse charging (EPC). The pellets has been obtained with open porosity in the range of 15-25%. It is shown that the use of EPC technique greatly simplifies the preparation of tablets, as It allows to use a powder having a particle size of 5 microns to 3 mm. A determination of the thermal conductivity of the fuel pellets, which allowed for thermal calculations FBR reactor fuel element, it was shown that the temperature in the center of the fuel pin of U-Mo alloy porous or U-Zr does not exceed 650 ° C. To justify the performance of the porous fuel in FBR held diffusion test tablets with steel ferritic-martensitic grade aluminum alloy, vanadium alloys and lead.

С.В.СТАРИКОВ

*Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия*

*E-mail: starikov@ihed.ras.ru*

## **МНОГОМАСШТАБНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

В настоящее время перед радиационным материаловедением поставлена задача о создании методики точного прогнозирования поведения материалов атомной энергетики в условиях эксплуатации. Данная задача допускает несколько подходов к её решению, но наиболее перспективным представляется многомасштабный подход, когда методами моделирования и теоретической физики совместно решаются подзадачи на различных временных и пространственных масштабах. Кооперация таких методов (квантовые расчеты, атомистическое моделирование, дислокационная динамика, теория фазового поля, кинетические уравнения и приближение сплошной среды) может позволить предсказать поведение ядерных материалов практически без привлечения экспериментальных данных, которые в этом случае могут быть использованы для верификации всей модели. На данный момент такая многомасштабная модель только разрабатывается, однако её развитие уже привело к существенным достижениям в методах расчета поведения вещества при термических, деформационных и радиационных воздействиях. Для материалов атомной энергетики (UN, U-Mo, Zr-Nb) разработаны новые межатомные потенциалы, способные описывать поведение материалов в широком диапазоне давлений и температур. Данные потенциалы созданы целиком на основе квантовых расчетов и позволяют моделировать свойства веществ как в термодинамическом равновесии, так в неравновесных условиях. Методами молекулярной динамики исследуются столкновительные радиационные каскады, фазовые переходы, механизмы диффузии точечных дефектов, поведение дислокаций и границ зерен. Результаты расчетов атомистического моделирования являются входными параметрами для дислокационной динамики, кинетических уравнений и теории фазового поля. В свою очередь, указанные макромодели применяются для исследования изменения механических и термодинамических свойств конструкционных материалов при радиационных и термических воздействиях.

S.V.STARIKOV

*Joint Institute for High Temperatures of RAS, Moscow, Russia*

*E-mail: starikov@ihed.ras.ru*

## **MULTISCALE COMPUTER MODELING OF PROPERTIES OF MATERIALS FOR NUCLEAR ENGINEERING**

Currently, there is a problem in Materials Science about accurate description and prediction of behavior of nuclear engineering materials under operating conditions. This task may be resolved by several methods, but the most perspective approach is the multiscale modeling. Various techniques of modeling and theoretical physics are used for solution of subtasks on various time and spatial scales. The cooperation of different approaches (such as quantum calculations, atomistic simulation, dislocation dynamics, phase field modeling, kinetic equations and continuum mechanics) allows to predict the behavior of nuclear materials without use of experimental data. At the present time, the multiscale model is at development stage. However, there are essential achievements in various methods of simulation of materials' properties at thermal, deformation and radiation impacts on various scales. We developed a set of novel interatomic potentials (for UN, U-Mo, Zr-Nb) that can describe the studied materials in a wide range of pressures and temperatures. These potentials have been created entirely on the basis of quantum calculations and allow to simulate the nonequilibrium state of matter. We used molecular dynamics method for study of radiation damage cascades, phase transitions, mechanisms of point defects diffusion, behavior of dislocations and grain boundaries. The results of atomistic simulation are used as input parameters for the dislocation dynamics, kinetic equations and phase field modeling. In turn, the specified macromodels are applied to research mechanical and thermodynamic properties of structural materials at radiation and thermal impacts.

СЕКЦИИ 1-2  
СТАРЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ  
ОБОРУДОВАНИЯ ЯЭУ.  
ДЕГРАДАЦИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

SECTIONS 1-2  
AGEING OF MATERIALS  
OF THE NPP EQUIPMENT.  
DEGRADATION OF STRUCTURAL  
MATERIALS

Г.Н.БАКШУТОВА<sup>1,2</sup>, В.С.НЕУСТРОЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Дмитровградский инженерно-технологический институт  
«НИЯУ «МИФИ»,

<sup>2</sup>Акционерное общество «Государственный научный центр –  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов»,

г. Дмитровград, Ульяновская область, Россия

E-mail: galina.bakshutova.94@mail.ru

## **ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ X18H10T, ОБЛУЧЕННОЙ В РЕАКТОРЕ СМ-3**

При длительной эксплуатации реакторов возникает необходимость в оценке свойств материалов несменяемых элементов и конструкций реактора, изготовленных, как правило, из аустенитных коррозионностойких сталей с основой X18H10.

В представленной работе представлен анализ дозных зависимостей механических свойств стали X18H10T при низких температурах облучения (70-90°C) в реакторе СМ-3. Анализируются также температурные зависимости характеристик механических свойств, необлученных и облученных нейтронами образцов сталей.

G.BAKSHUTOVA, V.NEUSTROEV

*Dimitrovgrad Engineering and Technology Institute «NRNU «MEPhI»,  
Joint Stock Company «State Scientific Center - Research Institute of Atomic  
Reactors», Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia*

*E-mail: galina.bakshutova.94@mail.ru*

## **STUDY OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE CHARACTERISTICS OF MECHANICAL PROPERTIES OF CR<sub>18</sub>NI<sub>10</sub>TI STEEL, IRRADIATED IN THE SM-3 REACTOR**

During long-term operation of reactors, there is a need to assess the properties of materials non-replaceable components of the reactor, made typically from austenitic corrosion-resistant Fe-18Cr-10Ni-Ti steels.

In the presented work presents the analysis of dose dependencies of the mechanical properties of Fe-18Cr-10Ni-Ti steels at low irradiation temperatures (70-90°C) in the reactor SM-3. Also analyzed the temperature dependence of the characteristics of the mechanical properties of unirradiated and neutron-irradiated steel samples.



Б.С.ВОЛОСКОВ<sup>1,2</sup>, В.М.ЧЕРНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А.Бочвара, г. Москва, Россия,*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия.*

*E-mail: vbs93@mail.ru*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ 12%-ЫХ ХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ ЭП-823 И ЭК-181, И СПЛАВА V-4Ti-4Cr**

Исследовано усталостное разрушение при комнатной температуре ферритно-мартенситных сталей ЭП-823 (обычная термообработка) и ЭК-181 (обычная термообработка + старение в свинце при 600 °С, 3000 ч) и сплава V-4Ti-4Cr (обычная термообработка + старение в свинце при 600 °С, 3000 ч). Определены пределы усталостной выносливости и исследованы (фрактография) поверхности усталостного разрушения материалов.

B.S.VOLOSOKOV<sup>1,2</sup>, V.M.CHERNOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*A.A.Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials (SC  
“VNIINM”), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia*

*E-mail: vbs93@mail.ru*

## **INVESTIGATION OF FATIGUE FRACTURE OF FERRITIC MARTENSITIC 12% CHROMIUM STEELS EP-823 AND EK-181, AND ALOY V-4Ti-4Cr**

The fatigue fracture at room temperature of ferritic-martensitic steels EP-823 (standard heat treatment) and EP-823 (standard heat treatment + aging in lead 600 °C, 3000 h) and alloy V-4Ti-4Cr (standard heat treatment + aging in lead 600 °C, 3000 h) was investigated. The fatigue limits were determined and the surfaces of the fatigue fracture were studied.

Д.Н.ДЕМИДОВ<sup>1</sup>, А.Б.ЦЕПЕЛЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН,  
г. Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕСЕЙ НА СКОРОСТЬ РОСТА ГЕЛИЕВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ГРАНИЦАХ ЗЁРЕН ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ**

В ферритных сталях с примесями и границами зёрен, исследовано влияние разных типов примесей и легирующих элементов различной концентрации, ширины границы зерна и скорости накопления дозы облучения на кинетические характеристики собственных точечных радиационных дефектов (СТРД) в границе зерна и радиационно – стимулированной зерно-граничной диффузии (РСГД). Анализируется влияние указанных величин на параметры процессов зарождения и роста гелиевых пузырьков в границе зерна. Проведены оценки температурных зависимостей стационарной концентрации СТРД для материалов с различной энергией связи комплексов «СТДР – примесь» в объёме и в границе зерна, эффективных значений скорости взаимной рекомбинации СТРД, влияния образования примесных комплексов на процесс ускорения РСГД. Анализируется возможность варьирования характеристик комплексов «СТРД – примесь», концентрации легирующих элементов и примесей, параметров облучения для подавления процессов высокотемпературного радиационного охрупчивания (ВТРО) ферритных сталей.

D.N.DEMIDOV<sup>1</sup>, A.B.TSEPELEV<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*E-mail: dmitydem11@gmail.com, tsep@imet.ac.ru*

## **EFFECTS OF RADIATION AND IMPURITIES ON THE RATE GROWTH OF HELIUM BUBBLES IN THE GRAIN BOUNDARIES OF FERRITIC STEELS**

The influence of different types of impurities and alloying elements of different concentrations, the width of the grain boundary and the rate of accumulation of radiation dose on the kinetic characteristics of the own point of radiation defects (OPRD) in the grain boundary and radiation - enhanced grain boundary diffusion (REGD) has been studied. The influence of these variables on the parameters of the processes of nucleation and growth of helium bubbles in the grain boundary has been analyzed. Temperature dependences of steady-state concentration OPRD for materials with different binding energy complexes "OPRD – impurity atom" in the amount and in the grain boundary, the effective mutual recombination velocities STRD, influence the formation of impurity complexes on the acceleration of the REGD has been studied. The possibility of varying the characteristics of the complexes "OPRD – impurity atom", the concentration of alloying elements and impurities, irradiation parameters for suppressing the processes of high-temperature radiation embrittlement (HTRE) of ferritic steels has been analyzed.

А.С.ДИКОВ<sup>1,2</sup>, С.Б.КИСЛИЦИН<sup>1,2</sup>, И.И.ЧЕРНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт ядерной физики Республики Казахстан,  
г. Алматы, Республика Казахстан*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИСПЫТАНИЙ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ 12Х18Н10Т И 08Х16Н11М3, ОБЛУЧЕННЫХ БЫСТ- РЫМИ НЕЙТРОНАМИ В РЕАКТОРЕ БН-350**

Представлены результаты испытаний на одноосное растяжение и ползучесть при температурах 20 °С, 350 °С и 450 °С сталей 12Х18Н10Т и 08Х16Н11М3 - конструкционных материалов чехлов отработавших ТВС реактора БН-350.

Установлено, что при температуре испытаний 450 °С возрастают пределы текучести и прочности этих сталей по сравнению с испытаниями при температурах 20 °С и 350 °С. При этом пластичность этих сталей монотонно снижается с увеличением температуры испытаний. Определены скорости пострадиационной ползучести сталей 12Х18Н10Т и 08Х16Н11М3 при температурах 350 °С и 450 °С.

A.S.DIKOV<sup>1,2</sup>, S.B.KISLITSIN<sup>1,2</sup>, I.I.CHERNOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*The Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan,  
Almaty, Republic of Kazakhstan*

## **EFFECT OF TEST TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AUSTENITIC CR<sub>18</sub>NI<sub>10</sub>Ti AND CR<sub>16</sub>NI<sub>11</sub>MO<sub>3</sub> STEELS, IRRADIATION BY FAST NEUTRONS IN THE BN-350**

The results of uniaxial tensile tests and creep tests at temperatures of 20 °C, 350 °C and 450 °C of X18H10T X16N11M3 steels - structural materials of covers spent fuel assemblies BN-350 reactor are presented. It found that at a test temperature of 450 °C the yield strength and ultimate strength of these steels increases in comparing with tests at temperatures of 20 °C and 350 °C. At the same time plasticity of these steels decreases monotonically with test temperature growth. Rates of the post irradiation creep of the Cr16Ni11M3 and Cr18Ni10Ti steels at temperatures of 350 °C and 450 °C were determined.

Н.А.ИСКАНДАРОВ<sup>1,2</sup>, С.В.РОГОЖКИН<sup>2,1</sup>, А.А.ЛУКЬЯНЧУК<sup>1,2</sup>,  
О.А.РАЗНИЦЫН<sup>1,2</sup>, А.С.ШУТОВ<sup>1,2</sup>, А.Г.ЗАЛУЖНЫЙ<sup>2,1</sup>  
М.В.ЛЕОНТЬЕВА-СМИРНОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «ГНЦ РФ - ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А.Бочвара, г. Москва, Россия

## **ИЗМЕНЕНИЕ НАНОМАСШТАБНОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭК-181 ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ СТАРЕНИИ**

Проведены томографические атомно-зондовые исследования влияния термического старения при 450 °С на ферритно-мартенситную сталь с быстрым спадом наведенной активности ЭК-181 (Fe-12Cr-2W-V-Ta-B-0,16C). Получены данные о содержании и распределении различных химических элементов в исходном состоянии и после термического старения в течение 3000 и 5000 ч на масштабах от нескольких межатомных расстояний до нескольких сотен нанометров.

N.A.ISKANDAROV<sup>1,2</sup>, S.V.ROGOZHNIKIN<sup>2,1</sup>,  
A.A.LUKYANCHUK<sup>1,2</sup>, O.A.RAZNITSYN<sup>1,2</sup>, A.S.SHUTOV<sup>1,2</sup>,  
A.G.ZALUZHNY<sup>2,1</sup>, M.V.LEONTIEVA-SMIRNOVA<sup>3,2</sup>

<sup>1</sup>State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

<sup>3</sup>A.A. Bochvar High-Technology Scientific Research Institute for Inorganic Materials (VNIINM), Moscow, Russia

## **EVOLUTION OF RUSFER EK-181 FERRITIC-MARTENSITIC STEEL NANOSCALE STRUCTURE UNDER AGING**

Ferritic-martensitic reduced-activation steel Rusfer EK-181 (Fe-12Cr-2W-V-Ta-B-0,16C) after aging at 450 °C was studied by tomography atom probe. Concentrations and spatial distribution of different chemical elements were obtained for specimens in initial state and after aging at 3000 and 5000 hours at the scale from several lattice constant to hundreds nanometers.

М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, Я.А.БАБИЧ<sup>1</sup>,  
В.А.ШУЛОВ<sup>2</sup>, Д.А.ТЕРЯЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет), г. Москва, Россия*

## **ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА ВТ18У В РЕЗУЛЬТАТЕ ОБЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ**

На примере лопаток компрессора газотурбинных двигателей из сплава ВТ18У показано, что в результате облучения сильноточным импульсным электронным пучком происходит изменение структурно-фазового состояния поверхностных слоев. Установлено, что при использовании электронных пучков с плотностью энергий 14-16 Дж/см<sup>2</sup> и 18-20 Дж/см<sup>2</sup> существенно искажается структура материала, а также меняется фазовый состав. Увеличение параметров кристаллических решеток, а также непосредственное измерение остаточных макронапряжений в поверхностных слоях спинки лопатки после облучения свидетельствуют о развитии в этих слоях сжимающих напряжений, обеспечивающих повышение работоспособности лопаток.

M.G.ISAENKOVA<sup>1</sup>, Yu.A.PERLOVICH, Ya.A.BABICH<sup>1</sup>,  
V.A.SHULOV<sup>2</sup>, D.A.TERYAEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

## **CHANGES IN THE STRUCTURE OF THE SURFACE LAYERS OF PRODUCTS FROM ALLOY VT18U BY IRRADIATION OF A HIGH-CURRENT PULSED ELECTRON BEAM**

On the examples of the compressor blades of gas turbine engines from alloy VT18U it was shown that at irradiation by a high-current pulsed electron beam the structural-phase state of the surface layers is changed. It was found that by using electron beams with the energy density of 14-16 J/cm<sup>2</sup> and 18-20 J/cm<sup>2</sup> leads to a significant distortion of the material structure, and changes the phase composition. The increase of the crystal lattice parameters, as well as direct measurement of residual macroscopic stresses in the surface layers of the back side of the blade after irradiation indicate the development in these layers of compressive stresses that enhance the efficiency of the blades.

М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, В.В.НОВИКОВ<sup>1,2</sup>,  
Д.И.ЖУК<sup>1</sup>, А.В.ГРИГОРЬЕВ<sup>1</sup>, М.Н.САБЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени А.А.Бочвара, г. Москва, Россия

## **ЗАВИСИМОСТЬ ОРИЕНТАЦИИ ГИДРИДОВ ОТ ПОСЛОЙНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ В ОПЫТНОЙ ТРУБЕ ИЗ СПЛАВА Э635**

Выявлена послойная текстурная неоднородность опытных труб из сплава Э635, обусловленная неоднородностью деформации трубы на заключительном этапе её обработки. Моделирование методом конечных элементов распределения напряжений, развивающихся в результате неоднородного изменения объема разных слоев текстурированной трубы при варьировании температуры, показало, что при охлаждении трубы от температуры эксплуатации 350°C во внешних и внутренних её слоях развиваются растягивающие окружные напряжения, достигающие 70-90 МПа. Неоднородность кристаллографической текстуры и растягивающих напряжений предопределяют наблюдаемую ориентацию гидридов по толщине стенки опытной трубы.

M.G.ISAENKOVA<sup>1</sup>, Yu.A.PERLOVICH<sup>1</sup>, V.V.NOVIKOV<sup>1,2</sup>,  
D.I.ZHUK<sup>1</sup>, A.V.GRIGORYEV<sup>1</sup>, M.N.SABLIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

<sup>2</sup>High-tech Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russia

## **THE DEPENDENCE OF HYDRIDE ORIENTATION ON LAYERED INHOMOGENEITY OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE OF EXPERIMENTAL TUBES FROM ALLOY E635**

It was revealed layered textural heterogeneity of the experimental alloy tubes E635, due to heterogeneity of the deformation of the tube at the final stage of its processing. Finite element simulation of stress distribution, developing as a result of inhomogeneous volume changes in different layers of textured tube at varying temperatures showed that at the cooling of tube from operating temperature 350C the tensile circumferential stresses are developed in their external and internal layers and reach 70-90 MPa. The heterogeneity of the crystallographic texture and tensile stresses determine the orientation of the observed hydrides on thickness of the experimental tube wall.

Б.А.КАЛИН<sup>1</sup>, Н.В.ВОЛКОВ<sup>1</sup>, Р.А.ВАЛИКОВ<sup>1</sup>,  
А.С.ЯШИН<sup>1</sup>, Д.Н.ИГНАТЬЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия,*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт научно-производственное объединение «Луч», г. Подольск, Московская область, Россия  
E-mail: Yashin\_itf@mail.ru*

## **ЛЕГИРОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110 НА ГУБЧАТОЙ ОСНОВЕ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОКИСЛЕНИЮ**

В работе изучается возможность создания барьерных слоев при ионно-плазменном модифицировании поверхности с целью снижения скорости окисления и наводороживания оболочек твэлов из циркониевых сплавов в различных условиях эксплуатации.

На основании проведенных расчетов и экспериментов определен режим ионной полировки внешней поверхности оболочек твэлов из сплава Э110опт: средняя энергия ионов в пучке 3-4 кВ, ионный ток 0,4-0,7 мА/см<sup>2</sup> и общая доза облучения ион/см<sup>2</sup>.

