

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

**НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ –  
Материалы инновационной  
энергетики: разработка, методы  
исследования и применение**

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

*Москва, 23 – 27 октября 2017 г.*

Москва 2017

УДК 621.039.531 (06)

ББК 31.46в6

М43

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ – МАТЕРИАЛЫ ИННОВАЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ: РАЗРАБОТКА, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ. Материалы 15-й Международной школы-конференции для молодых ученых и специалистов. Москва, 23 – 27 октября 2017 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2017, 184 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 материаловедения ядерных реакторов 4-го поколения, термоядерных реакторов ДЕМО, установок прямого преобразования энергии, 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

Аннотации лекций и докладов получены до 10.10.2017, одобрены программным комитетом и издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2419-0

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2017

## ОРГАНИЗАТОРЫ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ

- ГК «РОСАТОМ»
- Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ):
  - Институт ядерной физики и технологий
  - Кафедра Физических проблем материаловедения
  - Лаборатория электромагнитных методов производства новых материалов
- Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ МИСиС):
  - Кафедра материаловедения и физики прочности
- Межрегиональное научно-техническое общество материаловедов (МОМ)
- Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ КИ)
- Высокотехнологичный научно-исследовательский институт неорганических материалов (ВНИИНМ)
- Научно-исследовательский институт Научно-производственного объединения «ЛУЧ» (НИИ НПО «ЛУЧ»)

## ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

|                          |                             |           |
|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| <b>Председатель:</b>     | Стриханов М.Н.              | НИЯУ МИФИ |
| <b>Зам председателя:</b> | Калин Б.А.                  | НИЯУ МИФИ |
| <b>Секретарь:</b>        | Джумаев П.С.                | НИЯУ МИФИ |
| <b>Члены комитета:</b>   |                             |           |
| Гарнер Ф.А.              | РЕС (США)                   |           |
| Дуб А.В.                 | ГК «Росатом»                |           |
| Гурович Б.А.             | НИЦ «Курчатовский институт» |           |
| Зайцев П.А.              | НИИ НПО «ЛУЧ»               |           |
| Карпюк Л.А.              | АО ВНИИНМ                   |           |
| Лавренюк П.И.            | ТК ТВЭЛ                     |           |
| Марков Д.В.              | АО ИРМ                      |           |
| Никулин С.А.             | НИТУ МИСиС                  |           |
| Рисованный В.Д.          | ГК «Росатом»                |           |
| Троянов В.М.             | АО «Росэнергоатом»          |           |
| Тузов А.А.               | НИИАР                       |           |
| Шорт М.Ф.                | MIT (США)                   |           |
| Штробмах Я.И.            | НИЦ «Курчатовский институт» |           |

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

|                          |                             |           |
|--------------------------|-----------------------------|-----------|
| <b>Председатель:</b>     | Каргин Н.И.                 | НИЯУ МИФИ |
| <b>Зам председателя:</b> | Калин Б.А.                  | НИЯУ МИФИ |
| <b>Секретарь:</b>        | Джумаев П.С.                | НИЯУ МИФИ |
| <b>Члены комитета:</b>   |                             |           |
| Ганченкова М.Г.          | НИЯУ МИФИ                   |           |
| Гагаринский А.Ю.         | НИЦ КИ                      |           |
| Глаговский Э.М.          | НИЯУ МИФИ                   |           |
| Долгов А.Б.              | ТК «ТВЭЛ»                   |           |
| Казанский Ю.А.           | ИАТЭ НИЯУ МИФИ              |           |
| Крицкий В.Г.             | АО «НИАЭП»-«АСЭ»            |           |
| Мирнов С.В.              | ТРИНИТИ                     |           |
| Нечайкина Т.А.           | НИТУ МИСиС                  |           |
| Новиков В.В.             | АО ВНИИНМ                   |           |
| Приходько К.Е.           | НИЦ «Курчатовский институт» |           |
| Рожнов А.Б.              | НИТУ МИСиС                  |           |
| Русанов А.Е.             | ГНЦ РФ ФЭИ                  |           |
| Скоробогатых В.Н.        | ЦНИИТМАШ                    |           |
| Скупов М.В.              | АО ВНИИНМ                   |           |
| Тихомиров Г.В.           | НИЯУ МИФИ                   |           |
| Цепелев А.Б.             | ИМЕТ РАН                    |           |

## **СОДЕРЖАНИЕ**

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| ПРОГРАММА .....          | 6   |
| АННОТАЦИИ ЛЕКЦИЙ .....   | 17  |
| АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ ..... | 55  |
| СЕКЦИЯ 1 .....           | 55  |
| СЕКЦИЯ 2 .....           | 117 |

## **CONTENTS**

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| PROGRAM .....               | 14  |
| ABSTRACTS OF LECTURES ..... | 17  |
| ABSTRACTS OF REPORTS .....  | 55  |
| SECTION 1 .....             | 55  |
| SECTION 2 .....             | 117 |

## ПРОГРАММА

### 23 октября

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

**10<sup>00</sup> – 10<sup>20</sup>** Открытие

**10<sup>20</sup> – 11<sup>40</sup>** Гагаринский А.Ю. (НИЦ «Курчатовский институт»). Перспективы мировой энергетики.

**11<sup>40</sup> – 12<sup>00</sup>** Мирнов С.В. (ТРИНИТИ). Некоторые проблемы термоядерной энергетики на основе магнитного синтеза.

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

**12<sup>20</sup> – 13<sup>40</sup>** Калинин Б.А. (НИЯУ МИФИ). Материаловедческие вопросы активных зон инновационных ядерных реакторов.

**13<sup>40</sup> – 14<sup>00</sup>** Рисованный В.Д. (ГК «Росатом»). Поглощающие материалы для инновационных ядерных реакторов.

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

**15<sup>00</sup> – 15<sup>50</sup>** Гурович Б.А. (НИЦ «Курчатовский институт»). Восстановительный отжиг для продления срока службы корпусов и ВКУ действующих реакторов ВВЭР-1000.

**15<sup>50</sup> – 16<sup>40</sup>** Дуб А.В. (АО «Наука и инновации»). Возможности аддитивных технологий для производства оборудования для энергетики.

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

**17<sup>00</sup> – 18<sup>00</sup>** *Стендовая сессия (секция 1). Обсуждение докладов.*

### 24 октября

**10<sup>00</sup> – 10<sup>50</sup>** Люблинский И.Е. (АО «Красная Звезда»). Жидкие металлы в термоядерных системах с магнитным удержанием: опыт использования и перспективы.

**10<sup>50</sup> – 11<sup>40</sup>** Добаткин С.В. (ИМЕТ РАН). Высокопрочные ультрамелкозернистые медные сплавы с повышенными эксплуатационными свойствами для электротехнического применения.

#### Перерыв 11<sup>40</sup> – 12<sup>00</sup>

**12<sup>00</sup> – 12<sup>50</sup>** Рожнов А.Б. (НИТУ МИСиС). Многослойные и гибридные материалы для сложных условий эксплуатации.

**12<sup>50</sup> – 13<sup>40</sup>** Никитина А.А. (ВНИИНМ). Развитие работ по перспективным материалам активных зон реакторов на быстрых нейтронах.

#### Обед 13<sup>40</sup> – 14<sup>00</sup>

**14<sup>00</sup> – 15<sup>30</sup>** Орели Жентиль (CSNSM, Univ. Paris-Sud, Франция). Исследование формирования наноразмерных оксидных частиц в ДУО (ODS) хромистых сталях для современных атомных и термоядерных реакторов.

**15<sup>30</sup> – 16<sup>20</sup>** Френк Гарнер (Radiation Effects Consulting, США). Влияние высокодозного облучения в различных типах ядерных реакторов на свойства аустенитных сталей.

#### Перерыв 16<sup>20</sup> – 16<sup>40</sup>

**16<sup>40</sup> – 18<sup>00</sup>** *Стендовая сессия (секция 2). Обсуждение докладов.*

## 25 октября

**10<sup>00</sup> – 10<sup>50</sup>** Миловзоров Н.Г. (ООО «Тескан»). Возможности сканирующих электронных микроскопов Tescan при исследовании конструкционных и функциональных материалов.

**10<sup>50</sup> – 11<sup>40</sup>** Шорт Майкл (MIT, США). Современные спектроскопические методы для оценки степени радиационного повреждения.

### Перерыв 11<sup>40</sup> – 12<sup>00</sup>

**12<sup>00</sup> – 12<sup>50</sup>** Орели Жентиль (CSNSM, Univ. Paris-Sud, Франция). Радиационная стойкость отработанного ядерного топлива - модельный эксперимент методами *in situ* просвечивающей электронной микроскопии и резерфордского обратного рассеяния при имитационном ионном облучении

**12<sup>50</sup> – 13<sup>40</sup>** Айман Хавари (Университет Северной Каролины, США). Влияние атомной структуры и радиационного повреждения на нейтронные характеристики графитовых замедлителей.

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

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

## 26 октября

**10<sup>00</sup> – 13<sup>20</sup>** *Ознакомительная практика. Стендовая сессия.*

### Обед 13<sup>20</sup> – 14<sup>20</sup>

**14<sup>20</sup> – 15<sup>00</sup>** Владимир Кршчак (Технологический Институт Братиславы, Словакия). Экспериментальное исследование взаимодействия гелия с радиационными дефектами в металлах и сплавах.

**15<sup>00</sup> – 15<sup>40</sup>** Стариков С.В. (ОИВТ РАН). Многомасштабное компьютерное моделирование поведения ядерного топлива при термическом и радиационном воздействии.

**15<sup>40</sup> – 16<sup>20</sup>** Воскобойников Р.Е. (НИЦ «Курчатовский институт»). Моделирование первичного дефектообразования в Ti-Al интерметаллидах методом молекулярной динамики.

### Перерыв 16<sup>20</sup> – 16<sup>40</sup>

**16<sup>40</sup> – 17<sup>20</sup>** Каражанов С.Ж. (Institute for Energy Technology, Норвегия). Современное состояние и перспективы исследований в области фотовольтаических технологий.

**17<sup>20</sup> – 18<sup>00</sup>** Никулин С.А. (НИТУ МИСиС). Акустико-эмиссионные технологии диагностики качества и мониторинга разрушения материалов энергетических установок.

## 27 октября

**10<sup>00</sup> – 10<sup>50</sup>** Подведение итогов.

**10<sup>50</sup> – 12<sup>00</sup>** Закрытие и награждение.

Экскурсия в НИЯУ МИФИ

## СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ 23 ОКТЯБРЯ (Секция 1)

1. Е.И.МАКАРОВ, Н.В.КИРЕЕВ, В.С.НЕУСТРОЕВ, Д.Е.МАРКЕЛОВ, С.В.БЕЛОЗЁРОВ. Моделирование напряженно-деформированного состояния газонаполненного образца сложной формы.

2. Е.В.МОРОЗОВ. Воздействие импульсных потоков высокотемпературной дейтериевой плазмы и ионов дейтерия на структуру поверхностного слоя ванадия.

3. А.С.ДЕМИН. Влияние импульсных потоков ионов и плазмы, генерируемых в установке плазменный фокус на поверхность пластины молибдена.

4. Н.А.ЕПИФАНОВ. Повреждаемость покрытия на основе  $Al_2O_3$  на алюминиевой подложке импульсным лазерным излучением и высокотемпературной плазмы.

5. Е.А.КУЛЕШОВА, Д.А.ЖУРКО, А.Д.ЕРАК, С.А.БУБЯКИН, А.С.КИСЕЛЁВ. Определение локального напряжения отрыва на примере образцов из сталей ВВЭР испытанных на одноосное статическое растяжение.

6. Г.Н.БАКШУТОВА, А.П.БОЛЬШАКОВ, В.С.НЕУСТРОЕВ. Исследование механических свойств стали X18N10T, облученной в реакторе СМ-3 при температурах 60-80 С.

7. Б.А.КАЛИН, О.Н.СЕВРЮКОВ, А.А.ИВАННИКОВ, М.А.ПЕНЯЗЬ, А.В.ВОЕННОВ, Е.Р.АБРАМОВ. Термостойкость неразъёмных соединений, полученных с помощью высокотемпературной пайки реакторных коррозионностойких сталей быстрозакалёнными никелевыми припоями.

8. М.М.ДЕМЕНТЬЕВА, К.Е.ПРИХОДЬКО, Б.А.ГУРОВИЧ, Л.В.КУТУЗОВ, Д.А.КОМАРОВ. Радиационно-индуцированное окисление алюминия под действием ионного облучения.

9. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, О.А.КРЫМСКАЯ, С.Д.СТОЛБОВ, К.Е.КЛЮКОВА, В.В.НОВИКОВ, М.Н.САБЛИН. Корреляционная зависимость анизотропии свойств труб из сплавов на основе Zr с параметрам кристаллографической текстуры.

10. Ю.В.ЛЕВЧЕНКО, А.С.ЗЕВЯКИН, Ю.Е. КАРАЖЕЛЕВСКАЯ, А.М.ТЕРЕХОВА. Сравнение различных топливных композиций для исследовательского реактора тепловой мощностью до 10 МВт.

11. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, О.А.КРЫМСКАЯ, Д.И.ЖУК, С.Д.СТОЛБОВ, А.В.ИВАНОВ. Влияние структурного состояния и кристаллографической текстуры труб на стабильность размеров штампуемых из них ячеек дистанционирующей решетки.

12. М.Р.ХУСАИНОВ, С.А.КОМАРИСТОВ, В.М.ШАГИН. Подбор полимерных материалов для защитных чехлов манипуляторов.

13. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, В.А.ФЕСЕНКО, С.Д.СТОЛБОВ, К.Е.КЛЮКОВА, Д.И.ЖУК, А.В.ИВАНОВ. Особенности формирования кристаллографической текстуры в ячейках дистанционирующих решеток при штамповке.



14. Е.А.КУЛЕШОВА, А.С.ФРОЛОВ, Д.А.МАЛЫЦЕВ, Е.В.КРИКУН, Д.В.САФОНОВ, И.В.КОЗЛОВ. Структура и фазовый состав циркониевых оболочек в исходном состоянии и после испытаний на ползучесть.

15. М.С.МЕРЕЖКО, О.П.МАКСИМКИН, Д.А.МЕРЕЖКО. Кинетические параметры мартенситного превращения в деформируемых аустенитных сталях, облученных нейтронами.

16. В.И.ПАСТУХОВ, С.А.АВЕРИН, И.А.ПОРТНЫХ, А. В. КОЗЛОВ. Исследование особенностей радиационного порообразования в оболочках твэл быстрого реактора методом сканирующей электронной микроскопии.

17. А.С.ДИКОВ, С.Б.КИСЛИЦИН, И.И.ЧЕРНОВ, А.С.ЛАРИОНОВ. Нестабильность пластического течения при испытаниях на ползучесть облученной стали ЭП-450.

18. А.С.ЛАРИОНОВ, А.С.ДИКОВ, Д.А.САТПАЕВ, С.Б. КИСЛИЦИН. Сравнительные исследования радиационной стойкости защитных тонкопленочных покрытий на основе нитридов переходных металлов.

19. Р.О.ЗЫКОВА, А.М.ТЕРЕХОВА, Ю.Е. КАРАЖЛЕВСКАЯ, А.С.ЗЕВЯКИН. Перспектива использования карбидного топлива в исследовательском реакторе мощностью 10 МВт.

20. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, О.А.КРЫМСКАЯ, Д.И.ЖУК, А.Е.РУБАНОВ. Моделирование процесса холодной прокатки циркониевых труб методом совместной деформации зерен материала.

21. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, О.А.КРЫМСКАЯ, Д.И.ЖУК, А.Е.РУБАНОВ. Моделирование формирования кристаллографической текстуры в  $\alpha$ -цирконии при прокатке с учетом систем скольжения и двойникования.

22. М.Ю.ТЕРНОВЫХ, И.С.САЛЬДИКОВ, Г.В.ТИХОМИРОВ. Предсказание материального состава выгоревшей таблетки реактора типа ВВЭР с использованием нейтронно-физических кодов.

23. А.Д.ЧЕРНОВ. Эволюция структурно-фазового состояния оболочечных труб из стали ЭП823 в процессе длительного старения.

24. С.В.РОГОЖКИН, Н.А.ИСКАНДАРОВ, А.А.ЛУКЬЯНЧУК, А.С.ШУТОВ, О.А.РАЗНИЦЫН, А.А.НИКИТИН, А.Г.ЗАЛУЖНЫЙ, Т.В.КУЛЕВОЙ, Р.П.КУЙБИДА, С.Л. АНДРИАНОВ. Исследование изменения наноструктуры 12% хромистых ферритно-мартенситных сталей под воздействием облучения ионами Fe.

25. А.А. НИКИТИН, С.В. РОГОЖКИН. Изменение микроструктуры стали EUROFER97 под действием тяжелоионного облучения.

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

27. М.Д.САВЕЛЬЕВ, Б.А.ТАРАСОВ, Д.П.ШОРНИКОВ. Коррозионная стойкость сплавов Fe-Cr-Al-Si.

28. Б.А.КАЛИН, И.В.ФЕДОТОВ, Д.П.БАЧУРИНА, А.Н.СУЧКОВ. Анализ влияние материала и геометрии компенсирующей проставки соединения W/ЭК-181 применительно к концепции охлаждаемого гелием дивертора термоядерного реактора ДЕМО.

29. Е.В.КОЗЛОВА, В.В.ГОРЛЕВСКИЙ, А.А.СЕМЕНОВ, В.В.ВОЛКОВ, И.И.ЛЯТУН, П.А.ЕРШОВ, А.А.СНИГИРЕВ. Исследование перспективных бериллиевых материалов методом МУРР.

30. М.С. ШЕВЕРДЯЕВ, В.В. ГОРЛЕВСКИЙ, Е.В. КОЗЛОВА, А.А. СЕМЕНОВ. Бериллиевые материалы и их применение в энергетике будущего.

31. Т.А.НЕЧАЙКИНА, С.А.НИКУЛИН, А.Б.РОЖНОВ, С.О.РОГАЧЕВ, А.П.БАРАНОВА. Структура и прочность переходной зоны трехслойного материала «сталь / ванадиевый сплав / сталь».

32. А.С.ЯШИН, Д.А.САФОНОВ, Б.А.КАЛИН, Н.В.ВОЛКОВ, Д.А.АЛЕКСАНДРОВ, Е.Л.КОРЕНЕВСКИЙ, В.Г.КРИЦКИЙ. Поведение ионно-модифицированных оболочек твэлов из сплава Э110 в высокотемпературном водяном паре.

33. М.В.КОТЕНЕВА. Структура и механические свойства оксидных пленок циркониевых сплавов, формирующихся при окислении в воде с добавлением лития.

34. Д.А.КОРОБЕЙНИКОВ, А.А.СЕМЕНОВ. Решение проблемы утилизации бериллийсодержащих отходов в ядерной энергетике.

35. Э.В.ЛИ, А.В.ЛИ. Комплексная методика оценки охрупченного состояния окисленных образцов из циркониевых сплавов.

36. В.П.ФИЛИППОВ, В.Г.КИРИЧЕНКО, Ю.А.ЛАУЭР. Мессбауэровские исследования сегрегации и роста интерметаллических фаз в сплавах циркония.

37. И.А.БОГАЧЕВ, И.И.ЧЕРНОВ, М.С.СТАЛЬЦОВ. Влияние концентрации упрочняющих наночастиц на кинетику уплотнения ДУО стали при спарк-плазменном спекании порошков.

38. А.Е.КАРПЕЕВА, И.С.ТИМОШИН, Е.Н.МИХЕЕВ. Исследование способов влияния на значения термической стабильности геометрических размеров уран-гадолиниевого топлива.

39. А.А.БЕЛЯЕВ, М.С.СТАЛЬЦОВ, И.И.ЧЕРНОВ, Б.А.КАЛИН, Л.Ю.ГУСЕВА, С.Н.КОРШУНОВ. Формирование гелиевой пористости в ванадиевых сплавах системы V–Ti–Cr, V–W–Zr и V–W–Ta в сравнении с двойными сплавами.

40. М.Е.МАТВЕНОВ, И.С.ТИМОШИН, С.Н.ТИМОШИН, А.В.ТЕНИШЕВ, Д.П. ШОРНИКОВ. Оценка морфологических характеристик порошка на основе диоксида урана.

41. В.В.МИХАЛЬЧИК, С.Н.НИКИТИН, Б.А.ТАРАСОВ, А.В.ТЕНИШЕВ, Д.П.ШОРНИКОВ. Методические особенности исследования испарения мононитрида урана при термогравиметрии.

42. В.В.МИХАЛЬЧИК, С.Н.НИКИТИН, Б.А.ТАРАСОВ, А.В.ТЕНИШЕВ, Д.П.ШОРНИКОВ. Моделирование фазового разделения моонитрида урана.

43. Д.П.ШОРНИКОВ, А.В.ТЕНИШЕВ, С.Н.НИКИТИН, М.Е.МАТВЕНОВ, А.С.ЕФИМЕНКО. Изучение свойств таблеток диоксида урана в зависимости от параметров прессования и спекания.

44. Е.А. КУЛЕШОВА, О.О. ЗАБУСОВ, А.С. БРАГИН, А.С. ФРОЛОВ, Д.А. МАЛЬЦЕВ, Д.В. САФОНОВ, Е.В. КРИКУН. Влияние длительной изотермической выдержки на переориентацию гидридных фаз в материалах газонаполненных образцов оболочек твэлов в реакторах типа ВВЭР-1000.

45. К.К.ПОЛУНИН, А.А.УРУСОВ, А.А.МОКРУШИН, Д.С.КИСЕЛЕВ, Д.М.СОЛДАТКИН. Влияние защитного хромового покрытия на коррозионную стойкость штатных оболочек твэлов из сплава Э110 в условиях ЛОСА.

46. О.И.ЗАБОЛОТНИКОВА. Оценка влияния дефектности оксидных пленок образцов циркониевых сплавов на характер их разрушения при нагружении.

## **СТЕНДОВАЯ СЕССИЯ 24 ОКТЯБРЯ (Секция 2)**

47. М.П.БРАЖНИКОВ, М.С.СУРИНА, В.Е.ЕРЕМЯШЕВ, Р.Ф.ЗАЙНУЛЛИНА, Д.А.ЖЕРЕБЦОВ. Экспериментальное изучение влияния добавок церия и молибдена на термические свойства литиевого боросиликатного стекла.

48. М.П.БРАЖНИКОВ, М.Е.ОСИПОВА, В.Е.ЕРЕМЯШЕВ, Д.А.ЖЕРЕБЦОВ, Е.А.ТРОФИМОВ. Влияние молибдена и вольфрама на структурные особенности боросиликатных стёкол.

49. С.С.МАРТЫНЕНКО, В.И.ПЕТРОВ. Опыт корректировки распределения примесей железа и алюминия в бериллии технической чистоты.

50. В.А.ГЛУЩЕНКОВ, В.К.АЛЕХИНА, Р.М.БИКБАЕВ. Материалы с памятью формы. Скорость нагрева - скорость срабатывания.

51. В.Ю.ГОЛЬЦЕВ, Л.А.ДЕГАДНИКОВА, А.В.ОСИНЦЕВ. Проведение механических испытаний материалов с использованием метода цифровой корреляции изображений.

52. Р.К.ВИШЕРАТИН, В.А.СТЕПАНОВ. Влияние комбинированной деформации на кристаллизацию стекла НВАНІ.

53. А.В. БРАЦУК, М.Л.ТАУБИН, А.А.УРУСОВ. Синтез и очистка углеродных нанотрубок методом химического разложения углеводородов.

54. В.Ю.ГОЛЬЦЕВ, А.В.ОСИНЦЕВ. Определение хрупкой прочности материала ядерного топлива.

55. В.Ю.ГОЛЬЦЕВ, Н.А.ГРИБОВ. Применение тонких дисковых образцов для определения сопротивления разрыву хрупких материалов.

56. А.А. АБУ ГАЗАЛ, П.С.ДЖУМАЕВ, А.В.ОСИНЦЕВ, В.И.ПОЛЬСКИЙ, В.И.СУРИН. Использование метода сканирующей контактной потенциометрии в физико-механических испытаниях материалов.

57. А.Л.УДОВСКИЙ, М.В.КУПАВЦЕВ. Учет магнетизма для расчета структурных и термодинамических свойств  $\sigma$ - фазы в системе Fe-V в рамках трехподрешоточной модели.

58. С.В.БАРСАНОВА, М.В.ЕВСЕЕВ, В.Л.ПАНЧЕНКО, В.И.ПАСТУХОВ, Р.П.КАРАГЕРГИ. Методика испытаний образцов переменного химического состава на ударную вязкость для определения критической температуры хрупкости.

59. И.С.САЕНКО, Б.О.МУХАМЕДОВ, А.Л.УДОВСКИЙ, О.Б.ФАБРИЧНАЯ, И.А.АБРИКОСОВ. Термодинамическое моделирование и экспериментальное исследование термодинамических свойств в системы Zr-Fe.

60. Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, М.Г.ИСАЕНКОВА, О.А.КРЫМСКАЯ, Н.С.МОРОЗОВ, П.С.ДЖУМАЕВ, И.В.РЯХОВСКИХ. Связь стойкости к коррозионному растрескиванию стальных труб магистральных газопроводов с послойной неоднородностью их кристаллографической текстуры.

61. А.Л.УДОВСКИЙ, Д.А.ВАСИЛЬЕВ. Применение термодинамического моделирования для предсказания физических свойств ОЦК одно- и двухфазных сплавов системы Fe-Cr.

62. В.Н.СКОРОБОГАТЫХ, Н.П.АНОСОВ, П.А.КОЗЛОВ, Е.В.ПОГОРЕЛОВ, А.С.ГУДЕНКО, Е.М.СИМИЧ-ЛАФИЦКАЯ. Исследование зоны структурной и химической неоднородности границы сплавления перлитной и аустенитной стали с использованием слитков переменного химического состава.

63. Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, М.Г.ИСАЕНКОВА, П.Л.ДОБРОХОТОВ, Д.И.ЖУК, А.Е.РУБАНОВ. Моделирование формирования кристаллографической текстуры ферритной стали после горячей прокатки.

64. Д.А.РЯБОВ, А.А.ХЛЫБОВ. Определение остаточных напряжений в изделиях с наплавкой.

65. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, А.В.ОСИНЦЕВ, В.А.ФЕСЕНКО, М.М.ЗАРИПОВА. Методы изучения эффектов памяти формы и сверхупругости в сплаве Ti-22%Nb-6%Zr.

66. А.Г.БЕБИЯ, М.П.БОРОНЕНКО, П.Ю.ГУЛЯЕВ. Экспресс-метод фазового состава продуктов СВ-синтеза.

67. Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, М.Г.ИСАЕНКОВА, П.Л.ДОБРОХОТОВ, А.К.АМАНОВА, М.В.ЛЕОНТЬЕВА-СМИРНОВА. Изменения структуры и кристаллографической текстуры ферритно-мартенситных сталей в результате испытаний на термическую ползучесть и старение.

68. Б.П.МИХАЙЛОВ, А.Б.МИХАЙЛОВА, В.Я.НИКУЛИН, И.В.БОРОВИЦКАЯ, П.В.СИЛИН. Свойства и структурные трансформации MgB<sub>2</sub>-лент под действием ударных волн плазмы.

69. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, В.А.ФЕСЕНКО, Я.А.БАБИЧ, Н.А.КРАПИВКА. Изменение анизотропии механических свойств квазимонокристаллов из низкомодульного сплава Zr-25Nb в процессе прокатки.

70. Р.Н.ЯСТРЕБИНСКИЙ, В.И.ПАВЛЕНКО, О.В.КУПРИЕВА. Повышение термической стабильности гидрида титана.

71. А.Ф.ГИБАДУЛЛИНА, И.Б.ПОЛОВОВ. Структура и свойства никелевого суперсплава VDM® ALLOY C-4.

72. С.Н.НИКИТИН. Определение удельной теплоемкости стали методом дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием термомодуляции.

73. С.А.СУББОТИН, В.В.ЕФРЕМОВ. Прогнозирование системных требований к материалам оболочки твэлов инновационных реакторов на быстрых нейтронах.

74. М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, В.А.ФЕСЕНКО, М.М.ЗАРИПОВА, Н.А.КРАПИВКА. Закономерности изменения структуры и текстуры низкомодульного сплава Zr-25Nb при холодной прокатке монокристаллов разных ориентаций.

75. М.О.КУВШИНОВ, А.А.ХЛЫБОВ. Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование.

76. Е.А.КУЛЕШОВА, А.Д.ЕРАК, А.П.БАНДУРА, С.А.БУБЯКИН. Исследование процесса квазихрупкого разрушения сталей при испытании на вязкость разрушения.

77. Д.А.БЕЛОБРАГА, А.В.НАЗАРОВ. Моделирование миграции вакансий и атомов в В2 структурах.

78. В.С.КУЗЬМИН, Д.В.ПОСОХОВ. Исследование влияния разбавления никелевой добавкой матрицы на основе алюминия полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

79. Б.А.ТАРАСОВ, М.Д.САВЕЛЬЕВ, А.В.ОСИНЦЕВ, Д.П.ШОРНИКОВ. Кратковременные механические свойства сплавов.

80. Б.А.ТАРАСОВ, М.С.ТАРАСОВА, И.И.КОНОВАЛОВ, Э.М.ГЛАГОВСКИЙ. Прогнозирование длительной прочности ферритомартенситных сталей.

81. А.А.ГУСЕВ, А.В.НАЗАРОВ. Моделирование особенностей диффузионных скачков углерода в ОЦК железе методом молекулярной динамики.

82. А.В.НАЗАРОВ, А.А.МИХЕЕВ. Моделирование атомной структуры в окрестности пор и оценки анизотропии их скорости роста.

83. М.В.САВВИН, А.В.НАЗАРОВ. Моделирование корреляционных эффектов при миграции вакансий и атомов в упорядочивающихся структурах.

84. Е.В.ГЛАДКИХ, И.И.МАСЛЕНИКОВ, А.С.УСЕИНОВ. Индентирование шариком как метод определения соотношения прикладываемой нагрузки и деформации материала.

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

86. А.В.КОСТЮХИНА, А.А.МОКРУШИН. Анизотропия деформационного упрочнения сплава Э110.

87. И.В. КОЗЛОВ, Г.Н. ЕЛМАНОВ, К.Е.ПРИХОДЬКО, В.С.МАШЕРА, Е.С.ГОРЕЛИКОВ<sup>3</sup>, С.А.ГУДОШНИКОВ.. Эволюция микроструктуры аморфных  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  микропроводов при термической обработке.

88. В.М.ХАТКЕВИЧ, С.А.НИКУЛИН. Применение акустической эмиссии для анализа деформации и разрушение сталей в различном структурном состоянии.

89. О.Н.СЕВРЮКОВ, А.А.ИВАННИКОВ, В.Е.МИСНИКОВ, М.А.ПЕНЯЗЬ, И.В.ФЕДОТОВ, А.С.ПЕКЛИЧ. Применение сплава СТЕМЕТ 1301 для соединения молибдена со сталью 12Х18Н10Т.

90. С.Г.ВАСИЛЬЕВ, А.В.МОЛЯРОВ. Механические свойства стали 09Г2С при повышенных температурах.

91. 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, М.В.ЧЕРКАЩЕНКО. Исследование ближнего упорядочения и электронной плотности модельных сплавов на основе железа.

92. И.В.ФЕДОТОВ, О.Н.СЕВРЮКОВ, А.Н.СУЧКОВ, Б.А.КАЛИН, А.А.ИВАННИКОВ, Ю.М.НЕМЧИНОВ. Высокотемпературная пайка молибденового сплава TZM и графита МПГ-6 для конструирования анода аппарата компьютерной томографии.

93. А.В.ПОПОВА, В.И.ОДИНЦОВ, И.В. КОЗЛОВ, Г.Н.ЕЛМАНОВ, Е.В.КОСТИЦИНА, Е.С.ГОРЕЛИКОВ, С.А.ГУДОШНИКОВ. Влияние технологических параметров на магнитные свойства аморфных ферромагнитных микропроводов на основе кобальта.

94. А.С. УСЕИНОВ, Е.В. ГЛАДКИХ, М.Д. БУТЮТО, В.Н. РЕШЕТОВ, А.А. РУСАКОВ. Современные отечественные приборы и методики для комплексной диагностики механических свойств материалов.

95. Д.В.КУЗНЕЦОВ, С.М.ТИХОНОВ, А.А.КОМИССАРОВ, Е.П.СИДОРОВА, Ю.В.КОМИССАРОВА, Г.В.СЕРОВ, А.В.МИТРОФАНОВ, И.Г.РОДИОНОВА. Разработка новой марки коррозионностойкой трубной стали в рамках проекта СЕВЕРКОР.

## PROGRAM

### 23 October

- 9<sup>00</sup> – 10<sup>00</sup>** Registration of participants  
**10<sup>00</sup> – 10<sup>20</sup>** Opening of the School-Conference  
**10<sup>20</sup> – 11<sup>10</sup>** A.YU. Gagarinskiy (NRC "Kurchatov institute"). Global energy prospects.  
**11<sup>10</sup> – 12<sup>00</sup>** S.V.Mirnov (Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research). Several issues of tokamak-based fusion energy.

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

- 12<sup>20</sup> – 13<sup>10</sup>** B.A.Kalin (NRNU MEPhI). Materials science problems of the core materials of innovative nuclear reactors.  
**13<sup>10</sup> – 14<sup>00</sup>** V.D. Risovany (SC "Rosatom"). Absorbent materials for innovative nuclear reactors.

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

- 15<sup>00</sup> – 15<sup>50</sup>** B.A. Gurovich (NRC "Kurchatov Institute"). Recovery annealing for the lifetime extension of operating VVER-1000 reactor pressure vessels and internals.  
**15<sup>50</sup> – 16<sup>40</sup>** A.V. Dub (JSC "Science and Innovations"). Additive technologies for production of the power industry equipment.

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

- 17<sup>00</sup> – 18<sup>00</sup>** Poster session (Section 1)

### 24 October

- 10<sup>00</sup> – 10<sup>50</sup>** I.E. Lyublinski (SC Red Star). Liquid metals in thermonuclear systems with magnetic confinement: experience and prospects.  
**10<sup>50</sup> – 11<sup>40</sup>** S.V. Dobatkin (Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the RAS). High strength ultrafine-grained copper-based alloys with high service properties for electrotechnical applications.

#### Coffee Break 11<sup>40</sup> – 12<sup>00</sup>

- 12<sup>00</sup> – 12<sup>50</sup>** A.B.Rozhnov (The National University of Science and Technology "MISIS"). Multilayer and hybrid materials for hard exploitation conditions.  
**12<sup>50</sup> – 13<sup>40</sup>** Nikitina A.A. (JSC A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials). Development of prospective core materials for fast neutron reactors.

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

- 14<sup>40</sup> – 15<sup>30</sup>** Aurelie Gentils (University Paris-Sud, France). Understanding the formation of nano-size metallic oxide particles in oxide-dispersion-strengthened (ODS) FeCr steels for advanced fission and fusion nuclear power plants.  
**15<sup>30</sup> – 16<sup>20</sup>** F.A. Garner (Radiation Effects Consulting, USA). Impact of radiation-induced changes in dimension and mechanical properties of reactor structural components.

#### Coffee Break 16<sup>20</sup> – 16<sup>40</sup>

**16<sup>40</sup> – 18<sup>00</sup>** Poster session (Section 2)

### **25 October**

**10<sup>00</sup> – 10<sup>50</sup>** N.G. Milovzorov (OOO «Teskan»). Possibilities of scanning electron microscope Tescan for the study of construction and functional materials.

**10<sup>50</sup> – 11<sup>40</sup>** Short Michael Philip (Massachusetts Institute of Technology, USA). Pinpointing the onset of radiation void swelling with transient grating spectroscopy.

#### **Coffee Break 11<sup>40</sup> – 12<sup>00</sup>**

**12<sup>00</sup> – 12<sup>50</sup>** Aurelie Gentils (University Paris-Sud, France). Radiation stability of spent nuclear fuel - experimental simulation with ions and microstructure characterization by in situ techniques (RBS/C, TEM).

**12<sup>50</sup> – 13<sup>40</sup>** Ayman I. Hawari (North Carolina State University, USA) Impact of atomic structure and radiation damage on neutronic performance of graphite moderators.

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

**14<sup>40</sup> – 18<sup>00</sup>** Excursions. Introductory Practices. Poster session.

### **26 October**

**10<sup>00</sup> – 13<sup>20</sup>** Excursions. Introductory Practices. Poster session.

#### **Lunch break 13<sup>20</sup> – 14<sup>20</sup>**

**14<sup>20</sup> – 15<sup>00</sup>** Vladimir Krsjak (Slovak University of Technology in Bratislava, Bratislava, Slovakia). Experimental studies of helium interaction with radiation defects in metals and alloys.

**15<sup>00</sup> – 15<sup>40</sup>** S.V. Starikov (Joint Institute for High Temperatures of RAS). Multiscale computer modeling of nuclear fuel behavior.

**15<sup>40</sup> – 16<sup>20</sup>** Roman Voskoboinikov (NRC «Kurchatov Institute»). MD simulations of radiation damage in Ti-Al based structural intermetallics .

#### **Coffee Break 16<sup>20</sup> – 16<sup>40</sup>**

**16<sup>40</sup> – 17<sup>20</sup>** Smagul Karazhanov (Institute for Energy Technology (IFE), Kjeller, Norway). Current state and perspectives of research in a field of photo-voltaic technology.

**17<sup>20</sup> – 18<sup>00</sup>** S.A. Nikulin (The National University of Science and Technology “MISIS”). acoustic-emission technologies for quality diagnostic and monitoring of the fracture of the materials of energy plants.



АННОТАЦИИ ЛЕКЦИЙ  
ABSTRACTS OF LECTURES

А.Ю. ГАГАРИНСКИЙ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
г. Москва, Россия  
agagarin@kia.ru*

## **ПЕРСПЕКТИВЫ МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Опыт развития цивилизации свидетельствует, что благосостояние стран и народов прямо зависит от потребляемой энергии, что очевидным и естественным образом заставляет людей стремиться это потребление наращивать. За последние тридцать лет XX века мировое потребление энергетических ресурсов выросло почти в два раза и к 2017 году составляет 13,3 млрд. тонн нефтяного эквивалента в год. Органическое топливо составляет 86% в структуре мирового потребления так называемой первичной энергии. Из остальных коммерчески используемых источников энергии на долю гидроэнергии приходится 6,7%, атома – 4,5%, других возобновляемых источников – 3,2%.

В докладе обсуждаются предпосылки и перспективы роста потребления энергии в мире и обеспечения его различными энергетическими источниками.

При этом основное внимание сосредоточено на наиболее обсуждаемых в последнее время аспектах мирового энергетического процесса. В их числе: мировые ресурсы и ограничения использования органики; «сланцевая революция» в добыче органического топлива; роль низкоуглеродных источников в производстве энергии и состояние и перспективы возобновляемой энергетики.

В области ядерной энергетики дан краткий обзор её состояния и развития в мире и России, генеральная линия которого – направление реакторов с водой под давлением как основы мирового и отечественного ядерно-энергетического прогресса.

Обсуждаются наиболее дискутируемые в российском ядерном сообществе вопросы дальнейшего развития: принципиальное совершенствование направления водо-водяных энергетических реакторов, технологическая основа и темпы наращивания направления реакторов на быстрых нейтронах, малая ядерная энергетика, альтернативные предложения для долгосрочной перспективы.

A.YU. GAGARINSKIY

*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

agagarin@kiae.ru

## **GLOBAL ENERGY PROSPECTS**

Throughout the existence of our civilization, peoples and countries have always depended upon energy in order to prosper, so they have naturally sought to increase their energy consumption. Over the last three decades of the 20th century, global energy consumption has almost doubled and reached 13.3 btoe per year by 2017. The consumption of so-called primary energy consists of the following commercial sources: fossil fuels (86%); hydro (6.7%); nuclear (4.5%); and other renewables (3.2%).

This paper discusses prerequisites and prospects for the growth of global energy consumption on the basis of various energy sources.

The focus is on most debatable global energy aspects that include: fossil energy resources and constraints; “shale revolution”; low-carbon share in the primary energy; and status and prospects of renewable energy sources.

As regards nuclear energy both in Russia and in the world, this paper provides a brief overview of its status and development based on pressurized water reactors as a cornerstone of national and global progress of nuclear energy.

This paper also addresses the issues of further development that are now widely discussed within the Russian nuclear community, namely: fundamental improvement of VVERs; basic technologies and rates of development of fast neutron reactors; small power plants; alternative concepts suggested for longer term; etc.

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ МАГНИТНОГО СИНТЕЗА

Стационарный характер плазменного горения – одно из основных требований, предъявляемых энергетиками к будущему реактору термоядерного синтеза. Однако именно оно встречается сегодня основные трудности. Анализ, так называемых, «лучших режимов» работы токамаков на протяжении последних 55 лет показал, что максимально допустимая мощность нагрева плазмы  $P$  для каждого отдельного токамака менялась при этом примерно пропорционально  $S$ -площади камеры, обращенной к плазме [1], что выглядит как существование некоторого предела  $P/S = 0.2 \pm 0.1$  МВт/м<sup>2</sup>, превышение которого приводит к развитию МГД-возмущений и деградации плазменного удержания. При этом максимально допустимая мощность нагрева  $P$  возрастает с ростом магнитного поля  $B_T$ , растет с уменьшением  $Z$ -материала первой стенки - и снижается по мере увеличения длительности плазменного импульса  $t \sim 1/(P/S)^{1.7}$ , как показали эксперименты на токамаках со сверхпроводящими обмотками магнитного поля, а также на стеллараторе LHD (Рисунок).

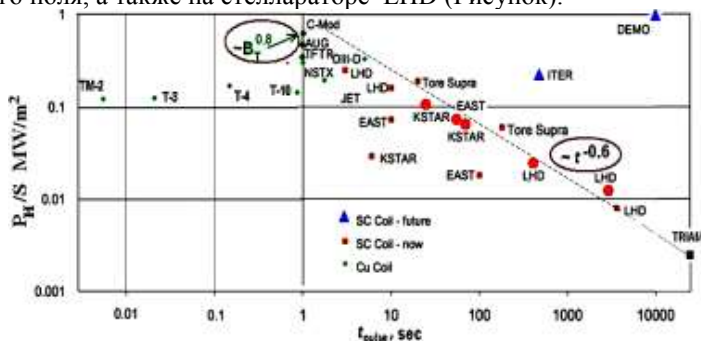


Диаграмма  $P/S$  -  $t$  для основных известных токамаков и LHD

Если предположить, что причиной видимого ограничения  $P/S$  является пробой плазменного слоя на границе плазма-стенка [2], видимое снижение  $P/S$  по мере увеличения длительности разряда можно объяснить постепенным накоплением на стенках камеры продуктов эрозии ее внутренних компонентов, контактирующих с плазмой, что может провоцировать пробой плазма-стенка. Это означало бы, что стационарный плазменный процесс в токамаках возможен только при условии постоянного удаления продуктов эрозии из камеры токамака-реактора. В качестве одного из способов решения этой проблемы рассматривается организация в слое плазма-стенка замкнутой циркуляции лития между соответствующими эмиттерами лития и коллекторами. Эти вопросы предполагается обсудить в сообщении.

[1] Mirnov S.V., et al. Nucl. Fus. **55** (2015) 123015

[2] Mirnov S.V. Plasma Phys. Contr. Fus. **58** (2016) 022001

## ABOUT SOME PROBLEMS OF THE MAGNETIC FUSION ENERGETICS

The steady state hot plasma operation should be the main requirement on the future fusion reactor. However, this requirement finds difficulties. The analysis of the tokamak "high performance regimes" for the past 55 years showed that the maximum allowable plasma heating power  $P$  for each separate tokamak changes approximately linearly with  $S$ -area of the chamber wall facing to the plasma [1]. This seems as the existence of some kind of limit ( $P/S$  limit  $0.2 \pm 0.1$  MW/m<sup>2</sup>) which exceeding leads to the MHD excitation and degradation of the plasma confinement. The maximum allowable heating power  $P$  increases with increase of the magnetic field, with decreasing  $Z$  of the material of the first wall and reduces with the plasma shot duration  $t \sim 1/(P/S)^{1.7}$  as shown the experiments on superconductor tokamaks and stellarator LHD (Figure).

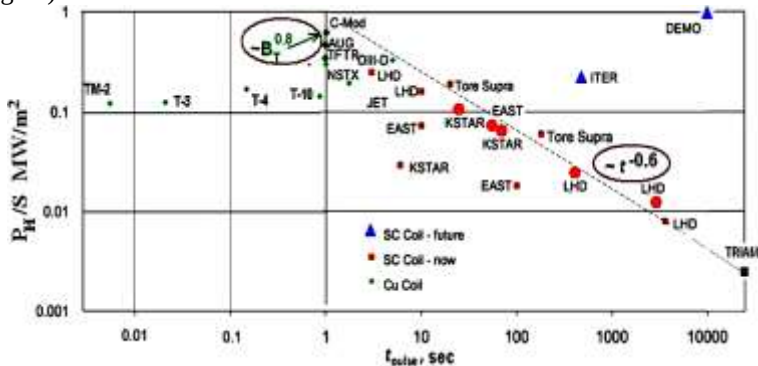


Figure. Diagram  $P/S$  -  $t$  shots for number of fusion devices

If we suppose that the reason of the  $P/S$  restrictions is the breakdown of the plasma sheet [2], we can explain the visible  $P/S$  reducing as result of the gradual collection of erosion products of limiters and divertor on the chamber wall that can provoke the plasma-wall breakdown. That means that the steady state plasma operation, which needs for the industrial fusion reactor, will require the constant removal of erosion products from the tokamak chamber. The use of lithium circulation between the wall and the plasma in the form of the closed loop can be one of the solutions of this problem. These questions will discuss in the communication.

[1] Mirnov S.V., et al. Nucl.Fus. **55** (2015) 123015

[2] Mirnov S.V. Plasma Phys. Contr. Fus. **58** (2016) 022001

The steady state character of the hot plasma operation should be the main requirement on the tokamak fusion reactor.

Б.А.КАЛИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия  
bakalin@mephi.ru*

## **МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ АКТИВНЫХ ЗОН ИННОВАЦИОННЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

Концепция развития атомной энергетики (АЭ) на базе реакторов четвертого поколения (Generation 4), наряду с развитием современной энергетики на основе реакторов на тепловых нейтронах (RTN), предполагает строительство быстрых натриевых реакторов (SFR); сверхвысокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (VHTR); газоохлаждаемых быстрых реакторов (GFR); легководных реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя (SCWR); быстрых реакторов, охлаждаемым теплоносителем на основе свинца или его сплавов (LFR); жидкосолевых (расплавосолевых) реакторов (MSR).

Темп развития ядерной энергетики определяется экономикой и материаловедением, призванным обеспечить безопасность и конкурентность АЭ на энергетическом рынке за счет увеличения параметров теплоносителя, выгорания топлива и коэффициента использования мощности. Материаловедческие вопросы активных зон являются ключевыми при реализации проектов. Поэтому в докладе рассмотрены перспективные направления этого поиска новых материалов для активных зон реакторов. Например для АЭ на базе RTN это совершенствование сплавов циркония, разработка толерантного топлива. Развитие SFR связано с созданием малораспухающих жаропрочных сталей, освоение VHTR определяется наличием тугоплавких материалов. Максимальный масштаб поисковых материаловедческих задач связан с созданием SCWR и MSR.

B.A.KALIN

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

bakalin@mephi.ru

## **MATERIALS SCIENCE PROBLEMS OF THE CORES OF INNOVATIVE NUCLEAR REACTORS**

The development concept of nuclear power engineering (NPE) based on the fourth generation reactors (Gen-IV Reactors), along with the development of the modern power engineering based on the reactors on thermal neutrons (RTN), assumes the construction of sodium fast reactors (SFR), very-high-temperature gas-cooled reactors (VHTR), gas-cooled fast reactors (GFR), supercritical light water reactors (SCWR), fast reactors with a coolant based on lead or its alloys (LFR) and molten salt reactors (MSR).

The development rate of nuclear power engineering is determined by the economy and materials science that should ensure its safety and competitiveness *in the energy market* at the expense of increasing the coolant parameters, the fuel burn-up and the power utilization factor. Materials science questions of the reactor cores are key in the implementation of projects. Therefore, the report looks at promising directions of the search of new materials for the cores of reactors. For example, for the NPE based on RTN, this is the improvement of zirconium alloys and the development of tolerant fuel. The development of SFR is connected with the creation of low-swelling heat-resistant steels and the development of VHTR is determined by the presence of refractory materials. The maximum scale of the search of materials science problems is connected with the creation of SCWR and MSR.

## ПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

До настоящего времени как у нас в стране, так и за рубежом строились и продолжают эксплуатироваться в России, Индии, Китае и Японии ядерные реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-реакторы). Подходы в использовании в них поглощающих материалов стержней управления и защиты (далее стержней регулирования) были одинаковы и обусловлены особенностями активных зон. Требуются поглощающие материалы с высокими сечениями поглощения нейтронов в быстром спектре энергий для обеспечения большого запаса реактивности при относительно небольшом количестве мест (ячеек) под стержни регулирования. Самую высокую эффективность поглощения «быстрых» нейтронов имеют изотопы бор-10, а из материалов с бором - карбид бора ( $B_xC$ , где  $x = 4-10$ ) с обогащением бора до 97% по изотопу бор-10. Карбид бора можно рассматривать, как гомогенный поглощающий (изотопы бор-10) и замедляющий (атомы углерода и изотопы В-11) материал. Атомы углерода и изотопа бор-11 в быстром спектре нейтронов играют роль замедлителя, снижают энергию нейтронов, что приводит к увеличению скоростей захвата нейтронов изотопами бор-10. Не смотря на высокую радиационную повреждаемость карбида бора, достаточно низкую совместимость с конструкционными материалами, высокую стоимость бора с высоким содержанием изотопов бор-10 все действующие ядерные реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем используют в стержнях регулирования карбид бора различного обогащения по изотопу бор-10, от 19,8% до 97%.

В стержнях регулирования ядерных реакторов на быстрых нейтронах применялись также оксид европия ( $Eu_2O_3$ ) и оксид европия в металлических матрицах ( $Eu_2O_3 + Mo$ ). Исследовали различные матрицы, включая медь, ниобий, никель, кобальт и другие. Стержни регулирования на их основе применялись в реакторах на быстрых нейтронах БОР-60 и БН-600, но из-за высокой активности накапливаемых в них радионуклидов  $Eu-152, 154, 155$  с большим периодом полураспада (до 13 лет) был проведен переход на карбид бора. Достаточно высокую физическую эффективность в быстром спектре нейтронов имеет тантал ( $Ta$ ), но изделия из тантала не прошли реакторные испытания. Из-за высокого остаточного энерговыделения после выгрузки из реактора изделия разрушались на воздухе за сравнительно короткое время.



Были разработаны конструкции стержней регулирования «ловушечного» типа с гетерогенным размещением поглощающих ( $B_4C$  или  $Eu_2O_3$ ) и замедляющих материалов ( $ZrH_2$ ). Изделия не нашли широкого применения по причине высокой активности радиоизотопов европия и высокой повреждаемости карбида бор.

В отечественных стержнях управления и защиты (далее стержни регулирования) энергетических ядерных реакторов на тепловых нейтронах ВВЭР и РБМК в качестве поглощающих материалов применяются карбид бора ( $B_4C$ ) с естественным содержанием изотопов бор-10 и бор-11 (19,8% и 80,2%, соответственно) и титанат диспрозия ( $Dy_2O_3TiO_2$ ). Установленное время эксплуатации стержней регулирования с  $B_4C$  и с  $B_4C/Dy_2O_3TiO_2$  (вех и низ изделий) в реакторе ВВЭР-1000 составляет 10 лет. Максимально достигнутый ресурс стержней регулирования с поглощающим материалом 80%Ag-15%In-5%Cd зарубежных PWR (аналог ВВЭР-1000) составляет 21 год. Время работы стержней регулирования с титанатом диспрозия и оксидом европия в исследовательских реакторах, например, МИР и СМ-3 мощностью по 100МВт также составляют около 20 лет. Предложены конструкции стержней регулирования нового поколения с гафнатом диспрозия ( $nDy_2O_3mHfO_2$ ) для энергетических ядерных реакторов типа ВВЭР-1000 с повышенными технико-экономическими характеристиками и ресурсом более 20 лет, а также с оксидом европия в матрице из кобальта ( $15\%Eu_2O_3 + 85\%Co$ ), что позволяет в стержнях регулирования набирать радиоизотопы Co-60 и Eu-152,154,155.

V.D. RISOVANY

*SC "Rosatom", Moscow, Russia*

## **ABSORBENT MATERIALS FOR INNOVATIVE NUCLEAR REACTORS**

Fast neutrons reactors with a sodium coolant were previously building in Russia and abroad. At present, fast reactors continue to be used in Russia, India, China and Japan. There were the same approaches to choose materials of the control and protection rods and always determined by the features of the active zones. Absorbent materials with high neutron emission cross sections in the fast energy spectrum are necessary to provide a large reactivity margin with a relatively small number of cells under the control rods. Boron-10 isotopes are materials with the highest absorption efficiency of "fast" neutrons for example boron carbide ( $B_xC$ , where  $x = 4-10$ ) with boron-10 isotope enrichment up to 97%. Boron carbide can be considered as a homogeneous absorbing (boron-10 isotopes) and retarding (carbon atoms and isotopes B-11).

Carbon atoms and boron-11 isotope in the fast neutron spectrum plays retarding role (reduce the neutron energy). The last leads to increase of neutrons capture rates by boron-10 isotopes. In spite of the high radiation damage of boron carbide, the low compatibility with construction materials, the high cost of boron with a high content of boron-10 isotopes, boron carbide is used in operating fast reactors with various content of B-10: from 19.8% to 97%.

Europium oxide in metallic matrices ( $\text{Eu}_2\text{O}_3 + \text{Mo}$ ) and pure europium oxide ( $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ) were also used in the control rods of fast reactors. Various matrices were studied, including copper, niobium, nickel, cobalt, and others. The control rods based on them were used in fast reactors BOR-60 and BN-600, but due to the high activity of accumulated radionuclides Eu-152,154,155 with a long half-life (up to 13 years),  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  changed to boron carbide. Tantalum is material with sufficiently high physical efficiency in the fast neutron spectrum but products from tantalum were failing reactor test. Because of the high residual energy release after unloading from the reactor, the tantalum products were destroyed in the air in a relatively short time.

There are also were constructed control rods of "trap type" with heterogeneous arrangement of absorbing ( $\text{B}_4\text{C}$  or  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ) and retarding materials ( $\text{ZrH}_2$ ). The products were not widely used due to high activity of europium radioisotopes and high damage of boron carbide.

In Russia, carbide of boron ( $\text{B}_4\text{C}$ ) with natural content of boron-10, dysprosium titanate ( $\text{Dy}_2\text{O}_3\text{TiO}_2$ ) and boron-11 isotopes (19.8% and 80.2%) is used as the absorbing materials in control and protection rods for power nuclear reactors VVER and RBMK. The established operating time of control rods with  $\text{B}_4\text{C}$  and  $\text{B}_4\text{C}/\text{Dy}_2\text{O}_3\text{TiO}_2$  (top and bottom of products) in the VVER-1000 reactor is 10 years. The maximum achieved resource of control rods with absorbing material of 80% Ag-15% In-5% Cd of foreign PWR (VVER-1000 analog) is 21 years. The operating time of control rods with dysprosium titanate and europium oxide in research reactors (for example MIR and SM-3 with a capacity of 100 MW) are also about 20 years. New generation control rods design with dysprosium hafnate ( $\text{nDy}_2\text{O}_3\text{mHfO}_2$ ) for VVER-1000 with improved technical and economic characteristics and a resource for more than 20 years, as well as with europium oxide in a cobalt matrix (15%  $\text{Eu}_2\text{O}_3 + 85\% \text{Co}$ ), which makes it possible to get radioisotopes Co-60 and Eu-152,154,155 in control rods.

Б.А. ГУРОВИЧ<sup>1</sup>, Е.А. КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, А.С. ФРОЛОВ<sup>1</sup>,  
Д.А. МАЛЫЦЕВ<sup>1</sup>, С.В. ФЕДОТОВА<sup>1</sup>, Д.А. ЖУРКО<sup>1</sup>, Д.Ю. ЕРАК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>-НИИЦ «Курчатовский институт», Москва Россия,

<sup>2</sup>-НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

evgenia-orm@yandex.ru

## **ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЙ ОТЖИГ ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ КОРПУСОВ И ВКУ ДЕЙСТВУЮЩИХ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000**

Восстановительные отжиги – эффективный способ возврата микроструктурных параметров и механических свойств материалов после воздействия эксплуатационных факторов ЯЭУ (нейтронного облучения и повышенных температур) к значениям, характерным для исходного состояния, что значительно позволяет продлить срок службы изделий из них. Причем данная процедура применима как к корпусам реакторов типа ВВЭР-1000, изготавливаемых из сталей феррито-мартенситного класса, так и изделий из коррозионно-стойких аустенитных сталей, например, внутрикорпусных устройств (ВКУ), размещаемых в активной зоне реактора.

В процессе восстановительного отжига сталей корпусов реакторов (КР) ВВЭР-1000 необходимо обеспечить не только исчезновение радиационно-индуцированных изменений наноструктуры, но и значительное растворение зернограницных сегрегаций фосфора.

Механизмы деградации структуры аустенитных коррозионно-стойких сталей под действием нейтронного облучения и повышенных температур несколько отличаются от механизмов, характерных для материалов КР. Помимо изменения фазового состава происходит образование вакансионных газонаполненных пор, перераспределение легирующих элементов близ границ зерен, а также накопление водорода и гелия за счет ядерных реакций. Это, в свою очередь, является причиной деградации материалов данного класса: изменение объемной плотности, прочностных и пластических характеристик, а также трещиностойкости и стойкости к коррозионному растрескиванию.

В данной работе проведен комплекс микроструктурных исследований (с использованием просвечивающей и растровой электронной микроскопии, атомно-зондовой томографии, а также оже-электронной спектроскопии) отожженных материалов для выявления влияния восстановительного отжига материалов корпуса и элементов ВКУ реактора ВВЭР-1000 на полноту возврата структурного состояния и отсутствие развития сегрегационных процессов по границам зерен при проведении отжига.

Экспериментально подтверждена возможность практически полного

восстановления структуры и свойств материалов КР ВВЭР-1000 в результате восстановительных отжига по режиму  $565 \pm 15^\circ\text{C}/100\text{ч}$  после облучения в широком диапазоне флюенсов нейтронов.

Результаты комплексных исследований структурного состояния и свойств аустенитных сталей Cr-Ni-Ti композиций после облучения в реакторах БОР-60 и ВВЭР-1000 в температурном диапазоне  $320\text{--}450^\circ\text{C}$  при повреждающих дозах вплоть до 150 сна, показали, что за счет восстановительного отжига  $(900\text{--}1000)^\circ\text{C}$  также возможен возврат структурного состояния (исчезновение радиационно-индуцированных фаз, пористости и восстановление химического состава границ зерен), что приводит к возврату механических свойств и снижению склонности сталей к межкристаллитной коррозии до уровня, практически соответствующего исходному состоянию материалов ВКУ.

Это показывает возможность использования восстановительных отжигов для обеспечения продления эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР-1000 до 60 лет и более.

B.A. GUROVICH<sup>1</sup>, E.A. KULESHOVA<sup>1,2</sup>, A.S. FROLOV<sup>1</sup>,  
D.A. MALTSEV<sup>1</sup>, S.V.FEDOTOVA<sup>1</sup>, D.A.ZHURKO<sup>1</sup>, D.YU.ERAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>-NRC "Kurchatov institute", Moscow, Russia

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

evgenia-orm@yandex.ru

## **RECOVERY ANNEALING FOR THE LIFETIME EXTENSION OF OPERATING VVER-1000 REACTOR PRESSURE VESSELS AND INTERNALS**

Recovery annealing is an effective method to recover the microstructure parameters and mechanical properties of materials after exposure to NPP operational factors (neutron irradiation and elevated temperatures) to the values typical for the initial state, which allows its lifetime extension. Moreover, this procedure is applicable both to VVER-type reactor pressure vessels (RPV), made of ferritic-martensitic grade steels, and internals located in the reactor core and fabricated from corrosion-resistant austenitic steels.

During recovery annealing of VVER-1000 RPVs it is necessary to ensure not only the disappearance of radiation-induced nanostructure changes, but also a significant dissolution of grain-boundary phosphorus segregation.

Degradation mechanisms of corrosion-resistant austenitic steels under neutron irradiation and elevated temperatures differ from that for RPV materials. Beside the phase composition changing, formation of vacancy gas-filled pores, redistribution of alloying elements near grain boundaries as well as hydrogen and helium accumulation due to nuclear reactions take place. This, in turn,

causes this class of materials degradation: changes in volume density, strength and plastic characteristics, as well as crack resistance and resistance to stress-corrosion cracking.

In this paper, a complex of microstructural studies (using transmission and scanning electron microscopy, atom probe tomography and Auger electron spectroscopy) of annealed materials was carried out to reveal the effect of VVER-1000 RPV and internal elements recovery annealing on the completeness of structural state restoration and the absence of segregation processes along grain boundaries during annealing.

The possibility of almost complete restoration of structure and properties of VVER-1000 RPV materials subjected to irradiation in a wide range of fast neutron fluences as a result of recovery annealing at  $565 \pm 15$  °C/100 h was experimentally confirmed.

The results of complex studies of the structural state and properties of Cr-Ni-Ti austenitic steels after irradiation in BOR-60 and VVER-1000 reactors in the temperature range 320-450 °C with damaging doses up to 150 dpa showed that recovery annealing (900-1000) °C also provides the structural state return (disappearance of radiation-induced phases, porosity and recovery of grain boundaries chemical composition). This leads to mechanical properties return and decrease of the steel tendency to intergranular corrosion to a level that practically corresponds to the initial state of internal materials.

This demonstrates the possibility of using recovery annealing to ensure the lifetime extension of VVER-1000 reactors up to 60 years and more.

И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ  
*АО «Красная Звезда», НИЯУ МИФИ, Москва, Россия*  
lyublinski@yandex.ru

## **ЖИДКИЕ МЕТАЛЛЫ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ СИСТЕМАХ С МАГНИТНЫМ УДЕРЖАНИЕМ: ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Достижение стационарного режима функционирования термоядерного реактора ведёт к необходимости развития в области конструкции и выбора материалов для элементов, контактирующих с плазмой. В этом смысле наиболее перспективным решением является концепция использования капиллярно-пористых систем с жидким металлом, которые обеспечивают самовозобновление поверхности элементов, контактирующих с плазмой, замкнутый оборот в них изотопов водорода, повышение параметров плазмы и способствуют достижению постоянного режима её горения. Рассматривается опыт развития, создания и экспериментального исследования жидкометаллических капиллярно-пористых систем, базирующийся на результатах испытания моделей элементов токамаков T-11M, T-10, FTU и KTM, контактирующих с плазмой.

I.E. LYUBLINSKI  
*JRC Red Star, NRNU MEPhI, Moscow, Russia*  
lyublinski@yandex.ru

## **LIQUID METALS IN THERMONUCLEAR SYSTEMS WITH MAGNETIC CONFINEMENT: EXPERIENCE AND PROSPECTS**

Realization of steady-state operation of fusion reactor leads to the necessity of development of essentially new design and material for plasma facing elements. In this sense the most perspective solution is the concept of use of capillary-porous system with liquid metal that provide plasma facing elements surface self-renewal, closed circulation of their hydrogen isotopes, plasma performance improvement and promote achievement of practically stationary modes of plasma burning. Experience in development, creation and experimental study of capillary-porous system based models of steady-state operating liquid metal plasma facing elements of T-11M, T-10, FTU and KTM tokamaks are considered.