Проведена очистка и полировка внешней поверхности образцов из сплава Э110 на установке ИЛУР-03 с источником радиального потока ионов с широким энергетическим спектром. На отполированную поверхность с помощью магнетронного напыления были нанесены тонкие пленки (до 100 нм) легирующих элементов Fe, Al, Mo, Y, Mg, Cr, которые затем были внедрены в приповерхностный слой под действием радиального пучка ионов аргона.

Изучение элементного состава очищенных и модифицированных приповерхностных слоев проведено методом рентгеновского микроанализа.

Для создания защитного слоя из оксидной пленки, обогащенной внедренными элементами часть образцов прошли предварительное автоклавирование (500 часов, T = 350 °С, P = 17 МПа, дистиллированная вода).

Показано, что легирующие элементы располагаются преимущественно на границе оксид-металл и в оксидном слое.



B.A.KALIN<sup>1</sup>, N.V.VOLKOV<sup>1</sup>, R.A.VALIKOV<sup>1</sup>,

A.S.YASHIN<sup>1</sup>, D.N.IGNAT'EV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*SRI SIA «Luch», Podolsk, Moscow region, Russia*

## **ALLOYING OF SURFACE LAYERS OF THE FUEL CLADDINGS FROM SPONGE BASED E110 ALLOY TO INCREASE HIGH TEMPERATURE OXIDATION RESISTANCE**

Possibility of barrier layers formation by means of ion-plasma surface modification to decrease oxidation and hydration rate of fuel claddings from zirconium alloys in various operation conditions is studied in this paper.

Ion polishing mode of fuel cladding from E110opt alloy outer surface is determined on the basis of calculations and experiments performed: average ion beam energy 3-4 keV, ion current 0.4-0.7 mA·cm<sup>-2</sup>, total irradiation dose (1-10)·10<sup>18</sup> ion·cm<sup>-2</sup>.

Outer surface of samples was cleaned and polished on installation ILUR-03 by means of radial ion source with wide-range energy spectrum of beam. Thin films (up to 100 nm) of alloying elements Fe, Al, Mo, Y, Mg, Cr were deposited on polished surface and then implemented into surface layer by radial argon ions beam impact.

Elemental composition of cleaned and modified surface layers studied by X-ray microanalysis. Some samples were previously autoclaved (500 h, T=350° C, P=17 MPa) to form protective layer from oxide film, enriched by implanted elements.

It is shown that alloying elements located predominantly on the oxide-metal boundary and in oxide layer.

Е.А.КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, А.С.ФРОЛОВ<sup>1</sup>, Д.А.МАЛЬЦЕВ<sup>1</sup>,  
Е.В.КРИКУН<sup>1</sup>, Д.А.ЖУРКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

## **РАДИАЦИОННОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ СТАЛИ 15Х2НМФА КЛАСС 1 В РЕЗУЛЬТАТЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

В работе исследованы образцы стали 15Х2НМФА класс 1 в состояниях: исходном и после ускоренного облучения быстрыми нейтронами в интервалах температур (50-70)°С, (120-140)°С и (290-315)°С. Исследования показали, что радиационное упрочнение стали после облучения при температуре ~300°С в основном обусловлено образованием радиационно-индуцированных преципитатов большой плотности, в то время как при низкотемпературном облучении радиационное упрочнение связано только с образованием радиационных дефектов - дислокационных петель сверхвысокой плотности. Это приводит к существенно большему радиационному охрупчиванию при низких температурах облучения.

Е.А.KULESHOVA<sup>1,2</sup>, A.S.FROLOV<sup>1</sup>, D.A.MALTSEV<sup>1</sup>,  
E.V.KRIKUN<sup>1</sup>, D.A.ZHURKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **RADIATION EMBRITTLEMENT OF 15H2NMFA CLASS 1 STEEL UNDER THE LOW-TEMPERATURE IRRADIATION**

The samples of 15KH2NMFA class 1 RPV steel were studied in several states: initial and after accelerated fast neutrons irradiation in the temperature range of (50-70)°C, (120-140)°C and (290-315)°C. The research has shown that after irradiation at ~300°C the main reason of radiation hardening of steel is radiation induced formation of high density precipitates. At the same time low temperature irradiation leads to radiation hardening of steel, associated only with the formation of radiation-induced defects - dislocation loops of ultra-high density. This causes a significantly higher radiation embrittlement after irradiation at low temperatures.

Е.А.КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, Б.А.ГУРОВИЧ<sup>1</sup>, З.В.БУКИНА<sup>1</sup>,  
Д.А.МАЛЫЦЕВ<sup>1</sup>, С.В.ФЕДОТОВА<sup>1</sup>, А.С.ФРОЛОВ<sup>1</sup>,  
Г.М.ЖУЧКОВ<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

## **ОЦЕНКА ВКЛАДА УПРОЧНЯЮЩЕГО МЕХАНИЗМА В ЭФФЕКТ ФЛАКСА ПРИ УСКОРЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ СТАЛЕЙ КОРПУСОВ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000 МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ И ТРАНСМИССИ- ОННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

В работе исследован лучевой комплект и температурный комплект образцов-свидетелей металла шва (МШ) корпуса реактора (КР) ВВЭР-1000, дополнительно ускоренно облученный в исследовательском реакторе ИР-8 до флюенса, соответствующего флюенсу лучевого комплекта.

По измеренным плотностям и размерам радиационно-индуцированных упрочняющих фаз с использованием уравнения Орована оценен предел текучести ( $R_{p0,2}$ ) образцов, облученных с различным флаксом. Установлено, что изменение  $R_{p0,2}$  не коррелирует со сдвигом  $\Delta T_k$  что свидетельствует об определяющем влиянии второго механизма радиационного охрупчивания – образовании зернограницных сегрегаций.

Е.А.KULESHOVA<sup>1,2</sup>, В.А.GUROVICH<sup>1</sup>, Z.V.BUKINA<sup>1</sup>,  
D.A.MALTSEV<sup>1</sup>, S.V.FEDOTOVA<sup>1</sup>, A.S.FROLOV<sup>1</sup>,  
G.M.ZHUCHKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

## **ASSESSMENT OF THE HARDENING MECHANISM CONTRIBUTION TO FLUX EFFECT OF VVER-1000 RPV STEELS UNDER ACCELERATED IRRADIATION BY APT AND TEM**

The radiation and temperature sets of RPV weld metal (WM) surveillance specimens (SS) were investigated. Temperature set was subsequently irradiated in a research reactor IR-8 up to the radiation set fluence.

The yield strength  $R_{p0,2}$  of specimens was estimated using the Orowan equation with the use of measured density and sizes of hardening radiation induced structural elements. It was found that the change  $R_{p0,2}$  does not correlate with the  $\Delta T_k$  shift indicating the determining influence of the second radiation embrittlement mechanism – the grain boundary segregations.

Е.А.КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, Д.А.МАЛЫЦЕВ<sup>1</sup>, А.С.ФРОЛОВ<sup>1</sup>,  
Д.В.САФОНОВ<sup>1,2</sup>, Г.М.ЖУЧКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

## **СТРУКТУРНЫЕ И ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЛЕТОВ, ВЫРЕЗАННЫХ ИЗ КР ЭНЕРГОБЛОКА №4 НВАЭС, ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ**

В работе представлены результаты комплексных структурных исследований высокоразрешающими методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии, атомно-зондовой томографии и фрактографического анализа темплетов основного металла (ОМ) и металла сварного шва (МШ), вырезанных из разных мест КР энергоблока №4 НВАЭС, в текущем состоянии. Исследования показали, что фазовый состав облучаемых ОМ и МШ представлен упрочняющими фазами: исходными карбидами, термически-стимулированными карбонитридами ванадия и радиационно-индуцированными преципитатами различного состава и дислокационными петлями. Фазовый состав необлучаемых ОМ и МШ представлен фазами: карбидами и термически-стимулированными карбонитридами ванадия. Фрактографический анализ показал, что в текущем состоянии в изломах образцов ОМ после испытаний на ударный изгиб наблюдается значительная доля хрупкого межзеренного разрушения, в то время как в изломах образцов МШ зернограницное охрупчивание отсутствует, что характерно для МШ и объясняется особенностью его микроструктуры.

E.A.KULESHOVA<sup>1,2</sup>, D.A.MALTSEV<sup>1</sup>, A.S.FROLOV<sup>1</sup>,  
D.V.SAFONOV<sup>1,2</sup>, G.M.ZHUCHKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

## **STRUCTURAL AND FRACTOGRAPHIC STUDY OF TEMPLATES CUT OUT FROM RPV OF NOVovoronezh NPP POWER UNIT №4 FOR CURRENT STATE EVALUATION**

This article presents the results of structural study of templates of the base (BM) and weld metal (WM) in current state by TEM, SEM, APT and fractographic analysis. The phase structure of irradiated BM and WM is shown to be presented by the hardening phases: initial carbides, thermal-stimulated carbonitrides of vanadium as well as radiation-induced precipitates and dislocation loops. It is also shown that there is a large share of brittle intergranular fracture in the BM, but there isn't any brittle intergranular fracture in the WM, that characteristic for WM and explains the feature of the microstructure.

Е.И.МАКАРОВ, В.С.НЕУСТРОЕВ, С.В.БЕЛОЗЁРОВ,  
Д.Е.МАРКЕЛОВ, А.В.ОБУХОВ

*Акционерное общество «Государственный научный центр –  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов»  
(АО «ГНЦ НИИАР»), г. Димитровград, Ульяновская область, Россия*

**ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДЕФОРМАЦИЮ  
ПОЛЗУЧЕСТИ И РАСПУХАНИЕ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ  
ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 08Х18Н10Т, ОБЛУЧЕННЫХ  
В РЕАКТОРЕ БОР-60**

В АО «ГНЦ НИИАР» проводились эксперименты по изучению влияния растягивающих напряжений на свойства и структуру материала ВКУ.

В настоящей работе приведены результаты исследования радиационной ползучести, распухания и микроструктуры, газонаполненных образцов сложной формы, облученных в реакторе БОР-60 при температурах облучения 350 и 420 °С до 100 сна.

Е.МАКАРОВ, V.NEUSTROEV, S.BELOZEROV,  
D.MARKELOV, A.OBUKHOV

*Joint Stock Company «State Scientific Center - Research Institute of Atomic  
Reactors» (JSC «SSC RIAR»), Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia*

**EFFECT OF STRESS ON IRRADIATION-INDUCED CREEP  
AND SWELLING OF FE-18CR-10NI-TI STEEL PRESSURIZED  
SPECIMENS IRRADIATED IN THE BOR-60 REACTOR**

JSC “SSC RIAR” conducted experiments on the effect of tensile stress on the properties and structure of internals material.

This paper presents the results of a study of irradiation-induced creep, swelling and microstructure of pressurized specimens of sophisticated design irradiated to 100 dpa in the BOR-60 reactor at 350 °C and 420 °C.

**А.О.МАЗАЕВ**

*Акционерное общество «Государственный научный центр –  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов»  
(АО «ГНЦ НИИАР»), г. Димитровград, Ульяновская область, Россия*

## **ОХРУПЧИВАНИЕ СТАЛЬНЫХ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ В СОСТАВЕ ТВС РЕАКТОРА РБМК-1000**

В последнее время на атомных станциях с реакторами РБМК-1000 наблюдается растрескивание и охрупчивание отдельных стальных дистанционирующих решеток (ДР), длительно эксплуатировавшихся в составе ТВС. Подробные материаловедческие исследования отработавших ТВС с ДР позволяют улучшить понимание причин охрупчивания, оценить правильность конструкторских и технологических решений, выбрать наиболее оптимальные варианты совершенствования ДР.

В работе представлены результаты исследований ДР из стали (Fe-18% Cr-10% Ni-Ti) ТВС РБМК, отработавшей на Ленинградской АЭС в течение ~ 7 лет (1835 эф. сут.).

Цель работы – получение экспериментальных результатов по комплексному влиянию облучения и теплоносителя реактора РБМК-1000 на склонность к повреждению стальных ДР при их длительной эксплуатации.

**А.МАЗАЕВ**

*Joint Stock Company «State Scientific Center - Research Institute of Atomic Reactors» (JSC «SSC RIAR»), Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia*

## **EMBRITTLMENT OF STEEL SPACER GRIDS AS A RESULT OF LONG-TERM OPERATION IN THE RBMK-1000 REACTOR**

At present, RBMK-1000 NPPs face cracking and embrittlement of single steel spacer grids after long-term operation as part of fuel assemblies. Thorough materials testing of spent fuel assemblies with spacer grids helps us to improve understanding of the embrittlement nature, evaluate engineering and process solutions, and choose the optimal options for spacer grid design enhancement.

The paper presents the data on examining spacer grids made of steel Fe-18% Cr-10% Ni-Ti that have been under operation in Leningrad NPP during ~ 7 years (1835 full-power days).

The objective is to obtain experimental data on combined influence of irradiation and RBMK-1000 coolant on a tendency for steel grain damage under long-term operation.

И.Д.НИКОЛАЕВА<sup>1</sup>, М.С.СТАЛЬЦОВ<sup>1</sup>, И.И.ЧЕРНОВ<sup>1</sup>,  
Б.А.КАЛИН<sup>1</sup>, И.А.БОГАЧЕВ<sup>1</sup>, Л.Ю.ГУСЕВА<sup>1</sup>,  
М.В.ДРОЖЖИНА<sup>1</sup>, А.А.БЕЛЯЕВ<sup>1</sup>,  
А.Г.ТИЩЕНКО<sup>1</sup>, С.Н.КОРШУНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва, Россия

## **ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДА ИТТРИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГЕЛИЕВОЙ ПОРИСТОСТИ В ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ ДУО СТАЛИ**

В работе исследовались особенности формирования гелиевой пористости в ферритно-мартенситной стали ЭП-450-ДУО с 1 мас. % (СПС-1) и 0,3 мас. % (СПС-0,3)  $Y_2O_3$ , изготовленной спарк-плазменным спеканием.

Обнаружено, что в образце стали СПС-1 наблюдаются четыре зоны с сильно различающимся характером развития гелиевой пористости, а в структуре образца СПС-0,3 только две зоны. При этом усредненное по всему облученному слою распухание в образцах СПС-1 и СПС-0,3 составило 2,6 и 1,1 %, соответственно.

I.D.NIKOLAEVA<sup>1</sup>, M.S.STALTSOV<sup>1</sup>, I.I.CHERNOV<sup>1</sup>,  
B.A.KALIN<sup>1</sup>, I.A.BOGACHEV<sup>1</sup>, L.YU.GUSEVA<sup>1</sup>,  
M.V.DROZHZHINA<sup>1</sup>, A.A.BELIAEV<sup>1</sup>,  
A.G.TISCHENKO<sup>1</sup>, S.N.KORSHUNOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

## **THE EFFECT OF YTTRIUM OXIDE CONCENTRATION ON HELIUM POROSITY FORMATION IN FERRITE-MARTENSITIC ODS STEEL**

The features of helium porosity formation in the ferritic-martensitic steel EP-450 ODS with 1 wt. % (SPS-1) and 0.3 wt. % (SPS-0.3)  $Y_2O_3$ , manufactured by spark-plasma sintering, was investigated.

The four zones with widely divergent nature of helium porosity in sample SPS-1 and only two zones in SPS-0.3 was found. The average swelling of the SPS-1 and SPS-0.3 samples is 2.6 and 1.1%, respectively.

Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА,  
П. Л. ДОБРОХОТОВ, А. К. АМАНОВА  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ТЕКСТУРУ И СУБСТРУКТУРУ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ ИЗ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ**

Исследована зависимость текстуры и субструктурного состояния оболочечных труб из ферритно-мартенситной стали ЭП823 от степени деформации, предшествовавшей финальной термообработке (закалка+отпуск). Показано, что в зависимости от степени деформации изменяются соотношения интенсивности типичных для ОЦК металлов текстурных компонент. Исследовано влияние на характеристики субструктурного состояния (степени наклепа зерен, микроискажений кристаллической решетки) уровня предшествующей деформации, установлено различие в субструктурном состоянии зерен, соответствующих внешним и внутренним поверхностным слоям оболочечной трубы.

Yu. A. PERLOVICH, M. G. ISAENKOVA,  
P. L. DOBROKHOTOV, A. K. AMANOVA  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **EFFECT OF PREVIOUS DEFORMATION LEVEL ON TEXTURE AND SUBSTRUCTURE OF CLADDING TUBES MADE OF FERRITIC-MARTENSITIC STEEL**

The dependence of texture and substructure of cladding tubes made of ferritic-martensitic steel EP823 on deformation level, imposed before final annealing treatment (quenching+tempering) was investigated. It was shown that depending on the deformation level the intensity ratio of texture maxima, that are typical to BCC deformation texture were changing. The research of effect of previous deformation level on substructure condition characteristics (strain hardening level, crystal lattice microdeformation) was conducted. It was established, that inner and outer surface layers of cladding tube are having various substructure condition.



Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, О.А.КРЫМСКАЯ<sup>1</sup>,  
Н.С.МОРОЗОВ<sup>1</sup>, И.В.РЯХОВСКИХ<sup>2</sup>, Т.С.ЕСИЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Общество с ограниченной ответственностью «Газпром ВНИИГАЗ»,  
г. Москва, Россия*

## **ЗАВИСИМОСТЬ СКЛОННОСТИ К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ СТАЛЬНЫХ ТРУБ ОТ ПОСЛОЙНОЙ ТЕКСТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ**

Проблема коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) стальных трубо- и газопроводов становится более актуальной по мере увеличения сроков их эксплуатации. На примере стальных труб магистральных газопроводов по данным рентгеновского анализа показано, что формирующаяся в процессе изготовления послойная текстурная и структурная неоднородность оказывает влияние на развитие коррозионных трещин. Более неоднородное распределение текстурных характеристик приводит к увеличению стойкости против КРН, т.к. раскрытие трещин может тормозиться при достижении слоя с измененной текстурой из-за высокой взаимной разориентации зерен и необходимости изменения плоскости движения трещины, что требует увеличения приложенных напряжений.

M.G.ISAENKOVA<sup>1</sup>, Yu.A.PERLOVICH<sup>1</sup>, O.A.KRYMSKAYA<sup>1</sup>,  
N.S.MOROZOV<sup>1</sup>, I.V.RYAKHOVSKIKH<sup>2</sup>, T.S.ESIEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Limited Liability Company «Gazprom VNIIGAZ», Moscow, Russia*

## **DEPENDENCE OF THE STEEL TUBES SUSCEPTIBILITY TO STRESS CORROSION FROM THE LAYERWISE TEXTURAL INHOMOGENEITY**

The problem of the stress corrosion cracking (SCC) of steel pipes and gas pipelines becomes more urgent with increasing of their exploitation period. Based on the X-ray analysis data of main gas pipelines it was shown that layerwise textural and structural inhomogeneity, formed during their manufacturing, has an influence on the corrosion cracks development. The intensification of the texture inhomogeneity results in the increasing of the material resistance to SCC, because the crack opening can be inhibited when it achieves the layer with a modified texture due to the high mutual misorientation of grains and the necessity of changing the moving crack plane, what requires an increasing of applied stresses.

Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, М.Г.ИСАЕНКОВА,  
В.А.ФЕСЕНКО, П.Л.ДОБРОХОТОВ

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

## **ПОСЛОЙНАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ ТЕКСТУРЫ И СУБСТРУКТУРЫ В ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБАХ ИЗ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ**

Исследована текстура и субструктура оболочечных труб из ферритно-мартенситной стали ЭП450 ДУО на разных этапах их изготовления. Показано, что при обработке изделий (деформация прокаткой, отжиг) создается послойная текстурная и субструктурная неоднородность: внешние слои характеризуются слабыми текстурными максимумами и высокой степенью деформационного наклепа, центральные слои – слабыми, размытыми текстурными максимумами и низким уровнем деформационного наклепа, тогда как внутренние слои – наиболее острыми и сильными текстурными максимумами и степенью наклепа, меньшей чем во внешних слоях, но большей чем в центральных. Выявлено, что текстурная неоднородность вносится на этапе горячей экструзии, а неоднородность субструктурного состояния при дальнейших последовательных этапах холодной деформации и отжига.