С.В. ДОБАТКИН<sup>1,2</sup>, Д.В. ШАНЬГИНА<sup>1,2</sup>, Н.Р. БОЧВАР<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва

<sup>2</sup>НИТУ «МИСиС», Лаборатория гибридных наноструктурных материалов

## **ВЫСОКОПРОЧНЫЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ МЕДНЫЕ СПЛАВЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Проведено исследование структуры и свойств низколегированных сплавов на основе меди (Cu-0,7%Cr, Cu-0,18%Zr, Cu-0,9%Hf, Cu-0,5%Cr-0,08%Zr, Cu-0,7%Cr-0,07%Zr и Cu-0,7%Cr-0,9%Hf) после интенсивной пластической деформации (ИПД) методами кручения под высоким давлением (КВД) и равноканального углового прессования (РКУП).

Микротвердость после КВД увеличивается в ряду сплавов Cu-0,7%Cr, Cu-0,18%Zr, Cu-0,9%Hf, Cu-0,5%Cr-0,08%Zr и Cu-0,7%Cr-0,9%Hf с 1,7 до 2,4 ГПа за счет уменьшения среднего размера зерна с 209 до 108 нм. Показано, что выделяющиеся при старении частицы  $\text{Cu}_5\text{Zr}/\text{Cu}_5\text{Hf}$  приводят к дополнительному упрочнению и более эффективно стабилизируют УМЗ структуру при нагреве, по сравнению с частицами Cr. Полученные закономерности были подтверждены исследованиями низколегированных бронз после РКУП. Установлено, что применение дополнительного старения позволяет существенно повысить свойства сплавов. Так, в сплаве Cu-0,7%Cr-0,9%Hf после РКУП и старения при температуре 450 °С (2,5ч) предел прочности и предел усталости (на базе  $10^7$  циклов) повышаются в 2,2 и 2 раза (до 602 и 375 МПа), соответственно, по сравнению со сплавом после закалки, при достаточно высоких электропроводности (78%IACS) и относительном удлинении до разрушения ( $\delta=11\%$ ). Также, на примере сплава Cu-0,7%Cr-0,07%Zr после КВД и старения при 450°С (1ч) была показана возможность значительного повышения износостойкости в условиях сухого трения: потеря массы сократилась в 8,5 раз по сравнению с исходным состоянием.

Таким образом, применение закалки, ИПД и последующего старения приводит к значительному повышению механических и эксплуатационных свойств исследуемых сплавов.

Подобная комбинация свойств позволяет повысить стойкость электродов контактной сварки. Исследования показали, что относительное уширение рабочей поверхности электрода, изготовленного из УМЗ сплава Cu-0,7%Cr-0,9%Hf после 2000 циклов сварки в 5 раз меньше, чем для исходного крупнокристаллического материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект №14.А12.31.0001) и Программы повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» (проект №К2-2016-062).

S.V. DOBATKIN<sup>1,2</sup>, D.V. SHANGINA<sup>1,2</sup>, N.R. BOCHAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*A.A.Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*NUST "MISIS", Laboratory of Hybrid Nanostructured Materials, Moscow*

## **HIGH STRENGTH ULTRAFINE-GRAINED COPPER-BASED ALLOYS WITH HIGH SERVICE PROPERTIES FOR ELECTROTECHNICAL APPLICATIONS**

Structure and properties of low-alloyed copper-based alloys (Cu-0.7%Cr, Cu-0.18%Zr, Cu-0.9%Hf, Cu-0.5%Cr-0.08%Zr, Cu-0.7%Cr-0.07%Zr, and Cu-0.7%Cr-0.9%Hf) after severe plastic deformation (SPD) using techniques of high pressure torsion (HPT) and equal channel angular pressing (ECAP) have been studied.

The microhardness of the alloys after HPT rises in the following row: Cu-0.7%Cr, Cu-0.18%Zr, Cu-0.9%Hf, Cu-0.5%Cr-0.08%Zr, and Cu-0.7%Cr-0.9%Hf alloys from 1.7 to 2.4 GPa while the grain size decreases from 209 to 108 nm. Cu<sub>5</sub>Zr and Cu<sub>5</sub>Hf particles suppress the grain growth in ultrafine-grained (UFG) structure more effectively than the Cr particles and provide additional hardening during aging. The results obtained on the alloys after HPT are in good agreement with data on the alloys after ECAP. It was found that the application of additional aging after SPD significantly improves the alloys properties. Thus, the Cu-0.7%Cr-0.9%Hf alloy after ECAP and subsequent aging at 450 °C (2.5 h) possesses sufficiently high conductivity (78% IACS) and elongation to fracture ( $\delta = 11\%$ ) while ultimate tensile strength and fatigue limit ( $10^7$  cycles) increase by a factor of 2.2 and 2 (to 602 and 375 MPa), respectively, relative to the quenched state. Also, considerably enhanced wear resistance under dry conditions is shown in the Cu-0.7%Cr-0.07%Zr alloy after HPT and aging at 450 °C (1h): weight loss decreases by a factor of 8.5 in comparison with the initial coarse-grained state.

Thus, the application of SPD and subsequent aging leads to simultaneously high electrical conductivity, strength, wear resistance and fatigue properties in low-alloyed Cu - based alloys.

This combination of properties results in a high durability of electrodes for resistance spot welding. Studies have shown that the working surface wear of the electrode from the UFG Cu-0.7%Cr-0.9%Hf alloy after 2000 welding cycles is smaller by a factor of 5, relative to a commercial coarse-grained alloy.

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant #14.A 12.31.0001) and Increased Competitiveness Program of NUST «MISiS» (grant # K2-2016-062).



А.Б. РОЖНОВ  
НИТУ «МИСиС», Москва, Россия  
rojnov@nm.ru

## **МНОГОСЛОЙНЫЕ И ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Энергетические установки нового поколения требуют создания новых конструкционных материалов с повышенным комплексом свойств, способных работать в сверхжестких условиях эксплуатации высоких давлений, температур, доз облучения и агрессивных сред. Учитывая такие требования и ограниченные возможности «мономатериалов», одним из перспективных подходов к созданию современных конструкционных материалов является создание композиционных (гибридных) материалов, сочетающих в себе положительные свойства компонентов. Одним из таких материалов является трехслойный материал, состоящий из ванадиевого сплава, покрытого с двух сторон коррозионностойкой сталью. Ванадиевый сплав обеспечивает высокую жаропрочность и радиационную стойкость, а сталь – высокую коррозионную стойкость. Одним из применений такого материала являются оболочки твэлов атомных реакторов на быстрых нейтронах, работающие в режиме замкнутого топливного цикла. В работе обобщаются достигнутые к настоящему времени результаты, касающиеся технологических аспектов получения трехслойных труб. *Работа выполнена при финансовой поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС», грант К2-2016-062*

A.B.ROZHN OV  
*The National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia*

## **MULTILAYER AND HYBRID MATERIALS FOR HARD EXPLOITATION CONDITIONS**

New generation power plants require the creation of new structural materials with an increased range of properties capable of operating in extreme conditions. One of the promising approaches to the creation of modern structural materials is the creation of composite (hybrid) materials. One such material is a three-layer material consisting of a vanadium alloy coated with stainless steel. Vanadium alloy provides high heat and radiation resistance, and steel - high corrosion resistance. One of the applications of such material is the fuel rod cladding of fast-neutron nuclear reactors. The paper summarizes the results achieved so far regarding the aspects of producing three-layer tubes.

## **РАЗВИТИЕ РАБОТ ПО ПЕРСПЕКТИВНЫМ МАТЕРИАЛАМ АКТИВНЫХ ЗОН РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века предусматривает строительство и пуск в эксплуатацию реакторов на быстрых нейтронах нового поколения с различным типом теплоносителя: натрий (БН-800, БН-1200, МБИР) и свинец (БРЕСТ-ОД-300).

Для обеспечения работоспособности строящихся реакторов и достижения экономически целесообразного выгорания ядерного топлива должны быть разработаны и обоснованы конструкционные материалы для активных зон, обладающие определенным уровнем радиационной стойкости и жаропрочности, а также высокой коррозионной стойкостью в теплоносителе, воде бассейна выдержки и при взаимодействии с продуктами деления ядерного топлива.

Для реакторов с натриевым теплоносителем ключевой является задача по созданию радиационно-стойких и жаропрочных оболочечных материалов, обеспечивающих выгорание топлива свыше 15 % т.а. Решение данной задачи предусмотрено за счет поэтапного использования в качестве оболочек твэлов аустенитных сталей ЧС68 и ЭК164 (максимальные повреждающие дозы ~ 90 и ~110-115 с.н.а., соответственно), дисперсионно-твердеющих жаропрочных ферритно-мартенситных сталей ЭК181 и ЧС139 (максимальная повреждающая доза ~140 с.н.а.) и дисперсионно-упрочненных оксидами (ДУО) сталей (максимальная повреждающая доза свыше 140 с.н.а.).

При разработке материалов активной зоны реакторов со свинцовым теплоносителем, помимо радиационной стойкости и жаропрочности, существенной проблемой является коррозионная стойкость в теплоносителе. Этой проблеме уделяется пристальное внимание - в настоящее время активно ведутся работы по исследованию коррозионной стойкости кандидатных оболочечных конструкционных материалов, среди которых сталь ферритно-мартенситного класса ЭП823 с повышенным содержанием кремния, биметаллические трубы, а также ДУО стали различного состава.

В качестве перспективных материалов активных зон, рассчитанных на повышенные параметры по температуре и дозе облучения, рассматриваются ванадиевые сплавы и композиционные материалы SiC/SiC.

A.A. NIKITINA  
JC "A.A. Bochvar High-technological Research Institute  
of Inorganic Materials", Moscow, Russia  
AANikitina@bochvar.ru

## **DEVELOPMENT OF PROSPECTIVE CORE MATERIALS FOR FAST NEUTRON REACTORS**

The strategy of development of atomic energy in Russia in the first half of XXI century contemplates construction and putting in operation of fast reactors of new generation with sodium (BN-800, BN-1200, MBIR) and lead (BREST-OD-300) coolants.

For assurance of the working capacity of reactors that are under construction and achievement of economically reasonable burn-up of nuclear fuel the structural core materials with necessary level of radiation resistance, heat resistance, corrosion resistance to products of fuel fission, corrosion resistance in coolant and in water of cooling pond must be developed and justified.

It is shown that for sodium cooled reactors the key challenge is creation of radiation resistant and heat resistant cladding materials, which must ensure the achievement of damage doses at least 140 dpa.

The solution of this problem is provided by step-by-step use as cladding materials of austenitic steels ChS68 and EK164 (maximum damage doses ~ 92 and ~110-115 dpa, respectively), precipitation-hardening heat resistant ferritic-martensitic steels EK181 and ChS139 (maximum damage dose ~140 dpa) and oxide dispersion strengthened (ODS) steels (maximum damage dose more than 140 dpa).

For development of core materials for reactor with lead coolant the most serious challenge is corrosion resistance of materials in coolant. Therefore at present time a very wide range of works on study of corrosion resistance of candidate materials is carrying out. As the basic material for the cladding tubes is considered a ferritic-martensitic steel EP823 with high silicon content. Besides EP823, bimetallic tubes and different ODS steels are under development.

Also vanadium alloys and composite SiC/SiC materials are considered as promising core materials for increased parameters of temperature and radiation doses.

**ПОНИМАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОКСИДНЫХ ЧАСТИЦ В  
ДИСПЕРСИОННО-УПРОЧНЕННЫХ ОКСИДАМИ (ДУО)  
СТАЛЯХ FeCr ДЛЯ ПЕРЕДОВЫХ ЯДЕРНЫХ И  
ТЕРМОЯДЕРНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Дисперсионно-упрочненные оксидами (ДУО) стали, армированные металлическими дисперсионными нанооксидами, являются перспективными конструкционными материалами для будущих крупномасштабных энергетических установок. Глубокое понимание механизмов, связанных с осаждением этих нанооксидов, улучшит производственные и механические свойства ДУО сталей с сильным экономическим воздействием на их индустриализацию. Идеальным инструментом для экспериментального изучения этих механизмов является ионная имплантация, где различные параметры синтеза выделений находятся под контролем. Эта презентация демонстрирует осуществимость и преимущества подхода синтеза ионным пучком, применяя синтез частиц оксида алюминия в модельных сплавах Fe-Cr [1-3].

Высокочистые сплавы Fe-10Cr имплантированы ионами Al и O при комнатной температуре и затем отжигали при 500 °C. Получен целый ряд интересных и неожиданных результатов, обеспечивающих ценный вклад в понимание механизмов, участвующих в осаждении оксидов металлов как при имплантации, так и во время отжига. Например, наблюдения электронной микроскопии показали, что нанооксиды появились уже при ионной имплантации при комнатной температуре. Это очень необычно, потому что для стандартного метода синтеза ионного пучка требуется дополнительный последующий высокотемпературный отжиг для выращивания осадков из имплантированных примесных атомов. Зарождение этих наночастиц диаметром несколько нм указывает на подвижность имплантированных элементов уже при комнатной температуре, что, очевидно, стимулируется точечными дефектами, создаваемыми при ионной имплантации. Рассмотрены наиболее интересные наблюдения, способствующих пониманию основополагающих механизмов зарождения и роста наночастиц.

Большой объем доступных наблюдений позволил сформулировать общую концепцию осаждения оксида металла в условиях синтеза ионного пучка, что дает разумное и непротиворечивое объяснение почти всех наших наблюдений. В этом отчете мы подробно обсудим эту концепцию и ее потенциал для прогнозирования эффективности осаждения оксида металла с помощью альтернативных пучков ионов металлов (например, Y, Ti или Zr вместо Al).

**UNDERSTANDING THE FORMATION OF NANO-SIZE  
METALLIC OXIDE PARTICLES IN OXIDE-DISPERSION-  
STRENGTHENED (ODS) FeCr STEELS FOR ADVANCED  
FISSION AND FUSION NUCLEAR POWER PLANTS**

ODS (Oxide Dispersed Strengthened) steels reinforced with metal dispersions of nano-oxides are promising structural materials for future large-scale energy facilities. The detailed understanding of the mechanisms involved in the precipitation of these nano-oxides would improve manufacturing and mechanical properties of ODS steels, with a strong economic impact for their industrialization. A perfect tool to experimentally study these mechanisms is ion implantation, where the various parameters of precipitate synthesis are under control. This presentation demonstrates the feasibility and advantages of the ion beam synthesis approach as applied to aluminium oxide particle synthesis in Fe-Cr model alloys [1-3].

High purity Fe-10Cr alloys were implanted with Al and O ions at room temperature and subsequently annealed at 500 °C. Quite a number of interesting and unexpected results were obtained, providing valuable contribution to the understanding of the mechanisms involved in the metal-oxide particle precipitation both under implantation and during the annealing. For example, transmission electron microscopy observations demonstrated that the nano-oxides had appeared already upon ion implantation at room temperature. This is very unusual because the standard ion beam synthesis technique requires an additional subsequent high-temperature annealing in order to grow the precipitates from implanted impurity atoms. The nucleation of these nanoparticles, of a few nm in diameter, indicates the mobility of implanted elements already at room temperature, which is evidently promoted by point defects created during ion implantation. A review of the most interesting observations strongly contributing to the understanding of the underlying mechanisms of nano-particle nucleation and growth will be given.

The large body of available observations has allowed us to formulate a general concept of metal oxide precipitation in ion beam synthesis conditions that provides reasonable and non-contradictory explanation of nearly all our observations. In this report we are going to discuss in detail both this concept and its potential for predicting metal-oxide precipitation efficiency with alternative metal ion beams (e.g. Y, Ti, or Zr instead of Al).

[1] C. Zheng, A. Gentils, J. Ribis et al, *Phil. Mag.* **94**, 2937 (2014).

[2] C. Zheng, A. Gentils, J. Ribis et al, *Nucl. Instr. Meth. B* **365**, 319 (2015).

[3] C. Zheng, A. Gentils, J. Ribis et al, *J. Appl. Phys.* **121**, 174305 (2017).

F. A. GARNER  
*Radiation Effects Consulting, Richland WA USA*

## **ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА РАЗМЕРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУРНЫХ КОМПОНЕНТОВ РЕАКТОРА**

Экономика и безопасность ядерных реакторов чаще ограничиваются материалами, чем топливом или ядерными проблемами. Сплавы, используемые для создания структурных компонентов ядерных реакторов, в условиях облучения нейтронами и при повышенных температурах, претерпевают значительные изменения в микроструктуре. Эти изменения могут приводить к значительным искажениям размеров и изменениям объема компонентов реактора, вследствие радиационно-индуцированных выделений, набухания и ползучести под облучением. Кроме того, часто происходят сильные изменения механических свойств конструкционных сталей.

Будет представлен обзор вышеописанных явлений и их влияние на функциональность и срок службы компонентов реактора.

F. A. GARNER  
*Radiation Effects Consulting, Richland WA USA*

## **IMPACT OF RADIATION-INDUCED CHANGES IN DIMENSION AND MECHANICAL PROPERTIES OF REACTOR STRUCTURAL COMPONENTS**

The economics and safety of nuclear reactors often is limited more by material's issues than by fuel or nuclear issues. When subjected to neutron irradiation at elevated temperatures alloys used to make the structural components of nuclear reactors undergo extensive changes in microstructure. These microstructural changes can lead to significant dimensional distortion and changes in volume of reactor components via the processes of radiation-induced precipitation, void swelling and irradiation creep. Additionally there are often strong changes induced in the mechanical properties of structural steels. A review of these phenomena and their impact on the continued functionality and lifetime of reactor components will be presented.

МАЙКЛ ФИЛИП ШОРТ

*Массачусетский технологический институт, США*

## **ТОЧЕЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ ПУСТОТ С ПОМОЩЬЮ ПРОХОДНОЙ РЕШЕТЧАТОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Облучение, вызывающее распухание пустот, остается главной проблемой при работе ядерного реактора. Для определения распухания могут понадобиться годы и как результат, происходит быстрая деградация свойств материала после его начала. Развитие сплавов для передовых ядерных систем требует быстрой оценки распухания в новых сплавах, но такой возможности еще не существует. Мы обнаружили, что переходная решетчатая спектроскопия (TGS) может обнаруживать распухание пустот в монокристаллической меди, с помощью изменения скорости поверхностной акустической волны (SAW). Растровая просвечивающая электронная микроскопия связывает наблюдаемые с помощью TGS-спектроскопии изменения с микроструктурными изменениями, вызванные распуханием. Эти результаты, суммируя с предыдущей работой, предполагают, возможность использования TGS-спектроскопию для быстрого определения, когда часть нового материала начнет распухать, сокращая время разработки и испытания сплава. Более поздние результаты также дают возможность измерять абсолютную термическую диффузию, позволяя с помощью TGS-спектроскопии изучать изменения в керамике и полупроводниках под облучением.

SHORT MICHAEL PHILIP

*Massachusetts Institute of Technology, USA*

## **PINPOINTING THE ONSET OF RADIATION VOID SWELLING WITH TRANSIENT GRATING SPECTROSCOPY**

Irradiation-induced void swelling remains a major challenge to nuclear reactor operation. Swelling may take years to initiate and often results in rapid material property degradation once started. Alloy development for advanced nuclear systems will require rapid characterization of the swelling breakaway dose in new alloys, yet this capability does not yet exist. We demonstrate that transient grating spectroscopy (TGS) can detect void swelling in single crystal copper via changes in surface acoustic wave (SAW) velocity. Scanning transmission electron microscopy (STEM) links the TGS-observed changes with void swelling-induced microstructural changes. These results are considered in the context of previous work to suggest that in situ TGS will be able to rapidly determine when new bulk material begin void swelling, shortening alloy development and testing times. More recent results also demonstrate the ability to measure absolute thermal diffusivities, enabling TGS to study changes in ceramics and semiconductors under irradiation.

ОРЕЛИ ЖЕНТИЛЬ

*Университет Париж-Сюд, Франция*

**РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО  
ТОПЛИВА - МОДЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ МЕТОДАМИ *IN SITU*  
ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ  
И РЕЗЕРФОРДОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ  
ПРИ ИМИТАЦИОННОМ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ**

С первых дней исследований атомной отрасли, посвященных ядерному топливу, была освещена легендарная радиационная стабильность флюоритоструктурированных оксидов. Диоксид урана не становится аморфным при облучении, но вместо этого, в нем обнаруживается дефектная специфическая микроструктура, зависящая от нескольких параметров (выгорания, локальной температуры, условий облучения, включенных примесей). Хотя основные механизмы образования дефектов в облученных твердых телах хорошо изучены, предпринимаются значительные экспериментальные и вычислительные усилия для лучшего понимания точной роли различных соответствующих параметров в формировании конкретной микроструктуры и окончательной дестабилизации твердого тела.

Экспериментальное моделирование, основанное на использовании моноэнергетических ионов, дает уникальную возможность исследовать поведение материала при облучении. Такой подход был успешно применен к монокристаллам урана, облученным ионами с низкой энергией, для изучения вклада баллистического повреждения и вклада различных имплантатов. Изначально (i) кристаллы были альтернативно имплантированы при увеличении степени флюенса, ионами Xe и La с энергией 100 кэВ при температуре 500 °C (температура на периферии топлива) и затем (ii), изучались с помощью обратной спектроскопии Резерфорда (характеризующейся *in situ*) в геометрии канала (RBS/C) и просвечивающей электронной микроскопией (ПЭМ). Данные о канале были проанализированы методом Монте-Карло. Были установлены два важных шага в кинетике разупорядочения твердого тела, которые интерпретировались в терминах перехода от образования изолированных дефектов к расширенным дефектам при низком числе  $\phi_{ра}$  и из-за агрегации примесей, когда их концентрация достигает критического значения.



AURELIE GENTILS  
*University Paris-Sud, France*

**RADIATION STABILITY OF SPENT NUCLEAR  
FUEL - EXPERIMENTAL SIMULATION WITH IONS  
AND MICROSTRUCTURE CHARACTERIZATION  
BY *IN SITU* TECHNIQUES (RBS/C, TEM)**

Ever since the early days of the nuclear industry researches devoted to nuclear fuels enlightened the legendary radiation stability of fluorite-structured oxides. Uranium dioxide does not become amorphous under irradiation but exhibits instead a defective structure, whose specific microstructure depends on several parameters (burnup, local temperature, irradiation conditions, incorporated impurities). Although the basic mechanisms of defects production in irradiated solids are well established, considerable experimental and computational efforts are undertaken to better understand the exact role played by the various relevant parameters in the formation of a specific microstructure and on the final destabilization of the solid.

Experimental simulations based on the use of monoenergetic ions offer the unique opportunity to investigate the behavior of a material under irradiation. Such an approach was successfully applied to urania single crystals irradiated with low-energy ions to examine the contribution of ballistic damage and the contribution of implanted species. Crystals were alternatively (i) implanted at increasing fluence steps with few 100-keV Xe and La ions at 500°C (the temperature at the periphery of the fuel) and (ii) characterized *in situ* by Rutherford Backscattered Spectrometry in Channeling geometry (RBS/C) and Transmission Electron Microscopy (TEM). Channeling data were analyzed by Monte Carlo simulations. Two important steps in the disordering kinetics of the solid were established and they were interpreted in terms of the transition from the formation of isolated defects to extended defects at a low dpa number, and due to the aggregation of impurities when their concentration reaches a critical threshold.

## **ВЛИЯНИЕ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ И РАДИАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА НЕЙТРОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРАФИТОВЫХ ЗАМЕДЛИТЕЛЕЙ**

Фундаментальной величиной при описании свойств вещества, включая воздействие на него излучения, является динамический структурный фактор, т.е. функция  $S(\mathbf{k}, \omega)$ , где  $\mathbf{k}$  – волновой вектор, представляющий обмен импульсами, а  $\omega$  – циклическая частота представляющая обмен энергией. Обычно, функция  $S(\mathbf{k}, \omega)$  частично обнаруживается с помощью экспериментов по рассеиванию частиц, которые зондируют фазовое пространство, определяемое атомной структурой материала. Совсем недавно стало возможным точно рассчитать  $S(\mathbf{k}, \omega)$  с помощью атомистического моделирования. Этот метод даёт более точные результаты, нежели обычные приближения и позволяет оценивать  $S(\mathbf{k}, \omega)$  для чистых материалов и/или когда их атомная структура разрушается, например, из-за радиационных повреждений. Следовательно, становится возможным рассмотрение воздействия радиационных разрушений на работоспособность материала, являющимся замедлителем нейтронов. Особый интерес представляет графит, классический материал ядерных реакторов, который вновь появляется в качестве ключевого компонента в активной зоне передовых реакторов, таких как сверхвысокотемпературный реактор (VHTR) и высокотемпературный фторид охлаждаемый реактор (FHR). В этой работе атомная структура графита и его разрушение из-за быстрого нейтронного облучения исследуются с использованием методов рассеивания нейтронов и аннигиляции позитронов, и связаны с принципом действия замедлителя нейтронов посредством расчета  $S(\mathbf{k}, \omega)$ . Кроме того, исследовано влияние атомной структуры на эксплуатационные характеристики реактора.

AYMAN I. HAWARI  
*North Carolina State University, USA*

**IMPACT OF ATOMIC STRUCTURE AND RADIATION  
DAMAGE ON NEUTRONIC PERFORMANCE  
OF GRAPHITE MODERATORS**

A fundamental quantity in describing the properties of matter including its interaction with radiation is the dynamic structure factor, i.e.,  $S(\mathbf{\kappa}, \omega)$ , where  $\mathbf{\kappa}$  is a wave vector representing momentum exchange and  $\omega$  is a frequency representing energy exchange. Traditionally,  $S(\mathbf{\kappa}, \omega)$  is partially accessed through particle scattering experiments that probe the momentum-energy phase space defined by a material's atomic structure. More recently, it became possible to accurately calculate  $S(\mathbf{\kappa}, \omega)$  using atomistic simulations. This capability, that enables relaxing much of the conventional approximations, allows estimating  $S(\mathbf{\kappa}, \omega)$  for pristine materials and/or when the atomic structure is disrupted, e.g., due to radiation damage in solids. Consequently, examination of the impact of radiation damage on a material's performance as a neutron moderator becomes feasible. A material of interest is graphite, which is a classical nuclear material that is reemerging as a key component in the reactor core of proposed advanced nuclear reactor concepts such as the very high temperature reactor (VHTR) and the fluoride salt cooled high temperature reactor (FHR). In this work, the graphite atomic structure, and its disruption due to fast neutron irradiation, is examined using neutron scattering and positron annihilation techniques and related to performance as a neutron moderator through calculations of  $S(\mathbf{\kappa}, \omega)$ . In addition, impact of the atomic structure on the operational characteristics of the reactor is investigated.

## **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

В энергетическом секторе многих стран доля возобновляемых источников энергии, в частности, фотовольтаической (ФВ) технологий, из года в год возрастает. Хотя ФВ-устройства на основе Si занимают более 90% ФВ рынка, существуют проблемы, связанные с Si, такие как плохое поглощение солнечного света, сложность производства Si, подготовки Si пластины, разработки солнечных элементов и методов изготовления солнечных элементов. Попытки решить этих проблем привели к возникновению второго, третьего и четвертого поколений солнечных элементов, новых типов материалов и методов изготовления солнечных элементов и исследования их свойств. В лекции будет проведен анализ современного состояния исследований и перспектив использования фотовольтаических технологий, солнечных модулей и панелей, а также фотовольтаических приборов, интегрированных в окна и здания. Материалы, которые используются в солнечных элементах, основные параметры, характеризующие материалы и устройства солнечных элементов, транспорт носителей заряда, технологий изготовления и характеристики, процессы рекомбинации, дефекты и примеси, конструкции солнечных элементов и их принципы работы. Существует четыре поколения солнечных элементов. Промышленные солнечные элементы на основе Si являются представителями солнечных элементов первого поколения. До настоящего времени было разработано много типов конструкций солнечных элементов. Солнечные элементы второго поколения основаны на тонкопленочных материалах, которые являются гибкими и легкими. Представителями являются CIGS, CdTe, тонкие пленки a-Si, CZTS и т. д. Однако этому поколению солнечных элементов характерна низкая эффективность и более короткий срок службы, чем монокристаллические. За последние пять лет эффективность солнечных элементов из тонких пленок была увеличена до более чем 20%. Однако их дизайн стал сложным, и неясно, за счет чего было достигнуто повышение эффективности. Предполагается, что технологии изготовления солнечных элементов третьего и четвертого поколения будут использовать преимущества как первого, так и второго поколений солнечных элементов. В настоящее время существует множество представителей солнечных элементов третьего поколения. Солнечные элементы четвертого поколения включают в себя преимущества органических солнечных элементов, таких как недорогой и простой способ изготовления и большая долговечность неорганических солнечных элементов путем создания гибридных органических / неорганических материалов и солнечных элементов. В настоящей лекции будут отражены основные моменты по вышеуказанным пунктам.

SMAGUL KARAZHANOV

*Institute for Energy Technology (IFE), Kjeller, Norway*  
smagul.karazhanov@ife.no

## **CURRENT STATE AND PROSPECTIVES OF RESEARCH IN A FIELD OF PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGY**

Big changes happened in the last few years in energy sector. The share of renewable energies, in particular, photovoltaic (PV) technologies in the energy sector is tremendously increasing from year to year. Although Si based PV devices occupy more than 90 of the PV market, there are main challenges related to Si such as poor absorption of sunlight, complexity of Si production, wafer preparation, solar cell design and solar cell fabrication methods. Attempts to solve these challenges have led to second, third and fourth generations of solar cells, new types of materials and methods fabrication of solar cells and characterization. The lecture is about present status of the research and perspectives of using the photovoltaic technologies, about solar modules and panels as well as window and building integrated photovoltaics. Materials to be used in solar cell technologies, main parameters, characterizing the solar cell materials and devices, electrical charge carrier transport, fabrication and characterization tools, recombination processes, defects and impurities, solar cell designs and principles of operation. There are four generations of solar cells. The industrial Si-based solar cells are representatives of the first generation solar cells. Many types of solar cell designs have been developed so far. The second generation solar cells are based on thin film materials that are flexible, lightweight. Representatives are CIGS, CdTe, thin films a-Si, CZTS, etc. However, they are of low efficiency and are less durable than monocrystalline cells. In the last five years, efficiency of the thin films cells have been increased to more than 20%. However, design became complicated and it is not clear how the efficiency increase has been achieved. The third and fourth generation solar cell technologies are expected to use advantages of both first and second generations of solar cells and bring to low cost high efficiency solar cells. At present there are many representatives of third generation solar cells. Fourth generation solar cells include advantages of organic solar cells such as low cost and easy fabrication method and large durability of inorganic solar cells by making hybrid organic/inorganic materials and solar cells. The present lecture will reflect main findings on the above points.

С.В. СТАРИКОВ

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*  
starikov@ihed.ras.ru

## **МНОГОМАСШТАБНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

В настоящее время перед радиационным материаловедением поставлена задача о создании методики точного прогнозирования поведения ядерного топлива 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 ядерного топлива (UN, U-Mo) 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 макромоделли применяются для исследования изменения механических и термодинамических свойств ядерного топлива при радиационных и термических воздействиях.

S.V. STARIKOV

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

starikov@ihed.ras.ru

## **MULTISCALE COMPUTER MODELING OF NUCLEAR FUEL BEHAVIOUR**

Currently, there is a problem in Materials Science about accurate description and prediction of behavior of nuclear fuel 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) 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 nuclear fuel at radiation and thermal impacts.

## РОМАН ВОСКОБОЙНИКОВ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,*

*Москва, Россия*

roman.voskoboynikov@gmail.com

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНОГО ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В Ti-Al ИНТЕРМЕТАЛЛИДАХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ**

Благодаря своим сервисным свойствам, интерметаллические сплавы на основе  $\gamma$ -TiAl уже используются для изготовления лопаток турбин низкого давления авиационных двигателей семейства GEnx. Для повышения рабочей температуры новых сплавов на основе  $\gamma$ -TiAl и  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al необходимо повышение их коррозионной стойкости, которого можно добиться ионно-лучевой обработкой поверхности. С фундаментальной точки зрения, Ti-Al интерметаллиды являются хорошей модельной системой для изучения радиационных эффектов в упорядоченных твердых растворах.

Первичным процессом, происходящим в материалах, подвергаемых облучению быстрыми частицами в режиме упругих потерь энергии, является образование дефектов в каскадах, инициированных первично выбитыми атомами (ПВА) с энергией  $E_{\text{ПВА}}$  больше  $\sim 1$  кэВ. Каскад смещений занимает область  $\sim 10$ -30 нм и протекает за время  $\sim 5$ -20 пс. Сегодня не существует экспериментальных методов прямого исследования дефектообразования в каскадах, и моделирование методом молекулярной динамики (МД) является единственным способом изучения этого процесса.

Методом МД смоделированы каскады смещений, создаваемые ПВА с энергиями  $E_{\text{ПВА}} = 5, 10, 15$  и 20 кэВ в  $\gamma$ -TiAl и  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al при температурах  $T = 100, 300, 600, 900$  и 1200 К. Размер статистической выборки составил 48 каскадов для каждой пары  $(E_{\text{ПВА}}, T)$ . Были определены число пар Френкеля, доля Al и Ti вакансий, междоузлий и антисайтов, типичные кластеры точечных дефектов и т.д. как функция  $(E_{\text{РКА}}, T)$  и проведено сравнение полученных результатов с данными для других материалов.

Анализ результатов компьютерного моделирования показал, что Ti-Al интерметаллиды обладают аномально высокой радиационной стойкостью. Исследование механизмов, определяющих релаксацию энергии в облучаемых интерметаллических сплавах может послужить фундаментом для разработки нового класса радиационно-стойких материалов.

Предпочтительное образование Al междоузлий в Ti-Al интерметаллидах, находящихся под облучением, наблюдалось при всех смоделированных условиях. Проведенные квантовомеханические расчеты позволили определить физический механизм, лежащий в основе этого явления, и предложить эффективный метод повышения коррозионной стойкости интерметаллических сплавов на основе Ti-Al.



ROMAN VOSKOBOINIKOV

*National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russia*

roman.voskoboynikov@gmail.com

## **MD SIMULATIONS OF RADIATION DAMAGE IN Ti-Al BASED STRUCTURAL INTERMETALLICS**

Owing to unique combination of high melting temperature, specific strength, creep resistance and stability of mechanical properties over a wide temperature range, Ti-Al based intermetallic alloys have already been used for manufacturing low-pressure turbine blades of GENx turbofan jet engines and turbocharger wheels of high performance car engines. Increasing the operating temperature of Ti-Al intermetallics requires better oxidation and corrosion resistance that can be achieved by ion beam surface engineering. From the fundamental perspective, Ti-Al intermetallic compounds represent a good model system for studying radiation effects in ordered metallic alloys suitable for nuclear engineering applications.

Collision cascades are the main source of radiation defects in materials subjected to fast particle irradiation in the nuclear stopping power regime. They are formed by the recoil of primary knock-on atoms (PKA) with the energy of more than  $\sim 1$  keV. The cascade process is characterized by the *ps* and *nm* temporal and spatial scale, which is prohibitive for direct experimental investigation but can be studied by molecular dynamics (MD) simulations.

MD simulations were conducted to explore primary damage formation in collision cascades in  $\gamma$ -TiAl and  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al intermetallic compounds over a wide range of temperature  $100\text{K} < T < 1200\text{K}$  and PKA energy  $5\text{keV} < E_{\text{PKA}} < 20\text{keV}$ . A series of 48 cascades for each  $(E_{\text{PKA}}, T)$  set was simulated to assure statistical reliability of the results. To quantify the radiation damage, the number of Frenkel pairs, fraction of Al and Ti vacancies, self-interstitials and anti-sites, typical point defect clusters, cluster per cascade yield, etc. were found as a function of  $(E_{\text{PKA}}, T)$  and compared with elemental metals.

It was established that Ti-Al based intermetallic compounds possess very high resistance against the formation of primary radiation defects. Understanding and controlling energy dissipation in irradiated intermetallic alloys may pave the way for new design concepts of radiation-tolerant structural and functional materials for nuclear engineering applications.

Preferred formation of Al self-interstitials in Ti-Al based intermetallic compounds exposed to fast particle irradiation was observed under all simulation conditions. We have proposed an underlying governing mechanism of this phenomenon and validated it by conducting *ab initio* calculations. The predicted radiation effect can be employed for raising the oxidation and corrosion resistance of Ti-Al based intermetallic alloys by ion beam surface engineering.

ВЛАДИМИР КРШЧАК

*Словацкий университет технических и прикладных наук,  
Братислава, Словакия*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЯ С РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ**

Методика позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС), как известно, очень чувствительна к очень малым дефектам, таким как моно-вакансии, с размером менее 0,1 аргм. Кроме того, взаимодействие позитронов с дефектами в кристаллической структуре сильно зависит от присутствия гелия, который получен с высокой скоростью при плавлении и радиационном расщеплении. Это делает позитроны идеальным зондом для исследования радиационной стойкости материалов для передовых ядерных установок.

Понимание набухания пустот в сложных сплавах Fe-Cr-X и проверка некоторых существующих теоретических моделей связанных с образованием галлиевых вакансионных кластеров неизбежно требуют экспериментальных входных данных. Имеется большая потребность в экспериментальных данных, особенно для ранних стадий радиационного облучения. Ограниченное пространственное разрешение методов электронной микроскопии, ограниченная чувствительность к световым элементам в аналитических методах и низкое соотношение сигнал-шум при измерениях активированных образцов методами ядерной спектроскопии требует инновационного экспериментального подхода.

Недавно разработанная методика позитронной аннигиляционной спектроскопии с использованием источника позитронов на основе внутреннего превращения, позволяет провести подходящее исследование образцов, облученных в мишенях расщепления. Они обеспечивают среду, отвечающую требованиям синтеза, для тестирования материалов и реальных уровней разрушения. С другой стороны, экспериментальное моделирование радиационных эффектов с использованием ионной имплантации значительно снижает затраты и время проведения эксперимента по облучению, ставя под угрозу значимость разрушений и скорости производства гелия.

Какую информацию мы можем получить из различных экспериментов по облучению с использованием методов аннигиляции позитронов и того, как высокие темпы производства гелия влияют на формирование микроструктуры облученных образцов, будут представлены в этой лекции.

## **EXPERIMENTAL STUDIES OF HELIUM INTERACTION WITH RADIATION DEFECTS IN METALS AND ALLOYS**

The understanding of the void swelling in complex Fe-Cr-X alloys and the validation of some existing theoretical models concerning the formation of helium-vacancy clusters inevitably requires experimental inputs. There is a great need for experimental data, particularly for the early stage radiation damage. The limited spatial resolution of electron microscopy techniques, limited sensitivity to light elements in analytical techniques, and a low signal-to-noise ratio in measurements of activated samples by nuclear spectroscopy techniques call for an innovative experimental approach.

The technique of positron annihilation spectroscopy (PAS) is known to be very sensitive to defects as small as mono-vacancies with concentrations as low as 0.1 appm. Furthermore, the interaction of positrons with defects in a crystalline structure is strongly influenced by the presence of helium, which is with high rates produced under fusion and spallation irradiation conditions. This makes positrons the ideal probe for investigation of radiation damage resistance of materials for advanced nuclear facilities.

The recently developed methodology for positron annihilation spectroscopy utilizing an internal transmutation based positron source enables convenient investigation of the samples irradiated in spallation targets. These provide a fusion-relevant environment for materials testing and realistic damage rates. On the other hand, the experimental simulation of radiation effects using ion implantation significantly reduces the costs and time of an irradiation experiment, compromising on the relevance of damage and helium production rates.

What kind of information can we obtain from various irradiation experiments using positron annihilation techniques and how the high helium production rates influence the formation of the microstructure of irradiated samples, will be summarized in this lecture.

С.А. НИКУЛИН  
НИТУ «МИСиС», Москва, Россия  
nikulin@misis.ru

## **АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИАГНОСТИКИ КАЧЕСТВА И МОНИТОРИНГА РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

За последние 30 лет на кафедре металловедения и физики прочности НИТУ «МИСиС» созданы аппаратура и многочисленные специальные методики измерений акустической эмиссии (АЭ), и накоплен большой опыт использования метода АЭ для решения целого ряда важнейших металловедческих задач.

В настоящей статье обобщены наиболее важные результаты этих работ, показывающие широчайший диапазон возможностей метода АЭ применительно к задачам изучения деформации материалов и мониторинга технологий, а также представлены новейшие методы и технологии измерения АЭ в металловедческих экспериментах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор № RFMEFI57815X0139).*

S.A. NIKULIN  
*The National University of Science and Technology “MISIS”*  
nikulin@misis.ru

## **ACOUSTIC-EMISSION TECHNOLOGIES FOR QUALITY DIAGNOSTIC AND MONITORING OF THE FRACTURE OF THE MATERIALS OF ENERGY PLANTS**

Over the past 30 years, the Department of Physical Metallurgy and Physics of Strength of the National University of Science and Technology “MISIS” has developed the equipments and numerous special methods for acoustic emission (AE) measuring, and has accumulated extensive experience in using the AE method to solve a number of important metallurgical problems.

In this paper, the most important results of these studies showing the widest range of capabilities of the AE method in relation to the problems of studying the deformation of materials and monitoring of the technologies are summarized. The latest methods and technologies for AE measuring for materials science experiments are presented.

*The work has been performed with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Unique Identifier of the Project No. RFMEFI57815X0139).*

# АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ

Секция I – 23 октября

# ABSTRACTS OF REPORTS

Section I – October, 23

Е.И.МАКАРОВ, Н.В.КИРЕЕВ, В.С.НЕУСТРОЕВ,  
Д.Е.МАРКЕЛОВ, С.В.БЕЛОЗЁРОВ  
*АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, Ульяновская область, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОНАПОЛНЕННОГО ОБРАЗЦА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

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

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

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

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

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

E.I.MAKAROV, N.V.KIREEV, V.S.NEUSTROEV,  
D.E.MARKELOV, S.V.BELOZEROV  
*JSC "SSC RIAR", Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia*

## **SIMULATED STRESSED-STRAINED STATE OF A PRESSURIZED CONTOURED SPECIMEN**

The paper presents the results of simulating the stressed-strained state of a pressurized contoured specimen to investigate the irradiation creep processes. Distributions of the hoop stresses on the internal and external tubes are shown.

The main purpose of the calculations is to determine the strain and components of the normal stresses for the external and internal tubes of the pressurized specimen to investigate the irradiation creep processes.

Simulation of the stressed-strained state of the pressurized specimen is done by the finite element method with the use of the ANSYS Mechanical software.

The calculations showed that due to the gas pressure in the inter-tubular space, the hoop compressive stresses appear on the internal tube of the specimen whereas hoop tensile ones appear on the external tube. Axial stresses are approximately twice less than the hoop ones and confirmed by the analytical calculations using the formulae presented in PNAE G -7-002-86. Radial stresses are insignificant and do not greatly contribute to the stressed-strained state. So, they can be neglected in further research to analyze the stress-strain effect.

The described computational model of the pressurized contoured specimen can be used for creep calculations provided there is no any effect of radiation-induced swelling.

Е.В.МОРОЗОВ

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,  
г. Москва, Россия  
Lieutenant@list.ru*

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ И ИОНОВ ДЕЙТЕРИЯ НА СТРУКТУРУ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВАНАДИЯ**

Представлены результаты облучения ванадия импульсными потоками высокотемпературной дейтериевой плазмы и ионов дейтерия, генерируемыми в установке Плазменный фокус. Плотность мощности составляла  $q = (1-4) \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>, длительность импульса  $\tau = 50$  нс. Показано, что в реализованном режиме облучения происходит оплавление поверхности, образуется волнообразный рельеф и закристаллизовавшиеся капли расплава. Наблюдаются также блистеры (вздутия), микротрещины и выбросы частиц, вызванные ударно-волновыми воздействиями.

E.V.MOROZOV

*IMET RAS, Moscow, Russia*

## **EFFECT OF PULSE FLOWS OF HIGH-TEMPERATURE DEUTERIUM PLASMA AND DEUTERIUM IONS ON THE STRUCTURE OF THE SURFACE LAYER OF VANADIUM**

The results of irradiation of vanadium by pulsed flows of high-temperature deuterium plasma and deuterium ions generated in the Plasma focus unit are presented. The power density was  $q = (1-4) \cdot 10^{10}$  W / m<sup>2</sup>, the pulse duration was  $\tau = 50$  ns. It was shown that in the realized irradiation regime the surface is melted, a wavy relief and crystallized melt drops are formed. Blisters (blisters), microcracks and particle emissions caused by shock-wave influences are also observed.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ грант №16-0800189*



А.С.ДЕМИН

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН  
г. Москва, Россия  
casha@bk.ru*

## **ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОТОКОВ ИОНОВ И ПЛАЗМЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС НА ПОВЕРХНОСТЬ ПЛАСТИНЫ МОЛИБДЕНА**

Исследованы повреждаемость, дефектообразование, изменение топографии поверхности, структурного состояния и химического состава поверхностного слоя молибдена после однократного воздействия мощных импульсных потоков ионов и высокотемпературной плазмы. Эксперимент проведен на установке Плазменный фокус PF-1000 с использованием дейтерия в качестве рабочего газа. Максимальная плотность мощности потока ионов дейтерия составляла  $q_i \sim 10^{11} - 10^{12} \text{ Вт/см}^2$ , а для потока дейтериевой плазмы  $q_{pl} \sim 10^9 - 10^{10} \text{ Вт/см}^2$ . Показано, что воздействие указанных потоков ионов дейтерия и дейтериевой плазмы на молибденовую пластину приводит к повреждаемости облученного поверхностного слоя: происходит его плавление, частичное испарение и формирование поверхностных структурных дефектов.

A.S.DEMIN

*IMET RAS, Moscow, Russia*

## **INFLUENCE OF PULSE FLOWS OF IONS AND PLASMA GENERATED IN PLASMA FOCUS INSTALLATION ON THE SURFACE OF MOLYBDEN PLATE**

Damage, defect formation, changes in topography of the surface, structural state and chemical composition of the surface layer of molybdenum after a single action of high-power impulse ion fluxes and high-temperature plasma have been studied. The experiment was carried out at the PF-1000 plasma focus unit using deuterium as the working gas. The maximum power density of the deuterium ion flux was  $q_i \sim 10^{11} - 10^{12} \text{ W / cm}^2$ , and for the deuterium plasma flow  $q_{pl} \sim 10^9 - 10^{10} \text{ W / cm}^2$ . It is shown that the action of these deuterium and deuterium plasma streams on the molybdenum plate leads to damage to the irradiated surface layer: its melting, partial evaporation and the formation of surface structural defects occur.

*Работа выполнена при частичной поддержке Российского Фонда  
Фундаментальных Исследований (грант 16-08-00189)*

Н.А.ЕПИФАНОВ

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

## **ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ $Al_2O_3$ НА АЛЮМИНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ ИМПУЛЬСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ**

В настоящей работе проводилось исследование повреждаемости керамического покрытия на основе оксида  $Al_2O_3$  толщиной 20 мкм. Длительность импульса при лазерном облучении составляла 700 мкс в режиме свободной генерации (СГ) и 80 нс в режиме модулированной добротности (МД). Обработка ионными и плазменными потоками проводилась с использованием установки PF-6. Экспериментально определены пороговые значения плотности потока энергии импульсного лазерного излучения, при которых происходит отслаивание покрытия. Найдены основные характеристики повреждаемости покрытия потоками плотной высокотемпературной дейтериевой плазмой.

N.A. EPIFANOV

*IMET RAS, Moscow, Russia*

## **DAMAGE OF $Al_2O_3$ COATING BASED ON ALUMINUM SUBSTRATE BY PULSED LASER DEPOSITION AND HIGH- TEMPERATURE PLASMA**

In the present work, a study about the damageability of a ceramic coating based on  $Al_2O_3$  oxide with a thickness of 20  $\mu m$  was made. The pulse duration concerning laser irradiation was 700  $\mu s$  in the free running mode (FM) and 80 ns in the Q-switching mode. Treatment with ion and plasma streams was carried out using the PF-6 unit. As a result, the threshold values of the energy flux density of pulsed laser radiation were determined experimentally. The main characteristics of the defectiveness of coatings by dense high-temperature deuterium plasma were researched as well.

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант16-08-00189)*

Е.А.КУЛЕШОВА<sup>1, 2</sup>, Д.А. ЖУРКО<sup>1</sup>, А.Д.ЕРАК<sup>1</sup>,  
С.А.БУБЯКИН<sup>1</sup>, А.С.КИСЕЛЁВ<sup>1</sup>, А.С.КИСЕЛЁВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

bubjakin\_sa@mail.ru

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТРЫВА НА ПРИМЕРЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛЕЙ ВВЭР, ИСПЫТАННЫХ НА ОДНООСНОЕ СТАТИЧЕСКОЕ РАСТЯЖЕНИЕ**

Корпус реактора является несменяемой частью энергетической установки и в значительной мере определяет ресурс всего энергоблока в целом. Как известно, в процессе эксплуатации на корпус реактора действует повышенная температура и поток ионизирующего излучения (в районе активной зоны), что приводит к деградации механических свойств материала корпуса реактора, проявляющейся в снижении когезивной прочности границ зёрен, что, в конечном счете, приводит к самому опасному виду разрушения – хрупкому межзеренному разрушению.

Для оценки влияния эксплуатационных факторов (в данной работе оценено влияние высокой рабочей температуры) на хрупкое разрушение будет предложено использовать величину локального напряжения отрыва на границе источника зарождения хрупкой трещины.

В данной работе представлены данные по испытаниям образцов из корпусной стали с кольцевым надрезом на одноосное статическое растяжение в термически состаренном и отожженном состояниях, проведены фрактографические исследования поверхностей разрушения образцов. Предложена методика определения напряжения отрыва для испытанных образцов. Установлено влияние длительного воздействия высокой температуры на смену источника зарождения хрупкой трещины.

E.A.KULESHOVA<sup>1,2</sup>, D.A.ZHURKO<sup>1</sup>, A.D.ERAK<sup>1</sup>,  
S.A.BUBYAKIN<sup>1</sup>, A.S.KISELEV<sup>1</sup>, A.S.KISELEV<sup>1</sup>

*National Research Center «Kurchatov institute», Moscow, Russia  
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

## **DETERMINATION OF THE LOCAL TEAR STRESS USING EXAMPLES OF VVER STEELS TESTED FOR UNIAXIAL STATIC STRETCHING**

The reactor pressure vessel is an irremovable part of the power plant and it largely determines the resource of the whole power unit. As is known, the reactor vessel is exposed to an elevated temperature and ionizing radiation (near the reactor core) during the operation process. This leads to the mechanical properties degradation of the RPV material. The degradation is expressed in the grain boundaries cohesive strength reducing, which ultimately leads to the most dangerous kind of destruction - brittle intergranular destruction.

To assess the operational factors effect on brittle fracture (in this paper, the influence of high operating temperature is estimated), it was proposed to use the value of the local normal stress at the boundary of the brittle fracture source.

In this paper, the data on the testing of samples from RPV steels are represented. The uniaxial static stretching of samples with an annular notch was carried out in thermally aged and annealed states. The fractographic studies of sample destruction surfaces were carried out. A technique for determining of the normal stress for the tested samples was proposed. The effect of a long term high temperature exposure on the change of the brittle fracture source was found.

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

<sup>1</sup>*ДИТИ НИЯУ МИФИ*

<sup>2</sup>*АО «ГНЦ НИИАР»*

*г. Дмитровград Ульяновской области, Россия*

*galina.bakshutova.94@mail.ru*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ X18H10T, ОБЛУЧЕННОЙ В РЕАКТОРЕ СМ-3 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 60-80°C**

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 (60-80°C) в реакторе СМ-3. Анализируются также температурные и дозные зависимости характеристик механических свойств образцов сталей с основой X18H10 после облучения нейтронами в различных реакторах.

G.BAKSHUTOVA<sup>1</sup>, A.BOLSHAKOV<sup>1</sup>, V.NEUSTROEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*DITI NRNU MEPhI*

<sup>2</sup>*JSC "SSC NIIAR"*

*Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia*

## **INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF 18Cr-10Ni-Ti STEEL, IRRADIATED IN THE SM-3 REACTOR AT TEMPERATURES 60-80°C**

During long-term operation of reactors, there is a need to assess the properties of materials non-replaceable components of the reactor, made usually 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 (60-80°C) in the reactor SM-3. The temperature and dose dependences of the mechanical characteristics of steel samples with the base of Fe-18Cr-10Ni-Ti after neutron irradiation in various reactors, are also analyzed.

Б.А.КАЛИН, О.Н.СЕВРЮКОВ, А.А.ИВАННИКОВ, М.А.ПЕНЯЗЬ,  
А.В.ВОЕННОВ, Е.Р.АБРАМОВ  
*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*

## **ТЕРМОСТОЙКОСТЬ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ РЕАКТОРНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ БЫСТРОЗАКАЛЁННЫМИ НИКЕЛЕВЫМИ ПРИПОЯМИ**

Диффузионная пайка коррозионностойких сталей позволяет получать соединения, выдерживающие большие механические нагрузки, высокие температуры и агрессивное влияние активных сред без существенного изменения их свойств. В настоящее время перспективными сплавами для диффузионной пайки сталей являются быстрозакалённые никелевые припои.

Паяные узлы, как правило, являются частью энергонапряжённых изделий, зачастую работающих в условиях изменения температуры. Поэтому необходимо исследовать изменение механических свойств материала после многократных операций нагрева и охлаждения. С этой целью проведено термоциклирование паяных образцов, что является ускоренным способом изучения усталостной стойкости соединений. Рассмотрены классические сплавы-припои системы Ni-Cr-Si-B с различным элементным соотношением и разработанные сплавы системы Ni-Cr-Si-Be.

Определено влияния термоциклической обработки соединений на структурно-фазовое состояние шва. С помощью метода EBSD установлено, что в диффузионной зоне паяного соединения, полученного с помощью припоя, содержащего бор, образуется в два раза больше мартенсита вследствие формирования во время изотермической выдержки боридной сетки, приводящей к накоплению микронапряжений и пластической деформации, стимулирующих фазовое  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращение в стали.

Установлено на базе 50 циклов, что все рассмотренные в работе соединения обладают стойкостью к термоусталости в интервале температур от комнатной до 450 °С, что свидетельствует о реальной возможности эксплуатации данных неразъёмных соединений в условиях значительных колебаний рабочей температуры.

B.A.KALIN, O.N.SEVRYUKOV, A.A.IVANNIKOV,  
M.A.PENYAZ, A.V.VOENNOV, E.R.ABRAMOV  
*NRNU MEPhI, Moscow, Russia*

## **HEAT RESISTANCE OF JOINTS OBTAINED BY TLP – BONDING OF REACTOR STAINLESS STEELS WITH FILLER METALS BASED ON Ni**

Transient liquid phase bonding (TLP-bonding) of stainless steels allows to receive joints that can withstand high mechanical loads, high temperature and aggressive influence of active environment without a significant change in their properties. Nowadays, perspective alloys for TLP – bonding are filler metals based on Ni.

Usually, brazed joints are part of energy – stressed products that often work under conditions of temperature change. Therefore, it's necessary to investigate changes in mechanical properties after multiple heating and cooling operations. For this propose, brazed samples were thermocycled. It is a fast way to investigate fatigue resistance of joints. The classical filler metals based on Ni-Cr-Si-B and developed filler metals based on Ni-Cr-Si-Be were considered.

Influence of thermocycling on structural – phase state of joints was defined. Using electron backscatter diffraction (EBSD) method, it's established that twice as much martensite is formed in diffusion zone of brazed joint, obtained by boron filler metal, due to the formation of boron net. This net, appeared during the isothermal holding, leads to accumulation of microstresses and plastic deformation, which stimulates the phase  $\gamma \rightarrow \alpha'$  transformation in steel.

After 50 cycles it's established that all joints, considered in the investigation, are resistant to the thermal fatigue in temperature range from room temperature to 450 °C. It means that there is real possibility of using these joints under operating temperature fluctuations.

М.М.ДЕМЕНТЬЕВА<sup>1</sup>, К.Е.ПРИХОДЬКО<sup>1,2</sup>, Б.А.ГУРОВИЧ<sup>1</sup>,  
Л.В.КУТУЗОВ<sup>1</sup>, Д.А.КОМАРОВ<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  
dementyeva\_mm@nrcki.ru*

## **РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ОКИСЛЕНИЕ АЛЮМИНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

В работе выполнены экспериментальные исследования протекания радиационно-индуцированного процесса селективного соединения атомов в ходе облучения тонкой пленки металлического алюминия ионами кислорода различных энергий (0.2-0.5 кэВ). Методами высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии и спектроскопии энергетических потерь электронов получены дозовые зависимости, характеризующие протекание процесса окисления алюминия под действием облучения по глубине пленки при различных энергиях ионов кислорода. Получены экспериментальные профили распределения элементов по глубине пленки при различных дозах облучения. Показано, что с возрастанием дозы облучения происходит увеличение степени окисления алюминия и образование предельного при больших дозах облучения оксида алюминия на полную глубину проективного пробега ионов. Установлено, что процесс селективного соединения атомов можно успешно использовать для формирования высококачественного аморфного оксида алюминия в требуемых местах на заданную глубину путем облучения ионами кислорода малых энергий через окна, сформированные в маске, устойчивой к кислородному облучению.



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

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

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

## **RADIATION-INDUCED OXIDATION OF ALUMINUM UNDER ION IRRADIATION**

In this work was demonstrated experimental study of radiation-induced process of selective association of atoms under low energy oxygen irradiation of thin metallic Al films. The energies of oxygen irradiation were varied in the range (0.2 – 0.5 keV). Dose dependences characterizing the process of aluminum oxidation under ion irradiation in depth of the film at different oxygen ion energies were obtained by high-resolution transmission electron microscopy and electron energy loss spectroscopy. Experimental profiles of the elements distribution in Al film depth at various irradiation doses were obtained. It was shown that with increasing irradiation dose increased degree of aluminum oxidation and formation of limiting alumina occurred at high irradiation doses at full depth of projected range of ions. It was established that the process of selective association of atoms could be successfully used to form high-quality amorphous aluminum oxide in the required places at a given depth under low energy oxygen irradiation through windows formed in a mask resistant to oxygen irradiation.

М.Г. ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, О.А. КРЫМСКАЯ<sup>1</sup>,  
С.Д. СТОЛБОВ<sup>1</sup>, К.Е. КЛЮКОВА<sup>1</sup>, В.В. НОВИКОВ<sup>2</sup>, М.Н. САБЛИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> АО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, г. Москва, Россия

## КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ АНИЗОТРОПИИ СВОЙСТВ ТРУБ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Zr С ПАРАМЕТРАМ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ

Эксплуатационные свойства труб из сплавов на основе циркония существенно зависят от их кристаллографической текстуры, которая определяет особенности радиационного роста и ползучести. В настоящее время качество изготовленных труб контролируется, в частности, анизотропией пределов текучести в продольном и осевом направлениях при температуре 380°C. В данной работе предложено заменить контроль требующих существенных затрат материала процедур механических испытаний при 380°C измерением кристаллографической текстуры, а именно расчетом по полным прямым полюсным фигурам (0001) интегральных текстурных параметров Кернса ( $f_R$ ,  $f_T$ ,  $f_L$ ) с последующей оценкой по ним анизотропии свойств. На большой подборке труб из сплава Э110 с варьирующимся элементным составом, полученных по различным технологическим режимам, проведено сопоставление рассчитываемой из параметров Кернса анизотропии свойств с экспериментальными измерениями пределов текучести в осевом и тангенциальном направлениях. По полученным данным оценивали расчетный коэффициент анизотропии исследованных труб  $K_a^{\text{расч}}$  по формуле, выведенной из формул общей поверхности текучести и одноосного растяжения.

Анализ аппроксимирующих функций, характеризующихся максимальными коэффициентами детерминации, позволил выбрать оптимальную зависимость коэффициента анизотропии от соотношения текстурных параметров и подобрать необходимые коэффициенты расчета.

$$K_a = \exp \left( -0.442 \cdot \ln \sqrt{\frac{(1-f_L)}{(1-f_T)}} + 0.637 \right).$$

Расхождение между рассчитанными и экспериментально измеренными зависимостями коэффициента анизотропии от соотношения параметров Кернса  $f_R/f_T$  можно объяснить несовершенством методики построения контура текучести только при учете  $f$ -параметров, т.к. они не полностью описывают текстуру материала. Кроме того, методика опирается только на текстуру  $\alpha$ -фазы, не принимая во внимание наличие  $\beta$ -фазы, а также не учитывает структурные характеристики материала (размер зерна, доля  $\beta$ -фазы, наличие примесей), которые могут повлиять на соотношение пределов текучести.

M.G. ISAENKOVA<sup>1</sup>, YU.A. PERLOVICH<sup>1</sup>, O.A. KRYMSKAYA<sup>1</sup>,  
S.D. STOLBOV<sup>1</sup>, K.E. KLYUKOVA<sup>1</sup>, V.V. NOVIKOV<sup>2</sup> and  
M.N. SABLIN<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>High-Tech Scientific Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russia.

## **CORRELATION DEPENDENCE OF ANISOTROPY OF PROPERTIES OF Zr-BASED ALLOYS WITH PARAMETERS OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE**

Operating properties of tubes from Zr-based alloys are strongly depend on parameters of their crystallographic texture, which defines features of the radiation growth and creep. Currently the anisotropy of yield stresses for the axial and circumferential (or tangential) tube's directions at 380°C is the one of the parameters that is controlled when assessing the tubes quality. At the same time the properties anisotropy is known to depend on crystallographic texture, which can be quantitatively evaluated by integral texture parameters (*f*-parameters) for materials having hexagonal close-packed (HCP) crystalline structure. In this paper we suggest to replace metal consuming mechanical tests with the anisotropy assessment by *f*-parameters calculated for radial (R), tangential (T) and longitudinal (L), i.e. axial, directions of the tube.

On the large set of tubes from Zr-1%Nb alloy with varying element composition and produced by different manufacturing routes we compared the anisotropy degree, calculated by *f*-parameters and experimentally obtained by measured yield stresses for axial and circumferential directions of tubes  $K_a^{380^\circ\text{C}} = \frac{\sigma_{0.2}^T}{\sigma_{0.2}^L}$ . The anisotropy coefficient can be calculated by the equation of the Mises yield surface for orthotropic HCP materials at single axis test.

Analysis of the *R*-squared determination coefficient for different approximating functions of  $K_a$  dependency on  $f_R/f_T$  ratio allowed choosing the power law as an optimal function and calculating the required approximating coefficients. Thus, for express evaluation of the yield stresses anisotropy of Zr cladding tubes by texture parameters, the following equation is suggested:

$$K_a^{calc} = \exp \left( -0.442 \cdot \ln \sqrt{\frac{(1-f_L)}{(1-f_T)}} + 0.637 \right).$$

The obtained disagreement of calculated and measured  $K_a$  values is explained by the imperfection of a proposed technique. It takes into account only *f*-parameters and no information about activated mechanisms of plastic deformation, which strongly affect the yield stresses and considerably differ depending on the orientation of crystallographic direction [0001]. Moreover, the procedure doesn't include any information about structural characteristics of the material (grain size,  $\beta$ -phase content, impurity presence) which can vary the yield stresses anisotropy.

Ю.В. ЛЕВЧЕНКО, А.С. ЗЕВЯКИН, Ю.Е. КАРАЖЕЛЕВСКАЯ,  
А.М. ТЕРЕХОВА

*ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Россия*  
YVLevchenko@mephi.ru

## **СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 10 МВт**

В настоящее время прослеживается заметный интерес к исследовательским реакторам для применения в различных областях науки и технологий. Одним из самых актуальных является рынок радиоизотопной продукции в области медицины. С точки зрения ядерной медицины интерес вызывают следующие изотопы:  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{68}\text{Ga}$  и другие. Исследовательский ядерный реактор тепловой мощностью до 10 МВт с топливной кампанией не менее 10 лет позволит снизить затраты на обращение со свежим и отработавшим ядерным топливом, а так же позволит частично решить проблему учета, контроля и нераспространения ядерных материалов.