Yu.A.PERLOVICH, M.G.ISAENKOVA,  
V.A.FESENKO, P.L.DOBROKHOTOV

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **THROUGH-THICKNESS TEXTURE AND SUBSTRUCTURE INHOMOGENEITY OF CLADDING TUBES MADE OF FER- RITIC-MARTENSITIC STEEL**

Texture and substructure of cladding tubes made of ferritic-martensitic ODS steel EP450 at various stages of their manufacturing route were investigated. It was shown that during processing of products (rolling, annealing) through-thickness inhomogeneity was created: outer layers of tube are characterized by weak texture maxima and high hardening level, central layers – by weak and smooth texture maxima and the lowest strain hardening level, while inner layers – by the strongest texture maxima and by strain hardening level lower than that of outer layers, but higher in comparison to central layers. It was revealed that texture inhomogeneity is imposed during hot extrusion process, while substructure inhomogeneity – during following successive deformation and annealing steps.

Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, В.А.ФЕСЕНКО<sup>1</sup>,  
О.А.КРЫМСКАЯ<sup>1</sup>, Г.П.КОБЫЛЯНСКИЙ<sup>2</sup>, Ю.Д.ГОНЧАРЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, г. Димитровград, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОДОЗНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СУБСТРУКТУРУ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ ИЗ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

В «горячей» лаборатории НИИАР при использовании разработанного и смонтированного в НИЯУ МИФИ рентгеновского текстурного комплекса для изучения влияния нейтронного облучения на субструктуру оболочечных труб из циркониевых сплавов применен метод обобщенных полюсных фигур, совмещающий съемку текстуры с регистрацией профиля рентгеновской линии. Показано, что исходная структурная неоднородность текстурованных оболочечных труб под действием нейтронного облучения претерпевает изменения, направленные к выравниванию структурного состояния зерен  $\alpha$ -Zr с ориентациями текстурных максимумов и минимумов. В результате облучения изначально неоднородная субструктура текстурованной трубы стабилизируется на некотором промежуточном уровне, отвечающем повышению дефектности зерен текстурных максимумов и снижению дефектности зерен текстурных минимумов.

Yu.A.PERLOVICH<sup>1</sup>, M.G.ISAENKOVA<sup>1</sup>, V.A.FESENKO<sup>1</sup>,  
O.A.KRYMSKAYA<sup>1</sup>, G.P.KOBYLYANSKIY<sup>2</sup>,  
Yu.D.GONCHARENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*State Scientific Center - Research Institute of Atomic Reactors",  
Dimitrovgrad, Russia*

## **INFLUENCE OF HIGH-NEUTRON IRRADIATION ON SUBSTRUCTURE OF CLADDING TUBES FROM ZIRCONIUM ALLOYS**

At the "hot" laboratory of SSC RIAR, using the X-ray texture complex designed and mounted by MEPhI, the method of generalized pole figures, combining texture measurement with registration of X-ray line profiles, was applied for study of the effect of neutron irradiation on the substructure of cladding tubes from zirconium alloys. It was shown, that the initial substructure heterogeneity of textured cladding tubes under neutron irradiation is undergoing changes directed to equalization of structure conditions for  $\alpha$ -Zr grains with the orientations of texture maxima and texture minima. As a result of irradiation, initial non-uniform substructure of textured tube stabilizes at some intermediate level corresponding to increase of the defect content in grains with orientation of texture maxima and to decrease of the defect content in grains with orientation of texture minima.

К.Е.ПРИХОДЬКО<sup>1,2</sup>, Б.А.ГУРОВИЧ<sup>1</sup>, М.М.ДЕМЕНТЬЕВА<sup>1</sup>,  
Д.А.КОМАРОВ<sup>1</sup>, Л.В.КУТУЗОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

## **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ЭЛЕМЕНТОНОГО СОСТАВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ОКСИДА МЕДИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

В работе методами аналитической просвечивающей электронной микроскопии проведено исследование протекания процесса селективного удаления атомов кислорода из оксида меди под действием протонного облучения. Экспериментально выявлена эволюция структурно-фазового состава оксида меди в ходе восстановления до металла ( $\text{CuO-Cu}_2\text{O-Cu}$ ), а также методами спектроскопии энергетических потерь электронов (СЭПЭ) получены распределения элементов по глубине пленки для различных доз протонного облучения.

K.E.PRIKHODKO<sup>1,2</sup>, B.A.GUROVICH<sup>1</sup>, M.M.DEMENTYIEVA<sup>1</sup>,  
D.A.KOMAROV<sup>1</sup>, L.V.KUTUZOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

## **CHANGES OF MICROSTRUCTURE AND ELEMENTAL COMPOSITION FEATURES IN COPPER OXIDE THIN FILMS UNDER PROTON IRRADIATION**

This work presents the study of the selective removal of oxygen atoms from the copper oxide under proton irradiation performed by transmission electron microscopy. The evolution of structurally-phase composition of copper oxide during the reduction to metal ( $\text{CuO-Cu}_2\text{O-Cu}$ ) was experimentally revealed, as well as film depth distribution of elements for different doses of proton irradiation were obtained by the techniques of electron energy loss spectroscopy (EELS).

Н.В.СТЕПАНОВ<sup>1</sup>, П.С.ДЖУМАЕВ<sup>1</sup>, В.Л.ЯКУШИН<sup>1</sup>,  
М.В.ЛЕОНТЬЕВА-СМИРНОВА<sup>1,2</sup>, И.А.НАУМЕНКО<sup>2</sup>,  
В.И.ПОЛЬСКИЙ<sup>1</sup>, Г.А.БИРЖЕВОЙ<sup>3</sup>, О.Э.ЛЕВИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт не-  
органических материалов им. академика А.А.Бочвара»,  
г. Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Государственный научный центр Российской Федерации –  
Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского*

## **ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ПОТОКАМИ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ТВЭЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ ТИПА Х12 В ЖИДКОМ СВИНЦЕ**

Представлены результаты экспериментального исследования влияния обработки потоками импульсной плазмы, в том числе методом поверхностного жидкофазного легирования алюминием и хромом, на коррозионную стойкость твэльных труб из ферритно-мартенситных хромистых сталей типа Х12 (ЭП823 (16Х12НМВСБФР) и ЭП900 (16Х12НМВСБФАР)) в потоке жидкого свинца при температурах 620-650 °С с повышенным ((5-8)·10<sup>-5</sup> масс. %) контролируемым содержанием кислорода и временах выдержки 1000-5000 часов. Исследования методом растровой электронной микроскопии микроструктуры поверхности и поперечных шлифов образцов после коррозионных испытаний показали, что поверхностное легирование твэльных труб из хромистых сталей типа Х12 значительно (до 10 раз) повышает их коррозионную стойкость.

N.V.STEPANOV<sup>1</sup>, P.S.DZHUMAЕV<sup>1</sup>, V.L.YAKUSHIN<sup>1</sup>,  
M.V.LEONT'EVA-SMIRNOVA<sup>1,2</sup>, I.A.NAUMENKO<sup>2</sup>,  
V.I.POLSKIY<sup>1</sup>, G.A.BIRZHEVOY<sup>3</sup>, O.E.LEVIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*JSC A.A.Bochvar All-Russian Scientific Research Institute for Inorganic  
Materials, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*State Scientific Center, Institute of Physics and Power Engineering,  
Obninsk, Russia*

## **INFLUENCE OF PULSED PLASMA FLOWS TREATMENT ON THE CORROSION RESISTANCE OF 12 Cr FERRITIC- MARTENSITIC STEEL FUEL CLADDING TUBES IN LIQUID LEAD**

This paper presents the experimental results of the investigations on the corrosion resistance improvement by high-temperature pulsed plasma flows treatment (including the liquid phase surface alloying method) of 12% Cr ferritic-martensitic steels (EP823 (16Cr12MoWSiVNbB) and EP900 (16Cr12MoWSiNbVCeNB)) fuel cladding tubes in liquid lead flow with an increased and controlled oxygen content ( $C_o = (5-8) \cdot 10^{-5}$  wt%) at the temperature of 620-650°C and the test duration of 1000-5000 h. SEM investigations of the surface and cross-section of samples after corrosion tests have shown that the surface alloying by Al or Cr significantly (up to 6-10 times) increases the corrosion resistance of the 12% Cr ferritic-martensitic steel tubes in liquid lead flow with an increased oxygen content.

П.С.ДЖУМАЕВ, Е.М.МАЛИЕВА, В.Л.ЯКУШИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХРОМИСТЫХ СТАЛЕЙ ЭП823 И ЭК181**

Представлены экспериментальные результаты исследования влияния различных видов обработки на трибологические характеристики 12 %-ных хромистых ферритно-мартенситных сталей ЭП823 и ЭК181. Трибологические испытания проведены на отрезках твэльных труб из стали ЭП823 в состоянии поставки, модифицированных потоками импульсной плазмы и поверхностно-легированных алюминием с использованием плазменной обработки. Образцы-диски из стали ЭК181 исследованы после штатной термообработки (закалка на воздухе и отпуск), интенсивной пластической деформации кручением и модифицирования потоками азотной плазмы. Анализ полученных трибограмм и электронно-микроскопических снимков треков износа показал, что трибологические характеристики образцов существенно зависят от вида их предварительной обработки.

P.S.DZHUMAЕV, E.M.MALIEVA V.L.YAKUSHIN  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **EFFECT OF PRETREATMENT ON THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF CHROMIUM STEELS EP823 AND EK181**

The experimental results of influence the different treatments on the tribological characteristics of the 12% chromium ferritic-martensitic steels EP823 and EK181 are presented. Tribological tests were carried out on sections of fuel cladding tubes from EP823 steel in delivery condition, modified by pulsed plasma flows and surface-alloyed by aluminum using a plasma treatment. Discs samples from EK181 steel studied after standard heat treatment (quenching in air and tempering), intensive plastic deformation by torsion and modification by nitrogen plasma flows. Analysis of tribogramm and electron microscopic images of wear tracks showed that samples tribological characteristics depend strongly on the type of pretreatment.

Н.С.САБУРОВ, В.А.МАРКЕЛОВ, А.Ю.ГУСЕВ,  
С.А.БЕКРЕНЕВ, И.А.ШЕЛЕПОВ

*Акционерное общество «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А.Бочвара», г. Москва, Россия*

## **Пороговые условия для замедленного гидридного растрескивания оболочек ТВЭЛОВ из сплавов циркония**

Замедленное гидридное растрескивание (ЗГР) один из наиболее вероятных механизмов деградации изделий из сплавов циркония вследствие наводороживания при эксплуатации в активной зоне водоохлаждаемых реакторов.

В работе сформулированы и обоснованы критические параметры для ЗГР ( $C_H$ ,  $T_{пред}$  и  $K_{IH}$ ) и предложен подход к обоснованию вероятности гидридного растрескивания оболочки твэла при эксплуатации в реакторе PWR. С использованием такого подхода проведены исследования оболочек твэлов из сплавов Zr-1Nb, Zr-0,8Nb-0,8Sn-0,3Fe и Zircaloy-4 и определены значения критических параметров ЗГР для каждого сплава.

N.S.SABUROV, V.A.MARKELOV, A.U.GUSEV,  
S.A.BEKRENEV, I.A.SHELEPOV

*A.A.Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russia*

## **THE THRESHOLD CONDITIONS OF THE DELAYED HYDRIDE CRACKING IN ZIRCONIUM ALLOYS**

Delayed Hydride Cracking (DHC) is a likely degradation mechanism of zirconium alloy items in water cooled reactor cores.

In this work critical parameters of a DHC ( $C_H$ ,  $T_{lim}$  and  $K_{IH}$ ) have been formulated and substantiated and an approach to a rationale of a probability of the delayed hydride cracking of a fuel cladding under an operation in the PWR nuclear reactor. Using that approach investigations of fuel claddings produced from alloys Zr-1Nb, Zr-0,8Nb-0,8Sn-0,3Fe and Zircaloy-4 have been conducted and values of critical parameters of the DHC for each alloy have been determined.



В.В.УГЛОВ<sup>1,2,3</sup>, В.И.ШИМАНСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
Е.Л.КОРЕНЕВСКИЙ<sup>1</sup>, JACQUES O'CONNEL<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

<sup>3</sup>Научно исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Nelson Mandela University, Port Elizabeth, South Africa

## СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК $\text{AlN}/\text{SiN}_x$ ПОСЛЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ТЕР- МИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В работе исследовалось структурно-фазовое состояние многослойной пленки  $\text{AlN}/\text{SiN}_x$  толщиной 300 нм, сформированной магнетронным распылением, после облучения ионами гелия  $\text{He}^+$  (энергия 30 кэВ, доза  $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ) и последующего отжига при температуре 800 °С. Сформированная пленка  $\text{AlN}/\text{SiN}_x$  представляет собой чередование слоев кристаллической (AlN) и аморфной ( $\text{SiN}_x$ ) фаз. С помощью просвечивающей электронной микроскопии в слоях аморфной фазы  $\text{SiN}_x$  после постимплантационного отжига обнаружено образование сферических включений размером 4–7 нм. Согласно данным, полученным при моделировании радиационных процессов в программе SRIM, область образования таких включений соответствует области высокой концентрации имплантированных ионов гелия  $\text{He}^+$  (130–220 нм). Из этого можно заключить, что образование наблюдаемых включений происходит за счет кластеризации имплантированных ионов гелия  $\text{He}^+$  в результате диффузионных процессов при отжиге. Также следует отметить, что подобных включений в кристаллических слоях AlN не обнаружено.

V.V.UGLOV<sup>1,2,3</sup>, V.I.SHYMANSKI<sup>1,2</sup>,

E.L.KORENEVSKI<sup>1</sup>, J.O'CONNEL<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

<sup>3</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Nelson Mandela University, Port Elizabeth, South Africa*

## **STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF MULTI-LAYERED AlN/SiN<sub>x</sub> FILMS AFTER ION IRRADIATION AND THERMAL ANNEALING**

In this study structure and phase composition of multilayer magnetron sputtered films AlN/SiN<sub>x</sub> irradiated with He<sup>+</sup> (30 keV, dose  $5 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup>) and subsequent annealed at 800°C were investigated. These films are alternation of nanocrystalline (nc)-AlN and amorphous (a)-SiN<sub>x</sub> layers. The formation of spherical inclusions with the size of 4–7 nm was revealed in the a-SiN<sub>x</sub> layers after post implantation annealing by means of transmission electron microscopy. According to radiation processes modeling in SRIM, the region of the inclusion formation corresponds to the high He<sup>+</sup> implanted ion concentration (130–220 nm.). It may be concluded the inclusion formation is a result of clustering He<sup>+</sup> ion implantation during diffusion processes at annealing. The inclusions in the nc-AlN layers were not observed.

В.В.УГЛОВ<sup>1,2,3</sup>, С.В.ЗЛОЦКИЙ<sup>1</sup>, В.А.СКУРАТОВ<sup>4</sup>,  
Э.ВЕНДЛЕР<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>5</sup>Институт физики твердого тела, Германия

## **РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ПОКРЫТИИ TiZrN, ОБЛУЧЕННОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ**

Исследование поведения наноматериалов, подвергшихся воздействию радиации очень важно применительно к разработке перспективных компонентов для деления и синтеза реакторов нового поколения (реакторы на быстрых нейтронах, реакторы высокотемпературного газа, термоядерные реакторы и т.д.). Наличие высокой плотности интерфейсов в наноматериалах, выступающих в качестве раковины для радиационных дефектов позволяет прогнозировать улучшение радиационной стойкости таких материалов. Одним из перспективных групп этих наноматериалов включает покрытий на основе переходных металлов, нитриды, полученных физическим осаждением из паровой фазы. В данной работе, быстрый Хе и ионов Вi эффекты облучения в нанокристаллических TiZrN покрытий в зависимости от ионной плотности потока сообщаются. Нитридные пленки разной толщины (1 и 4 мкм), синтезированного методом вакуумного напыления дугового пара в нанокристаллическом состоянии облучали 167 МэВ Хе и 695 МэВ ионов Вi к флюенсах в диапазоне  $1 \times 10^{12} \div 1,83 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (Хе) и  $10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-2}$  (Вi) и изучены с использованием методов РСА. Никаких признаков аморфизации из-за высокого уровня потерь энергии ионизирующего излучения не найдено. Рентгеновские обследования не выявили каких-либо изменений в фазовом составе нанокристаллических TiZrN пленок, облученных с высокой энергией Хе и ионов Вi, доказывающие очень высокое удельное сопротивление этого материала от воздействия осколков деления. Было установлено, что радиационные результаты накопления повреждений в увеличении сжимающих напряжений в уровне TiZrN пленках. Измерения параметра решетки выявили немонотонная зависимость уровня напряжения в облученных образцах на ионной плотности энергии.

V.V.UGLOV<sup>1,2,3</sup>, S.V.ZLOTSKI<sup>1</sup>, V.A.SKURATOV<sup>4</sup>,  
E.WENDLER<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Tomsk Polytechnic University, Russia*

<sup>3</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

<sup>5</sup>*Institut für Festkörperphysik, Jena, Germany*

## **RADIATION EFFECTS IN NANOCRYSTALLINE TiZrN FILMS IRRADIATED BY HIGH ENERGY IONS**

Investigation of the behavior of nanomaterials exposed to radiation is very important as applied to the development of promising components for fission and synthesis reactors of a new generation (fast neutron reactors, high-temperature gas reactors, thermo-nuclear reactors, etc.). The presence of the high density of interfaces in nanomaterials acting as the sinks for radiation defects allows predicting the improved radiation stability of such materials. One of the perspective groups of these nanomaterials includes coatings on the basis of the transitional metal nitrides obtained by the physical vapour deposition. In this paper, swift Xe and Bi ion irradiation effects in nanocrystalline TiZrN coatings as a function of ion fluence are reported. Nitride films of different thickness (1 and 4  $\mu\text{m}$ ) synthesized by vacuum arc-vapour deposition in nanocrystalline state were irradiated with 167 MeV Xe and 695 MeV Bi ions to fluences in the range  $1 \times 10^{12} \div 1,83 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  (Xe) and  $10^{12} \div 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  (Bi) and studied using XRD techniques. No evidence of amorphization due to high level ionizing energy losses has been found. XRD examinations revealed no changes in phase composition of nanocrystalline TiZrN films irradiated with high energy Xe and Bi ions proving very high resistivity of this material against fission fragment impact. It was found that the radiation damage accumulation results in increase of compressive stress level in TiZrN films. The measurements of lattice parameter have revealed nonmonotonic dependence of the stress level in irradiated samples on ion fluence.