Использование различных топливных композиций может привести к увеличению кампании реактора. В работе рассматриваются два вида топлива:  $\text{UO}_2\text{-ThO}_2$  и  $\text{PuO}_2\text{-ThO}_2$ . Сравнивается их влияние на нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики активной зоны исследовательского реактора тепловой мощностью до 10 МВт.

Y.V.LEVCHENKO, A.S. ZEVYAKIN, Y.E.  
KARAZHIELIEVSKAIA, A.M. TEREKHOVA  
*IATE NRNU MEPhI, Obninsk, Russia*

## **COMPARISON OF DIFFERENT FUEL COMPOSITIONS FOR A RESEARCH REACTOR WITH THERMAL POWER OF UP TO 10 MW**

Presently there is a noticeable interest in research reactors for usage in various areas of science and technology. One of the most actual is the market of radioisotopic products in medicine. From the point of view of nuclear medicine, the following isotopes are of interest:  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{68}\text{Ga}$  and others. A nuclear reactor with a thermal power of up to 10 MW with a fuel campaign no less than 10 years will allow to reduce the cost of handling fresh and spent nuclear fuel, as well as partially solve the problem of accounting, control and non-proliferation of nuclear materials.

The using of various fuel compositions can lead to increasing of reactor campaign. The paper considers two types of fuel:  $\text{UO}_2\text{-ThO}_2$  and  $\text{PuO}_2\text{-ThO}_2$ . Their influence on the neutron-physical and thermal-hydraulic characteristics of the core of the research reactor with a thermal power of up to 10 MW is compared.

М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, О.А.КРЫМСКАЯ<sup>1</sup>,  
Д.И.ЖУК<sup>1</sup>, С.Д. СТОЛБОВ<sup>1</sup>, А.В. ИВАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Публичное акционерное общество «Машиностроительный завод», г. Электросталь, Россия

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ТРУБ НА СТАБИЛЬНОСТЬ РАЗМЕРОВ ШТАМПУЕМЫХ ИЗ НИХ ЯЧЕЕК ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКИ**

Проведено моделирование производства ячеек дистанционирующей решетки путем штамповки тонкостенных труб из сплава Zr-1%Nb. Из результатов моделирования следует, что точность изготовления пресс-инструмента оказывает определяющее влияние на формирование профиля решетки; структура и свойства деформируемого материала также сказываются на окончательных размерах изделия. Рассчитаны и измерены распределения аксиальных и тангенциальных остаточных напряжений в штампованной ячейке, величины максимальных значений которых находятся в хорошем взаимном соответствии. Показано, что варьирование анизотропии предела текучести и исходного структурного состояния приводит к заметному изменению размеров ячеек.

M. ISAENKOVA<sup>1</sup>, Yu. PERLOVICH<sup>1</sup>, O. KRYMSKAYA<sup>1</sup>, D.  
ZHUK<sup>1</sup>, S. STOLBOV<sup>1</sup>, A. IVANOV<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Public corporation "Machine Building Plant", Electrostal, Russia

## **INFLUENCE OF THE STRUCTURAL STATE AND CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE OF PIPES ON THE STABILITY OF THE SIZES OF STAMPING CELLS OF SPACER GRIDS**

Modeling of the production of the cells of the spacer grids by stamping thin-walled tubes from the alloy Zr-1% Nb is carried out. From modeling results it was concluded that the accuracy of manufacturing a press tool has a determining effect on the formation of the profile of the cell; the structure and properties of the deformable material also affect the final dimensions of the product. The distributions of axial and tangential residual stresses in a stamped cell are computed and measured, the maximum values of which are in good mutual correspondence. It was shown that the variation of the anisotropy of the yield point and the initial structural state leads to a noticeable changes of the cell dimensions.

М.Р. ХУСАИНОВ, С.А. КОМАРИСТОВ, В.М. ШАГИН  
*ФГУП «ПО «Маяк», г. Озёрск, Россия*  
cpl@po-mayak.ru

## **ПОДБОР ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЗАЩИТНЫХ ЧЕХЛОВ МАНИПУЛЯТОРОВ**

С целью подбора материала защитных чехлов электромеханических манипуляторов МЭМ-10 на ФГУП «ПО «Маяк» проводятся исследование различных полимерных материалов. В работе представлены результаты исследований стойкости полимерных материалов, представляющих собой отечественные и зарубежные технические ткани, эластомеры и пластик штатных защитных чехлов импортных манипуляторов и перчаток для боксов, к воздействию эксплуатационных факторов в лабораторных условиях и в условиях горячих камер радиохимического комплекса РТ-1.

M.R. KHUSAINOV, S.A. KOMARISTOV, V.M. SHAGIN  
*FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Russia*  
cpl@po-mayak.ru

## **SELECTION OF POLYMERIC MATERIALS USED IN PROTECTIVE CASING OF MANIPULATORS**

With the view of selecting material to be used for manufacture of protective casing of electrochemical manipulators MEM-10, the analysis of various polymeric materials is underway at the Mayak PA. The paper describes the results of the studies focused on resistance of the polymeric materials, namely, of domestically produced and foreign industrial fabrics, elastomers and plastic of the protective casing of foreign manipulators and gloves for glove boxes to operational factors under laboratory conditions and in the hot cells of RT-1 radiochemical complex.

М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, В.А.ФЕСЕНКО<sup>1</sup>,  
С.Д.СТОЛБОВ<sup>1</sup>, К.Е.КЛЮКОВА<sup>1</sup>, Д.И.ЖУК<sup>1</sup>, А.В.ИВАНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ПАО «Машиностроительный завод», г. Электросталь, Россия

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ В ЯЧЕЙКАХ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК ПРИ ШТАМПОВКЕ**

Изучены процессы текстурообразования в ячейках дистанционирующих решеток из сплава Zr-1%Nb при их штамповке из тонкостенных труб. Показано, что в результате пластической деформации трубы образуется существенная послойная текстурная неоднородность в различных участках ячейки, обусловленная особенностями распределения напряжений при штамповке. При этом интегральные текстурные параметры ячейки изменяются более чем на 0,1. Наличие послойной неоднородности в стенке ячейки и присутствие растягивающих напряжений в процессе эксплуатации изделия может способствовать неблагоприятной радиальной ориентации гидридов и развитию процесса замедленного гидридного растрескивания при знакопеременной нагрузке, реализующейся в активной зоне ядерного реактора.

M.G. ISAENKOVA<sup>1</sup>, Yu.A. PERLOVICH<sup>1</sup>, V.A. FESENKO<sup>1</sup>,  
S.D. STOLBOV<sup>1</sup>, K.E. KLYUKOVA<sup>1</sup>, D.I. ZHUK<sup>1</sup>, and  
A.V. IVANOV<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Public corporation "Machine Building Plant", Electrostal, Russia

## **FEATURES OF FORMATION OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE IN CELLS OF SPACER GRIDS AT PIPE STAMPING**

The processes of texture formation in the cells of spacing grids made of Zr-1% Nb alloy are studied at their stamping out of thin-walled pipes. It is shown that, as a result of plastic deformation of the tube, a significant layered texture heterogeneity is formed in different parts of the cell, due to the stress distribution features during stamping. In this case, the integral textural parameters of the cell vary by more than 0.1. The presence of layered heterogeneity in the cell wall and the presence of tensile stresses during the operation of the article can contribute to the unfavorable radial orientation of the hydrides and to the development of the delayed hydride cracking process under an alternating load realized in the core of a nuclear reactor.

Е.А. КУЛЕШОВА<sup>1, 2</sup>, А.С. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, Д.А. МАЛЫЦЕВ<sup>1</sup>,  
Е.В. КРИКУН<sup>1</sup>, Д.В. САФОНОВ<sup>1</sup>, И.В. КОЗЛОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

## **СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЦИРКОНИЕВЫХ ОБОЛОЧЕК В ИСХОДНОМ СОСТОЯНИИ И ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ**

В настоящее время перед промышленностью многих стран поставлена серьезная задача – переход на «сухое хранение» отработавшего ядерного топлива. Дальнейшее наращивание мощности ЯЭУ по всему миру в купе с отсутствием технологий переработки отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000 и РБМК-1000 требует увеличения числа хранилищ отработанного ядерного топлива, что существенно повышает эксплуатационные затраты и конечную стоимость ядерной энергии, делая ее менее конкурентоспособной. Развитие технологии «сухого хранения» позволит в будущем отказаться от «выдержки в бассейне» (либо уменьшить период данной фазы), что сделает хранения ОЯТ технически более простым и надежным, экологически безопасным и экономически более выгодным.

Главной решаемой проблемой хранения ОЯТ является герметичность элементов с радиоактивным материалом. В случае «сухого хранения» одной из нерешенных проблем, которая способна вызвать разгерметизацию твэла с ОЯТ, является деформация вследствие ползучести, сопровождающееся изменением длины и диаметра. Доминирующим механизмом ползучести циркониевых сплавов при напряжениях ниже 100 МПа является перепоплавание дислокаций, а при более высоких – скольжение. Также влияние на прочностные свойства данного материала под действием длительных статических нагрузок может оказывать образование вторичных фаз.

В работе проведены исследования циркониевых образцов твэльных оболочек в исходном состоянии и после испытаний на ползучесть. Методами ПЭМ, РЭМ и АЗТ определен размер зерен циркониевых образцов, исследованы фазовый состав и эволюция дислокационной структуры во время испытаний на ползучесть. Установлена плотность дислокаций, плоскости их залегания и вектора Бюргерса. Также определен фазовый состав исходных образцов, представленный частицами  $\beta$ -ниобия, частицами на основе ниобия и циркония, включениями на основе циркония, ниобия и железа, гидридами ZrH.



E.A. KULESHOVA<sup>1,2</sup>, A.S. FROLOV<sup>1</sup>, D.A. MALTSEV<sup>1</sup>,  
D.V.SAFONOV<sup>1</sup>, I.V. KOZLOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup> NRNU MEPhI, Moscow, Russia

## **STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF ZIRCONIUM SHELL IN INITIAL AND AFTER CREEP TESTS STATES**

At present day, the industry of many countries has a serious challenge - the transition of spent nuclear fuel to "dry storage". The further increase of nuclear power plants capacity in a compartment with the lack of technologies for reprocessing spent nuclear fuel of VVER-1000 and RBMK-1000 requires an increase in the number of spent nuclear fuel storage facilities, which significantly increases the operational costs and the final cost of nuclear energy, making it less competitive. The development of "dry storage" technology will allow in the future to abandon "aging in the basin" (or reduce the period of this phase), which will make storage of spent nuclear fuel technically simpler and more reliable, environmentally safe and economically more profitable.

The main solvable problem of SNF storage is the tightness of elements with radioactive material. One of the unsolved problems of dry storage, that can cause depressurization of a fuel element with SNF, is form changing due to creep, accompanied by changing in length and diameter. At voltages below 100 MPa the dominating creep mechanism of zirconium alloys is the creeping of dislocations, and at higher ones - sliding. Also, the effect on the strength properties of a given material under the influence of prolonged static loads may influence the formation of second phases.

The article presents the results of investigation zirconium fuel cladding samples in initial state and after the creep tests. The grain size, phase composition and the evolution of the dislocation structure during creep tests were determined by TEM, SEM, and AZT methods. The density of dislocations, planes of their occurrence and the Burgers vector were established. The phase composition of the initial state samples represented by  $\beta$ -niobium particles, niobium and zirconium-based particles, zirconium, niobium, iron-based inclusions, ZrH hydrides.

## **КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ, ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ**

Экономическая эффективность ядерных реакторов на быстрых нейтронах во многом определяется работоспособностью конструкционных материалов, которая, в частности, зависит от фазово-структурной стабильности нержавеющих реакторных сталей. В этой связи, исследование влияния нейтронного облучения на прямое фазовое мартенситное  $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращение, оказывающего значительное влияние на физико-механические свойства и радиационную стойкость аустенитных сталей, является актуальной задачей современного радиационного материаловедения.

Проведены сравнительные механические испытания с использованием методов оптической экстензометрии и магнитометрии промышленных нержавеющих сталей AISI 304, AISI 321, 12X18H10T, 08X16H11M3, облученных нейтронами в реакторах ВВР-К и БН-350 до различных повреждающих доз.

В результате экспериментов получены механические и энергетические характеристики, определены значения энергии дефекта упаковки (ЭДУ) для исследуемых материалов. Построены диаграммы накопления мартенситной  $\alpha'$ -фазы в координатах «мартенситная  $\alpha'$ -фаза — «истинные» напряжения», «мартенситная  $\alpha'$ -фаза — «истинные» локальные деформации».

Построены кинетические кривые мартенситного  $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращения в процессе растяжения. Показано, что для описания кривых мартенситного превращения в облученных сталях одинаково применимы уравнения G.V. Olson и H.C. Shin H.C. Выявлены закономерности накопления мартенситной  $\alpha'$ -фазы в зависимости от деформации и напряжений в облученных материалах.

Установлено влияние облучения на кинетические параметры мартенситного  $\gamma \rightarrow \alpha'$ -перехода.

## **PARAMETERS OF KINETICS OF DEFORMATION-INDUCED MARTENSITIC TRANSFORMATION IN AUSTENITIC STEELS IRRADIATED BY NEUTRONS**

The economic efficiency of fast nuclear reactors is largely determined by the operability of structural materials, which depends on the phase stability of the reactor stainless steels. Therefore, it is important to study the effect of neutron irradiation on a direct martensitic  $\gamma \rightarrow \alpha'$ -transformation, which significantly affects on the mechanical properties and radiation stability of austenitic steels.

Comparative mechanical tests of industrial AISI 304, AISI 321, 0.12C-18Cr-10Ni-0.5Ti, 0.08C-16Cr-11Ni-3Mo stainless steels irradiated with neutrons in the WWR-K and BN-350 reactors up to various damaging doses were carried out using the optical extensometry and magnetometry methods.

As a result of the experiments, mechanical and energy characteristics were obtained and the values of the stacking faults energy (SFE) were determined for the studied materials. The diagrams of the martensitic  $\alpha'$ -phase accumulation were constructed for "true" stresses and "true" local deformations values.

The kinetics curves of the martensitic  $\gamma \rightarrow \alpha'$ -transformation during the tensile tests were constructed. It is shown that the equations of G.B. Olson and H.C. Shin fit the martensite transformation curves of irradiated steels. The regularities of the martensitic  $\alpha'$ -phase accumulation as a function of strain and stresses in irradiated materials are revealed.

The effect of irradiation on the kinetic parameters of the martensitic  $\gamma \rightarrow \alpha'$ -transformation was established.

В.И. ПАСТУХОВ<sup>1,2</sup>, С.А. АВЕРИН<sup>1</sup>, И.А. ПОРТНЫХ<sup>1</sup>,  
А.В. КОЗЛОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия,

<sup>2</sup>ФГАОУ ВПО «УрФУ», Екатеринбург, Россия

vladimir.pastuhov1991@gmail.com

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАДИАЦИОННОГО ПОРООБРАЗОВАНИЯ В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛ БЫСТРОГО РЕАКТОРА МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

Радиационно-индуцированная пористость зависит многих параметров облучения, в частности, температуры эксплуатации и физических характеристик нейтронного потока. Различие параметров облучения приводит к пространственной неоднородности радиационного распухания оболочки твэла.

Проведено исследование пространственной неоднородности радиационно-индуцированной пористости оболочек твэлов быстрого реактора при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Сканирующая микроскопия, проведенная на поперечных шлифах оболочек твэл, позволила выявить существенную неоднородность объемного распределения пор по толщине оболочек твэлов. На всех исследуемых участках по высоте твэла у внутренней поверхности наблюдалась обедненная зона шириной порядка 5-7 мкм, в которой максимальный размер пор не превышал 30 нм. Установлено что средний размер пор уменьшается от внутренней к наружной поверхности оболочки. Наблюдается локальная неоднородность пористости, связанная с элементами структуры материала оболочки.

V.I. PASTUKHOV<sup>1,2</sup>, S.A. AVERIN<sup>1</sup>, I.A. PORTNYH<sup>1</sup>,  
A.V. KOZLOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*JSC «Institute of Nuclear Materials», Zarechny, Russia*

<sup>2</sup>*Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia*

vladimir.pastuhov1991@gmail.com

## **INVESTIGATION OF RADIATION PORE FORMATION FEATURES IN SHELVES OF FAST REACTOR FUEL ELEMENT BY METHOD OF SCANNING ELECTRONIC MICROSCOPY**

Radiation-induced porosity depends on various parameters of neutron irradiation, in particular, operating temperature and physical characteristics of the neutron flux. Differences between irradiations parameters lead to spatial inhomogeneity of radiation-induced porosity of the cladding tube of fuel pin.

Spatial inhomogeneity of radiation-induced porosity of the cladding tube was investigated by means of scanning electron microscope (SEM). Investigation carried out on transverse sections allowed to reveal significant volume distribution inhomogeneity through the cladding tube thickness. A depleted zone, 5-7 micrometers wide, was observed on all the studied areas along the fuel pin height at the inner surface. In this zone maximum void size was less than 30 nm. The average void size reduced from inner to outer surface of the cladding tube. The local porosity inhomogeneity was observed on various elements of the microstructure.

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

<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ИЯФ РК, г. Алматы, Республика Казахстан

lexa\_edji@mail.ru

## **НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ ОБЛУЧЕННОЙ СТАЛИ ЭП-450**

В работе приведены результаты испытаний на ползучесть стали ЭП-450 облученной в реакторе БН-350 до повреждающих доз 11 и 24 сна. Эта сталь используется в качестве конструкционного материала активной зоны реактора БН-1200. По результатам испытаний на пострadiационную ползучесть установлено, что независимо от условий испытаний (нагрузка = 100, 450, 550Н и  $T_{\text{исп}} = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) процесс ползучести носит немо- нотонный характер. На диаграммах испытаний наблюдаются сменяющие друг друга участки роста и снижения скорости деформации. Возможным объяснением неустойчивости пластического течения при испытаниях на ползучесть может быть взаимодействие дислокаций с примесными ато- мами и выделениями вторичных фаз.

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

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

<sup>2</sup>Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

## **INSTABILITY OF PLASTIC CURRENCY IN TESTS FOR CREEP OF IRRADIATED STEEL EP-450**

The work presents the results of creep tests for steel EP-450 irradiated with fast neutrons in BN-350 reactor to damage doses of 11 and 24 dpa. This steel is a structural material of the active zone of the BN-1200 reactor. According to the results of the tests on the post-radiation creep is established that irrespective of the test conditions (load = 100, 450, 550N and  $T_{\text{test}} = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), the creep process is no monotonic. On the test diagrams, there are alternating regions of growth and a decrease in the rate of deformation. A possible expla- nation for the instability of plastic flow during creep tests can be the interaction of dislocations with impurity atoms and secondary phase precipitates.

А.С. ЛАРИОНОВ<sup>1</sup>, А.С. ДИКОВ<sup>1,2</sup>, Д.А. САТПАЕВ<sup>1,3</sup>,  
С.Б. КИСЛИЦИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ИЯФ РК, г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>3</sup>КазННТУ, г. Алматы, Республика Казахстан

larionov@inp.kz

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ ЗАЩИТНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**

В работе приведены результаты исследований радиационной стойкости тонкопленочных защитных покрытий TiMoN, TiNbN и TiCrN, облученных низкоэнергетическими ионами инертных газов

Покрытия TiMoN и TiCrN синтезированы на стальной (12X18H10T) подложке методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ). Покрытия TiNbN осаждались методом магнетронного распыления из двух магнетронов (Ti и Nb) в остаточной атмосфере азота.

В качестве критериев оценки радиационной стойкости принимались: коэффициент распыления поверхности, изменение структурно-фазового состава и физико-механических свойств. По результатам исследований выявлено, что наибольшей радиационной стойкостью обладает TiMoN.

A.S. LARIONOV<sup>2</sup>, A.S. DIKOV<sup>1,2</sup>, D.A. SATPAEV<sup>1,3</sup>, S.B. KISLITSIN<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>KazNITU, Almaty, Kazakhstan

## **COMPARATIVE STUDIES OF RADIATION RESISTANCE OF PROTECTIVE THIN FILM COATINGS BASED ON NITRIDES OF TRANSITION METALS**

The results of investigations of radiation resistance of protective coatings from TiMoN, TiNbN and TiCrN irradiated by low-energy noble ions presented in this paper.

TiMoN and TiCrN coatings were synthesized on 12Cr18Ni10Ti steel substrate by the method of condensation with ion bombardment (CIB). TiNbN coatings were deposited by magnetron sputtering from two magnetrons (Ti and Nb) with in residual nitrogen atmosphere.

As criteria for assessing radiation resistance were chosen follow: sputtering yield, changes in the structural-phase composition, and of the physical-mechanical properties. It is reveal that TiMoN has the greatest radiation resistance.

С.А. СУББОТИН, В.В. ЕФРЕМОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СИСТЕМНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К МАТЕРИАЛАМ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛОВ ИННОВАЦИОННЫХ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

Инновационная система ядерной энергетики (ИЯЭС) призвана обеспечить эффективное использование урана 238 и тория 232 для получения энергии. Поддержание нейтронного баланса этого процесса требует разработки и использования новых видов ядерного топлива и конструкционных материалов. Это требует разработки моделей для прогнозирования изменения их свойств под действием полей различных излучений, температур, напряжений и воздействия различных химических субстанций. При этом важно достижение не предельных параметров, а оптимальное сочетание свойств материалов и условий их работы. В работе, для оптимальных параметров воспроизводства и загрузки топлива, выбранных на основе сценарного анализа развивающейся ИЯЭС России, рассчитываются такие параметры, как флюенс быстрых нейтронов и количество смещений на атом на оболочке ТВЭлов, поглощение нейтронов материалом оболочек ТВЭлов, изменение их нуклидного состава.

S.A. SUBBOTIN, V.V. EFREMOV

*National Research Nuclear University MEPhI*

## **FORECASTING SYSTEM REQUIREMENTS TO THE MATERIALS OF THE SHELL OF FUEL ELEMENTS OF INNOVATIVE FAST REACTORS**

The innovative nuclear power system (INPP) is designed to ensure the effective use of uranium 238 and thorium 232 to generate energy. Maintaining the neutron balance of this process requires the development and use of new types of nuclear fuel and structural materials. All this requires the development of models for predicting the change in their properties under the influence of fields of different radiations, temperatures, stresses and the effects of various chemical substances. It's important to achieve not the limiting parameters, but the optimal combination of the properties of materials and the conditions of their operation. In this paper, parameters such as fluence of fast neutrons and the number of dpa on the shells of fuel elements, neutron absorption by the material of fuel shells, and the change in their nuclide composition are calculated for optimal parameters of fuel reproduction and loading selected on the basis of scenario analysis of the developing INPP of Russia.



Р.О. ЗЫКОВА, А.М. ТЕРЕХОВА, Ю.Е. КАРАЖЛЕВСКАЯ,  
А.С. ЗЕВЯКИН  
*ИАТЭ НИЯУ МИФИ, г. Обнинск, Россия*  
ZykovaRuslana@yandex.ru

## **ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРБИДНОГО ТОПЛИВА В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ МОЩНОСТЬЮ 10 МВт**

Исследовательский реактор, использующий для поддержания цепной ядерной реакции нейтроны тепловой части спектра энергий, мощностью до 10 МВт, предназначенный для экспорта в страны с развивающейся атомной отраслью, требует технологий, обеспечивающих максимальную безопасность для персонала и оборудования ЯЭУ даже в случае ошибок оперативного персонала и минимальную возможность доступа к активной зоне. Для этого топливная кампания должна быть не менее 10 лет.

Ещё одним критерием является снижения обогащения начальной топливной загрузки. Одним из способов является использование более плотного топлива.

В работе рассматривается перспектива использования карбидного топлива в исследовательском реакторе для экспорта в страны с развивающейся атомной энергетикой.

R.O. ZIKOVA, A.M. TEREHOVA, Yu.E. KARAZHLEVSKAYA,  
A.S. ZEVYAKIN  
*IATE NRNU MEPhI, Obninsk, Russia*

## **PERSPECTIVE OF USE OF CARBIDE FUEL IN A 10 MW RESEARCH REACTOR**

A research reactor using superpower engines with a capacity of up to 10 MW, designed for export to countries with developing nuclear industry, uses technologies to ensure maximum safety for personnel and equipment of nuclear power plants, even in the case of operating personnel errors and minimal access to active zone. For this, the fuel campaign must be at least 10 years old.

Another criterion is to reduce the enrichment of the initial fuel load. One way is to use more dense fuel.

The paper considers the prospect of using carbide fuel in a research reactor for export to countries with developing nuclear power.

М.Г. ИСАЕНКОВА, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, О.А. КРЫМСКАЯ,  
Д.И. ЖУК, А.Е. РУБАНОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
г. Москва, Россия  
dimazhuk@gmail.com*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ МЕТОДОМ СОВМЕСТНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕРЕН МАТЕРИАЛА**

Механическая обработка материалов обычно приводит к переориентации отдельных зерен и формированию кристаллографической текстуры. Цирконий является гексагональным материалом с большой степенью анизотропии, поэтому для него влияние текстуры на механические характеристики изделия наиболее заметны. Для исследования этого процесса использовалась упруго-пластическая феноменологическая модель материала. Выбраны несколько режимов прокатки с разным соотношением уменьшения толщины к уменьшению диаметра и несколько образцов с различной исходной текстурой. Полученные при моделировании функции распределения зерен по ориентациям и полюсные фигуры сравнены с экспериментальными и получена высокая степень корреляции.

M.G. ISAENKOVA, Yu.A. PERLOVICH, O.A. KRYMSKAYA,  
D.I. ZHUK, A.E. RUBANOV

*National Research Nuclear University MPhI, Moscow, Russia  
dimazhuk@gmail.com*

## **MODELLING OF COLD ROLLING OF ZIRCONIUM TUBES WITH JOINT DEFORMATION OF POLYCRYSTAL MATERIAL**

Mechanical processing of materials usually result in change of grains' orientation and forming of crystallographic texture. Zirconium is a highly anisotropic material and so the change of crystallographic texture will significantly affect the mechanical properties. To research this process the self-consistent phenomenological viscoelastic material model was implemented. Several rolling modes with different ratios of tube thickness to diameter reduction rates were studied. Different initial textures were investigated. Orientation distribution functions obtained by modelling were compared to experimental. They are found to be in a good agreement.

М.Г. ИСАЕНКОВА, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, О.А. КРЫМСКАЯ,  
Д.И. ЖУК, А.Е. РУБАНОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
г. Москва, Россия  
dimazhuk@gmail.com*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ В $\alpha$ -ЦИРКОНИИ ПРИ ПРОКАТКЕ С УЧЕТОМ СИСТЕМ СКОЛЬЖЕНИЯ И ДВОЙНИКОВАНИЯ**

Моделирование процесса формирования кристаллографической текстуры в гексагональном цирконии при холодной прокатке проводили с использованием программного обеспечения DAMASK, в котором рассматривается изменение структуры материала (зерна) и переориентация зерен в зависимости от действующих механизмов пластической деформации. Рассматривали три системы скольжения: призматическое  $\{1\bar{1}00\} < 11\bar{2}0 >$ , базисное  $(0001) < 11\bar{2}0 >$  и пирамидальное  $\{10\bar{1}1\} < 11\bar{2}3 >$ , а также двойникование по плоскостям  $\{10\bar{1}2\}$ ,  $\{11\bar{2}1\}$ ,  $\{11\bar{2}\bar{1}\}$ . Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными по прокатке монокристаллов циркония разных ориентаций..

M.G. ISAENKOVA, Yu.A. PERLOVICH, O.A. KRYMSKAYA,  
D.I. ZHUK, A.E. RUBANOV  
*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia  
dimazhuk@gmail.com*

## **MODELLING OF CRYTALLOGRAPHIC TEXTURE FORMING DURING ROLLING $\alpha$ -ZIRCONIUM TUBES CONSIDERING SLIP AND TWIN SYSTEMS**

Modelling of hexagonal Zirconium cold rolling process conducted with use of DAMASK software code. The simulation accounts for changes in grains' structure and reorientation depending on active mechanism of plastic deformation. Three slip systems are taken into consideration including prismatic  $\{1\bar{1}00\} < 11\bar{2}0 >$ , basal  $(0001) < 11\bar{2}0 >$  and pyramidal  $\{10\bar{1}1\} < 11\bar{2}3 >$ . In addition three twin systems with  $\{10\bar{1}2\}$ ,  $\{11\bar{2}1\}$ ,  $\{11\bar{2}\bar{1}\}$  implemented in the model. Obtained results are in good agreement with experimental.

М.Ю.ТЕРНОВЫХ, И.С.САЛЬДИКОВ, Г.В.ТИХОМИРОВ

*НИЯУ МИФИ» г. Москва, Россия*

MYTernovykh@mephi.ru, ISSaldikov@mephi.ru

## **ПРЕДСКАЗАНИЕ МАТЕРИАЛЬНОГО СОСТАВА ВЫГОРЕВШЕЙ ТАБЛЕТКИ РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ КОДОВ**

В работе представлены результаты моделирования элементного состава отработавшего ядерного топлива в твэлах реактора типа ВВЭР с помощью нейтронно-физического комплекса SCALE, разработанный в США, Оакриджской национальной лаборатории. Изучаемая модель в виде таблетки топлива реактора может включать добавки для изменения её нейтронно-физических и теплофизических свойств. Просуммировав изотопный состав можно предсказать тот элементный состав, который будет в таблетке после облучения в реакторе и который был использован в качестве основы для проведения экспериментов по изучению теплофизических свойств на кафедре №9 НИЯУ МИФИ в 2012 году. Полученные в результате предсказания изотопного состава элементы были заменены на их аналоги для получения тех же свойств в материале, который использовался в качестве имитатора таблетки.

M.YU.TERNOVYKH, I.S.SALDIKOV, G.V.TIKHOMIROV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

MYTernovykh@mephi.ru, ISSaldikov@mephi.ru

## **PREDICTION OF THE MATERIAL COMPOSITION OF THE VVER-TYPE REACTOR BURNED PELLET WITH USING OF NEUTRON-PHYSICAL CODES**

The paper presents the results of modeling the elemental composition of spent nuclear fuel in of the VVER-type reactor using the SCALE neutron-physical complex developed in the US, Oakridge National Laboratory. This fuel pellet of the reactor can include additives to change its neutron-physical and thermophysical properties. Summing up the isotopic composition one can predict the elemental composition which will be in the pellet after irradiation in the reactor and which used as the basis for conducting experiments on the study of thermophysical properties at the Department No. 9 in NRNU MEPhI in 2012. The resulting elements composition in the fuel replaced by their analogs to obtain the same properties in the material that used as a simulator of the pellet.

А.Д.ЧЕРНОВ

*АО "ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара", г. Москва, Россия  
chernoff95@gmail.com*

## **ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ ЭП823 В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОГО СТАРЕНИЯ**

В данной работе исследованы изменения структуры и свойств улучшенной ферритно-мартенситной стали 16X12MBCФБР (ЭП823-Ш) в процессе продолжительного термического старения. В исходном состоянии сталь имеет ферритно-сорбитную структуру. В процессе старения при температурах от 540 до 600 °С в зернах феррита формируются дисперсные частицы фазы Лавеса  $\text{Fe}_2(\text{Mo}, \text{W}, \text{Si})$ . Старение при более высоких температурах приводит к растворению фазы Лавеса и дополнительному формированию крупных карбидных частиц. Старение при 660 °С в течение 1000 часов приводит к снижению микротвердости на 30%. Дальнейшее старение (5000 ч) к дополнительному разупрочнению не привело. Значение предела прочности после старения в 5000 ч снизилось на 11%.

A.D.CHERNOV

*SC VNINM, Moscow, Russia*

## **EVOLUTION OF THE STRUCTURAL-PHASE STATE OF SHELL LAMPS FROM STEEL EP823 IN THE PROCESS OF LONG AGING**

In given work changes of the structure and properties of improved by heat treatment ferritic-martensitic steel 16Kh12MVSFBR (EP823-Sh) during extended thermal ageing are studied. In initial state steel has ferritic-sorbite structure. During ageing at temperatures from 540 to 600 °C dispersed particles of the Laves phase  $\text{Fe}_2(\text{Mo}, \text{W}, \text{Si})$  are formed in the grains of ferrite. Aging at higher temperatures leads to the dissolution of the Laves phase and the additional formation of large carbide particles. Ageing at 660 °C for 1000 hours leads to a decrease in microhardness by 30%. Further ageing (5000 h) did not lead to additional softening. The value of the tensile strength after aging in 5000 hours decreased by 11%.

С.В. РОГОЖКИН, Н.А. ИСКАНДАРОВ, А.А. ЛУКЬЯНЧУК,  
А.С. ШУТОВ, О.А. РАЗНИЦЫН, А.А. НИКИТИН,  
А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ, Т.В. КУЛЕВОЙ, Р.П. КУЙБИДА,  
С.Л. АНДРИАНОВ

*НИИ "Курчатовский институт" – ИТЭФ, Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРЫ 12% ХРОМИСТЫХ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe**

Проведено томографическое атомно-зондовое исследование распределения химических элементов и тонкой структуры образцов сталей ЧС-139 и ЭК-181 в исходном состоянии с традиционной термической обработкой и после облучения ионами железа при комнатной температуре до повреждающих доз ~ нескольких сна. В исходном состоянии сталей в объеме материала обнаружено значительное число наноразмерных кластеров ( $\sim 10^{23} \text{ м}^{-3}$ ), обогащенных хромом, ванадием и азотом (и ниобием в стали ЧС-139). Показано, что под воздействием облучения происходит изменение состава и размеров кластеров. Увеличение размера кластеров в процессе облучения сопровождается снижением в них концентрации хрома, ванадия и азота (и ниобия в стали ЧС-139).

S.V. ROGOZHNIKIN, N.A. ISKANDAROV, A.A. LUKYANCHUK,  
A.S. SHUTOV, O.A. RAZNITSYN, A.A. NIKITIN,  
A.G. ZALUZHNY, T.V. KULEVOY, R.P. KUIBEDA,  
S.L. ANDRIANOV

*NRC «Kurchatov Institute» - ITEPh, Moscow, Russia*

## **STUDY OF NANOSTRUCTURE OF 12% CHROMIUM FERRITIC-MARTEMSTIC SREELS UNDER Fe ION IRRADIATION**

Tomographic atom probe analysis of chemical element spatial distribution and of nanostructure in ChS-139 and EK-181 steels after conventional normalizing and tempering (initial state) and after additional Fe ion irradiation at room temperature up to few dpa was carried out. A large amount of nanoclusters ( $\sim 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ) enriched in Cr, V, and N (and Nb in ChS-139 steel) was found out in unirradiated steels. It was shown that chemical composition and sizes of nanoclusters change under heavy ion irradiation. The increase of cluster size accompanies the decrease of concentration of Cr, V, and N (and Nb in ChS-139 steel).

А.А. НИКИТИН, С.В. РОГОЖКИН  
*НИИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ, Москва, Россия*  
nikitin@itep.ru

## **ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ СТАЛИ EUROFER97 ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЯЖЕЛОИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

В рамках анализа устойчивости ферритно-мартенситных сталей к радиационным воздействиям проведено облучение образцов стали Eurofer97 при температуре 300 °С ионами Fe с энергией 5,6 МэВ до дозы порядка 10 сна. Исследование поперечных сечений образца с помощью просвечивающей электронной микроскопии показало высокую объемную концентрацию структурных дефектов (до  $10^{22} \text{ м}^{-3}$ ) на глубине порядка 1,5 мкм. Дополнительно, методом атомно-зондовой томографии обнаружено перераспределение атомов хрома и углерода под облучением. Совокупность данных эффектов может объяснять измеренное увеличение твердости материала в поврежденном приповерхностном слое.

A.A. NIKITIN, S.V. ROGOZHNIKIN  
*NRC «Kurchatov Institute» - ITEPh, Moscow, Russia*  
nikitin@itep.ru

## **EUROFER97 STEEL MICROSTRUCTURE RESPONSE TO HEAVY ION IRRADIATION**

This study is aimed on the analysis of ferritic-martensitic steel resistance to irradiation. Eurofer97 steel samples were irradiated with 5.6 MeV Fe ions at 300 °C up to 10 dpa. Transmission electron microscopy characterization of the cross-section specimens showed high number density of structural defects (up to  $10^{22} \text{ m}^{-3}$ ) at the 1.5 mkm depth from irradiated surface. In addition atom probe tomography studies revealed redistribution of Cr and C atoms under irradiation. Superposition of these effects may be the origin of the measured increase in material hardness in the damaged near surface region.

Д.В. ПОСОХОВ, В.С. КУЗЬМИН  
*ФГАОУ ВО НИ ТПУ, г. Томск, Российская Федерация*  
Posokhov.d.v@gmail.com

**РАЗРАБОТКА ПЕРОВСКИТО-ПОДОБНОГО МАТЕРИАЛА  
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ  
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В РЕЖИМЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ГОРЕНИЯ МЕТОДОМ СВ-  
СИНТЕЗА**

В данной работе изучена возможность получения матричного материала на основе модифицированного перовскита для иммобилизации высоко-радиоактивных 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  
*ФГАОУ ВО НИ ТПУ, г. Томск, Российская Федерация*  
Posokhov.d.v@gmail.com

**DEVELOPMENT OF PEROVSKITE-SIMILAR MATERIAL BASED  
ON ALUMINUM FOR IMMOBILIZATION OF RADIOACTIVE  
WASTES IN THE MODE OF TECHNOLOGICAL COMBUSTION BY  
METHOD SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE  
SYNTHESIS**

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.



М.Д. САВЕЛЬЕВ, Б.А. ТАРАСОВ, Д.П. ШОРНИКОВ  
*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*  
SavelyevMD@gmail.com

## **КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ Fe-Cr-Al-Si С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ХРОМА**

Целью данной работы является изучение коррозионной стойкости сплавов на основе Fe-Cr-Al-Si в воде высоких параметров и перегретом паре.

В рамках данной работы рассматриваются сплавы с содержанием хрома от 5 до 14 мас.%, алюминия от 0 до 4 мас.% и кремния от 0 до 4 мас.%. Образцы были испытаны на стойкость к окислению в различных условиях.

В результате получены зависимости коррозионной стойкости сплавов от состава и определена нижняя граница содержания Cr+Al+Si в сплавах, обладающих достаточной коррозионной стойкостью. Подтверждено существования синергетического эффекта влияния кремния и алюминия на коррозионную стойкость сталей.

M.D. SAVELYEV, B.A. TARASOV, D.P. SHORNIKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*  
SavelyevMD@gmail.com

## **CORROSIVE RESISTANCE OF Fe-Cr-Al-Si ALLOYS WITH LOW CHROME CONTENT**

The purpose of this work is to study the corrosion resistance of Fe-Cr-Al-Si-based alloys in high-temperature water and superheated steam.

Within the framework of this work, alloys with a chromium content of 5 to 14 wt.%, aluminum from 0 to 4 wt.%, and silicon from 0 to 4 wt.% were considered. Samples were tested for oxidation resistance under various conditions.

As a result, the corrosion resistance of the alloys was found to depend on the composition and the lower limit of Cr+Al+Si content was determined in alloys with sufficient corrosion resistance. The existence of a synergistic effect of the influence of silicon and aluminum on the corrosion resistance of steels has been confirmed.

И.В. ФЕДОТОВ, А.Н. СУЧКОВ, Д.М. БАЧУРИНА,  
О.Н. СЕВРЮКОВ, Б.А. КАЛИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА И ГЕОМЕТРИИ  
КОМПЕНСИРУЮЩЕЙ ПРОСТАВКИ В СОЕДИНЕНИИ  
W/ЭК-181 ПРИМЕНительно К КОНЦЕПЦИИ  
ОХЛАЖДАЕМОГО ГЕЛИЕМ ДИВЕРТОРА  
ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЕМО**

При разработке охлаждаемого гелием дивертора термоядерного реактора ДЕМО возникает необходимость соединения разнородных материалов. Одним из способов соединения составных частей охлаждающего «пальца» из вольфрама и малоактивируемой ферритно-мартенситной стали ЭК-181 является диффузионная пайка.

В работе рассматривается влияние компенсирующей проставки из ванадия и тантала на напряженно-деформированное состояние в соединении W/ЭК-181. Для определения напряженно-деформированного состояния соединений W/V/ЭК-181 и W/Ta/ЭК-181 проведено моделирование с помощью программного комплекса ANSYS. Рассмотрены различные геометрии соединения, включая охлаждающий «палец» дивертора. Получены распределения напряжений и пластических деформаций в результате охлаждения с температуры пайки.

Для различных геометрических параметров подобрана минимальная толщина компенсирующей проставки при увеличении которой не происходит значительных уменьшений остаточных напряжений. Рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния в соединениях W/V/ЭК-181 и W/Ta/ЭК-181 при наличии прослойки имитирующей паяный шов.

I.V. FEDOTOV, A.N. SUCHKOV, D.M. BACHURINA,  
O.N. SEVRYUKOV, B.A. KALIN  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia*

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF MATERIAL AND  
GEOMETRY OF THE COMPENSATING INTERLAYER IN  
W/EK-181 JOINT APPLICABLE TO THE HELIUM-COOLED  
DIVERTOR FOR DEMO FUSION REACTOR**

During developing a helium-cooled divertor of a DEMO fusion reactor, it becomes necessary to joint dissimilar materials. Diffusion brazing is one of the ways to joint components of the cooling "finger" made of tungsten and low-activation ferritic-martensitic steel EK-181.

The influence of the vanadium and tantalum compensating interlayer on the stress-strain state in the W/EK-181 joint is considered. To get the stress-strain state of W/V/EK-181 and W/Ta/EK-181 joints, was performed simulation using the ANSYS software. Various joint geometries, including the cooling "finger" of the divertor, is considered. Stress and plastic deformation distributions was obtained after simulation of cooling from the brazing temperature.

The minimum thickness of the compensating interlayer for a variety of geometric parameters was chosen. There is no significant decrease of residual stresses at increase of it. The change in the stress-strain state in W/V/EK-181 and W/Ta/EK-181 joints in the presence of brazing seam imitating interlayer is considered.

Е.В. КОЗЛОВА<sup>1</sup>, В.В. ГОРЛЕВСКИЙ<sup>1</sup>, А.А. СЕМЕНОВ<sup>1</sup>,  
В.В. ВОЛКОВ<sup>2</sup>, И.И. ЛЯТУН<sup>3</sup>, П.А. ЕРШОВ<sup>3</sup>, А.А. СНИГИРЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>АО «ВНИИНМ», Москва, Россия,

<sup>2</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ "Кристалло-  
графия и фотоника" РАН, Москва, Россия,

<sup>3</sup>Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,

Калининград, Россия

keleva@mail.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ БЕРИЛЛИЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ МУРР

Метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) позволяет определить распределение неоднородностей в материалах по размерам и спрогнозировать их свойства при изготовлении устройств рентгеновской оптики. Методом МУРР изучен ряд бериллиевых материалов, предназначенных для изготовления устройств рентгеновской оптики (рефракционных линз и спекл-суппрессоров). Исследованы различные композитные материалы на основе пористого бериллия. Показано влияние добавки детонационных наноалмазов в бериллиевую матрицу на рассеивающую способность материала.

E.V. KOZLOVA<sup>1</sup>, V.V. GORLEVSKY<sup>1</sup>, A.A. SEMENOV<sup>1</sup>,  
V.V. VOLKOV<sup>2</sup>, I.I. LYATUN<sup>3</sup>, P.A. ERSHOV<sup>3</sup>, A.A. SNIGIREV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>SC «VNIINM», Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Shubnikov Institute of Crystallography, RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

## SAXS INVESTIGATION OF ADVANCED BERYLLIUM MATERIALS

The small-angle X-ray scattering (SAXS) technique allows to determine size distributions of inhomogeneities in materials and to predict their properties in X-ray optics devices. A number of beryllium materials for the manufacturing of X-ray optics (refractive lenses and speckle suppressors) have been studied by the SAXS. Various composite materials based on porous beryllium have been studied. The effect of adding detonation nanodiamonds to the beryllium matrix on the scattering ability of the material is presented.

М.С. ШЕВЕРДЯЕВ, В.В. ГОРЛЕВСКИЙ, Е.В. КОЗЛОВА,  
А.А. СЕМЕНОВ  
*АО «ВНИИНМ», Москва, Россия*  
sheverdyayev\_max@mail.ru

## **БЕРИЛЛИЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ БУДУЩЕГО**

Бериллиевые материалы широко применяются в науке и технике. Они востребованы как ядерной, так и термоядерной энергетикой. Кроме этого, металлический бериллий прозрачен для рентгеновского излучения и используется при изготовлении рентгеновских окон и рефракционных рентгеновских линз.

В АО «ВНИИНМ» разработаны бериллиевые материалы различного назначения: для облицовки первой стенки ITER, для фокусировки и управления рентгеновского излучения. Особо интересен пористый бериллий, который перспективен как отражатель и размножитель нейтронов в blankets термоядерных устройств. Уникальное сочетание рентгенооптических свойств позволяет его также использовать в устройствах для формирования изображения в пучке синхротронного излучения (speckle suppressor).

M.S. SHEVERDYAEV, V.V. GORLEVSKY, E.V.KOZLOVA,  
A.A. SEMENOV  
*SC «VNIINM», Moscow, Russia*  
sheverdyayev\_max@mail.ru

## **BERYLLIUM MATERIALS AND THEIR APPLICATION IN ENERGETICS OF THE FUTURE**

Beryllium materials are widely used in science and technology. They are of importance both for nuclear and thermonuclear energy applications. Additionally, metallic beryllium is transparent to x-ray radiation and used in the manufacture of X-ray windows and refractive x-ray lenses.

VNIINM JSC has developed beryllium materials for various purposes: for coating of the ITER's first wall, for focusing and controlling X-ray radiation. Porous beryllium is of particular interest as it is an upcoming trend as a neutron multiplier in blankets of thermonuclear facilities. A unique combination of X-ray optical properties also makes it possible to use porous beryllium in imaging devices in a synchrotron radiation beam (speckle suppressor).

Т.А.НЕЧАЙКИНА, С.А.НИКУЛИН, А.Б.РОЖНОВ,  
С.О.РОГАЧЕВ, А.П.БАРАНОВА  
НИТУ МИСиС, г. Москва, Россия  
nechaykinata@gmail.com

## **СТРУКТУРА И ПРОЧНОСТЬ ПЕРЕХОДНОЙ ЗОНЫ ТРЕХСЛОЙНОГО МАТЕРИАЛА «СТАЛЬ / ВАНАДИЕВЫЙ СПЛАВ / СТАЛЬ»**

Создание нового конструкционного материала для оболочек ТВЭЛ быстрых реакторов является актуальной задачей. В настоящее время существует трехслойный материал на основе ванадиевого сплава с покрытием из коррозионностойкой стали, удовлетворяющий требованиям работы в сверхжестких условиях. В работе изучали «переходную» зону трехслойной трубной заготовки «сталь 20Х13/сплав V-4Ti-4Cr/сталь 20Х13» после совместного прессования при 1100 °С и последующего отжига при 800 и 900 °С, 2 ч. Между сплавом ванадия и сталью формируется «переходная» зона диффузионного взаимодействия шириной не менее 10-15 мкм. Отжиг приводит к увеличению ширины этой зоны до 25-35 мкм. Трехслойный материал после горячего прессования и отжига при деформации ведет себя как монолитный с формированием вязкого излома. *Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (№ RFMEFI57517X0124).*

T.A.NECHAYKINA, S.A.NIKULIN, A.B.ROZHN OV,  
S.O.ROGACHEV, A.P.BARANOVA  
*The National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia*

## **THE STRUCTURE AND STRENGTH OF TRANSITION AREA OF A "STEEL / VANADIUM ALLOY / STEEL" THREE-LAYER MATERIAL**

The creation of a new structural material for fast neutron reactor cladding tubes is a topical task. A three-layered material based on vanadium alloy coated with a corrosion-resistant steel have been developed recently, which meets the requirements for work in super-hard conditions. The purpose of the present work is to study the "transition" area of a "Fe-0.2C-13Cr steel / V-4Ti-4Cr alloy / Fe-0.2C-13Cr steel " three-layer tube billet after co-extrusion at 1100 °C and subsequent annealing at 800 and 900 °C for 2 hours. It is shown that "transition" layer of diffusion interaction (at least 10-15  $\mu\text{m}$ ) is formed between vanadium alloy and steel. Annealing can increase its width up to 25-35  $\mu\text{m}$ . The three-layered material after co-extrusion and annealing deforms as a monolithic material forming a ductile fracture.

А.С. ЯШИН<sup>1</sup>, Д.А. САФОНОВ<sup>1</sup>, Б.А. КАЛИН<sup>1</sup>, Н.В. ВОЛКОВ<sup>1</sup>,  
Д.А. АЛЕКСАНДРОВ<sup>1</sup>, Е.Л. КОРЕНЕВСКИЙ<sup>1</sup>, В.Г. КРИЦКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ», г. Санкт-Петербург, Россия*  
yashin\_itf@mail.ru

## **ПОВЕДЕНИЕ ИОННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110 В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ВОДЯНОМ ПАРЕ**

В работе представлены результаты изучения приповерхностного слоя материала оболочек твэлов из сплава Э110 на основе губчатого циркония после коррозионных испытаний в водяном паре. Окисление проводилось в изотермическом режиме при температурах 800-1200 °С и атмосферном давлении. Поверхность образцов была предварительно модифицирована методами ионно-пучковых технологий путём полировки, легирования Fe, Cr, Ni, Al и нанесения защитных покрытий. Показано, что проведенная обработка может повышать коррозионную стойкость сплава Э110 за счет формирования плотной оксидной пленки и торможения проникновения кислорода в металл.

A.S. YASHIN<sup>1</sup>, D.A. SAFONOV<sup>1</sup>, B.A. KALIN<sup>1</sup>, N.V. VOLKOV<sup>1</sup>,  
D.A. ALEXANDROV<sup>1</sup>, E.L. KORENEVSKIY<sup>1</sup>, V.G. KRITSKIY<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*JSC «VNIPIET», Saint-Petersburg, Russia*

yashin\_itf@mail.ru

## **BEHAVIOR OF ION-MODIFIED FUEL CLADDINGS FROM E110 ALLOY IN HIGH-TEMPERATURE WATER STEAM**

The results of studying of the near-surface layer of fuel claddings material from E110 alloy based on sponge zirconium after corrosion tests in water steam are presented in this paper. Oxidation was carried out under isothermal conditions at temperatures of 800-1200 °C and atmospheric pressure. The surface of the samples was preliminarily modified by methods of ion-beam technologies by polishing, alloying Fe, Cr, Ni, Al and protective coatings deposition. It is shown that the treatment performed can increase corrosion resistance of the E110 alloy due to the formation of dense oxide film and inhibition of the oxygen penetration into the metal.

М.В. КОТЕНЕВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИТУ «МИСЦ», г. Москва, Россия  
mariakt@yandex.ru

## **СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ ПРИ ОКИСЛЕНИИ В ВОДЕ С ДОБАВЛЕНИЕМ ЛИТИЯ**

Одной из важнейших характеристик циркониевых сплавов является их высокая коррозионная стойкость, что обеспечивает надежную работу элементов при длительной эксплуатации в реакторе. В процессе коррозии в зависимости от химического состава сплава, состояния поверхности и условий окисления формируются оксидные пленки с различной структурой, дефектностью и механическими свойствами, что существенно влияет на их защитные свойства и коррозионную стойкость сплавов.

Воду с добавлением лития используют в качестве теплоносителя в реакторах PWR. Крайне актуально исследовать поведение циркониевых сплавов в жестких условиях эксплуатации, связанных с повышением концентрации LiOH в воде для реакторов PWR.

В работе представлены результаты исследования структуры и механических свойств оксидных пленок образцов циркониевых сплавов Э110, Э125 и Э635, окисленных в воде с добавлением лития.

M. V. KOTENEVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NUST MISiS, Moscow, Russia

## **STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF OXIDE FILMS OF ZIRCONIUM ALLOYS FORMED DURING OXIDATION IN WATER WITH ADDITION OF LITHIUM**

One of the most important characteristics of zirconium alloys is their high corrosion stability which provides safe performance of the elements during long-term exploitation in a reactor. Depending on chemical composition, surface state and oxidation conditions of the alloy, its corrosion results in the formation of the oxide films of various structure and defectiveness, which should affect significantly protective properties and eventually corrosion stability of the alloy.

Water with the addition of lithium is used as a coolant in PWR reactors. It is extremely important to investigate the behavior of zirconium alloys under severe operating conditions associated with an increase in the concentration of LiOH in water for PWR reactors. The paper presents the results of studying of the structure and mechanical properties of oxide films of zirconium alloys E110, E125 and E635 oxidized in water with the addition of lithium.



Д.А. КОРОБЕЙНИКОВ<sup>1</sup>, А.А. СЕМЕНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «ВНИИНМ», Москва, Россия

DAKorobeynikov@bochvar.ru

Korobeynikov.83@mail.ru

## **РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ БЕРИЛЛИЙСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Бериллиевые материалы широко применяются в науке и технике. Они востребованы как ядерной, так и термоядерной энергетикой. В процессе получения бериллия образуются различные виды бериллийсодержащих отходов требующих утилизации.

АО «ВНИИНМ» и многие другие предприятия, работающие с бериллием и его соединениями, имеют серьёзные проблемы с утилизацией высокотоксичных отходов загрязнённых бериллием. Из-за отсутствия технологии переработки бериллийсодержащих отходов все перерабатывающие компании и полигоны отказываются принимать данный вид отходов на захоронение. В связи с этим в АО «ВНИИНМ» была разработана технология иммобилизации высокотоксичных бериллийсодержащих отходов в цементном компаунде.

D.A. KOROBAYNIKOV<sup>1</sup>, A.A. SEMENOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SC «VNIINM», Moscow, Russia

DAKorobeynikov@bochvar.ru, Korobeynikov.83@mail.ru

## **BERYLLIC WASTE UTILIZATION SOLUTIONS IN NUCLEAR ENERGETICS**

Beryllium materials are widely used in science and technology. They are of importance both for nuclear and thermonuclear energy applications. Beryllium generating process results in the formation of various beryllic wastes that require utilization.

VNIINM JSC and many others companies working with beryllium and its compounds have a serious problems when utilizing high-toxic wastes with beryllic contamination. As there is no technology for recycling beryllic wastes, all recycling companies and polygons refuse to accept the toxic wastes for waste burial. Due to that VNIINM JSC a technology of immobilization of high-toxic beryllic wastes in cement compound has been designed.

Э.В. ЛИ, А.В. ЛИ  
*НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия*  
Li\_elina2787@mail.ru

## **КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОХРУПЧЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОКИСЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Высокотемпературное окисление в паре, имитирующее аварийную ситуацию, приводит к охрупчиванию материала. Для оценки охрупченного состояния предложена комплексная методика, включающая в себя металлографический и фратографический анализ, определение содержания поглощенных кислорода и водорода, а также измерение статической трещиностойкости. Данная методика позволяет объективно охарактеризовать и выявить основные факторы, влияющие на состояние охрупченного материала после различных режимов окисления.

E.V. Li, A.V. Li  
*NUST MISiS, Moscow, Russia*  
Li\_elina2787@mail.ru

## **COMPLEX EMBRITTLEMENT EVALUATION METHOD FOR OXIDIZED ZIRCONIUM ALLOYS**

High-temperature oxidation in a steam, simulating an emergency situation, leads to material embrittlement. To evaluate the embrittled state, a complex methodology is proposed, including metallographic and fractographic analysis, determination of the absorbed oxygen and hydrogen content, and also static fracture toughness measurement. This technique allows objectively characterize and reveal the main factors affecting the embrittled state of the material after various oxidation regimes.

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

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва,  
Россия*

*vpfilippov@terphi.ru*

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

*val\_kir48@mail.ru*

## **МЕССБАУЭРОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕГРЕГАЦИИ И РОСТА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ФАЗ В СПЛАВАХ ЦИРКОНИЯ**

Методом мессбауэровской спектроскопии 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>, YU.A. LAUER

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics  
Institute), Moscow, Russia,*

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

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

Using Mössbauer spectroscopy 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.

И.А. БОГАЧЕВ, И.И. ЧЕРНОВ, М.С. СТАЛЬЦОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия  
i\_chernov@mail.ru*

## **ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ УПРОЧНЯЮЩИХ НАНОЧАСТИЦ НА КИНЕТИКУ УПЛОТНЕНИЯ ДУО СТАЛИ ПРИ СПАРК-ПЛАЗМЕННОМ СПЕКАНИИ ПОРОШКОВ**

При изучении влияния концентрации дисперсных упрочняющих частиц  $Y_2O_3$  (от 0,1 до 1 мас. %) на кинетику спекания ДУО стали экспериментально было установлено, что максимальная скорость уплотнения образцов наблюдается при концентрации наночастиц  $Y_2O_3 \sim 0,3$  мас. %. В связи с этим, в работе представлена модель влияния концентрации дисперсной упрочняющей фазы на кинетику уплотнения ДУО стали ЭП-450 в процессе спарк-плазменного спекания. Суть модели заключается в том, что, начиная с определенной массовой доли частиц в порошковой засыпке тепловой эффект их присутствия, выражающийся в снижении напряжения течения материала, начинает превалировать над эффектом упрочнения матрицы этими частицами и позволяет достичь максимальной скорости уплотнения при 0,33 мас. %  $Y_2O_3$ . Дальнейшее увеличение доли частиц приводит к большему влиянию упрочняющего эффекта и, соответственно, снижению скорости деформации материала и его уплотнения. Полученная в соответствии разработанной моделью зависимость хорошо совпадает с экспериментально полученной зависимостью скорости уплотнения образцов от концентрации упрочняющих оксидных частиц.

I.A. BOGACHEV, I.I. CHERNOV, M.S. STALTSOV  
*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia*  
i\_chernov@mail.ru

## **INFLUENCE OF STRENGTHENING NANOPARTICLES CONCENTRATION ON SEAL KINETICS OF ODS STEEL DURING SPARK-PLASMA SINTERING OF POWDERS**

When studying the effect of dispersed  $Y_2O_3$  strengthening particles concentration (0.1 to 1 wt.%) on sintering kinetics of ODS steel, it has been experimentally determined that the maximum seal rate of samples is observed for concentration  $\sim 0,3$  wt.%  $Y_2O_3$  in powder. In this connection, the paper presents a model of the dispersed strengthening phase concentration influence on the kinetics of ODS EP-450 steel compaction in the process of spark-plasma sintering. The essence of the model is that, starting from a certain mass fraction of particles in the powder backfilling, the thermal effect of their presence, expressed in reducing of the material yield stress, begins to prevail over the effect of hardening of the matrix by these particles and allows achieving a maximum compaction rate at 0.33 wt. %  $Y_2O_3$ . A further increase in the fraction of particles leads to a greater influence of the strengthening effect and, correspondingly, to a decrease of material deformation rate and its compaction. The dependence obtained in accordance with the developed model is in a good agreement with the experimentally obtained dependence of the compaction rate of the samples on the concentration of hardening oxide particles.

А.Е. КАРПЕЕВА<sup>1</sup>, И.С. ТИМОШИН<sup>1</sup>, Е.Н. МИХЕЕВ<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>ПАО «Машиностроительный завод», г. Электросталь, Россия  
<sup>2</sup>АО «ВНИИНМ», г. Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ВЛИЯНИЯ НА ЗНАЧЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ УРАН-ГАДОЛИНИЕВОГО ТОПЛИВА

Используя результаты тестирования таблеток на термическую стабильность ("доспекаемость"), можно прогнозировать внутриреакторное уплотнение и усадку таблеток при работе реактора. Тестирование на «доспекаемость» проводят по усовершенствованной методике с выдержкой спеченных уран-гадолиниевых таблеток (с содержанием оксида гадолиния 8.00%мас.) при температуре 1725°C, в течение 24 часов. В настоящее время получаемые результаты по «доспекаемости» находятся в диапазоне требований 0,0-0,4%. Однако ввиду возможных увеличений требований по «доспекаемости» необходимо исследовать способы влияния на значения термической стабильности топлива с высоким содержанием выгорающего поглотителя ( $Gd_2O_3$ ).

Перспективным направлением повышения эксплуатационных характеристик водо-водяных энергетических реакторов является ужесточение требований по термической стабильности ядерного топлива. В настоящее время требования для ядерного топлива типа ВВЭР по «доспекаемости» находятся в диапазоне 0,0-0,4%. Выполнение установленных требований является наиболее сложной задачей для ядерного уран-гадолиниевого топлива с высоким содержанием оксида гадолиния (более 8.00 % масс.).

«Доспекаемость» топлива представляет собой термическую стабильность геометрических размеров (диаметра) и плотности топливных таблеток. В свою очередь, как размеры, так и плотность топливной таблетки зависят от многих технологических параметров. В данной работе были исследованы следующие параметры, влияющие на значения термической стабильности геометрических размеров спеченных уран-гадолиниевых таблеток: температура спекания, количество порообразователя и способ его введения в исходный порошок.

Учитывая современные и перспективные требования к термической стабильности геометрических размеров спеченных уран-гадолиниевых таблеток предлагаемые способы, позволяют не только влиять на значения «доспекаемости», но и сохранить другие важные технологические параметры топливных таблеток.

A.KARPEEVA<sup>1</sup>, I.TIMOSHIN<sup>1</sup>, E.MIKHEEV<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>*PJSC MASHINOSTROITEL'NY ZAVOD, Elektrostal, Russia*  
<sup>2</sup>*SC VNIINM, Moscow, Russia*

## **INVESTIGATIONS ON WHAT INFLUENCES THERMAL STABILITY OF U-Gd FUEL GEOMETRY VALUES**

Using the results of pellet testing for thermal stability ("resintering") it is possible to predict in-pile densification and pellet shrinkage during reactor operation. Test for "resintering" is carried out using an improved technique with soaking of sintered U-Gd pellets (containing 8.00% wt of gadolinium oxide) at 1725 ° C for 24 hours. At present the results obtained for "resintering" are in the range of requirements of 0.0-0.4%. However, because of possible "resintering" increase requirements, it is necessary to investigate how to influence thermal stability values of fuel with a high content of a burnable absorber ( $Gd_2O_3$ ).

A promising direction for operational characteristics rising of pressurized-water reactors is requirement strengthening on nuclear fuel thermal stability. At present the requirements for VVER type nuclear fuel on "resintering" are in the range of 0.0-0.4%. The fulfillment of specified requirements is the most difficult task for nuclear U-Gd fuel with a high content of gadolinium oxide (>8.00% wt).

Fuel "resintering" is the thermal stability of geometric dimensions (diameter) and density of fuel pellets. Again, fuel pellet dimensions and density depend on many process parameters. In this investigation the following parameters influencing the thermal stability values of sintered U-Gd pellets geometric dimensions (containing 8.00 % wt Gd oxide) were explored: sintering temperature, amount of pore former and method of its introduction into original powder.

Taking into account modern and prospective requirements for thermal stability of sintered U-Gd pellets geometric dimensions, the offered methods allow not only to influence "resintering" values but also to keep other important process parameters of fuel pellets.

А.А. БЕЛЯЕВ<sup>1</sup>, М.С. СТАЛЬЦОВ<sup>1</sup>, И.И. ЧЕРНОВ<sup>1</sup>, Б.А. КАЛИН<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>НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия  
m.staltsov@gmail.com

## **ФОРМИРОВАНИЕ ГЕЛИЕВОЙ ПОРИСТОСТИ В ВАНАДИЕВЫХ СПЛАВАХ СИСТЕМЫ V–Ti–Cr, V–W–Zr И V–W–Ta В СРАВНЕНИИ С ДВОЙНЫМИ СПЛАВАМИ**

В работе представлены результаты ПЭМ исследований развития гелиевой пористости и газового распухания в тройных сплавах ванадия V–Ti–Cr, V–W–Zr и V–W–Ta в сравнении с двойными сплавами, содержащими те же легирующие добавки, после облученных ионами гелия с энергией 40 кэВ до дозы  $5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-2}$  при 650 °С.