**В.П.ФИЛИППОВ, А.Б.БАТЕЕВ**

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

## **ВЛИЯНИЕ РЕАКТОРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ ОЛОВА В ОКСИДНЫХ ПЛЕНКАХ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Zr-0,76%Fe-1,6%Sn**

Реакторное облучение заметно изменяет перераспределение легирующих элементов и в сплаве, и в оксидных пленках. На примере сплава Zr-0,76%Fe-1,6%Sn, изучались и сопоставлялись изменения в состоянии атомов олова в процессе коррозионных испытаний в автоклаве и в реакторных условиях при одинаковых температурах и коррозионной среде. Выявлено, что в условиях реакторного облучения процесс коррозии значительно ускоряется. Показано, что и в автоклавных и в реакторных условиях на начальных стадиях коррозии в оксидных пленках образуются соединения двухвалентного и четырехвалентного олова и частиц бета олова. В условиях реакторного облучения кинетика изменения состояний атомов олова имеет более ускоренный характер. Обсуждаются возможные причины изменения коррозионной стойкости сплава и ее взаимосвязь с состоянием атомов олова в оксидной пленке.

**V.P.FILIPPOV, A.B.BATTEV**

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **REACTOR IRRADIATION INFLUENCE ON TIN STATE IN OXIDE FILMS OF ALLOY Zr-0.76%Fe-1.6%Sn**

Reactor irradiation significantly modifies the redistribution of alloying elements in the alloys and also in oxide films. The alloy Zr-0.76% Fe-1.6% Sn have been corroded in an autoclave and reactor conditions. The changes of tin atoms state are compared. It was revealed that under the reactor irradiation corrosion process is accelerated significantly. It is shown that in the autoclave conditions and reactor conditions in the initial corrosion processes in oxide films the tetravalent, divalent tin compounds and beta tin particles are formed. Under reactor irradiation the kinetics of the tin atoms changes is more accelerated. Possible reasons for changing of the alloy corrosion resistance and its relationship with the state of the tin atoms in the oxide films are discussed.

В.П.ФИЛИППОВ<sup>1</sup>, В.Г.КИРИЧЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина,  
г. Харьков, Украина*

## **РОСТ И СЕГРЕГАЦИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ В СПЛАВАХ ЦИРКОНИЯ**

Обнаружена взаимосвязь процессов роста включений интерметаллических фаз и их поверхностной сегрегации в бинарных и тройных сплавах на основе циркония. Увеличение поверхностной концентрации атомов железа связано с увеличением размеров включений при росте температуры отжига деформированных сплавов. Модель асимметричного роста интерметаллических включений, приводящего к их миграции, позволила определить коэффициент диффузии атомов железа в интерметаллических фазах.

V.P.FILIPPOV<sup>1</sup>, V.G.KIRICHENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia,*

<sup>2</sup>*Kharkiv National Karazin University, Kharkov, Ukraine*

## **THE GROWTH AND SEGREGATION OF INTERMETALLIC PHASES IN ZIRCONIUM ALLOYS**

The interrelation of processes of growth of inclusions of intermetallic phases and their surface segregation in binary and threefold alloys on the basis of zirconium is found. The increase of surface concentration of iron atoms associated with the increase in the size of inclusions with increasing temperature of annealing of the deformed alloys. Model of asymmetric growth of the intermetallic inclusions, leading to their migration have enabled us to determine the diffusion coefficient of iron atoms in intermetallic phases.

А.Б.ЦЕПЕЛЕВ<sup>1,2</sup>, И.М.МИЛЯЕВ<sup>1</sup>, В.Н.ПИМЕНОВ<sup>1</sup>,  
В.С.ЮСУПОВ<sup>1</sup>, В.Н.МЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>, А.И.МИЛЯЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова Российской академии наук, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

*E-mail: tsep@imet.ac.ru; imilyaev@mail.ru; pimval@mail.ru;  
yusupov@aport2000.ru*

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА КИНЕТИКУ РАСПАДА ТВЕРДОГО РАСТВОРА И КОЭРЦИТИВНУЮ СИЛУ МАГНИТОТВЕРДОГО СПЛАВА Fe-Cr-Co**

Исследовано влияние электронного (2 МэВ) облучения при температуре 350 °С на распад твердого раствора магнитотвердого сплава Fe-22Cr-15Co-1Ti. Кинетику распада контролировали по изменению коэрцитивной силы через каждые 2 часа облучения. Максимальная доза облучения составляла  $\sim 2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup>. Установлено, что облучение приводит к заметному повышению коэрцитивной силы магнитотвердого сплава до величины, недостижимой при термических отпусках даже при более высоких (до 500 °С) температурах, что свидетельствует о более глубоком, чем в термических условиях, радиационно-стимулированном распаде твердого раствора. При термической обработке величина коэрцитивной силы сплава достигает насыщения уже после нескольких часов отжига, тогда как в процессе радиационной обработки рост коэрцитивной силы продолжается без выхода на насыщение даже после 20 часов облучения.

A.B.TSEPELEV<sup>1,2</sup>, I.M.MILYAEV<sup>1</sup>, V.N.PIMENOV<sup>1</sup>,  
V.S.YUSUPOV<sup>1</sup>, V.N.MELNIKOV<sup>1</sup>, A.I.MILYAEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *A.A.Baikov Institute of metallurgy and materials science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

*E-mail: tsep@imet.ac.ru; imilyaev@mail.ru; pimval@mail.ru;  
yusupov@aport2000.ru*

## **EFFECT OF ELECTRON IRRADIATION ON THE KINETICS OF DECOMPOSITION OF SOLID SOLUTION AND COERCIV- ITY OF Fe-Cr-Co HARD MAGNETIC ALLOY**

Effect of 2 MeV electron irradiation at 350°C on solid solution decomposition in Fe-22Cr-15Co-1Ti hard magnetic alloy has been investigated. Monitoring of the decomposition kinetics was carried out by the coercivity measurement after every two hours of irradiation. The greatest time of irradiation was 20 hours (fluence of  $\sim 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ). It is ascertained that irradiation leads to significant increasing the coecivity of the alloy up to value unreachable under thermal tempering at the more high temperatures, up to 500°C. Such changes of coecivity values indicate more deep radiation-induced decomposition of the solid solution compared to that under the thermal treatment of the alloy. During thermal treatment, the coecivity value reaches the saturation already after a few hours of annealing while increasing the coercivity value without saturation was found under radiation treatment even after 20 hours of irradiation.



А.В.ШУЛЬГА

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

## **ОСОБЕННОСТИ СТАРЕНИЯ И ДЕГРАДАЦИИ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ КОНСОЛИДАЦИИ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ПОРОШКОВ, ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖКАХ**

Представлены результаты сравнительных исследований механических свойств при растяжении и микроструктуры образцов твэльных трубок коррозионно-стойких сталей, полученных консолидацией быстрозакаленных порошков и по традиционной технологии после высокотемпературных выдержек при температурах 600 и 700 °С в течение 1400 и 1000 ч, соответственно. Механические испытания на растяжение кольцевых образцов от твэльных трубок коррозионно-стойких аустенитной стали типа AISI 316 и ферритно-мартенситной стали проведены при комнатной температуре. Микроструктура, распределение углерода и бора исследованы с использованием методов металлографии и авторадиографии по бору и углероду в образцах от твэльных трубок, а также полуфабрикатов, полученных горячим изостатическим компактированием быстрозакаленных порошков и по традиционной технологии горячей деформацией слитков. Быстрозакаленные порошки исследуемых сталей получены методом центробежного распыления слитка-электрода. Установлен эффект высокотемпературного старения при температуре 600 °С, а также сохранение положительного влияния применения технологии консолидации быстрозакаленных порошков. Наряду с этим установлена деградация исследуемых сталей при 700 °С. Выявлена корреляция однородности распределения углерода и бора с уровнем механических характеристик исследуемых сталей, полученных методом порошковой металлургии и по традиционной технологии.

A.V.SHULGA

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

**FEATURES OF THERMAL AGING AND DEGRADATION OF  
STAINLESS STEELS MANUFACTURED BY CONSOLIDATION  
OF THE RAPIDLY QUENCHED POWDERS UNDER HIGH  
TEMPERATURE EXPOSURES**

The results of comparative research of the tensile properties and microstructure of the stainless steel cladding fuel tubes fabricated by powder metallurgy via hot isostatic pressing (PM HIP) with using of the rapidly quenched powders and traditional technologies after high temperature exposures at 600 and 700 °C for 1400 и 1000 h, correspondingly, are presented. Mechanical tests were performed at room temperature of the ring specimens of the cladding fuel tubes of the type AISI 316 austenitic stainless steel and ferritic/martensitic steel. The microstructure and carbon and boron distribution in the cladding tubes and in the semi-finished products PM HIP compacts of the rapidly quenched powders and conventional hot forged ingots were examined by metallography and autoradiography on carbon and boron. The rapidly quenched powders of the investigated steels were produced by plasma rotating electrode process. Effect of the thermal aging and retention of the positive result of PM HIP technology via the rapidly quenched powders consolidation under exposure at 600 °C were revealed. Besides, degradation of the investigated steels at 700 °C was established. Correlation of the homogeneity of carbon and boron distribution with the mechanical properties of investigated steels was observed.

В.М.ЧЕРНОВ<sup>1,2</sup>, К.А.МОРОЗ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А.Бочвара,*

*г. Москва, Россия,*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,*

*г. Москва, Россия.*

*E-mail: kirill.moroz.92@mail.ru.*

## **ВЛИЯНИЕ ПОВРЕЖДАЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НИЗКО-ТЕМПЕРАТУРНОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ МЕТАЛЛОВ**

Исследовано влияние повреждающего облучения на формирование состояния низко-температурного охрупчивания (хладноломкости) металлов, проявляющих хладноломкость без облучения. В процессе облучения неустойчивое состояние хладноломкости металлов с возможностью хрупкого разрушения не формируется из-за возникающих в металле радиационных динамических процессов.

V.M.CHERNOV<sup>1,2</sup>, K.A.MOROZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*A.A.Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia.*

*E-mail: kirill.moroz.92@mail.ru*

## **INFLUENCE OF THE DAMAGE IRRADIATION ON THE LOW TEMPERATURE EMBRITTLEMENT OF METALS**

The formation of the state low-temperature embrittlement (cold brittleness) with the possibility of a brittle fracture of metals, showing the cold brittleness without irradiation (the formation of the temperature of a ductile-brittle transition) are considered. During irradiation the unstable state of the cold brittleness is not formed due to arising in metals radiation dynamic processes.



СЕКЦИЯ 3  
ЯДЕРНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ТОПЛИВА

SECTION 3  
NUCLEAR FUEL COMPONENT

В.В.МИХАЛЬЧИК, А.В.ТЕНИШЕВ,  
Д.П.ШОРНИКОВ, Р.С.КУЗЬМИН

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

## **ОСОБЕННОСТИ ИСПАРЕНИЯ МОНОНИТРИДА УРАНА**

Компакты мононитрида урана отжигались в среде с низким содержанием азота в приборе синхронного термического анализа. Дифференциальный термический анализ в комплексе с термогравиметрией, показали наличие переходных процессов. На первом этапе происходит инконгруэнтное испарение мононитрида урана с преобладанием выделения азота. На второй стадии обеднение поверхности азотом приводит к локальному повышению концентрации урана, что является стимулом к диссоциации с образованием жидкой фазы. Высокая междоузельная подвижность атомов азота в решетке не может в полной мере препятствовать обеднению поверхности азотом. Время до начала фазового перехода линейно растет с увеличением площади поверхности образцов, однако изменение геометрии не влияет на скорость испарения.

V.V.MIKHALCHIK, A.V.TENISHEV,  
D.P.SHORNIKOV, R.S.KUZMIN

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **FEATURES OF URANIUM MONONITRIDE EVAPORATION**

Compacts of uranium mononitride were annealed in medium with low nitrogen content by apparatus of simultaneous thermal analysis. Combination differential thermal analysis with thermogravimetry showed the presence of transient processes. The first step was incongruent evaporation of uranium mononitride with predominance volatilized of nitrogen. At the second stage surface nitrogen depletion led to a local increase of the uranium concentration. The last was stimulus to the dissociation with liquid phase formation. Remarkable that high interstitial mobility of nitrogen atoms in the lattice can't prevent nitrogen depletion on the surface. Showed, that isothermal exposure increased linearly with increasing of the sample's surface area.

**С.Н.НИКИТИН, Б.А.ТАРАСОВ, Д.П.ШОРНИКОВ**  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
г. Москва, Россия*

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА С МАТЕРИАЛАМИ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА**

Долгое время наиболее распространенным топливным материалом являлось металлическое ядерное топливо на основе урана и его сплавов, однако эксплуатация металлического топлива осложнялась изменением структуры под облучением, огромным распуханием литых изделий, а также сильнейшим радиационным ростом и взаимодействием с оболочкой при повышенных температурах. Мировой опыт использования металлического топлива показал, что данных проблемы можно устранить либо конструкторскими решениями, либо легированием топлива. Однако вопрос совместимости остается открытым. В данной работе проведены исследования совместимости перспективного металлического ядерного топлива с материалами оболочки твэла.

**S.N.NIKITIN, B.A.TARASOV, D.P.SHORNIKOV**  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **INTERACTION OF METAL NUCLEAR FUEL WITH CLADDING MATERIALS**

For a long time most prevalent fuel material is metallic nuclear fuel based on uranium and its alloys, however, the metal fuel operation was complicated by changes in radiation patterns, a huge swelling, radiation growth and interaction with the shell at higher temperatures. World experience of using metallic fuel showed that these problems can be eliminated or construction solutions or doped fuel. However, compatibility remains an open question. In this paper we conducted research compatibility of the promising metal fuel with cladding materials.

И.И.КОНОВАЛОВ, М.С.ТАРАСОВА, Б.А.ТАРАСОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
г. Москва, Россия*

## **РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТВЭЛОВ С ПЛОТНЫМ ТОПЛИВОМ**

В работе рассмотрена механическая система оболочка твэла – плотное топливо.

Представлены физико-математические модели набухания, газовыделения и ползучести плотного топлива под облучением. Показана принципиальная разница в поведении твэлов с металлическим и нитридным топливом при эксплуатации в реакторах на быстрых нейтронах.

Дан прогноз по предельным параметрам эксплуатации плотного топлива в зависимости от конструктивных особенностей твэлов, условий облучения, материала оболочки и структурных параметров и содержания примесей в плотном топливе.

I.I.KONOVALOV, M.S.TARASOVA, B.A.TARASOV  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **CALCULATED DEFINITION OF THE PERFORMANCE LIMITS OF FUEL ELEMENTS WITH A DENSE FUEL**

We consider a mechanical system cladding - dense fuel.

The physical and mathematical models of the swelling, gas release and creep of dense fuel under irradiation are presented. We have shown a fundamental difference in the behavior of fuel elements with a metal and nitride fuel when used in fast reactors.

The forecast of the marginal operating parameters of dense fuel is done, depending on the design features of the fuel elements, irradiation conditions, the cladding material, the structural parameters and content of impurities in fuels.



Р.С.КУЗЬМИН, А.В.ТЕНИШЕВ,  
В.В.МИХАЛЬЧИК, Д.П.ШОРНИКОВ

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

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТВЕРДОГО РАСТВОРА (U,Gd)O<sub>2</sub> ПРИ СПЕКАНИИ ТАБЛЕТОК ОКСИД- НОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

Прессовки UO<sub>2</sub> с добавками Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> спекали в печи дилатометра по различным температурным программам с максимальной температурой нагрева 1600 °С. В структуре прессовок обнаружены включения, образовавшиеся на стадии помола и представляющие собой уплотнения из кристаллитов UO<sub>2</sub> с распределенными по объему частицами Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которые не исчезают при нагреве до температуры ниже 1300 °С. Показано замедление усадки, по сравнению со спеканием чистого UO<sub>2</sub>, вызванное образованием твердого раствора (U,Gd)O<sub>2</sub>. Перераспределение гадолиния происходит на протяжении всего нагрева до 1600 °С и продолжается на начальном этапе изотермической выдержки при этой температуре.

R.S.KUZMIN, A.V.TENISHEV,  
V.V.MIKHALCHIK, D.P.SHORNIKOV

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **REGULARITIES OF SOLID SOLUTION FORMATION (U,Gd)O<sub>2</sub> DURING SINTERING OXIDE NUCLEAR FUEL**

UO<sub>2</sub> compacts were sintered with additives Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by dilatometer furnace under various temperature programs up to maximum temperature 1600 °C. Sample's structure showed inclusions which have formed already during grinding stage. Inclusions consisted of UO<sub>2</sub> crystallites with distributed particles of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and the last one didn't disappear up to 1300 °C. It is noticed that shrinkage of UO<sub>2</sub> with additives Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slower than shrinkage pure UO<sub>2</sub> due to formation of solid solution (U,Gd)O<sub>2</sub>. Gadolinium redistribution have occurring during heating up to 1600 °C and the process continuing during exposure on the initial stage.

**Б.А.ТАРАСОВ, И.И.КОНОВАЛОВ**

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

## **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНИМОСТИ СИЛИЦИДОВ УРАНА В КАЧЕСТВЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ВВЭР**

В работе рассматриваются некоторые свойства силицидов урана  $U_3Si_2$  и  $U_3Si$ , применительно к использованию этих соединений в качестве топлива реакторов ВВЭР.

Обсуждаются вопросы коррозионной стойкости, теплофизических и механических свойств. В частности, показана плохая коррозионная стойкость силицида  $U_3Si_2$  в воде высоких параметров.

Приводятся результаты измерения теплоемкости и теплопроводности в интервале температур от комнатной до  $600^\circ C$ .

Рассмотрены особенности изготовления данных материалов методами порошковой металлургии, и структурно-фазовое состояние получаемых образцов.

**B.A.TARASOV, I.I.KONOVALOV**

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **SOME ASPECTS OF APPLICABILITY URANIUM SILICIDE AS NUCLEAR FUEL IN PWR**

The paper considers some properties of uranium silicides ( $U_3Si_2$ ,  $U_3Si$ ) in relation to the use of these compounds as fuel for PWR reactors.

Issues of corrosion resistance, thermal and mechanical properties are discussed. In particular, silicide  $U_3Si_2$  shows poor corrosion resistance in high-temperature water.

The results on determination of the specific heat and thermal conductivity in the temperature range from room temperature to  $600^\circ C$  are discussed.

The features of the manufacture of these materials by powder metallurgy and structural-phase state of the received samples are considered.

СЕКЦИЯ 4  
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

SECTION 4  
METHODS OF RESEARCH AND MODELING  
OF MATERIALS

А.В.АНДРОСОВ<sup>1</sup>, В.И.ВЫБЫВАНЕЦ<sup>1</sup>, Е.Г.КОЛЕСНИКОВ<sup>1</sup>,  
В.С.СЕРИКОВ<sup>1</sup>, Е.С.СОЛНЦНЕВА<sup>1</sup>, П.А.СТЕПАНЧИКОВ<sup>1</sup>,  
И.М.РУССКИХ<sup>2</sup>, Е.Н.СЕЛЕЗНЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт научно-производственное объединение «Луч», г. Подольск, Московская область, Россия

<sup>2</sup>АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия

## ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ АМПУЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Исследование поведения твэлов в различных режимах, качественное описание физических процессов в материалах под облучением, возможно только в ампульных экспериментах. Ампульные каналы позволяют также получать данные, необходимые для разработки и верификации расчетных кодов, описывающих ресурсное поведение твэл. В настоящей работе представлены концептуальные решения и конструктивные особенности ампульного устройства, позволяющего одновременно облучать топливо и макеты твэлов и получать экспериментальные данные по кинетики выхода ГПД, распуханию топлива, ресурсному поведению твэл, деформационному поведению оболочки и совместимости материалов твэл. Условия испытаний обеспечивают параметры, максимально приближенные к штатным условиям эксплуатации. В работе приводится обоснование работоспособности и безопасности ампульного канала.

A.V.ANDROSOV<sup>1</sup>, V.I.VYBYVANETS<sup>1</sup>, E.G.KOLESNYKOV<sup>1</sup>,  
V.S.SERIKOV<sup>1</sup>, E.S.SOLNTSEVA<sup>1</sup>, P.A.STEPANCHYKOV<sup>1</sup>,  
I.M.RUSSKIKH<sup>2</sup>, E.N.SELEZNEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SRI SIA «Luch», Podolsk, Russia

<sup>2</sup>JSC «Institute of Nuclear Materials», Zarechny, Russia

## AMPOUL TEST METHODOLOGY

Fuel rods behavior study and description of the physical processes under irradiation are possible only in case of ampoule test. In addition ampoule tests allow obtain the data necessary for modeling codes verification. The conceptual solutions and design features of the ampoule test device, allowing irradiated fuel samples and fuel rods simultaneously presented in this paper. The device allowed to get experimental data on fission gas release and fuel swelling, resource behavior of fuel rods, deformation behavior of the shell, fuel element materials compatibility. It provides test conditions similar to operating regime. Safety justification and reliability substantiation are given in this paper.

И.А.АНТОШИНА, Р.К.ВИШЕРАТИН,  
В.А.СТЕПАНОВ, П.А.ХАЙМОВИЧ

*Обнинский институт атомной энергетики национальный исследователь-  
ский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Обнинск, Россия*

## **КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ПОСЛЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Методами дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгено-дифракционного анализа, атомно-силовой и электронной микроскопии исследована кинетика кристаллизации аморфных сплавов на основе кобальта после интенсивной пластической деформации. Интенсивная пластическая деформация создавалась ионным облучением (двуосное растяжение) и методом барокриодеформирования (всестороннее сжатие).

Показано, что скорость термической кристаллизации аморфных сплавов увеличивается после двуосного растяжения и уменьшается после всестороннего сжатия.

I.A.ANTOSHINA, R.K.VISHERATIN,  
V.A.STEPANOV, P.A.KHAYMOVICH

*Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering National Research Nuclear  
University «MEPhI», Obninsk, Russia*

## **CRYSTALLIZATION OF METALLIC GLASSES AFTER SEVERE PLASTIC DEFORMATION**

The crystallization kinetics of Co based amorphous alloys after severe plastic deformation was studied by differential scanning calorimetry, X-ray diffraction, atomic probe microscopy and electron microscopy techniques. Severe plastic deformation was achieved by ion irradiation (biaxial stretching) and by barocryodeformation (all-round compression).

It is shown that the rate of crystallization increases after biaxial stretching and decreases after all-round compression.

М.А.АРСЕНТЬЕВ<sup>1</sup>, С.В. ВАСИЛЬЕВА<sup>1</sup>, А.О.МЕРКУШКИН<sup>2</sup>,  
А.Ю.РАШКОВСКИЙ<sup>3</sup>, А.С.СМОЛЯНСКИЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Филиал АО «Научно-исследовательский  
физико-химический институт им. Л.Я.Карпова», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет имени  
Д.И.Менделеева, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>ООО «Системы для микроскопии и анализа», г. Москва, Россия  
E-mail: assa@nifhi.ru

## **ФРАКТАЛЬНАЯ СОРБЦИЯ И СТРОЕНИЕ ЧАСТИЦ ГАММА-ОБЛУЧЕННОГО ДИСПЕРСНОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА**

Методами низкотемпературной сорбции азота и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) исследовано строение и шероховатость поверхности частиц порошкообразного политетрафторэтилена (ПТФЭ), гамма-облученного (<sup>60</sup>Co) на воздухе, при комнатной температуре, дозами 0 – 1000 кГр. Установлено, что при дозах менее 200 кГр изменение шероховатости и строения поверхности частиц ПТФЭ определяется процессами радиационной кристаллизации. При более высоких поглощенных дозах доминируют процессы деструкции полимера. В результате ПЭМ-измерений обнаружено изменение микрогеометрии поверхности частиц ПТФЭ вследствие формирования граней нано-/микрорекристаллов полимера и выхода винтовых дислокаций. Особенно интенсивно радиационная кристаллизация протекает при дозах 10 – 50 кГр. В области поглощенных доз 50 – 200 кГр наблюдается исчезновение кристаллитов и аморфизация ПТФЭ. При дозах 200 – 1000 кГр доминируют процессы деструкции и газовыделения, наблюдается образование нанопор. Обнаружена корреляция между данными измерений сорбции азота и методом ПЭМ. В области доз менее 200 кГр рассчитанные значения фрактальной размерности поверхности частиц порошков ПТФЭ увеличиваются от  $2,48 \pm 0,01$  до  $2,500 \pm 0,007$ . Дальнейшее увеличение поглощенной дозы до 1000 кГр приводит к уменьшению  $D_s$  до  $2,49 \pm 0,02$ . Следовательно, рост величины  $D_s$  соответствует развитию поверхности частиц порошков ПТФЭ вследствие протекания процессов радиационной кристаллизации. Напротив, уменьшение  $D_s$  соответствует снижению шероховатости поверхности частиц ПТФЭ в результате радиационной деструкции и газовыделения. Таким образом, применение фрактального приближения для анализа результатов сорбции азота гамма-облученными порошками ПТФЭ позволяет определить природу и направленность радиационно-химических процессов, приводящих к изменению шероховатости поверхности частиц полимера.

M.A.ARSENT'EV<sup>1</sup>, S.V.VASIL'EVA<sup>1</sup>, A.O.MERKUSHKIN<sup>2</sup>,  
A.YU. RASHKOVSKI<sup>3</sup>, A.S.SMOLYANSKI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Branch of the JSC «Karpov Institute of Physical Chemistry»,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,  
Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*LLC «Systems for microscopy and analysis», Moscow, Russia  
E-mail: assa@nifhi.ru*

## **FRACTAL SORPTION AND PARTICLE STRUCTURE OF GAMMA IRRADIATED DISPERSED POLYTETRAFLUOROETHYLENE**

Structure and surface roughness of particles of the powdered PolyTetraFluoroEthylene (PTFE) gamma-irradiated (<sup>60</sup>Co) in the air, at room temperature, at the doses from 0 to 1000 kGy has been studied by the methods of low-temperature nitrogen sorption and transmission electron microscopy (TEM). It was shown that at the doses lower than 200 kGy the change in surface roughness and structure of PTFE particles is determined by the processes of radiation-induced crystallization. The processes of polymer destruction are dominating at higher absorbed doses. As a result of TEM-measurements the change of the surface microgeometry of the PTFE particles due to the formation of facets of the polymer nano-/microcrystals and the release of screw dislocations was found. Especially intense radiation crystallization occurs at doses 10 – 50 kGy. In the field of absorbed doses from 50 to 200 kGy the disappearance of the crystallites and growth of the amorphous phase were observed. The processes of destruction and the release of gases were dominated at doses of 200 – 1000 kGy; the formation of nanopores was observed also. The correlation between the measurement data obtained by the methods the low-temperature nitrogen sorption and TEM has been found. At doses lower than 200 kGy the calculated values of the fractal dimension of the surface of particles of PTFE powders increase from  $2.48 \pm 0.01$  to  $2.500 \pm 0.007$ . Subsequent increase in absorbed dose up to 1000 kGy leads to a decrease in  $D_s$  to  $2.49 \pm 0.02$ . Therefore, the increase in  $D_s$  value corresponds to the development of the surface of particles of powdered PTFE due to the occurrence of the radiation crystallization processes. On the contrary, the  $D_s$  reduction corresponds to the lowering of surface roughness of the PTFE particles due to radiation degradation and gas release. Thus, the application of fractal approach to analyze the results of sorption of nitrogen in gamma-irradiated PTFE powder allow to determine the nature and direction of radiation-chemical processes leading to changes in the surface roughness of the polymer particles.

В.В.ВАСИЛЕНКО, В.И.ПОЛЬСКИЙ, П.С.ДЖУМАЕВ,  
В.Н.ПЕТРОВСКИЙ, В.Л.ЯКУШИН  
Национальный исследовательский ядерный институт «МИФИ»,  
г. Москва, Россия  
E-mail: VIPolskij@mephi.ru

## **ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ**

В работе исследовалась степень поверхностного упрочнения различных низколегированных конструкционных сталей методом лазерных наплавов. Лазерные наплавки осуществлялись на установках «Сканер» и «Huffman HC-205». Были проведены исследования микроструктуры и элементного состава наплавов и зон термического влияния на подложках из выбранных сталей методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Были также проведены измерения микротвердости и построены зависимости изменения микротвёрдости по толщине самих наплавов и зон термического влияния. В результате установлены оптимальные режимы нанесения лазерных наплавов на подложки, позволяющие минимизировать размеры зон термического влияния и перепады значений микротвердости, что уменьшает вероятность трещин и несплошностей.

V.V.VASILENKO, V.I.POLSKY, P.S.DZHUMAЕV,  
V.N.PETROVSKY, V.L.YAKUSHIN  
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia  
E-mail: VIPolskij@mephi.ru

## **SURFACE HARDENING OF LOW ALLOY STRUCTURAL STEELS BY LASER CLADDING**

This paper presents the study of surface hardening of various low-alloy structural steels by laser cladding. Laser cladding was carried out by means of «Scanner» and «Huffman HC-205» laser devices. Microstructure and elemental composition of laser applied clad layers and the heat-affected zones (HAZ) of steel substrates were examined by scanning electron microscopy and x-ray microanalysis. Microhardness profile of surface layers which included cladding and HAZ regions was also investigated. As a result, the optimal modes of laser application of the clad layers on the steel substrate, allowing to minimize the size of HAZ and differences in microhardness values between HAZ and clad layer, which reduces the probability of formation of cracks and other microstructural defects were established.



Н.В.ВОЛКОВ<sup>1</sup>, Б.А.КАЛИН<sup>1</sup>,  
И.В.ОЛЕЙНИКОВ<sup>1</sup>, Н.В.СЫСОЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-технический институт межотраслевой информации», г. Москва, Россия  
E-mail: nvvolkov@mail.ru*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБОЛОЧЕК ИЗ СПЛАВА Э110**

Стабилизация структурно-фазового состояния в широком температурном диапазоне – это одна из наиболее важных проблем повышения свойств оксидных плёнок. Поэтому, поиск новых эффективных методов получения оксидов металлов с заданными физико-химическими, электрофизическими и термическими свойствами и их контроль – это важная и актуальная задача.

Цель данной работы – выделение особенностей состояния оксидных плёнок некоторых металлов Be, Al, Fe, Cu, Zr на металлической поверхности поликристаллических образцов методом инфракрасной спектроскопии.

Для идентификации резонансных эмиссионных линий разработан алгоритм обработки ИК-спектров и реализован на основе табличного процессора EXEL-2010, который позволил успешно выявить характерные резонансные линии и идентификации по ним неорганических химических соединений.

В рамках модели гармонического осциллятора рассчитаны резонансные частоты нормальных колебаний воды и ряда неорганических соединений: оксидов металлов – Be, Al, Fe, Cu, Zr и уточнены характеристические частоты для различных состояний (агрегатных, деформационных, фазовых).

Методами ИК-спектроскопии показана принципиальная возможность выявления особенностей в состояниях оксидных пленок на металлической подложке, позволяющая разрабатывать и совершенствовать технологию получения оксидных пленок с заданными свойствами.

N.V.VOLKOV<sup>1</sup>, B.A.KALIN<sup>1</sup>,  
I.V.OLEINIKOV<sup>1</sup>, N.V.SYSOEVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Federal State State-financed Organization «Scientific-technical institute  
of interbranch information», Moscow, Russia*

*E-mail: nvvolkov@mail.ru*

## **IR-SPECTROMENTRY APPLICATION FOR ANALYSIS OF OXIDE FILMS GROWN ON THE CLADDINGS SURFACE FROM E110 ALLOY**

Stabilization of structure-phase state in a wide temperature range is one of the most important problem of improving properties of oxide compounds. As such, the search of new effective methods for obtaining of metal oxides with desired physic-chemical, electro-physical and thermal properties and their control is important and relevant.

The aim of this work is identification features state of the oxide films of some metals Be, Al, Fe, Cu, Zr on the metal surface of the polycrystalline samples by infrared spectroscopy.

To identify the resonance emission bands algorithm of IR-spectra processing was developed and realized on the basis of table processor EXCEL-2010, which allow to reveal characteristic resonance bands successfully and identify inorganic chemical compounds.

In frame of simple oscillator model resonance frequencies of normal vibrations of water and some inorganic compounds: metal oxides – Be, Al, Fe, Cu, Zr were calculated and characteristic frequencies for different states (aggregate, deformation, phase) were specified.

By means of IR-spectroscopy fundamental possibility of revealing oxides films on metal substrate features state is shown, that allow to develop and optimize technology of production of the oxide films with desired properties.

Я.С.ВОЛОДИН, И.В.ЕРШОВА, А.В.НАЗАРОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ В ОКРЕСТНОСТИ НАНОПОР В ОЦК МЕТАЛЛАХ**

В большинстве случаев поля смещений в непосредственной близости от пор определялись уравнениями теории упругости. Такое описание имеет свои недостатки, поскольку оно не учитывает дискретность атомной структуры материалов и следует ожидать, что смещения атомов в окрестности нанопор должны существенно отличаться от предсказаний упомянутой теории. В наших недавних работах был разработан новый вариант метода Молекулярной Статики. В частности, в этой модели используется итерационная процедура, в которой атомная структура вблизи дефекта и постоянные, определяющие смещения атомов, погруженных в упругий континуум, рассчитываются самосогласованным образом. В данной работе используется упомянутая модель для изучения атомной структуры в окрестности нанопор различных размеров. Результаты показывают, что смещения атомов существенно различаются для различных кристаллографических направлений, и эти различия особенно велики в металлах с ОЦК структурой.

Y.S.VOLODIN, I.V.ERSHOVA, A.V.NAZAROV  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **SIMULATION OF ATOMIC STRUCTURE IN THE NEIGHBORHOOD OF NANOVoids IN BCC METALS**

Generally displacement fields in the vicinity of voids were determined by the equations of theory of elasticity. Such a description has its disadvantages as it doesn't take into account the discrete atomic structure of materials and it should be expected that atom displacements in the vicinity of nanovoids should significantly differ from the predictions of mentioned theory. In our recent works a new variant of Molecular Static method was developed. In particular in this model an iterative procedure is used in which the atomic structure in the vicinity of defect and constant, determining the displacement of atoms embedded into an elastic continuum, are obtained in a self-consistent manner. In this work we use our model for investigation of the atomic structure in the vicinity of nanovoids of different sizes. Results shows that the displacements are significantly different for variant crystallographic directions and these differences are particularly large in bcc metals.

Н.А.ГОЛОВИН<sup>1</sup>, М.Л.ТАУБИН<sup>1,2</sup>, А.А.ЯСКОЛКО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт научно-производственное объединение «Луч», г. Подольск, Московская область, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ ФОЛЬГ ВОЛЬФРАМА И ТАНТАЛА**

Высокие рабочие температуры катодов рентгеновских трубок вызывают огромные нагрузки на материалы, что приводит к значительному снижению эксплуатационных характеристик. Рабочие температуры могут быть уменьшены за счет использования новых материалов. В данной работе проведены исследования режимов диффузионной сварки фольг вольфрама и тантала для изготовления катодов мощных рентгеновских трубок (РТ). Биметаллический катод получен диффузионной сваркой танталовой фольги ( $d=50\text{мкм}$ ) с монокристаллическим сплавом W-Ta ( $d=200\text{мкм}$ ).

Цель работы – выявить особенности протекания диффузионных процессов при сварке образцов и их отжиге. Катоды исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа.

N.A.GOLOVIN<sup>1</sup>, M.L.TAUBIN<sup>1,2</sup>, A.A.YASKOLKO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>SRI SIA “Luch”, Podolsk, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

## **FEATURES OF TUNGSTEN AND TANTALUM FOIL TWO- LAYER STRUCTURE FORMATION**

High operating temperatures of X-ray tube emitters cause to enormous load materials, which lead to decrease working characteristics. Operating temperatures can be reduce by using a new materials. The diffusion bonding modes of tungsten and tantalum foil for the production of emitters for powerful X-ray tubes has been researched in this work. Bimetal cathode has been obtained by diffusion welding a tantalum foil ( $d = 50 \text{ mkm}$ ) with monocrystal W-Ta alloy. ( $D = 200 \text{ microns}$ ).

The purpose of work is revealing features of diffusion processes in welding and annealing the samples. Emitters were investigated by using a scanning electron microscope.

В.И.ГРАФУТИН<sup>1</sup>, И.А.ЕВСТЮХИНА<sup>2</sup>, В.П.КОЛОТУШКИН<sup>3</sup>,  
В.Ю.МИЛОСЕРДИН<sup>2</sup>, А.Ю.МИЩЕНКО<sup>2</sup>, С.Г.РУДАКОВ<sup>2</sup>,  
А.Л.УДОВСКИЙ<sup>2,4</sup>, Ю.В.ФУНТИКОВ<sup>1</sup>, А.С.ШАРАПОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Федеральное государственное предприятие – Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И.Алиханова, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Федеральное государственное унитарное предприятие – государственный научный центр Всероссийский институт неорганических материалов им. А.А.Бочвара, г. Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова, г. Москва, Россия*

E-mail: grafutin@itep.ru; mvyu\_46@mail.ru; kolotush@gmail.com aludovsky1@yandex.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗНАКА ПАРАМЕТРА БЛИЖНЕГО ПОРЯДКА И ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

Методами ядерного гамма - резонанса и аннигиляции позитронов исследованы изменения параметра ближнего порядка и изменений электронной плотности в модельных сплавах, содержащих Cr, Mo и W в качестве легирующих добавок. Обнаружен ряд особенностей в сплавах с ванадием в качестве легирующего элемента.

V.I.GRAFUTIN<sup>1</sup>, I.A.EVSTYUKHINA<sup>2</sup>, V.P.KOLOTUSHKIN<sup>3</sup>,  
V.YU.MILOSERDIN<sup>2</sup>, A.YU.MISCHENKO<sup>2</sup>, S.G.RUDAKOV<sup>2</sup>,  
A.L.UDOVSKY<sup>2,4</sup>, YU.V.FUNTIKOV<sup>1</sup>, A.S.SHARAPOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Federal state budget enterprise - Institute of theoretical and experimental physics named by A.I.Alikhanov, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Federal state unitary enterprise – state scientific center All-Russian research institute of non-organic materials named by A.A.Bochvar, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Institute of metallurgy and material science named by A.A.Baykov, Moscow, Russia*

E-mail: grafutin@itep.ru; mvyu\_46@mail.ru; kolotush@gmail.com; al-udovsky1@yandex.ru

## **INVESTIGATION OF PROCESSES OF CHANGE OF SHORT RANGE ORDERING AND ELECTRON DENSITY IN SIMULATING ALLOYS BASED ON IRON**

Changes of short-range ordering parameter and electron density in simulating alloys were investigated by nuclear gamma-resonance and positron annihilation methods in simulating alloys containing W, Cr and Mo, used as doping additions. A number of peculiarities were observed in alloys, containing vanadium as a dopi.

Г.Н.ЕЛМАНОВ, П.С.ДЖУМАЕВ, Е.А.ИВАНИЦКАЯ,  
Т.Л. МИЩЕНКО, А.Н.СУЧКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия*

## **ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ДИФфуЗИОННОЙ ПАЙКЕ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА БОСОДЕРЖАЩИМИ СПЛАВАМИ-ПРИПОЯМИ В УСЛОВИЯХ ОПЛАВЛЕНИЯ ГРАНИЦ ЗЕРЕН**

Представлены экспериментальные результаты исследования микро-  
структуры паяных швов и прилегающих к ним областей, полученных  
диффузионной пайкой чистых никеля и железа сплавами-припоями  
 $\text{Ni}_{71,5}\text{Cr}_{6,8}\text{Fe}_{2,7}\text{B}_{11,9}\text{Si}_{7,1}$  и  $\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$  соответственно.