Показано, что любое использованное легирование снижает гелиевое распухание по сравнению с чистым ванадием. Гелиевое распухание сплава V–4%Ti–4%Cr является самым низким среди всех изученных двойных и тройных сплавов, причем независимо от вида термомеханической обработки и того, промышленные или лабораторные сплавы исследовались.

В тройных сплавах V–1%W–1%Ta обнаружено также низкое распухание, однако при повышении содержания вольфрама до 2% наблюдается тенденция к увеличению размера пузырьков и распухания. Этот факт согласуется с тем, что в двойных сплавах V–W при увеличении содержания вольфрама распухание также растет.

Обнаружено также, что распухание тройных сплавов V–W–Zr меньше распухания двойных сплавов V–W и V–Zr. Увеличение содержания Zr в тройных сплавах также приводит к увеличению гелиевого распухания.



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

<sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics  
Institute), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia  
m.staltsov@gmail.com*

## **HELIUM POROSITY FORMATION IN VANADIUM ALLOYS V–Ti–Cr, V–W–Zr AND V–W–Ta SYSTEMS IN COMPARISON WITH BINARY ALLOYS**

The paper presents the results of TEM investigations of helium porosity evolution and gaseous swelling of V–Ti–Cr, V–W–Zr and V–W–Ta vanadium ternary alloys in comparison with binary alloys containing the same alloying elements irradiated by 40-keV helium ions up to dose of  $5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-2}$  at 650 °C.

It was shown that any used alloying reduces the helium swelling as compared with pure vanadium. The helium swelling of the V–4%Ti–4%Cr alloy is the lowest among all the studied binary and ternary alloys regardless of the type of thermo-mechanical treatment and whether industrial or laboratory alloys have been investigated.

A low swelling was observed in the ternary alloy V–1%W–1%Ta also but there is a tendency to increase the size of the bubbles and swelling with an increase in tungsten content up to 2%. This fact agrees with the fact that in binary V–W alloys swelling increases also with increasing of tungsten content.

It was also found that the swelling of ternary V–W–Zr alloys is less than the swelling of the V–W and V–Zr alloys. An increase a Zr content in ternary alloys leads also to helium swelling growth.

М.Е. МАТВЕНОВ, И.С. ТИМОШИН, С.Н. ТИМОШИН,  
А.В. ТЕНИШЕВ<sup>1</sup>, Д.П. ШОРНИКОВ<sup>1</sup>.

*ПАО МСЗ, <sup>1</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия*

## **ОЦЕНКА МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА УРАНА**

В настоящее время для оценки характеристик порошков на основе диоксида урана используют физико-химические, химические и технологические методы контроля. Результаты такого контроля позволяют оценить потенциальные возможности использования порошкового материала для дальнейшего использования при прессовании и спекании. Однако используемые методы и методики не позволяют оценить форму, размеры на уровне кристаллов, агрегатов и агломератов, способность к сцеплению частиц – т.е. морфологию порошков диоксида урана. Отечественный и зарубежный опыт изучения морфологических характеристик позволяет качественно, на уровне визуального анализа, выявить общие различия между порошками, в основном дублирующие корреляцию технологических свойств.

В ходе исследования разработан метод количественной оценки морфологии порошков. Проведен сравнительный анализ морфологических и технологических характеристик порошка диоксида урана, полученных различными методами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 11.2594.2017/ПЧ.

В.В. МИХАЛЬЧИК, С.Н. НИКИТИН, Б.А. ТАРАСОВ,  
А.В. ТЕНИШЕВ, Д.П. ШОРНИКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия  
vladimir\_mephi@mail.ru*

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ МОНОНИТРИДА УРАНА ПРИ ТЕРМОГРАВИМЕТРИИ**

Наиболее важными факторами при проведении высокотемпературных испытаний мононитрида урана является выбор режимов испарения и учет влияния площади образцов. Показано, что при увеличении площади образца, скорость потери массы также возрастает. Значительное возрастание скорости потери массы наблюдается также при изменении режима испытания – исследование образца на плоской поверхности вместо высокого тигля. Данные наблюдения находятся в согласии с теоретическими представлениями о кинетике испарения нитрида урана.

Таким образом, для сравнения результатов по термостабильности необходимо делать поправку на площадь поверхности образцов, а также учитывать режимы испарения.

V.V. MIKHALCHIK, S.N. NIKITIN, B.A. TARASOV,  
A.V. TENISHEV, D.P. SHORNIKOV  
*National research nuclear university “MEPhI”, Moscow, Russia*

## **METHODOLOGICAL FEATURES OF URANIUM MONONITRIDE EVAPORATION BY THERMOGRAVIMETRY**

Choice of evaporation regimes and allowance the sample area are the most important factors during conducting high-temperature tests of uranium mononitride. It is shown that as the sample area increases, the rate of mass loss also increases. Significant increase in the rate of mass loss is also observed with test regime change: study of a sample on a flat surface instead of a high crucible. These observations are in agreement with the theoretical concepts of uranium nitride evaporation kinetics.

Thus, it is necessary to make amendment for the surface area of the samples, as well as take into account evaporation regimes of the experiments to compare different results of thermal stability.

В.В. МИХАЛЬЧИК, С.Н. НИКИТИН, Б.А. ТАРАСОВ,  
А.В. ТЕНИШЕВ, Д.П. ШОРНИКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
г. Москва, Россия  
vladimir\_mephi@mail.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МОНОНИТРИДА УРАНА**

На основе проведенных ранее экспериментов по определению термохимической стабильности мононитрида урана в среде гелия при высоких температурах, проведено полуэмпирическое моделирование разложения нитрида, используя законы химической кинетики гетерогенных реакций. Рассчитанные кинетические кривые изменения концентрации продуктов разложения мононитрида урана соответствуют по своей форме разложению с самоускорением, которое следует за индукционным периодом. Полученное уравнение хорошо описывает экспериментальные данные по потере массы нитрида урана в исследованном диапазоне параметров. Разработанную модель можно использовать для оценки фазового состава мононитрида урана в процессе высокотемпературных испытаний в атмосфере, не содержащей азота.

V.V. MIKHALCHIK, S.N. NIKITIN, B.A. TARASOV,  
A.V. TENISHEV, D.P. SHORNIKOV  
*National research nuclear university "MEPhI", Moscow, Russia*

## **MODELING OF PHASE SEPARATION IN URANIUM MONONITRIDE**

Semiempirical modeling of uranium mononitride decomposition was carried out using the laws of the chemical kinetics of heterogeneous reactions. All calculations based on earlier experiments of UN thermal stability tests in helium at high temperatures. Calculated kinetic curves of concentration change of decomposition products correspond to the self-accelerating decomposition, which follows the induction period. The obtained equation well describes the experimental data of uranium nitride mass loss in the investigated range of parameters. The model can be used to estimate the phase composition of uranium mononitride during high-temperature tests in an atmosphere that does not contain nitrogen.

Д.П. ШОРНИКОВ, А.В. ТЕНИШЕВ, С.Н. НИКИТИН  
М.Е. МАТВЕНОВ, А.С. ЕФИМЕНКО

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

## **ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ТАБЛЕТОК ДИОКСИДА УРАНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПРЕССОВАНИЯ И СПЕКАНИЯ**

**Аннотация:** В работе проведено изготовление таблеток диоксида урана из порошков различного типа, при различных давлениях прессования и различных скоростях спекания. Проведены dilatометрические измерения, а затем исследование микроструктуры конечных таблеток, сделаны предварительные выводы об оптимальных значениях давления прессования и режимах спекания.

Диоксид урана является основным видом ядерного топлива коммерческих реакторов, технология его изготовления заключается в прессовании диоксида в компакт с последующим его спеканием. С переходом на новые типы порошков становится актуальной задача выработки оптимальных режимов производства.

Для исследования использовали порошки  $UO_2$  со средним размером частиц-агломератов около 10 мкм, сами агломераты состоят из кристаллитов с размером 100 - 300 нм.

Проведено прессование порошков диоксида урана при давлениях 2,2, 3,6 и 5,0 т/см<sup>2</sup> без добавок пластификатора. После прессования измеряли геометрическую и пикнометрическую плотность компактов, которая составила: 5,48 и 9,23 г/см<sup>3</sup>, соответственно. Также исследована микроструктура поверхности компактов.

Спекание полученных компактов проведено в dilatометре в восстановительной атмосфере смеси  $Ar-H_2$  при скоростях нагрева 2, 4, 6, 8, 15 и 20 °С/мин до температуры 1600 °С с выдержкой 1 ч. Полученные кривые усадки, показали, что для таблеток, спеченных со скоростью 2 С/мин усадка максимальна, однако это связано с большей продолжительностью спекания. Проведена оценка геометрической плотности, которая варьируется в пределах 9,7-10,1 г/см<sup>3</sup>, пикнометрическая плотность лежит в пределах 10,3-10,4 г/см<sup>3</sup>. Показано, что наибольшая плотность таблеток достигается при давлении прессования 3,6 т/см<sup>2</sup> и скоростях нагрева 4-6 К/мин.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 11.2594.2017/ПЧ.

D.P. SHORNIKOV, A.V. TENISHEV, S.N. NIKITIN  
M.E. MATVENOV, A.S. EFIMENKO  
*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia*

## **THE STUDY OF THE PROPERTIES OF URANIUM DIOXIDE PELLETS DEPENDING ON PRESSING AND SINTERING PARAMETERS**

**Abstract:** In the work, the manufacture of tablets of uranium dioxide from powders of various types, at various pressing pressures and various sintering rates was carried out. Dilatometric measurements were carried out, followed by a study of the microstructure of the final pellets, preliminary conclusions were drawn about the optimum values of the pressing pressure and the sintering regimes.

Uranium dioxide is the main type of nuclear fuel of commercial reactors, the technology of its manufacture consists in pressing the dioxide into a compact with its subsequent sintering. With the transition to new types of powders, the task of developing optimal production regimes becomes urgent.

UO<sub>2</sub> powders with a mean agglomerate particle size of about 10 μm were used for the study, the agglomerates themselves consist of crystallites with a size of 100-300 nm.

Pressing of uranium dioxide powders at pressures of 2,2, 3,6 and 5,0 t/cm<sup>2</sup> without additives of plasticizer has been carried out. After pressing, the geometric and pycnometric density of the compacts was measured, which was: 5.48 and 9.23 t/cm<sup>2</sup>, respectively. The microstructure of the surface of compacts is also studied.

Sintering of the obtained compacts was carried out in a dilatometer in a reducing atmosphere of the Ar-H<sub>2</sub> mixture at heating rates of 2, 4, 6, 8, 15 and 20 °C/min to a temperature of 1600 °C with an exposure time of 1 h. The obtained shrinkage curves showed that for pellets sintered at a rate of 2 °C/min, the shrinkage is maximum, but this is due to the longer sintering time. The geometrical density is estimated, which varies within 9.7-10.1 g/cm<sup>3</sup>, the pycnometric density lies in the range 10.3-10.4 t/cm<sup>2</sup>. It is shown that the greatest density of pellets is reached at a pressing pressure of 3.6 t/cm<sup>2</sup> and heating rates of 4-6 K/min.

The work was carried out within the framework of the State task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Project № 11.2594.2017 / PCh.

Е.А. КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, О.О. ЗАБУСОВ<sup>1,2</sup>, А.С. БРАГИН<sup>1,2</sup>,  
А.С. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, Д.А. МАЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, Д.В. САФОНОВ<sup>1</sup>,  
Е.В. КРИКУН<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,*

<sup>2</sup> *Национальный Исследовательский Ядерный Университет  
«МИФИ», г. Москва, РФ*

## **ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫДЕРЖКИ НА ПЕРЕОРИЕНТАЦИЮ ГИДРИДНЫХ ФАЗ В МАТЕРИАЛАХ ГАЗОНАПОЛНЕННЫХ ОБРАЗЦОВ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ В РЕАКТОРАХ ТИПА ВВЭР-1000**

В тепловыделяющих элементах на основе сплава Э110 в процессе эксплуатации ядерных энергетических установок наблюдается образование гидридных фаз, что приводит к деградации механических характеристик циркониевых оболочек ТВЭлов.

Источником водорода является газ, освобождающийся при взаимодействии с теплоносителем. Дополнительными факторами, оказывающими влияние на процесс поглощения водорода, являются высокая температура и напряжения в оболочке.

После эксплуатации в реакторе в изделиях из циркония, помещенных на длительное хранение, содержится водород, поглощенный во время эксплуатации (0,003-0,05% мас.), присутствуют дефекты (трещины), возникшие при эксплуатации, а также действуют напряжения, обусловленные различными причинами. Таким образом, присутствуют все факторы, необходимые для образования гидридных фаз и реализации замедленного гидридного растрескивания, т.к. данные выделения снижают способность материала к пластической деформации и уменьшают его трещиностойкость (коэффициент интенсивности напряжений). Наибольшее охрупчивание вызывают пластинчатые выделения, ориентированные перпендикулярно направлению действия растягивающих напряжений. В случае труб под давлением опасны, прежде всего, гидриды, ориентированные радиально.

В данной работе проведены микроструктурные исследования с использованием просвечивающей и растровой электронной микроскопии образцов ТВЭлов реактора ВВЭР-1000 в исходном состоянии, после наводораживания до 100 ppm и 200 ppm, а также после различных изотермических выдержек при аксиальных нагрузках до 60 МПа.

Показана зависимость коэффициента переориентации гидридов от приложенных аксиальных напряжений и длительности изотермических выдержек.

E.A. KULESHOVA<sup>1,2</sup>, O.O. ZABUSOV<sup>1,2</sup>, A.S. BRAGIN<sup>1,2</sup>,  
A.S. FROLOV<sup>1</sup>, D.A. MALTSEV<sup>1</sup>, D.V. SAFONOV<sup>1</sup>, E.V. KRIKUN<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> *National research center «Kurchatov institute», Moscow, Russia*  
<sup>2</sup> *National Research Nuclear University «MEPHI», Moscow, Russia*

## **INFLUENCE OF A LONG ISOTHERMAL AGING ON REORIENTATION OF HYDRIDE PHASES IN MATERIALS OF GAS-FILLED FUEL CLADDING SAMPLES IN VVER-1000 REACTORS**

In fuel elements manufactured from E110 Zr-based alloy, hydride phase formation is observed under nuclear power plant operation, which leads to the mechanical characteristics degradation of the zirconium fuel rod claddings.

The source of hydrogen is the gas liberated by interaction with the coolant. Factors affecting the process of hydrogen absorption are the temperature and stresses in the cladding.

After reactor operation, products from zirconium contain hydrogen absorbed during operation (0.003-0.05 wt %), defects (cracks) arising during operation, and also stresses caused by various causes. Thus, all the factors responsible for the hydride phase formation and realization of delayed hydride cracking are present, since this phases reduce the material ability to plastic deformation and reduce its fracture toughness. The highest embrittlement is caused by lamellar phases, oriented perpendicular to the direction of tensile stress action. In the case of pipes under pressure radially oriented hydrides are dangerous.

In this work, microstructural studies of VVER-1000 reactor fuel rod samples in several states: initial state, after hydrogenation up to 100 and 200 ppm, and also after different isothermal exposures under axial loads up to 60 MPa were carried out.

The dependence of the hydride reorientation coefficient on the isothermal exposure duration and applied axial stresses is shown.



К.К. ПОЛУНИН, А.А. УРУСОВ, А.А. МОКРУШИН,  
Д.С. КИСЕЛЕВ, Д.М. СОЛДАТКИН  
ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ», г. Подольск, Россия  
E-mail: poll25@mail.ru

## **ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОГО ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ШТАТНЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110 В УСЛОВИЯХ ЛОСА**

Целью работы является исследование влияния технологических режимов нанесения хромового покрытия на коррозионную стойкость оболочек твэлов из сплава Э110 при испытаниях в водяном паре в температурном диапазоне от 900 °С до 1200 °С. Рассмотрены методы предварительной подготовки внешней поверхности циркониевых образцов, дана оценка их влияния на адгезию покрытия с оболочкой твэла. Показан положительный эффект газодинамической обработки поверхности. Выполнены эксперименты по нанесению защитного покрытия на внешнюю поверхность оболочек твэлов электрохимическим методом. На основании коррозионных испытаний по двухстороннему окислению показано значительное снижение значений привеса и ЛГО образцов с покрытием по сравнению с образцами сплава Э110.

K.K. POLUNIN, A.A. URUSOV, A.A. MOKRUSHIN,  
D.S. KISELEV, D.M. SOLDATKIN  
FSUE «SRI SIA «LUCH», Podolsk, Russia  
E-mail: poll25@mail.ru

## **INFLUENCE OF THE PROTECTIVE CHROMIUM COATING ON CORROSION RESISTANCE OF STANDARD FUEL CLADDINGS FROM E110 ALLOY IN LOCA CONDITIONS**

The objective of the research is to investigate the influence of technological modes of deposition of chromium coating on the corrosion resistance of fuel cladding from E110 alloy when testing in water vapor in the temperature range from 900 °C to 1200 °C. The methods of preliminary preparation of the external surface of zirconium samples are considered, and the influence of these methods on the adhesion of the coating to the fuel cladding is evaluated. The positive effect of gas-dynamic treatment of the surface has been shown. Experiments have been performed to apply a protective coating on the external surface of fuel cladding by the electrochemical method. Based on the corrosion tests for two-sided oxidation, a significant reduction in the weight of the gain and ECR samples with the coating has been shown compared to samples of the alloy E110.

О.И. ЗАБОЛОТНИКОВА  
НИТУ «МИСиС»  
zabolotnikovaoksana93@gmail.com

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТНОСТИ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК ОБРАЗЦОВ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ХАРАКТЕР ИХ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ**

Циркониевые сплавы широко применяются в качестве материалов конструктивных элементов активных зон ядерных энергетических реакторов, главным образом для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов и других элементов тепловыделяющих сборок. Одной из важнейших характеристик изделий из циркония является их высокая стойкость к коррозии, обеспечивающая надежную работу элементов в течение длительной эксплуатации в реакторе.

В работе исследовано влияние дефектности оксидных пленок образцов циркониевых сплавов Э110 и Э635, окисленных в различных средах, на характер их разрушения при нагружении. Дефектность образцов была изучена при помощи сканирующей электронной микроскопии. Также исследуемые образцы были подвергнуты механическому сжатию с регистрацией акустической эмиссии.

В исследуемых образцах разрушение происходит по разным механизмам. Характер разрушения определяется различными факторами, одним из которых является дефектность оксидных пленок образцов окисленных в разных условиях.

O.I. ZABOLOTNIKOVA  
*NUST "MISiS"*

## **EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE DEFECTIVENESS OF OXIDE FILMS OF ZIRCONIUM ALLOY SAMPLES ON THE CHARACTER OF THEIR DESTRUCTION UNDER LOADING**

Zirconium alloys are widely used as materials of structural elements of active zones of nuclear power reactors, mainly for manufacturing shells of heat-generating elements and other elements of heat-generating assemblies. One of the most important characteristics of zirconium products is their high resistance to corrosion, which ensures reliable operation of the elements during long-term operation in the reactor.

The effect of the defectiveness of oxide films of samples of zirconium alloys E110 and E635 oxidized in different environments on the nature of their destruction under loading is investigated. The defectiveness of the samples was studied by scanning electron microscopy. Also, the samples under investigation were subjected to mechanical compression with registration of acoustic emission.

In the samples under study, the destruction takes place by different mechanisms. The fracture pattern is determined by various factors, one of which is the defectiveness of oxide films of oxidized samples under different conditions.

Д.В. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>, С.М. ТИХОНОВ<sup>1</sup>, А.А. КОМИССАРОВ<sup>1</sup>,  
Е.П. СИДОРОВА<sup>1</sup>, Ю.В. КОМИССАРОВА<sup>1</sup>, Г.В. СЕРОВ<sup>1</sup>,  
А.В. МИТРОФАНОВ<sup>2</sup>, И.Г. РОДИОНОВА<sup>3</sup>  
*1 – НИТУ «МИСиС»; 2 – ПАО «Северсталь»;*  
*3 – ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина»*

## **РАЗРАБОТКА НОВОЙ МАРКИ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ В РАМКАХ ПРОЕКТА СЕВЕРКОР**

В условиях повышенного спроса на рынке металлопродукции на холодостойкую и коррозионностойкую трубную продукцию, в том числе промышленные трубы, НИТУ «МИСиС» совместно с ПАО «Северсталь» запустили проект по созданию новой марки трубной стали «Северкор» с повышенными эксплуатационными свойствами. Особое внимание в рамках проекта уделяется повышению сопротивления общей и локальной коррозии.

Для повышения коррозионной стойкости металлопроката отработывались несколько вариантов микролегирования, а также разрабатывались методы оптимизации технологии выплавки и разливки.

D.V. KUZNETSOV<sup>1</sup>, S.M. TIKHONOV<sup>1</sup>, A.A. KOMISSAROV<sup>1</sup>,  
E.P. SIDOROVA<sup>1</sup>, YU.V. KOMISSAROVA<sup>1</sup>, G.V. SEROV<sup>1</sup>,  
A.V. MITROFANOV<sup>2</sup>, I.G. RODIONOVA<sup>3</sup>  
*1 – NUST «MISIS»; 2 – PAO «Severstal»;*  
*3 – (FSUE) I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy*

## **DEVELOPMENT OF NEW CORROSION-RESISTANT PIPELINE STEEL WITHIN THE PROJECT SEVERCOR**

In conditions of increased demand on cold-resistant and corrosion-resistant pipeline production in the metal products market, including pipeline steels, NUST «MISIS» together with PAO «Severstal» launched the project on creation of a new pipeline steel «Severcor» with increased operational properties. Particular attention in the project is given to increase the resistance of general and local corrosion.

To improve the corrosion resistance of rolled metal was testing several variants of microalloying and was developing methods of technology optimization for smelting and casting.



# АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ

Секция II – 24 октября

# ABSTRACTS OF REPORTS

Section II – October, 24

М.П.БРАЖНИКОВ, М.С.СУРИНА, В.Е.ЕРЕМЯШЕВ,  
Р.Ф.ЗАЙНУЛЛИНА, Д.А.ЖЕРЕБЦОВ  
*Южно-Уральский государственный университет  
Институт минералогии УрО РАН  
mikleboy@list.ru, vee-zlat@mail.ru*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК ЦЕРИЯ И МОЛИБДЕНА НА ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТИЕВОГО БОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА**

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии выполнено исследование влияния добавок молибдена и церия на термические свойства высокощелочных боросиликатных стёкол системы  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ . С этой целью был выполнен синтез серии стекол разного состава и исследовано их термическое поведение при нагреве-охлаждении. Зафиксированы эндо- и экзотермические эффекты, соответствующие процессам стеклования и кристаллизации, а также влияние на эти процессы добавок Мо и Се. Методом рентгеновской дифракции и электронной микроскопии исследован состав сформированной кристаллической фазы. Полученные результаты имеют значение при совершенствовании свойств матричных материалов, используемых при иммобилизации радиоактивных отходов. Представленные результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (проект № 11.9643.2017/8.9) и темы НИР ГР № АААА-А16-116012510127-9.

M.P.BRAZHNIKOV, M.S.SURINA, V.E.EREMYASHEV,  
R.F.ZAINULINA, D.A.ZHEREBTSOV  
*South Ural State University  
Institute of mineralogy UB RAS*

## **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CERIUM AND MOLYBDEN INFLUENCE ON THERMAL STABILITY OF LITHIUM BOROSILICATE GLASS**

The influence of molybdenum and cerium additives on the thermal properties of high-alkali borosilicate glasses of the  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  system was studied by DSC method. To this end, a series of different compositions glasses was used to synthesize and its behavior during heating-cooling was investigated. Endo- and exothermic effects corresponding to the processes of vitrification and crystallization, as well as the influence of Mo and Ce additives on these processes have been recorded. X-ray diffraction and electron microscopy were used to study the composition of formed crystalline phase. The results obtained are important in improving the properties of matrix materials used in the immobilization of radioactive waste. This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science (Projects NIR GP № АААА-А16-116012510127-9 and № 11.9643.2017/8.9).

М.П.БРАЖНИКОВ, М.Е.ОСИПОВА, В.Е.ЕРЕМЯШЕВ,  
Д.А.ЖЕРЕБЦОВ, Е.А.ТРОФИМОВ  
*Южно-Уральский государственный университет,  
Институт минералогии УрО РАН*  
mikleboy@list.ru, marina\_osipova\_9522@mail.ru, vee-zlat@mail.ru

## **ВЛИЯНИЕ МОЛИБДЕНА И ВОЛЬФРАМА НА СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ БОРОСИЛИКАТНЫХ СТЁКОЛ**

Применение стеклообразных боросиликатных материалов при иммобилизации радиоактивных отходов определяет важность исследования их структуры и свойств в зависимости от химического состава и процесса получения. Молибден и вольфрам являются распространенными компонентами радиоактивных отходов и способны оказывать значительное влияние на структуру и свойства формирующихся при сплавлении материалов. В рамках данного исследования методами электронной микроскопии, рентгеновской дифракции и инфракрасной спектроскопии были изучены особенности строения кальциевых боросиликатных матричных материалов, содержащих добавки молибдена и вольфрама. Полученные результаты исследования расширяют термическую основу в прогнозировании термических свойств и области применения данного вида материалов. Представленные результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (проект № 11.9643.2017/8.9) и темы НИР ГР № АААА-А16-116012510127-9.

M.P.BRAZHNIKOV, M.E.OSIPOVA, V.E.EREMYASHEV,  
D.A.ZHEREBTSOV, E.A.TROFIMOV  
*South Ural State University  
Institute of mineralogy UB RAS*

## **EFFECT OF MOLYBDENUM AND TUNGSTEN ON THE STRUCTURE FEATURES OF BOROSILICATE GLASSES**

The use of borosilicate glassy materials for the immobilization of radioactive waste determines the importance of studying the structure and properties depending on their chemical composition and obtaining process. Molybdenum and tungsten are common components of radioactive waste and, when they are fused with other components of borosilicate systems, they have a significant effect on the structure and properties of matrix materials which forming in this process. We studied the structural features of Mo and W-containing calcium borosilicate matrix materials using electron microscopy, X-ray diffraction and infrared spectroscopy. The obtained results extend the theoretical basis for determination and prediction of the thermal properties of this type of matrix materials. This work was supported by the Russian Ministry of Education and Science (Projects NIR GP № АААА-А16-116012510127-9 and № 11.9643.2017/8.9).

С. С.МАРТЫНЕНКО, В.И.ПЕТРОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
vipetrov@mephi.ru*

## **ОПЫТ КОРРЕКТИРОВКИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ ЖЕЛЕЗА И АЛЮМИНИЯ В БЕРИЛЛИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЧИСТОТЫ**

На примере бериллия технической чистоты показана возможность внесения изменений в распределение примесей между различными фазами в эксплуатационный период. Проведена подпитка и продлено активное действие одной из вторичных фаз, благоприятно влияющей на свойства материала. Методом мёссбауэровской спектроскопии получены данные о перераспределении примесей железа и алюминия. Спектры были получены после гомогенизации, на промежуточных стадиях и после завершения изотермических отжигов при 600 °С с общей продолжительностью более 1100 ч. Промежуточная вторичная фаза  $\text{AlFeBe}_4$  быстро выделяется и затем преобладает в течение более длительного периода, чем при обычном содержании алюминия. Обсуждаются способы корректировки распределения примесей. Полученные результаты могут быть полезными в материаловедении для анализа поведения примесей при термообработке и эксплуатации сплавов.

S. S.MARTYNENKO, V.I.PETROV

*National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia  
vipetrov@mephi.ru*

## **EXPERIENCE IN CORRECTING THE DISTRIBUTION OF IRON AND ALUMINUM IMPURITIES IN THE TECHNICAL GRADE BERYLLIUM**

The example of beryllium of technical purity shows the possibility of introducing changes in the distribution of impurities between different phases during the operational period. The feeding and prolongation of the active action of one of the secondary phases, which favorably affects the properties of the material, is carried out. The data on the redistribution of iron and aluminum impurities were obtained by Mössbauer spectroscopy. Spectra were received after homogenization, at the intermediate stages and after completion of isothermal annealing at 600 °C with the total endurance of more than 1100 h. The intermediate secondary phase  $\text{AlFeBe}_4$  is quickly formed and then prevails during more long-lived time term than with the ordinary content of aluminum. Methods for correcting the distribution of impurities are discussed. The results could be useful in materials science in the analysis of the impurity behavior at heat treatment and operation of alloys.



В.А.ГЛУЩЕНКОВ, В.К.АЛЕХИНА, Р.М.БИКБАЕВ,

*Самарский университет, г. Самара, Россия*

vgl@ssau.ru, rashid20181@mail.ru

## **МАТЕРИАЛЫ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ. СКОРОСТЬ НАГРЕВА – СКОРОСТЬ СРАБАТЫВАНИЯ**

Материал с памятью формы – нитинол – используется в технике в качестве силовых приводов в различного рода устройствах деформирования, испытания, в исполнительных механизмах. Важной характеристикой таких силовых приводов является скорость развития напряжений. В качестве силовых элементов в них, как правило, используются стержневые конструкции. Однако их использование имеет ограничения, связанные с необходимостью обеспечения быстрого и равномерного по сечению их нагрева, с трудностями методического характера по созданию «памяти формы».

В данном докладе предлагаются многозвенные конструкции силовых приводов, состоящие из нескольких «тонких» силовых элементов. Рассмотрены деформационно-силовые характеристики и зависимость скорости нарастания нагрузки от скорости нагрева. Определены основные преимущества таких силовых приводов.

V.A.GLUSCHENKOV, V.K.ALEKHINA, R.M.BIKBAEV,

*Samara University, Samara, Russia*

vgl@ssau.ru, rashid20181@mail.ru

## **MATERIALS WITH MEMORY OF SHAPE. HEATING SPEED – RESPONSE SPEED**

The material with memory of shape – nitinol – is used in technique as an actuator in various devices of deforming, testing as well as in servo mechanisms. An important characteristic of such actuators is the rate of development of stresses. As a rule, the rod constructions are used in these actuators as power elements. But their use has limitations associated with the need to ensure rapid and uniform over the cross section heating them as well as with difficulties of methodological nature to create “shape memory”.

The paper proposes multilink constructions of actuators consisting of several “thin” power elements. Deformation-strength characteristics and the dependence of the rate of increase of the load from the rate of heating are considered. Main advantages of such actuators are defined.

**В.Ю.ГОЛЬЦЕВ, Л.А.ДЕГАДНИКОВА, А.В.ОСИНЦЕВ**  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
г. Москва, Россия*

## **ПРОВЕДЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЦИФРОВОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Выполнение механических испытаний материалов регламентируется стандартами, в которых прописаны требования к образцам, испытательному оборудованию, условиям проведения испытаний и способам обработки результатов. Важно контролировать качество поверхности образца, его геометрические размеры и отклонения от заданной формы. Следующим этапом проведения испытаний является контроль фиксации исследуемого образца в испытательном оборудовании, а также необходимость визуализации его напряженно-деформированного состояния.

Использование метода цифровой корреляции изображений при проведении механических испытаний позволяет успешно осуществлять контроль на всех этапах проведения механических испытаний, начиная от образцов, испытательного оборудования, до визуализации напряженно-деформированного состояния и соответствия его принятой расчетной схеме.

**V.Y. GOLTSEV, L.A. DEGADNIKOVA, A.V. OSINTSEV**  
*NRNU "MEPhI", Moscow, Russia*

## **THE MECHANICAL TESTING OF MATERIALS USING THE METHOD OF DIGITAL IMAGE CORRELATION**

The mechanical testing of materials is regulated by standards, which established requirements for samples, test equipment, testing conditions and methods of processing the results. It is important to control the surface quality of the sample, its geometrical dimensions and deviations from a predetermined shape. The next stage of testing is to control the fixing of the test specimen in the test equipment and the need to render its stress-strain state.

Using the method of digital image correlation when conducting mechanical testing allows you to successfully control all phases of mechanical testing, from samples, testing equipment, to visualize the stress-strain state and its compliance with the adopted design scheme.