Пайка проводилась с использованием клиновидного зазора в условиях,  
обеспечивающих оплавление границ зерен основного металла. Анализи-  
руется характер распределение бора и боридов в никеле и железе, а также  
изменение микроструктуры в процессе охлаждения железных образцов в  
результате фазового превращения  $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ .

G.N.ELMANOV, P.S.DZHUMAЕV, E. A IVANITSKAYA,  
T.L.MISHENKO, A.N.SUCHKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

## **FORMATION OF BRAZED JOINTS OF NICKEL AND IRON USING THE BORON-CONTAINING FILLER METALS IN CONDITIONS OF MELTING THE GRAIN BOUNDARIES**

The experimental results of the study of microstructure of brazed joints and  
adjacent areas obtained by the diffusion brazing of pure nickel and iron using  
the filler-metal alloys  $\text{Ni}_{71,5}\text{Cr}_{6,8}\text{Fe}_{2,7}\text{B}_{11,9}\text{Si}_{7,1}$  and  $\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$ , respectively, are pre-  
sented.

Soldering carried out using a tapered gap under conditions that allow the  
melting of the basic metals grain boundaries. The nature of the distribution of  
boron and borides in nickel and iron is analyzed, as well as the microstructure  
changes during cooling iron samples as a result of the phase transformation of  
 $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ .

И.В.ЕРШОВА, А.В.НАЗАРОВ

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

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ МЕЖДОУЗЕЛЬНЫХ АТОМОВ В МЕТАЛЛАХ С ОЦК СТРУКТУРОЙ**

Эта работа посвящена применению модели, разработанной на основе метода молекулярной статистики, для изучения особенностей диффузии точечных дефектов в металлах. В частности, разработанная модель позволяет рассчитать объемы образования, которые описывают влияние давления на концентрацию дефектов в твердых телах. Наша модель реализует новый подход, который дает возможность самосогласованного определения атомной структуры вблизи дефекта и констант, характеризующих смещения атомов в упругой матрице вокруг расчетной ячейки. Кроме того, в модели принимается во внимание, что энергия идеальной системы и энергия системы с дефектом по-разному зависят от внешнего давления, и это дает дополнение к значениям объемов образования. Это добавление обычно не принимается в расчет, но оно может составлять значительную часть объема образования. Энергии и объемы образования рассчитаны для междоузельных атомов ряда ОЦК металлов.

I.V.ERSHOVA, A.V.NAZAROV

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **SIMULATION OF PRESSURE EFFECTS ON SELF INTERSTITIALS CONCENTRATION IN BCC METALS**

This work is devoted to applying of a model based on the molecular static method to study the diffusion features of point defects in metals. In particular, the developed model allows calculating formation volumes that describe the influence of pressure on the defect concentration in solids. Our model realizes a new approach that makes it possible to self-consistently determine the atomic structure near a defect and constants characterizing the displacement of atoms in an elastic matrix around a computational cell. Also we take into consideration that the energy of a perfect system and the energy of system with a defect differently depend on the outer pressure, and this gives an addition to the values of formation volumes. This addition isn't usually taken into calculation but it can comprise a considerable part of formation volume. The energies and volumes of formation are calculated for interstitials in bcc metals.

**В.А.ЖИТЕЛЕВ, М.В.КУПРИЕНКО, А.А.ИСАЕВ,  
Ф.Н.КРЮКОВ, Е.А.ЗВИР, А.В.СТРОЖУК, Г.Д.НУРУЛЛИНА**

*АО «Государственный научный центр –  
Научно-исследовательский институт атомных реакторов»,  
г. Димитровград, Россия  
E-mail: oit@niiar.ru*

## **ЭМИССИОННАЯ ГАММА-ТОМОГРАФИЯ НЕГЕРМЕТИЧНОЙ ЭТВС РЕАКТОРА БОР-60**

Компьютерная томография является одним из эффективных методов контроля, позволяющих получить изображение внутреннего строения объекта без его разрушения. Эмиссионная томография построена на основе регистрации собственного излучения объекта и решает задачу восстановления в сечении распределения коэффициента эмиссии. Получение изображений внутренней структуры осуществляется обработкой, так называемых, проекционных данных, полученных при сканировании объекта под различными углами. В данной работе с применением метода гамма эмиссионной томографии была исследована негерметичная ЭТВС реактора БОР-60, отработавшая до выгорания топлива  $B=(0,72\pm 0,03) \% \text{ т. а.}$

Гамма-сканирование ЭТВС проводилось в 12-ти угловых ориентациях на установке, имеющей механизмы вертикального и горизонтального позиционирования. Измерительно-управляющая система включала цифровой Ge-детектор гамма-излучения и спектрометрическое устройство компании «ORTEC».

Реконструкция распределений  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{58}\text{Co}$  по сечению ЭТВС проводилась с использованием алгебраических методов [1], в основе которых лежит дискретизация (разбиение) области, в которой задан исследуемый объект, на конечное число подобластей (ячеек). В пределах одной подобласти интенсивность гамма-излучения радионуклидов и линейный коэффициент ослабления излучения считаются постоянными.

По результатам реконструкции изображений можно сделать вывод о расположении твэлов и конструктивных элементов ЭТВС в исследуемом сечении.



V.A.ZHITELEV, M.V.KUPRIENKO, A.A.ISAEV,  
F.N.KRYUKOV, E.A.ZVIR, A.V.STROZHUK,  
AND G.D. NURULLINA

*JSC « State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors»,  
Dimitrovgrad, Russia  
E-mail: oit@niiar.ru*

## **GAMMA EMISSION TOMOGRAPHY OF A BOR-60 UNTIGHT EFA**

Computed tomography is an effective inspection technique that enables inner structure imaging without object destruction. Emission tomography is based on recording object's own radiation. It resolves the objective of recovering the emission factor distribution section. Inner structure imaging is done by processing projection data obtained in object scanning from different angles. We examined a BOR-60 untight EFA ( $0.72 \pm 0.03$ ) % h.a. using gamma emission tomography.

Gamma scanning of the EFA was performed in twelve angle orientations using equipment with vertical and horizontal positioning tools. A digital Ge detector (gamma) and ORTEC spectrometry device were used in a data measurement and control system.

Distribution of Nb-95, Mn-54, and Co-58 along the EFA cross-section was reconstructed using algebraic techniques [1], which are based on subdivision (discrete sampling) of an area assigned for an examined object into the finite number of sub-areas (cells). Gamma rays intensity of radionuclides and linear attenuation coefficient are considered to be constant within one sub-area.

From the image reconstruction data conclusions can be made about the arrangement of fuel elements and EFA design components in the examined section.

Р.А.ИБРАГИМОВА<sup>1</sup>, М.Г.ГАНЧЕНКОВА<sup>1</sup>, В.А.БОРОДИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*НИИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия*

## **AB-INITIO МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРОЗИИ ФЕРРИТО- МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ ЭП-823**

Разработка коррозионно-стойких материалов активной зоны реактора является сложной задачей, в которой широко применимы методы аналитического и численного моделирования. Интенсивное коррозионное воздействие обусловлено наличием жидкометаллического теплоносителя, содержание кислорода в котором приводит к росту оксидного слоя сложного состава, который впоследствии разрушается. В работе методами ab-initio моделирования изучен процесс накопления вакансий на интерфейсе магнетит-сталь, с целью выяснения механизма порообразования, приводящего к отслоению.

R.IBRAGIMOVA<sup>1</sup>, M.GANCHENKOVA<sup>1</sup>, V.BORODIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

## **AB-INITIO MODELLING OF CORROSION EFFECTS IN FERRITIC-MARTENSITIC STEEL EP-823**

The development of corrosion-resistant steels for the nuclear reactors is a complicated task, where is methods of analytical and numerical modeling meant to be widely used. Highly intensive corrosion effect is related to saturated with oxygen lead melt, which yields to oxidation of steel. The formed oxide layer has a complex composition and repeatedly exfoliates during overall lifecycle of active zone. Therefore, ab-initio modeling of the vacancies accumulation in the magnetite-steel interface has been performed in order to figure out a mechanism of pore formation, resulting in exfoliation.

А.А.ИВАННИКОВ, Б.А.КАЛИН, А.Н.СУЧКОВ,  
Д.М.БАЧУРИНА, М.А.ПЕНЯЗЬ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАЙКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СОЕДИНЕНИЙ РЕАКТОРНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИКЕЛЕВЫХ БОРСОДЕРЖАЩИХ ПРИПОЕВ**

В работе проведена диффузионная пайка коррозионностойких сталей аустенитного (12X18H10T) и ферритно-мартенситного классов (16X12MBCФБР) никелевыми борсодержащими припоями СТЕМЕТ 1301А (Ni-7Cr-3,5Fe-4,5Si-2,6B), СТЕМЕТ 1350 (Ni-19Cr-9Co-6Si-5,5Mo-1,3B) и Ni-22Cr-7,5Si-1,5B.

С помощью металлографических исследований показано, что соединение имеет сложную гетерогенную структуру, которую можно разбить на три зоны. Твердый раствор, область, обогащенная боридами и эвтектическая зона, которая исчезает при увеличении времени экспозиции. Методом рентгенофазового и микрорентгеноспектрального анализов изучен фазовый состав области обогащенной боридами. Показано, что они имеют сложный состав, отвечающий соединению  $(\text{Fe, Cr, Ni})_2\text{B}$ .

Для определения механизма зарождения боридов проведена закалка в воду соединения 12X18H10T, полученного с помощью припоя СТЕМЕТ 1301А при температуре 1100 °С и выдержке 15 минут. Выявлено, что формирование боридов происходит во время изотермической выдержки, и при медленном охлаждении из-за изменения растворимости их содержание увеличивается незначительно. Установлено, что важную роль при формировании структуры околошовной зоны имеет концентрация хрома в сплаве-припое и основном материале. При содержании хрома в припое больше, чем в основном материале удастся значительно снизить содержание боридов.

A.A.IVANNIKOV, B.A.KALIN, A.N.SUCHKOV,  
D.M.BACHURINA, M.A.PENYAZ

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **EFFECT OF TIME-TEMPERATURE BRAZING PARAMETERS ON JOINT MICROSTRUCTURE OF REACTOR STAINLESS STEELS USING NICKEL-BASED FILLER METALS WITH BORON**

Transient liquid phase (TLP) bonding was used to join austenitic (18Cr-10Ni-Ti, wt.%) and ferritic-martensitic (12Cr-Mo-W-Si-V-Nb-B, wt.%) stainless steels using Ni-based filler metal with boron STEMET 1301A (Ni-7Cr-3,5Fe-4,5Si-2,6B), STEMET 1350 (Ni-19Cr-9Co-6Si-5,5Mo-1,3B) and Ni-22Cr-7,5Si-1,5B.

Microstructure images shows that joint consists of three distinct zones, such as solid solution, zone enriched with boride precipitates and eutectic zone, which can be avoided in case of longer brazing time. Phase composition of boride enriched zone was investigated by X-ray diffraction and electron microprobe analyses. It is shown that they have a (Fe, Cr, Ni)<sub>2</sub>B compound.

Quenching was applied to (18Cr-10Ni-Ti)/STEMET 1301A/(18Cr-10Ni-Ti) specimen for investigation of boride nucleation mechanism at 1100 °C, 15min brazing regime. It is shown that borides occur during isothermal holding and at cooling process they grow not significant. It is stated that chromium concentration influences well on microstructure of boride enriched zone. If brazing filler metal includes more chromium than steel, boride content decreases.

А.А.ИВАННИКОВ<sup>1</sup>, О.Н.СЕВРЮКОВ<sup>1</sup>,  
И.Е.ЛЮБЛИНСКИЙ<sup>2</sup>, А.В.ВЕРТКОВ<sup>2</sup>, М.А.ПЕНЯЗЬ<sup>1</sup>,  
В.Е.МИСНИКОВ<sup>1</sup>, Ю.О.КОЧНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «Красная звезда», г. Москва, Россия

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ МОЛИБДЕНА СО СТАЛЬЮ 12Х18Н10Т ДЛЯ КАПИЛЛЯРНЫХ СИСТЕМ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКАМАКОВ**

При разработке дивертора токамака с емкостью для подпитки жидким металлом приемной поверхности возникает необходимость соединения разнородных материалов. В узле переходника с молибденовой трубки на стальную (12Х18Н10Т) предполагается использовать паяное соединение.

В работе рассмотрен метод получения прочного, термостойкого и герметичного соединения молибдена с коррозионностойкой сталью 12Х18Н10Т с использованием технологии высокотемпературной пайки сплавом-припоем на никелевой основе Ni-7Cr-4Fe-4Si-3B-0,8Mn мас.% (СТЕМЕТ 1301).

Отработана технология соединения коаксиальных цилиндрических образцов, позволяющая получить оптимальные зазоры, которые обеспечивают однородность паяного шва без хрупкой эвтектической прослойки.

Паяные образцы испытаны на термостойкость. После термоциклирования соединения проверены на герметичность с помощью гелиевого тестискателя. Нарушения сплошности обнаружено не было.

Для определения механических характеристик соединения измерена микротвёрдость области шва и проведены испытания на срез. Показано, что прочностные характеристики сильно зависят от величины зазоров между паяемыми материалами. Для образцов, собранных с оптимальным зазором предел прочности на срез составляет  $500 \pm 50$  МПа.

A.A.IVANNIKOV<sup>1</sup>, O.N.SEVRYUKOV<sup>1</sup>, I.E.LYUBLINSKY<sup>2</sup>,  
A.V.VERTKOV<sup>2</sup>, M.A.PENYAZ<sup>1</sup>, V.E.MISNIKOV<sup>1</sup>,  
YU.O.KOCHNOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*JSC «Red Star», Moscow, Russia*

## **THE APPLICATION OF BRAZING TO JOINT Mo WITH 12Cr18Ni10Ti FOR CAPILLARY SYSTEMS IN INTRACHAMBER ELEMENTS OF TOKAMAK**

During the process of developing a divertor with the volume for replenishment the receiving surface with liquid metal, it becomes necessary to joining dissimilar materials. It is supposed to use brazed joint at the junction from molybdenum pipe on steel pipe (12Cr18Ni10Ti).

In this work it was considered the method of producing a durable, heat-resistant and airtight connection of molybdenum with stainless steel 12Cr18Ni10Ti with using nickel-based filler metal: Ni-7Cr-4Fe-4Si-3B-0,8Mn wt.% (STEMET 1301).

The technology of the joining of coaxial cylindrical samples is developed. It is allowed to get optimal gaps, which are provided the homogeneity of brazed joint without brittle eutectic layer.

Brazed samples were tested for thermal stability. The samples were checked for leaks using a helium leak detector after the thermal cycling. Discontinuities were not detected.

The microhardness of the seam area was measured and shear tests were carried out to determine mechanical properties of the joint Mo/12H18N10T.

It has been shown that the strength properties strongly depend on the magnitude of gap between connected materials. For samples made with the optimum gap shear strength is  $500 \pm 50$  MPa.

М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ,  
В.А.ФЕСЕНКО, М.Д.ГРИЦКЕВИЧ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

## **ОСОБЕННОСТИ ТЕКСТУРООБРАЗОВАНИЯ В ЛИСТАХ ИЗ ОДНОФАЗНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТИТАНА ПРИ ИХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМООБРАБОТКЕ**

Изучены процессы текстурообразования в листах из однофазных и многофазных сплавов на основе титана при их пластической деформации и термообработке. Продемонстрировано торможение развития текстурообразования в  $\alpha$ -Ti при прокатке двухкомпонентного сплава VT-16. Установлены особенности деформации  $\beta$ -фазы в двухфазном сплаве. Наличие интерметаллидной фазы существенно снижает пластичность многофазного сплава, что препятствует его холодной прокатке. При рекристаллизации двухфазного сплава новые зерна  $\alpha$ -Ti сохраняют ориентацию призматических нормалей, приобретенную в результате предшествующей пластической деформации.

M.G.ISAENKOVA<sup>1</sup>, Yu.A.PERLOVICH<sup>1</sup>,  
V.A.FESENKO<sup>1</sup>, M.D.GRITSKEVICH<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **FEATURES OF TEXTURE IN SHEETS OF SINGLE-PHASE AND MULTIPHASE ALLOYS BASED ON TITANIUM DURING THEIR PLASTIC DEFORMATION AND HEAT TREATMENT**

Features of texture in sheets of single-phase and multiphase alloys based on titanium during their plastic deformation and heat treatment are investigated. The inhibition of the development of texture in  $\alpha$ -Ti at a rolling two-component alloy VT-16 is demonstrated. The features of deformation of  $\beta$ -phase in two-phase alloy are determined. The presence of intermetallic phase significantly reduces the ductility of a multiphase alloy that hinders its cold-rolling. At recrystallization of two-phase alloy sheets, the new  $\alpha$ -Ti grains retain the orientation of the prismatic axes, acquired as a result of prior plastic deformation.

М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, В.В.НОВИКОВ<sup>1,2</sup>,  
О.А.КРЫМСКАЯ<sup>1</sup>, А.В.ГРИГОРЬЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов, г. Москва, Россия

## **ЗАВИСИМОСТЬ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ ОТ ИХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ**

Анизотропия свойств текстурованных поликристаллических металлов с гексагональной плотноупакованной структурой определяется ориентацией базисных нормалей, оцениваемой суммой их проекций на выбранное направление (интегральный текстурный параметр Кёрнса или  $f$ -параметр). На большом числе образцов промышленных циркониевых труб установлена взаимосвязь анизотропии механических свойств и параметров кристаллографической текстуры. Значения коэффициентов анизотропии пределов текучести, измеренных в осевом и тангенциальном направлениях при температуре 380°C, коррелируют с величинами соотношения  $f$ -параметров в радиальном и тангенциальном направлениях, с увеличением которого снижается анизотропия предела текучести.

M.G.ISAENKOVA<sup>1</sup>, Yu.A.PERLOVICH<sup>1</sup>, V.V.NOVIKOV<sup>1,2</sup>,  
O.A.KRYMSKAYA<sup>1</sup>, A.V.GRIGORYEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

<sup>2</sup>High-tech Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russia

## **THE DEPENDENCE OF THE ANISOTROPY OF ZIRCONIUM TUBE PROPERTIES FROM THEIR CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE**

The anisotropy of properties of textured polycrystalline metals with a hexagonal close-packed structure is determined by the basal normals orientation, which is evaluated by the sum of their projections along selected direction (Kearns integral texture parameter or  $f$ -parameter). An interrelation between the anisotropy of mechanical properties and parameters of crystallographic texture was established for a large number of samples of industrial zirconium tubes. Values of the anisotropy parameters of the yield stresses, measured for the axial and tangential directions at temperature 380°C, correlate with the  $f$ -parameters ratio for radial and tangential directions, which decreases with an increase of the yield stress anisotropy.



Б.А.КАЛИН, О.Н.СЕВРЮКОВ, А.А.ИВАННИКОВ,  
М.А.ПЕНЯЗЬ, И.В.ФЕДОТОВ, Д.М.БАЧУРИНА  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЕДИНЕНИЙ ИЗ РЕАКТОРНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ БЫСТРО- ЗАКАЛЁННЫХ СПЛАВОВ-ПРИПОЕВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ni-Si-Be**

Использование классических бористых припоев для соединения реакторных коррозионностойких сталей различных классов приводит к образованию в диффузионной зоне сложной гетерогенной структуры, которая содержит выделения промежуточных фаз, таких как силициды и бориды. Последние выпадают по границам зёрен, активно распространяясь вглубь основного материала, что негативно сказывается на прочностных характеристиках соединений при динамических нагрузках и в условиях термоциклирования.

Для устранения данной структуры в паяном шве предложено использование безбористых сплавов-припоев на основе системы Ni-Si-Be. С помощью припоев этой системы проведена пайка сталей 12X18H10T и 16X12MBCФБР.

Для определения механических характеристик испытаны паяные образцы на одноосное растяжение и ударную вязкость. Полученные значения предела прочности и работы вязкого разрушения для соединений, паянных разработанными припоями, превосходят результаты, полученные на образцах соединённых с помощью широко используемого бористого припоя Ni-3,5Fe-7,5Cr-4,5Si-2,6B, масс.% (аналог сплава BNi-2).

Методами электронной микроскопии исследованы фрактографии и профили изломов испытанных образцов, проанализированы механизмы разрушения соединений, полученных с помощью бериллиевых и бористых припоев. Показано, что в случае первых паяные швы более пластичные и имеют однородную структуру, с отсутствием гетерогенностей в диффузионной зоне. На основе полученных данных можно сделать вывод, что замена бора на бериллий в никелевом сплаве-припое позволяет повысить прочностные характеристики соединений. Продемонстрирована возможность использования разработанного припоя для соединения энергонапряженных элементов из сталей различного класса.

B.A.KALIN, O.N.SEVRYUKOV, A.A.IVANNIKOV,  
M.A.PENYAZ, I.V.FEDOTOV, D.M.BACHURINA,  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **THE INVESTIGATION OF STRENGTH CHARACTERISTIC OF JOINTS OF REACTOR STAINLESS STEEL OBTAINED BY FILLER METAL BASED ON Ni-Si-Be**

The use of classical boron filler metals for joining different classes of reactor stainless steels leads to the formation of complex heterogeneous structure in the diffusion zone, which contains particles of intermediate phases such as silicides and borides. The last fall out at grain boundaries, actively spreading deep into the base material. This has a negative effect on its mechanical properties under dynamic loading and thermal cycling conditions.

The use of non-boron filler metal based on Ni-Si-Be system is proposed to resolve this structure in the brazed seam. The brazing of steel 12Cr18Ni10Ti and 16Cr12MoNbSiVWB was carried out by using of the alloy of this system.

The brazed samples were tested for uniaxial tensile and toughness to determine the mechanical properties. The resulting values of tensile strength and work ductile fracture for compounds, brazed by designed filler metals, exceed the results obtained on samples connected by widely used boron filler metal Ni-3,5Fe-7,5Cr-4,5Si-2,6B, wt.% (analog of the BNi-2).

The fractography and profiles of the fractures of tested samples are investigated by electron microscopy, the mechanisms of destruction of the compounds obtained by using beryllium and boron filler metals are analyzed. It is shown that in the case of first brazed seams are more plastic and have a homogeneous structure with the absence of heterogeneities in the diffusion zone. Based on the obtained data, it can be concluded that the replacement of boron on a beryllium in the nickel brazing alloy can improve mechanical properties of the joints. The possibility of using the developed filler metal to connect the energy-intensive elements of the steels of different classes is demonstrated.

И.В.КОЗЛОВ, Г.Н.ЕЛМАНОВ,  
П.С.ДЖУМАЕВ, О.В.ЕМЕЛЬЯНОВА  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия  
E-mail: ilya\_mephist@mail.ru, gnelmanov@rambler.ru*

## **ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МИКРОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА**

Проведено исследование структуры, состава, фрактограмм излома и характеристик гигантского магнитного импеданса (ГМИ) сверхтонких металлических волокон диаметром порядка 13 мкм системы Co-Fe-Si-B в зависимости от методов и режимов химического травления и термической обработки. Целью являлось повышение эффекта ГМИ микропроводов, перспективных для использования в высокочувствительных датчиках слабого магнитного поля. Показано, что сочетание различных методов обработки проводов может приводить к существенному улучшению характеристик ГМИ.

I.V.KOZLOV, G.N.ELMANOV,  
P.S.DZUMAEV, O.V.EMELYANOVA  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia  
E-mail: ilya\_mephist@mail.ru, gnelmanov@rambler.ru*

## **INVESTIGATION OF STRUCTURAL FEATURES OF CO-BASED COMPOSITION MICROWIRES**

The effect of heat treatment and chemical etching on the microstructure and composition evolution as well as on the giant magnetic impedance (GMI) characteristics of ultrathin Co-Fe-Si-B amorphous microfibers was investigated by means of scanning electron microscopy and diagonal GMI component technique. The aim of this study was to increase the GMI effect of microwires which are promising for use in highly sensitive sensors of a weak magnetic field. It was shown that a combination of the different processing techniques leads to the significant improvement of microwire's GMI characteristics.

В.Н.КОЛОКОЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, В.Ф.ДЕГТЯРЕВ<sup>2</sup>, И.В.БОРОВИЦКАЯ<sup>1</sup>,  
П.В.СИЛИН<sup>3</sup>, В.Я.НИКУЛИН<sup>3</sup>, Е.Н.ПЕРЕГУДОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН

<sup>2</sup>Московский технический университет связи и информатики

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

E-mail: v.kolokoltsev@yandex.ru

## **ФИКСАЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕКЛЯННЫХ ПЛАСТИНОК ПРИ НАНЕСЕНИИ ТОНКИХ ПЛЕНОК НА УСТАНОВКЕ «ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС»**

Упругая деформация в прозрачных средах обычно исследуется методом фотоупругости. Для непрозрачных сред применяют метод пленочных покрытий, тензометрический метод. При снятии внешней нагрузки интерференционная картина, соответствующая упругой деформации материала, исчезает.

Обнаружено, что упругое деформационное состояние тонкой стеклянной пластинки при действии сосредоточенной нагрузки может быть зафиксировано при напылении тонкой металлической пленки. Напыление тонких пленок меди выполняли при прохождении плазмы через медную трубку на установке «Плазменный фокус». После снятия нагрузки наблюдали картины интерференции в стеклянных пластинах в виде колец Ньютона и изогир в монохроматическом свете на сканерах ССD, использующих люминесцентные лампы с холодным катодом. Предполагается, что медная пленка фиксирует рельеф поверхности стеклянной пластинки в момент деформации и сохраняет его при снятии нагрузки. В случае сосредоточенной нагрузки этот рельеф имеет форму тонкой линзы большого радиуса. По этой причине интерференция когерентных лучей света в тонком воздушном зазоре между стеклом планшета сканера и поверхностью линзы имеет форму колец Ньютона. В этом случае при сканировании обратной стороны пластинки наблюдаются изогир. Представленная методика может быть использована при анализе механических напряжений в различных оптических элементах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №15-02-05995а).

V.N.KOLOKOLTSEV<sup>1</sup>, V.F.DEGTIAREV<sup>2</sup>,  
I.V.BOROVITSKAYA<sup>1</sup>, P.V.SILIN<sup>3</sup>, V.YA.NIKULIN<sup>3</sup>,  
E.N.PEREGUDOVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of RAS,

<sup>2</sup>Moscow technical University of communications and Informatics

<sup>3</sup>P.N.Lebedev Physical Institute of RAS

E-mail: v.kolokoltsev@yandex.ry

## **FIXING OF THE STRESSED STATE OF GLASS PLATES BY COATING OF THIN FILMS WITH USE OF «PLASMA FOCUS» INSTALLATION**

Elastic deformation in transparent mediums is usually studied by the photo-elasticity method. For opaque mediums the method of film coating and strain gauge method are used. After the external load was removed, the interference pattern corresponding to elastic deformation of the material disappears.

It is found that the elastic deformation state of the thin glass plate under the action of concentrated load can be fixed during the deposition of a thin metal film. Deposition of thin copper films was carried out by passing of the plasma through the copper tube in the «Plasma Focus» installation. After removing of the load, interference pattern on the glass plates was observed in the form of Newton's rings and isogers in non-monochromatic light on the CCD scanners which uses fluorescent lamps with cold cathode. It is supposed that the copper film fixes the relief of the surface of the glass plate at the time of deformation and saves it when the load is removed. In the case of a concentrated load, this relief has the shape of a thin lens of large radius. For this reason, the interference of coherent light rays in a thin air gap between the glass of the scanner's flatbed and the lens surface has the shape of Newton's rings. In this case, when scanning the back side of the plate isogyres observed. The presented method can be used in the analysis of mechanical stress in a various optical elements.

The work was supported by the RFBR (project # 15-02-05995a).

С.В.КОРОВИН, П.А.СИВАК, А.Б.СИВАК

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,*

*г. Москва, Россия*

*E-mail: korovin\_sv@nrcki.ru*

## **ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСЛОКАЦИОННЫХ СТОКОВ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ГЦК КРИСТАЛЛЕ Pu**

Методом кинетического Монте-Карло рассчитаны эффективности дислокационных стоков для радиационных дефектов (вакансии, собственные межузельные атомы) в  $\delta$ -Pu в интервале дислокационных плотностей  $8 \times 10^{11} - 2 \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$  и интервале температур 200 – 748 К. Рассмотрены винтовые, смешанные и краевые полные дислокации с вектором Бюргерса  $1/2\langle 110 \rangle$  в различных системах скольжения. Энергии взаимодействия собственных точечных дефектов с дислокациями рассчитаны методом анизотропной теории упругости. Предложены аналитические выражения для зависимости расчетных значений эффективности дислокационных стоков от температуры и дислокационной плотности.

S.V.KOROVIN, P.A.SIVAK, A.B.SIVAK

*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

*E-mail: korovin\_sv@nrcki.ru*

## **DISLOCATION SINK EFFICIENCIES FOR RADIATION DEFECTS IN FCC Pu CRYSTAL**

The sink efficiency of perfect dislocations for radiation defects (vacancies, self-interstitial atoms) in  $\delta$ -Pu has been calculated by an object kinetic Monte Carlo method in a temperature range of 200 – 748 K and range of dislocation densities from  $8 \times 10^{11}$  to  $2 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ . Screw, mixed, and edge dislocations with a Burgers vector  $1/2\langle 110 \rangle$  in different slip systems are analyzed. The interaction energies of radiation defects with dislocations are calculated using the anisotropic theory of elasticity. Analytical expressions are proposed for the dependences of the calculated values of dislocation sink efficiency on temperature and dislocation density.

А.Б.КРУГЛОВ, В.Б.КРУГЛОВ, П.Г.СТРУЧАЛИН,  
В.С.ХАРИТОНОВ

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

## **КОНТРОЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЭЛОВ С ПЛОТНЫМ ТОПЛИВОМ**

Информация о теплопроводящих свойствах тепловыделяющих элементов и их изменении в процессе работы необходима для обоснования безопасности и работоспособности активных зон ядерных энергетических установок. В проектах перспективных ЯЭУ планируется использование твэлов с плотными видами топлива (UN, UC, U-мет). Данных о поведении теплофизических свойств такого топлива при выгорании на настоящий момент недостаточно.

В настоящей работе приведено описание методики измерения теплопроводности топлива и контактного термического сопротивления «топливо-оболочка» неразрушающим методом, приведена схема экспериментальной установки и результаты измерений на макетах тепловыделяющих элементов.

A.B.KRUGLOV, V.B.KRUGLOV, P.G.STRUCHALIN,  
V.S.KHARITONOV

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **THE CONTROL OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF FUEL RODS WITH DENSE FUEL**

The information about heat-conducting properties of the fuel elements and their change in the work is needed to substantiate the safety and efficiency of the cores of nuclear power plants. The projects promising NEI plans to use rods with dense fuels (UN, UC, U-met). Data on the behavior of thermo-physical properties of the fuel under irradiation at the moment is not enough.

In this work we describe the methodology for measuring the thermal conductivity of the fuel and the thermal contact resistance "fuel-shell" by non-destructive method, a diagram of the experimental setup and the results of measurements on mock-ups of the fuel elements.

Б.П.МИХАЙЛОВ, А.Б.МИХАЙЛОВА, В.Ф.ШАМРАЙ,  
И.В.БОРОВИЦКАЯ

*Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки Институт  
металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН,*

*г. Москва, Россия*

*E-mail: borismix@yandex.ru*

## **ДЕГРАДАЦИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПАРАМЕТРОВ ВТСП ЛЕНТ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ТЕРМООБРАБОТКИ**

Как известно, токнесущие свойства ВТСП лент являются структурно чувствительными параметрами и в значительной степени зависят от размеров зерен, их морфологии, текстуры, наличия центров пиннига и др. Эти параметры структуры можно направленно изменять за счет приложения ударных нагрузок.

В докладе представлены результаты исследования воздействия ударных нагрузок различной интенсивности от 0,35 до 100 Дж/см<sup>2</sup> на структуру и сверхпроводящие характеристики Bi-2223 лент. Установлена сильная деградация критического тока  $I_c$  и критической температуры  $T_c$  при воздействии ударов с удельной энергией выше 5 Дж/см<sup>2</sup>.

Рассматриваются структурные изменения в сверхпроводящих прослойках под воздействием ударных нагрузок. Последующая термообработка при температурах 825 – 840°С в течение 5 -10 часов приводит к восстановлению сверхпроводящих характеристик. Сверхпроводящий переход после отжига становится более резким, а значения  $T_c$  на 4-5 К выше по сравнению с исходными значениями.. Критический ток увеличивается монотонно с возрастанием длительности отжига.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ №15-08-04045.



B.P.MIKHAILOV, A.B.MIKHAILOVA, V.F.SHAMRAY,  
I.V.BOROVITSKAYA  
*A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Materials Russian RAS,  
Moscow, Russia  
E-mail: borismix@yandex.ru*

## **DEGRADATION AND RESTORATION SUPERCONDUCTING PARAMETERS OF HTSC TAPES UNDER MECHANICAL LOADS AND HEAT TREATMENT**

As it is known, the current-carrying properties of HTSC tapes are structurally sensitive parameters, and largely depend on the grain size, morphology, texture, presence pinning centers and others. These structural parameters may be changed by shock loading actions.

The report presents the results of research of varying intensity shock loads effects from 0.35 to 100 J/cm<sup>2</sup> on the structure and characteristics of superconducting Bi-2223 tapes. A strong degradation of the critical current  $J_c$  and critical temperature  $T_c$  were shown for tapes exposed by strikes with a specific energy higher than 5 J/cm<sup>2</sup>.

The structural changes in the superconducting interlayers exposed by shock loads are researched. Subsequent thermal treatment at temperatures from 825 °C up to 840°C for 5-10 hours leads to the restoration of the superconducting characteristics. The superconducting transition after annealing becomes sharper, and the values of  $T_c$  4-5 K higher than the baseline values. The critical current increases monotonically with increasing annealing time.

This work was supported by RFBR project №15-08-04045.

А.В.НАЗАРОВ<sup>1</sup>, А.А.МИХЕЕВ<sup>2</sup>, А.Г.ЗАЛУЖНЫЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет дизайна и технологии,  
г. Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА НАНОПОР В МЕТАЛЛАХ С ГЦК СТРУКТУРОЙ**

В работе, на основе недавно развитого теоретического подхода, изучается, как упругие поля, возникающее в окрестности нанопор, влияют на потоки вакансий. В отличие от наших предыдущих работ упомянутый подход учитывает, что значения деформаций различны в седловой точке и в равновесной позиции атома. Одной из главных целей этой работы является моделирование скорости роста пор в кубических металлах. Нелинейное уравнение диффузии вакансий, в котором было учтено влияние упругих полей вблизи поры на поток, решается численными методами. Затем, на основе полученных решений, рассчитывается скорость роста поры. Показано, что особенности отличающие используемое уравнение от тех, которые известны из других работ, изменяют кинетику роста пор малого размера (нанопор). Проведены расчеты скорости роста пор в ГЦК металлах при различных условиях.

A.V.NAZAROV<sup>1</sup>, A.A.MIKHEEV<sup>2</sup>, A.G.ZALUZHNYI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Moscow State University of Design and Technology, Moscow, Russia*

## **SIMULATION OF NANOVOID GROWTH IN FCC METALS**

We examine how elastic stress, arising from nanovoids influence the diffusion vacancy fluxes using new approach. Our approach takes into account, that strain values are different in the saddle point and in the rest atom position, in differ from our earlier works. One of the chief aims of our work is to simulate the growth rate of voids in cubic metals. The nonlinear diffusion equation for vacancies in which the influence of elastic stress near the void on flux was taken into account is resolved by numerical methods. Then the growth rate of void is calculated. The feature distinguishes the equation from ones that are known changes the growth kinetics of pores the small size (nanovoid). We simulate void growth rate in FCC metals under different conditions.

В.И.ПАСТУХОВ<sup>1,2,3</sup>, С.А.АВЕРИН<sup>1,3</sup>, В.Л.ПАНЧЕНКО<sup>1,3</sup>,  
И.А.ПОРТНЫХ<sup>1</sup>, П.Д.ФРЭЙАР<sup>4</sup>, Л.А.ДЖАНУЦИ<sup>5</sup>, Ф.А.ГАРНЕР<sup>3,6</sup>

<sup>1</sup>АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный,  
Свердловская область, Россия

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого президента России  
Б.Н.Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Westinghouse Electric Company, Pittsburgh PA, USA

<sup>5</sup>L.A. Giannuzzi & Associates LLC, Fort Myers, FL, USA

<sup>6</sup>Radiation Effects Consulting LLC, Richland WA, USA

## **ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАТНО РАССЕЯННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ШИРОКОФОРМАТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОР, ОБРАЗОВАННЫХ ПРИ НЕЙТРОННОМ ИЛИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Показано, что при определенной настройке сканирующего электронного микроскопа и проведении необходимой подготовки поверхности образца становится возможным получать изображение пор в облученном материале. При этом возможно получить изображения пор на глубине до 500 нм и глубже с большой площади поверхности образца. Минимальный размер наблюдаемых пор при этом составляет порядка 5-10 нм. Использование метода сканирующей электронной микроскопии в исследовании пористости позволяет исследовать намного большие объемы материала по сравнению с методом ПЭМ, позволяет получать больше информации о распределении пористости, а в глобальном смысле о ее неоднородности распределения. Этот метод особенно полезен для количественной оценки пористости образцов, когда для них известна или предполагается ее значительная неоднородность. При помощи данного метода исследованы сталь аустенитного класса ЭК-164 после эксплуатации, показавшая неоднородность пористости, и сталь AISI 304 с однородным распуханием используемой в конструктивных элементах западных энергетических реакторов с водяным охлаждением. Также использование данного метода полезно в СЭМ оснащенных FIB колонной для приготовления тонких ламелей с определенных участков образцов после нейтронного или ионного облучения с последующим исследованием в ПЭМ. Этот метод также может быть применен для получения стерео изображений с целью определения глубины залегания пор от поверхности.

V.I.PASTUKHOV<sup>1,2,3</sup>, S.A.AVERIN<sup>1,3</sup>, V.L.PANCHENKO<sup>1,3</sup>,  
I.A.PORTNYKH<sup>1</sup>, P.D.FREYER<sup>4</sup>, L.A.GIANNUZZI<sup>5</sup>, F.A.GARNER<sup>3,6</sup>

<sup>1</sup>*Joint stock company «Institute of Nuclear Materials» Zarechny, Sverdlovsk region, Russia*

<sup>2</sup>*Ural Federal University named after the First President of Russia  
B.N.Yeltsyn, Ekaterinburg, Russia*

<sup>3</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Westinghouse Electric Company, Pittsburgh PA, USA*

<sup>5</sup>*L.A. Giannuzzi & Associates LLC, Fort Myers, FL, USA*

<sup>6</sup>*Radiation Effects Consulting LLC, Richland WA, USA*

## **APPLICATION OF BACKSCATTER ELECTRONS FOR LARGE AREA IMAGING OF CAVITIES PRODUCED BY NEUTRON OR ION IRRADIATION OF STRUCTURAL STEELS**

It is shown that with proper optimization, backscattered electrons in a scanning electron microscope can produce images of cavity distributions in austenitic steels over a large specimen surface, resolving cavities to a depth of ~500 nm and sometimes deeper in depth. The technique works best for cavity sizes larger than 5-10 nm. This procedure eliminates the need for electropolishing to produce global estimates of void size and density distributions, and also for some applications reduces the need for production of multiple specimens for microscopy. This technique is especially useful for quantifying cavity structures when the specimen is known or suspected to contain very heterogeneous distributions of cavities. Examples are presented for cold-worked EK-164, a very heterogeneously-swelling Russian fast reactor cladding steel and also for AISI 304, a homogeneously-swelling Western steel used for major structural components in Western water-cooled power reactors. This non-destructive overview method of quantizing cavity distribution can be used to direct the location and number of subsequent focused ion beam (FIB) prepared specimens for transmission electron microscopy examination of either neutron or ion-irradiated specimens. This technique can also be applied in modified stereo mode to quantify the depth dependence of cavities.

Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, М.Г.ИСАЕНКОВА, О.А.КРЫМСКАЯ,  
Д.И.ЖУК, Д.З.МАМЕДОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА ЯЧЕЕК ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКИ В ПРОЦЕССЕ ШТАМПОВКИ**

В работе исследован процесс штамповки ячеек дистанционирующей решетки тепловыделяющей сборки реактора. Ячейка решетки, изготовленная из тонкостенной трубы сплава Э110, при штамповке претерпевает высокую степень пластической деформации, что приводит к изменению ориентации зерен материала, т.е. его кристаллографической текстуры. При этом изменяется также анизотропия механических свойств. Проведено моделирование пластической деформации отдельных кристаллитов с помощью метода конечных элементов (crystal plasticity finite element modelling – CPFEM). Построены распределения напряжений, деформаций и температуры по объему ячейки, а также проведена оценка характеристик получаемой текстуры и свойств деформированного материала.

Yu.A.PERLOVICH, M.G.ISAENKOVA, O.A.KRYMSKAYA,  
D.I.ZHUK, D.Z.MAMEDOV  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **MODELLING OF PLASTIC DEFORMATION DURING FORMING OF NUCLEAR REACTOR SPACER GRID WITH CPFE METHOD**

Process of reactor fuel rod spacer grid elements stamping is investigated in present paper. Crystal plasticity finite element modelling(CPFEM) is utilized for this task. Spacer grid element made of E110 alloy is deformed to high degree of plastical strain. This lead to change of material's grains orientation and also change its' mechanical properties. Texture and mechanical properties for various areas with different degree and type of strain in derormed material is presented in paper.

Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, П.Л.ДОБРОХОТОВ<sup>1</sup>,  
С.Д.СТОЛБОВ<sup>1</sup>, И.О.БАННЫХ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова,  
г. Москва, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ПОСЛОЙНОЙ ТЕКСТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ЛИСТОВ ФЕРРИТНОЙ СТАЛИ НА АНИЗОТРОПИЮ ИХ МЕХАНИ- ЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОСЛЕ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ**

Проведен анализ послойной неоднородности текстуры, субструктурного и напряженного состояний, а также механических свойств в горячекатаных и термоупрочненных листах ферритной стали 55ХН2МА-Ш. Использован метод построения обобщенных прямых полюсных фигур и корреляционных диаграмм, позволяющих рассматривать субструктурное состояние зерен в зависимости от их ориентации. Термоупрочненные образцы отличаются сильным размытием текстуры, а также существенным повышением механических свойств (в частности микротвердости) и их анизотропии в центральных слоях, в то время как в горячекатаных образцах микротвердость и её анизотропия падают при приближении к внутренним слоям листа. Это обусловлено ориентированным зарождением вторичных фаз аустенита во внутренних слоях образцов в результате термообработки.

M.G.ISAENKOVA<sup>1</sup>, Yu.A.PERLOVICH<sup>1</sup>, P.L.DOBROKHOTOV<sup>1</sup>,  
S.D.STOLBOV<sup>1</sup>, I.O.BANNYH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Institute of Metallurgy and Materials Science, Moscow, Russia

## **EFFECT OF LAYERED TEXTURAL HETEROGENEITY OF HOT-ROLLED FERRITIC STEEL SHEETS ON THE ANISOTROPY OF MECHANICAL PROPERTIES AFTER THERMAL HARDENING**

The layered heterogeneity of texture, substructure and stress condition, mechanical properties of hot-rolled and thermal strengthened ferritic steel 55KhN2MA-Sh was analyzed. The method of generalized pole figures and correlation diagrams was used. It allows considering substructure condition depending on its orientation. Thermal strengthened samples have strong texture blurring and essential increase of mechanical properties (micro-hardness) and its anisotropy in the central layers, whereas micro-hardness and its anisotropy of hot-rolled samples decrease approaching to the inner layers of sheet. It caused by oriented nucleation of secondary phases of austenite in the inner layers of samples in consequence of heat treatment.

Д.В.ПОСОХОВ, В.С.КУЗЬМИН

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Российская Федерация*

*E-mail: Posokhov.d.v@gmail.com*

## **РАЗРАБОТКА ПЕРОВСКИТО-ПОДОБНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В РЕЖИМЕ ТЕХНОЛОГИ- ЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ МЕТОДОМ СВ-СИНТЕЗА**

В данной работе изучена возможность получения матричного материала на основе модифицированного перовскита для иммобилизации высокоактивных отходов методом СВС. Предлагаемая матрица для иммобилизации радиоактивных отходов является перовскитная керамика. Являющейся аналогом природных устойчивых минералов, отвечающая установленным требованиям к свойствам материалов для иммобилизации РАО. Которые могут быть использованы в качестве надежных матриц для окончательного захоронения РАО в течение долгого времени.

D.V.POSOKHOV, V.S.KUZMIN

*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

*E-mail: Posokhov.d.v@gmail.com*

## **DEVELOPMENT OF MODIFIED PEROVSKITE MATERIAL BASED ON ALUMINUM FOR THE IMMOBILIZATION OF RADIOACTIVE WASTE INTO BURNING MODE PROCESS BY CB SYNTHESIS TECHNIQUE**

This work deals with possibility of matrix material obtaining from modified perovskite for radioactive waste immobilization via self-propagating high-temperature synthesis. Perovskite ceramics is proposed matrix for radioactive waste immobilization due to its similarity to natural stable minerals and satisfy the requirements to the properties of materials for immobilization of radioactive waste. Perovskite ceramics is considered to be applied as reliable matrix for the final disposal of radioactive waste.

С.В.РОГОЖКИН, А.А.НИКИТИН, О.А.КОРЧУГАНОВА  
ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации –  
Институт теоретической и экспериментальной Физики»  
НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия  
E-mail: nikitin@itep.ru

## МИКРОСТРУКТУРА ТИТАНОВОГО СПЛАВА Ti-5Al-4V-2Zr ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ ПРИ 450 °C

В работе проведено изучение микроструктуры и анализ химического состава фаз и включений в образцах титановых сплавов Ti-5Al-4V-2Zr после термического старения при 450 °C в течение 1000 часов. Микроструктурные исследования выполнены методами просвечивающей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и атомно-зондовой томографии. Представлены результаты элементного анализа зерен матричной фазы и включений  $\beta$  фазы. Проводится сравнение с результатами анализа исходного состояния. Показано, что при термическом старении при 450 °C микроструктура сплава аналогична микроструктуре исходного состояния, в котором присутствуют две фазы:  $\alpha$ -фаза, имеющая гексагональную упаковку и  $\beta$ -фаза, имеющая ОЦК структуру. В тоже время после старения в течение 1000 часов обнаружено значительное увеличение обогащения  $\beta$ -фазы ванадием: с 20 до 40 масс. %.

S.V.ROGOZHNIKIN, A.A.NIKITIN, O.A.KORCHUGANOVA  
State Scientific Centre of the Russian Federation – Institute for Theoretical and  
Experimental Physics of National Research Centre “Kurchatov Institute”,  
Moscow, Russia  
E-mail: nikitin@itep.ru

## NANOSTRUCTURE OF TITANIUM ALLOY Ti-5Al-4V-2Zr AND ITS RESPONSE ON THERMAL AGING AT 450 °C

Titanium alloy specimens after heat treatment at 450°C for 1000 h were investigated and compared with the as-received material. Microstructure was analyzed by means of transmission electron microscopy, energy dispersion x-ray spectroscopy and atom probe tomography. Investigations of as-received alloy microstructure showed that it consists of matrix  $\alpha$ -phase with hcp structure and  $\beta$ -phase inclusions with bcc structure. Chemical composition comparison of as-received and aged material showed that isothermal heat treatment of alloy led to the increase of vanadium content in  $\beta$ -phase by two times from 20 up to 40 wt. %.



И.С.САЕНКО<sup>1,3</sup>, А.Л.УДОВСКИЙ<sup>1,2</sup>, О.Б.ФАБРИЧНАЯ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

<sup>3</sup>*Технический университет Фрайбергская горная академия,  
г. Фрайберг, Германия*

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ Fe-Y**

Целью настоящей работы является получение термодинамических параметров системы Fe–Y. В работе проведен критический обзор литературы, собраны все опубликованные экспериментальные и расчетные данные по системе Fe–Y. Основываясь на собранной информации, методом CalPhaD проведена оптимизация параметров, описывающих энергии Гиббса всех фаз в системе Fe–Y. Применение обобщенного метода « $\chi^2$ » показало, что расчетные термодинамические данные, полученные в данной работе, согласуются с экспериментальными данными лучше, чем результаты расчетов ранее опубликованных термодинамических описаний.

I.S.SAENKO<sup>1,3</sup>, A.L.UDOVSKY <sup>1,2</sup>, O.B.FABRICHNAYA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Freiberg University of Mining and Technology, Institute of Materials Science,  
Freiberg, Germany*

## **THERMODYNAMIC MODELLING OF PHASE DIAGRAM OF THE Fe-Y SYSTEM**

The aim of the present work is the optimization of thermodynamic description of the Fe–Y system. Critical review of the literature data was performed and available experimental and calculated data were collected. Thermodynamic parameters for all phases in the Fe–Y system were optimized using the CalPhaD method. The application of general « $\chi^2$ »- method has shown that results calculated in the present work describe experimental data better than thermodynamic descriptions published earlier.

Л.В.СЕЛЕЗНЕВА<sup>1</sup>, А.В.НАЗАРОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «Красная Звезда», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

## **ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА И ВАКАНСИИ НА МИГРАЦИЮ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В $\alpha$ -ЖЕЛЕЗЕ**

Углерод всегда присутствует в сплавах железа, в том числе в высокочистых образцах. Но даже такое малое количество углерода способно оказывать заметное влияние на энергетические и кинетические свойства точечных дефектов в этих сплавах.

Применение методов компьютерного моделирования позволяет проводить детальные расчеты характеристик дефектов в кристаллической решетке.

В работе показано, что образование комплекса вакансия-углерод приводит к отклонению от закона Аррениуса для вакансий. Эффективные коэффициенты диффузии вакансий и атома углерода в железе рассчитаны в зависимости от температуры. Полученные результаты раскрывают важную роль комплексов углерод-вакансия в изменении подвижности вакансий при наличии углерода и позволяют объяснить образование сегрегаций углерода в окрестности пор.

L.V.SELEZNEVA<sup>1</sup>, A.V.NAZAROV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «Red Star», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

## **MUTUAL INFLUENCE OF CARBON AND VACANCY ON POINT DEFECT MIGRATION IN $\alpha$ -IRON**

Carbon atoms are always present in  $\alpha$ -iron, either as impurities even in high purity samples. Although when carbon is present only in very small amounts, it is expected to have a mutual influence on the energetic and kinetic properties of point defects in these materials.

Simulation computers methods calculations have been performed to study the interaction between carbon atoms and vacancies (V) in  $\alpha$ -Fe.

The vacancy diffusivity is shown to be significantly modified by the formation of vacancy-carbon complexes, exhibiting non-Arrhenius behavior. Effective diffusion coefficients of vacancy and of carbon in  $\alpha$ -Fe are calculated as a function of temperature. The present results reveal the important role of vacancy-carbon complex to modify vacancy mobility in presence of carbon and help to explain the formation of carbon segregation in the void neighborhood.

А.В.ТЕНИШЕВ, Р.С.КУЗЬМИН, М.Е.МАТВЕНОВ,  
В.В.МИХАЛЬЧИК, Д.П.ШОРНИКОВ

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

## **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ НЕСТИХИОМЕТРИИ ДИОКСИДА УРАНА МЕТОДОМ ТЕРМОГРАВИМЕТРИИ**

Проведен обзор термогравиметрических методик определения нестехиометрии диоксида урана. Рассмотрены режимы окисления на воздухе по различным температурным программам. Проведена оценка основных параметров, которые влияют на точность получаемых результатов. Окислением таблеток, содержащих выгорающий поглотитель нейтронов (до 8%  $Gd_2O_3$ ) определено отношение кислород/металл. Предложены режимы окисления, как чистого диоксида урана, так и с добавками оксида гадолиния, позволяющие определять отношение кислород/металл с точностью не хуже  $\pm 0,002$  на навесках массой около 3 г. Проведена проверка полученных режимов на образцах с известным содержанием кислорода, измеренном другими методами.

A.V.TENISHEV, R.S.KUZMIN, M.E.MATVENOV,  
V.V.MIKHALCHIK, D.P.SHORNIKOV

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **FEATURES OF URANIUM DIOXIDE NONSTOICHIOMETRY MEASUREMENTS BY THERMOGRAVIMETRY**

Thermogravimetric methods for determining of the uranium dioxide nonstoichiometry were reviewed. The specific features of oxidation in air at different temperature programs were shown. Main parameters affecting the accuracy of the results were estimated. The oxygen to metal ratio was determined by oxidation of pellets containing burning neutron absorber (to 8%  $Gd_2O_3$ ). Oxidation regimes with an accuracy of determining the oxygen to metal ratio  $\pm 0.002$  by using  $\sim 3$  g samples were proposed for pure uranium dioxide and with gadolinia additives. The regimes were tested on samples with known oxygen concentration, measured by different techniques.

А.Л.УДОВСКИЙ<sup>1,2</sup>, Д.А. ВАСИЛЬЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

*E-mail: udovsky@imet.ac.ru*

**ПРОЯВЛЕНИЕ ФЕРРО - АНТИФЕРРОМАГНИТНОГО  
ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СПЛАВАХ  
БОГАТЫХ Cr В ВИДЕ НЕМОНОТОННЫХ  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ  
ДВУХФАЗНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe-Cr**

В работе описывается необычное поведение температурных зависимостей теплоемкостей ОЦК сплавов системы Fe–Cr, обусловленного наличием ферро – антиферромагнитного фазового перехода составов, богатых хромом.

Исследования были поддержаны проектом РФФИ-03-13-00462.

A.L.UDOVSKY<sup>1,2</sup>, D.A.VASILYEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of RAS*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

**MANIFESTATION OF FERROMAGNETIC - ANTIFERRO-  
MAGNETIC PHASE TRANSITION IN METASTABLE Cr RICH  
ALLOYS IN FORM OF NON-MONOTONIC TEMPERATURE  
DEPENDENCES OF HEAT CAPACITY OF TWO-PHASE  
ALLOYS IN THE Fe-Cr SYSTEM**

The paper describes the unusual behavior of the temperature dependences of the specific heats of the bcc Fe-Cr alloys, due to the presence of ferro – antiferromagnetic phase transition for Cr – rich compositions.

Researches were supported by a grant of RFBR-03-13-00462.

А.Л.УДОВСКИЙ<sup>1,2</sup>, М.В.КУПАВЦЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХПОДРЕШЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТОВ СТРУКТУРНЫХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ $\sigma$ - ФАЗЫ В СИСТЕМЕ Fe-V**

В приближении трех-подрешеточной модели проведены расчеты структурных и термодинамических свойств  $\sigma$ - фазы системы Fe-V в зависимости от состава и температуры. Предсказаны зависимости термодинамических свойств (потенциала Гиббса, энтальпии и энтропии смешения) для  $\sigma$ - фазы системы Fe-V в зависимости от состава и температуры.

Исследования поддержаны грантом РФФИ-03-13-00462.

A.L.UDOVSKII<sup>1,2</sup>, M.V.KUPAVTSEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Federal state budgetary organization of the science Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

## **THE APPLICATION OF THREE-SUBLATTICE MODEL FOR CALCULATING THE STRUCTURAL AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF $\sigma$ -PHASE IN THE Fe-V SYSTEM**

The three-sub-lattice approximation model calculations of the structural and thermodynamic properties of the Sigma - phase of the Fe-V system , depending on the composition and temperature, have been obtained. Thermodynamic properties (Gibbs potential, enthalpy and entropy of mixing) for  $\sigma$ -phase Fe-V system depending on the composition and temperature were predicted.

А.С.УСЕИНОВ<sup>1</sup>, Е.В.ГЛАДКИХ<sup>1</sup>, М.Д.БУТЮТО<sup>1</sup>,  
В.Н.РЕШЕТОВ<sup>2</sup>, А.А.РУСАКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ ТИСНУМ, г. Троицк, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия

## **СОВРЕМЕННЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДИКИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

Важными параметрами контроля старения и деградации материалов являются их механические свойства. Данные параметры: твёрдость, модуль упругости, трещиностойкость могут быть исследованы при помощи нанотвердомеров «НаноСкан», позволяющих измерять механические свойства на нанометровых и субмикронных масштабах линейных размеров. В работе рассмотрены методы автоматизации испытаний и ускорения обработки данных: множественные измерения для построения карт механических неоднородностей, использование языка макрокоманд, рассмотрены программные алгоритмы для ускорения обработки больших массивов данных.

A.S.USEINOV<sup>1</sup>, E.V.GLADKIH<sup>1</sup>, M.D.BUTYTO<sup>1</sup>,  
V.N.RESHETOV<sup>2</sup>, A.A.RUSAKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSBI TISNCM, Troitsk, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia

## **MODERN DOMESTIC DEVICES AND METHODS FOR COMPLEX DIAGNOSTICS OF MATERIAL PROPERTIES**

Mechanical properties are of importance to material's degradation and ageing control. Such properties as the hardness, elastic modulus or fracture toughness can be studied with the help of "NanoScan" nanohardness tester. These devices are capable of measuring the mechanical properties at nano and sub-micro scales of the linear dimensions. The work concerns methods for the measurements automatization and data processing acceleration, which includes multiple measurements for the mechanical inhomogeneities mapping, macro language usage, program algorithms for the large data processing acceleration.



НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ – ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ МАТЕРИАЛОВ:  
СТАРЕНИЕ И ДЕГРАДАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ  
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯЭУ.

Материалы 13-й Международной школы-конференции  
для молодых ученых и специалистов.

Москва, 17 – 21 октября 2016 г.

Подписано в печать 12.10.2016. Формат 60х84 1/16.

Печ. л. 8,5    Тираж 220 экз. Заказ №

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Типография НИЯУ МИФИ

115409, Москва, Каширское ш. 31