Р.К.ВИШЕРАТИН, В.А.СТЕПАНОВ  
*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ*  
*г.Обнинск, Россия*  
visher@mail.ru

## **ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ СТЕКЛА HBANI**

Методами дифференциальной сканирующей калориметрии и рентгеновского фазового анализа исследован процесс кристаллизации фторидного стекла состава HBANI после комбинированной деформации  $\varepsilon=4$  и отжигов до температур кристаллизации. Определены температуры стеклования и начала кристаллизации, а также последовательность появляющихся кристаллических фаз. Показано, что скорость кристаллизации фторидного стекла уменьшается после комбинированной деформации по сравнению со скоростью кристаллизации исходного стекла.

R.K.VISHERATIN, V.A.STEPANOV  
*Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering NRNU MEPhI*  
*Obninsk, Russia*  
visher@mail.ru

## **THE EFFECT OF COMBINED COMPRESSIVE AND TORSIONAL STRAIN ON THE CRYSTALLIZATION OF HBANI GLASS**

The crystallization process of fluoride glass HBANI after combined deformation of  $\varepsilon=4$  and annealing to crystallization temperatures was studied by differential scanning calorimetry and X-ray diffraction. The glass transition temperature and the crystallization temperature, the sequence of the crystalline phases emerging was determined. It is shown that the crystallization rate of fluoride glass decreases after combined deformation.

А.В.БРАЦУК<sup>1</sup>, М.Л.ТАУБИН<sup>1,2</sup>, А.А.УРУСОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ», г. Подольск, Россия

<sup>2</sup> НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

multislr@mail.ru

## **СИНТЕЗ И ОЧИСТКА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ**

В работе представлены результаты синтеза углеродных нанотрубок (УНТ) на подложках из различных материалов. Синтез УНТ проведен двумя методами: методом химического разложения газа – пропилена ( $C_3H_6$ ) и методом химического разложения паров этилового спирта ( $C_2H_5OH$ ). Важным моментом здесь является использование паров этилового спирта, поскольку  $C_2H_5OH$  обладает рядом преимуществ относительно  $C_3H_6$  по цене, хранению, токсичности. Также уделено внимание очистке нанотрубок. В работе применялись два метода – ультразвуковая и химическая очистка. Выявлено, что режим химической очистки наиболее эффективен при использовании его после синтеза УНТ.

A.V.BRATSUK<sup>1</sup>, M.L.TAUBIN<sup>1,2</sup>, A.A.URUSOV<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>NRNU «MEPhI», Moscow, Russia

multislr@mail.ru

## **SYNTHESIS AND PURIFICATION OF CARBON NANOTUBES BY THE METHOD OF CHEMICAL DECOMPOSITION OF HYDROCARBONS**

The paper presents the results of the synthesis of carbon nanotubes (CNTs) on substrates from various materials. Synthesis of CNTs was carried out by two methods: chemical decomposition of propylene gas ( $C_3H_6$ ) and chemical decomposition of ethanol vapor ( $C_2H_5OH$ ). An important point here is the use of ethanol vapors, because  $C_2H_5OH$  has a number of advantages relative to  $C_3H_6$  cost, storage, and toxicity. Attention is also paid to purification of nanotubes. In the work, two methods were used: ultrasound and chemical purification. It was found that chemical purification is effective when it is used after CNTs synthesis.

**В.Ю.ГОЛЬЦЕВ, А.В.ОСИНЦЕВ**

*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ  
г. Москва, Россия  
gvy587@gmail.com*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХРУПКОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛА ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА**

Развитие ядерной энергетики предполагает использование перспективного нитридного топлива в реакторах 4-го поколения, что потребует совершенствования технологии его получения и методов испытания. Предложено использовать испытание малоразмерных дисковых образцов-аналогов ядерного топлива по схеме «бразильского теста» (сжатие дискового образца в диаметральной плоскости) для совершенствования технологии их испытания и определения сопротивления материала разрыву. Приведены результаты испытания малоразмерных дисковых образцов, изготовленных из хрупких материалов чугуна и графита, как возможных модельных материалов ядерного топлива, и непосредственно образцов ядерного топлива  $UO_2$ . Исследовано влияние размера образцов на сопротивление их разрушению. Показано, что чугун по характеру деформирования и разрушения не может быть использован в качестве модельного материала ядерного топлива, тогда как результаты испытания образцов из графита АРВ-1 хорошо согласуются с результатами испытания образцов топлива  $UO_2$ . Предложена расчетная формула для определения сопротивления материала разрыву по результатам испытания образцов по схеме «бразильского теста».

**V.Y.GOLTSEV, A.V.OSINTSEV**  
*NRNU MEPhI, Moscow, Russia*

## **ESTIMATING THE BRITTLE STRENGTH OF NUCLEAR FUELMATERIAL**

The development of nuclear energy involves use of promising nitride nuclear fuel in reactors of the 4th generation. This will require improving the fuel production technology as well as its test methods. For estimation the strength of the nuclear fuel material as well and for further refinement of nuclear fuel test technology we propose to use small discoid samples, similar in shape to the elements of nuclear fuel in the context of "Brazilian test" (compression applied to disk specimen in the median plane). We present here the results of testing small discoid specimens made of brittle materials such as cast iron and graphite (being possible model materials for nuclear fuel). We compared these materials to nuclear fuel itself (as represented by uranium dioxide). In addition the effect of the specimen size on resistance to destruction was investigated. The type of deformation and fracture found in samples made from cast iron suggest that this material cannot be used as a model of the nuclear fuel. At the same time the results obtained in tests on samples composed of graphite ARV-1 were in good agreement with the results of tests on uranium dioxide. Using the data obtained in this study, a calculation formula for determining the strength of the nuclear fuel material based on the "Brazilian test" results is proposed.

В.Ю.ГОЛЬЦЕВ, Н.А.ГРИБОВ

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

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ ДИСКОВЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЫВУ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Развитие известных и разработка новых методов механических испытаний является актуальной задачей для атомной энергетики. Предложено использовать изгиб малоразмерных тонких дисковых образцов, опертых по контуру, для определения сопротивления материала разрыву. Приведены результаты компьютерного анализа такой схемы нагружения и испытания тонких дисковых образцов, изготовленных из хрупких материалов чугуна и графита и непосредственно образцов, изготовленных методами электроимпульсного воздействия. Исследовано влияние размера образцов на сопротивление их разрушению. Отмечены различные характеры деформирования и разрушения образцов чугуна и графита. Подтверждена возможность применения тонких дисковых образцов для определения сопротивления разрыву композиционных керамик на основе SiAlON с различными добавками  $Y_2O_3$ , SiC, TiN и карбида бора  $B_4C$ .

V.Y. GOLTSEV, N.A. GRIBOV

*NRNU MEPhI, Moscow, Russia*

## **THE USE OF THIN DISC SAMPLES FOR THE DETERMINATION OF THE TEAR RESISTANCE OF BRITTLE MATERIALS**

Technical requirements of complex systems the nuclear industry is obliged to develop new types of materials and methods mechanical tests to determine their mechanical properties. The development of known and development of new methods of mechanical testing is an important task for nuclear power. It is proposed to use the test of bending small thin disk specimens simply supported along the contour, to determine the resistance of material to tensile strain. The results of computer analysis of stress-strain state and test a thin disk specimens made of brittle materials are cast iron and graphite as a possible model, and directly samples made by electro-impuls methods are presented. It is shown the effect of size of specimens on the resistance to their destruction and different character of deformation and destruction of samples of cast iron and graphite. The possibility of application of thin disc samples for the determination the resistance to tensile strain of the composite ceramics based on SiAlON with various additives  $Y_2O_3$ , SiC, TiN, and boron carbide  $B_4C$  is confirmed.

А.А.АБУ ГАЗАЛ, П.С.ДЖУМАЕВ, А.В.ОСИНЦЕВ,  
В.И.ПОЛЬСКИЙ, В.И.СУРИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ*  
*г. Москва, Россия*  
*gazal.ayman@yandex.ru*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ В ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ МАТЕРИАЛОВ**

Исследованы процессы образования и роста усталостной зародышевой трещины в сталях ЭИ847 и Х18Н10Т при испытаниях на одноосное растяжение при постоянной нагрузке на разрывных машинах instron-5982 и LM-20 « на реакторе ИБР-2» с применением метода сканирующей контактной потенциометрии. Зародыш был обнаружен на поверхности образца в области предела текучести и устойчиво отслеживался по показаниям аппаратуры при более высоких нагрузках вплоть до момента разрушения.

A. A. ABU GHAZAL, P.S.JUMAYEV, A.V.OSINTSEV,  
V.I.POLSKI, V.I.SURIN  
*National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia*  
*gazal.ayman@yandex.ru*

## **USING SCANNING CONTACT POTENTIOMETRY METHOD IN PHYSIO-MECHANICAL MATERIALS TESTING**

Studying processes of forming and growing embryonic fatigue cracks in steel ЭИ847 and Х18Н10Т when tested in uniaxial tension at constant load by testing machine INSTRON-5982 and LM-20 « in IBR-2 reactor » using method of scanning contact potentiometry. The embryo was detected on the sample surface in the yield point and stably tracked by equipment indications at higher loads up to the fracture point.

А.Л.УДОВСКИЙ, М.В.КУПАВЦЕВ

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН*

## **УЧЕТ МАГНЕТИЗМА ДЛЯ РАСЧЕТА СТРУКТУРНЫХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ $\sigma$ - ФАЗЫ В СИСТЕМЕ Fe-V В РАМКАХ ТРЕХПОДРЕШЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ**

В приближении трех-подрешеточной модели рассчитаны энергетические и магнитные параметры (температура Кюри и средний магнитный момент). Рассчитана заселенность атомами компонентов трех модельных подрешеток (путем решения системы уравнений основного состояния, полученной минимизацией функционала энергии Гиббса по конфигурационным степеням свободы) и термодинамических свойств в зависимости от состава для основного состояния  $\sigma$ - фазы системы Fe-V. Проведен сравнительный анализ рассчитанных данных по структурным свойствам  $\sigma$ -фаз в системах Fe-(Cr,V) в зависимости от состава. Получена согласованность входных данных и результатов расчета по термодинамическим свойствам, зависимость энтальпии смешения  $\sigma$  – фазы системы Fe-V от состава относительно ВСС- фаз компонентов. *Входные данные использовали для поиска начальных значений параметров модели.* Согласованность свидетельствует о корректности найденных энергетических параметров модели. Исследования поддержаны грантом РФФИ-03-13-00462.

A.L.UDOVSKY · M.V. KUPAVTSEV

*IMET RAS, Moscow, Russia*

## **MAGNETICS INFLUENCE FOR CALCULATING THE STRUCTURAL AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF $\sigma$ -PHASE IN THE Fe-V SYSTEM FOR THREE-SUBLATTICE MODEL**

The three-sub-lattice approximation model calculations of the energies and magnetic parameters (Curie temperature and mean magnetic moment) are calculated. The distributions of atomic species in different model sublattices and the thermodynamic properties depending on the  $\sigma$  Fe-V alloy compositions at T=0K were evaluated by solving the set of equations at T=0K obtained by minimizing the functional  $\Delta G$  with respect to the independent configuration degrees of freedom. The comparison of the calculated data on the structural properties of  $\sigma$ -phases in Fe- (Cr, V) systems depending on composition and temperature was conducted. The consistency of the input data and the calculation results for the thermodynamic properties is obtained, namely, the dependence of the enthalpy of mixing of the  $\sigma$  -phase of the Fe-V system on the composition relatively of the BCC phases of pure Fe and V. The input data was used to find the initial values of the model parameters. The consistency of these data proves the correctness of the found energy parameters of the model. Research supported by a grant of RFFR-03-13-00462.



Б.А.КАЛИН, О.Н.СЕВРЮКОВ, А.А.ИВАННИКОВ, М.А.ПЕНЯЗЬ,  
А.В.ВОЕННОВ, Е.Р.АБРАМОВ  
*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*

## **ТЕРМОСТОЙКОСТЬ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПАЙКИ РЕАКТОРНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ БЫСТРОЗАКАЛЁННЫМИ НИКЕЛЕВЫМИ ПРИПОЯМИ**

Диффузионная пайка коррозионностойких сталей позволяет получать соединения, выдерживающие большие механические нагрузки, высокие температуры и агрессивное влияние активных сред без существенного изменения их свойств. В настоящее время перспективными сплавами для диффузионной пайки сталей являются быстрозакалённые никелевые припои.

Паяные узлы, как правило, являются частью энергонапряжённых изделий, зачастую работающих в условиях изменения температуры. Поэтому необходимо исследовать изменение механических свойств материала после многократных операций нагрева и охлаждения. С этой целью проведено термоциклирование паяных образцов, что является ускоренным способом изучения усталостной стойкости соединений. Рассмотрены классические сплавы-припои системы Ni-Cr-Si-B с различным элементным соотношением и разработанные сплавы системы Ni-Cr-Si-Be.

Определено влияние термоциклической обработки соединений на структурно-фазовое состояние шва. С помощью метода EBSD установлено, что в диффузионной зоне паяного соединения, полученного с помощью припоя, содержащего бор, образуется в два раза больше мартенсита вследствие формирования во время изотермической выдержки боридной сетки, приводящей к накоплению микронапряжений и пластической деформации, стимулирующих фазовое  $\gamma \rightarrow \alpha'$  превращение в стали.

Установлено на базе 50 циклов, что все рассмотренные в работе соединения обладают стойкостью к термоусталости в интервале температур от комнатной до 450 °С, что свидетельствует о реальной возможности эксплуатации данных неразъёмных соединений в условиях значительных колебаний рабочей температуры.

B.A.KALIN, O.N.SEVRYUKOV, A.A.IVANNIKOV,  
M.A.PENYAZ, A.V.VOENNOV, E.R.ABRAMOV  
*NRNU MEPhI, Moscow, Russia*

## **HEAT RESISTANCE OF JOINTS OBTAINED BY TLP – BONDING OF REACTOR STAINLESS STEELS WITH FILLER METALS BASED ON Ni**

Transient liquid phase bonding (TLP-bonding) of stainless steels allows to receive joints that can withstand high mechanical loads, high temperature and aggressive influence of active environment without a significant change in their properties. Nowadays, perspective alloys for TLP – bonding are filler metals based on Ni.

Usually, brazed joints are part of energy – stressed products, that often work under conditions of temperature change. Therefore, it's necessary to investigate changes in mechanical properties after multiple heating and cooling operations. For this propose, brazed samples were thermocycled. It is a fast way to investigate fatigue resistance of joints. The classical filler metals based on Ni-Cr-Si-B and developed filler metals based on Ni-Cr-Si-Be were considered.

Influence of thermocycling on structural – phase state of joints was defined. Using electron backscatter diffraction (EBSD) method, it's established that twice as much martensite is formed in diffusion zone of brazed joint, obtained by boron filler metal, due to the formation of boron net. This net, appeared during the isothermal holding, leads to accumulation of microstresses and plastic deformation, which stimulates the phase  $\gamma \rightarrow \alpha'$  transformation in steel.

After 50 cycles it's established that all joints, considered in the investigation, are resistant to the thermal fatigue in temperature range from room temperature to 450 °C. It means that there is real possibility of using these joints under operating temperature fluctuations.

С.В.БАРСАНОВА, М.В.ЕВСЕЕВ, В.Л.ПАНЧЕНКО,  
В.И.ПАСТУХОВ, Р.П.КАРАГЕРГИ  
*АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Россия*  
irm@irmatom.ru

## **МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ПЕРЕМЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА УДАРНУЮ ВЯЗКОСТЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ХРУПКОСТИ**

Для прогнозирования ресурса корпусных материалов и корпусов водородных технологических и энергетических атомных реакторов необходимо понимание процессов сопротивления хрупкому разрушению в условиях химической и структурной неоднородности. Определение критической температуры хрупкости сплавов переменного химического состава, моделирующих зоны сварного соединения, требует детальной проработки методики. В данной работе описаны методики подготовки образцов и испытания на ударную вязкость. Приведены результаты испытаний в диапазоне температур от минус 130 до плюс 275 °С и фактограммы образцов сплава переменного химического состава. Приведены результаты определения критической температуры хрупкости для материала с химической и структурной неоднородностью.

S.V.BARSANOVA, M.V.EVSEEV, V.L.PANCHENKO,  
V.I.PASTUKHOV, R.P.KARAGERGY  
*Joint Stock Company "Institute of Nuclear Materials", Moscow, Russia*

## **IMPACT TESTING TECHNIQUE FOR SAMPLES WITH AN ALTERNATING CHEMICAL COMPOSITION TO DETERMINE THE CRITICAL BRITTLENESS TEMPERATURE**

To predict service life of vessel materials and vessels of water-cooled technological and energy nuclear reactors it is necessary to have a deep insight into processes of brittle fracture resistance under chemical and structural inhomogeneity. Determination of the critical brittleness temperature of alloys with an alternating chemical composition, modeling welding joint areas, requires a thoroughly developed technique. The paper describes techniques for the sample preparation and impact testing. The results of the testing in the temperature range between -130 and +275 °C, as well as fracture patterns of alloy samples with an alternating chemical composition are given. Also the results of determination of the critical brittleness temperature for the material with chemical and structural inhomogeneity are given.

И.С.САЕНКО<sup>1,2</sup>, Б.О.МУХАМЕДОВ<sup>3</sup>, А.Л.УДОВСКИЙ<sup>2,4</sup>,  
О.Б.ФАБРИЧНАЯ<sup>1</sup>, И.А.АБРИКОСОВ<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup>*Технический университет Фрайбергская горная академия,  
г. Фрайберг, Германия*

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

<sup>3</sup>*Национальный Исследовательский Технический Университет «МИСиС»,  
г. Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,  
г. Москва, Россия*

*Линчёпингский университет, г. Линчёпинг, Швеция  
ivan.saenko@iww.tu-freiberg.de*

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В СИСТЕМЫ Zr-Fe**

Композитные материалы на базе высоколегированных сталей и упрочняющих керамических включений на основе  $ZrO_2$  исключительно интересны широкой областью их технологического применения, особенно в ядерной индустрии и автомобильной промышленности. Внедрение дисперсных частиц оксида циркония в матрицу сплава значительно улучшает механические свойства данного сплава и препятствует увеличению размеров зерен матрицы при работе сплава в интервале высоких температур, равных 0,5-0,6 от температуры плавления. Разработка данных композитных материалов требует знания термодинамических свойств и фазовых равновесий. Поэтому, целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое изучение термодинамических свойств интерметаллидов  $Zr_3Fe$  и  $ZrFe_2$ . Для расчета термодинамических свойств применялась теория функционала плотности совместно с теорией квазигармонического приближения. В результате расчета получены значения энтальпий образования данных интерметаллидов, их стандартные энтропии и зависимости теплоемкости от температуры начиная с 0 К при постоянном объеме ( $C_v$ ) и давлении ( $C_p$ ). Теплоемкости  $Zr_3Fe$  и  $ZrFe_2$  измерены методом дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК) в интервале температур от 100 К до 1023 К и 1423 К соответственно. Комбинируя результаты теории и эксперимента были описаны основные термодинамические свойства интерметаллидов  $Zr_3Fe$  и  $ZrFe_2$  от 0 К до температур близких к границе стабильности данных соединений.

I.S.SAENKO<sup>1,2</sup>, B.O.MUKHAMEDOV<sup>3</sup>, A.L.UDOVSKY<sup>2,4</sup>,  
O.B.FABRICHNAYA<sup>1</sup>, I.A.ABRIKOSOV<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup>*Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany*

<sup>2</sup>*IMET RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

<sup>5</sup>*Linköpings University, Linköping, Sweden*

ivan.saenko@iww.tu-freiberg.de

## **THEORETICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMODYNAMIC PROPERTIES IN THE ZR-FE BINARY SYSTEM**

Composite materials based on high alloyed steels reinforced by zirconia ceramics are of particular interest due to the wide range of their possible technological applications especially in the nuclear industry and automotive production as structural and functional materials. Fine disperse particles of partially stabilized zirconia introduced into steel–matrix of the alloy significantly improve mechanical properties and prevent the matrix grain growth at high temperatures in range of 0.5-0.6 of its melting temperature. Development of such composite materials requires the knowledge of thermodynamic properties and phase relations. Therefore, the aim of the present work is the experimental and theoretical study of the thermodynamic properties of the  $Zr_3Fe$  and  $ZrFe_2$  compounds. In the frame of the theoretical approach, density functional theory (DFT) calculations have been performed in combination with the quasi-harmonic approximation. Enthalpies of formation, standard entropies as well as heat capacities at constant volume ( $C_v$ ) and at constant pressure ( $C_p$ ) were calculated for the  $Zr_3Fe$  and  $ZrFe_2$  compounds from 0 K up to high temperatures. On the other hand, the heat capacities of both compounds was been measured using differential scanning calorimetry (DSC) method. Heat capacity of the  $Zr_3Fe$  compound was measured for the first time in the temperature range between 100 K and 1023 K. Experimental data on the heat capacity of the  $ZrFe_2$  were obtained in the wide temperature range from 100 K to 1473 K and compared with available literature data. Based on the combination of theoretical and experimental data, main thermodynamic properties of the  $Zr_3Fe$  and  $ZrFe_2$  compounds were described from 0 K up to temperatures close to the limits of their stability.

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

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

<sup>2</sup>ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, Россия

## **СВЯЗЬ СТОЙКОСТИ К КОРРОЗИОННОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ СТАЛЬНЫХ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ С ПОСЛОЙНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ИХ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ**

Проблема коррозионного растрескивания под напряжением (КРН) стальных труб особенно актуальна в странах, обладающих протяженной системой магистральных газопроводов (МГ). На настоящий момент установлено, что зарождение и развитие трещин зависит от совокупного влияния трех факторов: склонности материала труб к КРН, наличия локальных растягивающих напряжений и действия коррозионной среды. Однако механизмы, отвечающие за рост/торможение трещин так же, как и связь между скоростью развития трещин и параметрами текстуры труб, недостаточно изучены.

При этом известно, что горячая прокатка стальных листов, используемых для производства труб МГ, приводит к формированию значительной текстурной неоднородности по толщине стенки трубы, характер которой зависит от технологических параметров обработки листов на конкретном заводе. Более высокая степень текстурной неоднородности может увеличивать стойкость труб против КРН за счет того, что раскрытие трещин замедляется при достижении слоя с измененной текстурой вследствие высокой степени разориентации зерен и необходимости изменения плоскости движущейся трещины, что требует дополнительных растягивающих напряжений.

В настоящей работе влияние текстурной неоднородности труб на их стойкость против КРН продемонстрировано на примере нескольких МГ, находившихся в различных условиях эксплуатации и построенных из труб различных производителей. Проведены рентгеновские исследования кристаллографической текстуры и структурных характеристик для внешних и внутренних слоев участков труб с обнаруженными дефектами КРН и без них. Показана корреляция между глубиной коррозионных трещин и толщиной поверхностного слоя с резко отличающимися параметрами текстуры. Анализ данных также показывает, что наличие в поверхностных слоях текстурной компоненты  $\{110\}<001>$  повышает стойкость труб против КРН.

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

<sup>1</sup>National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia;

<sup>2</sup>LLC «Gazprom VNIIGAZ», Razvilka village, Moscow region, Russia

## **CORRELATION BETWEEN THE RESISTANCE TO STRESS CORROSION CRACKING OF STEEL TUBES OF GAS PIPELINES WITH THEIR LAYERWISE TEXTURE INHOMOGENEITY**

The problem of stress corrosion cracking (SCC) of steel tubes is especially urgent in countries, which have extended system of high-pressure main gas pipelines (MGP). At present moment, the combined effect of three factors is established for the cracks initiation and propagation processes: the material's susceptibility to the SCC, the presence of local tensile stresses and the exposure of corrosive environment. However, mechanisms responsible for the cracks propagation/inhibition are still insufficiently studied as well as the correlation between rate of crack propagation and tubes texture parameters.

At the same time, the hot rolling of steel sheets, used for the MGP tubes manufacturing, results in a significant textural inhomogeneity across the tube wall thickness. The character of such inhomogeneity depends on technological parameters of sheets processing at certain plant, i.e. the temperature and deformation gradients etc. The higher degree of textural inhomogeneity may increase the tubes SCC resistance. This effect can be explained by the fact that the crack opening can be inhibited when 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.

In this work, the influence of the textural inhomogeneity on the tubes SCC resistance is demonstrated on the example of several MGPs constructed of tubes of different manufactures and operated under various exploitation conditions. X-ray studies of crystallographic texture and structural characteristics were implemented for external and internal layers of various tubes sections, which were cut out from MGP zones with fixed SCC defects and without them. The correlation between corrosion cracks depth and surface layer having sharply different texture type is presented.

Analysis of texture data indicates that within external layers of tubes the  $\{110\}<001>$  component can appear in addition to typical components of steel rolling. The system data analysis shows that this component can increase the tubes resistance to SSC, while strong so-called  $\square$ -fiber component –  $\{001-111\}<110>$  – increases susceptibility of material to SCC. Thus, the higher degree of texture inhomogeneity across the tube wall thickness increases its resistance to SCC.

А.Л.УДОВСКИЙ, Д.А.ВАСИЛЬЕВ  
*ИМЕТ им. А.А.Байкова РАН, г. Москва, Россия*

**ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ  
СВОЙСТВ ОЦК ОДНО- И ДВУХФАЗНЫХ СПЛАВОВ  
СИСТЕМЫ Fe-Cr**

Применение результатов квантово-механических расчетов, физико-эмпирических моделей и термодинамического моделирования ОЦК – растворов позволило предсказать зависимости объемного модуля упругости (ОМУ), теплоемкости и коэффициента расширения (КТР) для одно – и двухфазных сплавов, от состава и температуры в системе Fe – Cr. Показано существенное влияние учета отклонения от правила Вегарда экспериментальных данных параметра решетки сплавов от состава на разрывы ОМУ и КТР сплавов. Исследования поддержаны грантом РФФИ-03-13-00462

A.L.UDOVSKY, D.A.VASILYEV  
*IMET RAS, Moscow, Russia*

**APPLICATION OF THERMODYNAMIC MODELING FOR THE  
PREDICTION OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF BCC Fe-  
Cr ALLOYS EXISTED IN THE ONE AND TWO-PHASE  
STATES**

The application of the results of quantum mechanical calculations, physico-empirical models and thermodynamic modeling of bcc solutions allowed predicting the dependence of the bulk modulus of elasticity (BME), heat capacity and expansion thermal coefficient (CTE) for single- and two-phase alloys, on composition and temperature in the Fe-Cr system. The significant influence of accounting for the deviation (from the Vegard's rule) the experimental data of the alloys lattice parameter on the discontinuities of the BME and CTE alloys is shown. The studies are supported by RFBR-03-13-00462 grant



В.Н.СКОРОБОГАТЫХ, Н.П.АНОСОВ, П.А.КОЗЛОВ,  
Е.В.ПОГОРЕЛОВ, А.С.ГУДЕНКО, Е.М.СИМИЧ-ЛАФИЦКАЯ  
*АО «НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва, Россия*  
EVPogorelov@cniitmash.com

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ СТРУКТУРНОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРАНИЦЫ СПЛАВЛЕНИЯ ПЕРЛИТНОЙ И АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛИТКОВ ПЕРЕМЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА**

При проектировании и эксплуатации энергетического оборудования, важным условием является понимание процессов фазовых и структурных превращений, протекающих в материалах, работающих под давлением в условиях длительного радиационного воздействия. Особый интерес представляют процессы, протекающие на границе сплавления соединений основного и наплавляемого металла, поскольку именно они могут во многом ограничивать ресурс корпусов ВВЭР.

В АО «НПО «ЦНИИТМАШ» выплавлен методом ЭШП слиток переменного химического состава, имитирующий зону химической и структурной неоднородности основного, перлитного, и наплавляемого, аустенитного, металлов. Исследовано распределение химических элементов в слитке, а также распределение твердости и макроструктуры. Методами термодинамического моделирования реализованные в программе Thermo-Calc изучен фазовый состав слитка переменного химического состава.

V.N.SKOROBOGATYKH, N.P.ANOSOV, P.A.KOZLOV,  
E.V.POGORELOV, A.S.GUDENKO, E.M.SIMICH-LAFITSKAYA  
*JSC RPA "CNIITMASH", Moscow, Russia*

**INVESTIGATION OF THE ZONE OF STRUCTURAL AND  
CHEMICAL HETEROGENEITY OF THE FUSION BOUNDARY  
BETWEEN PEARLITE AND AUSTENITIC STEELS USING  
INGOTS OF VARIABLE CHEMICAL COMPOSITION**

When designing and operating power equipment, an important condition is to ensure the processes of phase and structural transformations occurring in materials operating under pressure under conditions of prolonged radiation exposure. Of particular interest is the processes occurring at the border, as a rule, they can in many ways limit the resource of VVER pressure vessel.

In the JSC RPA "CNIITMASH" an ingot of variable chemical composition was smelted by the ESR method, which simulates a zone of chemical and structural heterogeneity of the base, pearlitic, and welded, austenitic metals. The distribution of chemical elements in the ingot, the hardness and the macrostructure of the ingot was studied. Thermodynamic modeling methods used in the program Thermo-Calc studied the phase composition of ingots of varying chemical composition.

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

dementyeva\_mm@nrcki.ru

## **РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ОКИСЛЕНИЕ АЛЮМИНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

В работе выполнены экспериментальные исследования протекания радиационно-индуцированного процесса селективного соединения атомов в ходе облучения тонкой пленки металлического алюминия ионами кислорода различных энергий (0.2-0.5 кэВ). Методами высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии и спектроскопии энергетических потерь электронов получены дозовые зависимости, характеризующие протекание процесса окисления алюминия под действием облучения по глубине пленки при различных энергиях ионов кислорода. Получены экспериментальные профили распределения элементов по глубине пленки при различных дозах облучения. Показано, что с возрастанием дозы облучения происходит увеличение степени окисления алюминия и образование предельного при больших дозах облучения оксида алюминия на полную глубину проективного пробега ионов. Установлено, что процесс селективного соединения атомов можно успешно использовать для формирования высококачественного аморфного оксида алюминия в требуемых местах на заданную глубину путем облучения ионами кислорода малых энергий через окна, сформированные в маске, устойчивой к кислородному облучению.

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

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

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

## **RADIATION-INDUCED OXIDATION OF ALUMINUM UNDER ION IRRADIATION**

In this work was demonstrated experimental study of radiation-induced process of selective association of atoms under low energy oxygen irradiation of thin metallic Al films. The energies of oxygen irradiation were varied in the range (0.2 – 0.5 keV). Dose dependences characterizing the process of aluminum oxidation under ion irradiation in depth of the film at different oxygen ion energies were obtained by high-resolution transmission electron microscopy and electron energy loss spectroscopy. Experimental profiles of the elements distribution in Al film depth at various irradiation doses were obtained. It was shown that with increasing irradiation dose increased degree of aluminum oxidation and formation of limiting alumina occurred at high irradiation doses at full depth of projected range of ions. It was established that the process of selective association of atoms could be successfully used to form high-quality amorphous aluminum oxide in the required places at a given depth under low energy oxygen irradiation through windows formed in a mask resistant to oxygen irradiation.

Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, М.Г.ИСАЕНКОВА, П.Л.ДОБРОХОТОВ,  
Д. И.ЖУК, А.Е.РУБАНОВ  
*Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ,  
г. Москва, Россия  
tol.y.rubanov@yandex.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ В ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ЛИСТАХ ИЗ ФЕРРИТНОЙ СТАЛИ**

Горячая прокатка ферритной стали 55ХН2МА-Ш (Fe-0,55%С-1%Cr-2%Ni-1%Mo) приводит к формированию неоднородной по толщине листа текстуры: приповерхностный слой характеризуется компонентами  $\{112\}\langle 111 \rangle$  и  $\{110\}\langle 112 \rangle$ , в то время как в центральной части листа преобладают компоненты  $\{100\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{112\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{111\}\langle 112 \rangle$ ,  $\{554\}\langle 225 \rangle$ . Для анализа процессов при горячей прокатке, приводящих к формированию указанных компонент текстуры, проведено моделирование на макро- и мезо-уровне с помощью метода конечных элементов. Макроскопическое моделирование выполнено путём прямого сопряжённого решения уравнений механики и теплопроводности с учётом температурных зависимостей механических и теплофизических свойств материала. При моделировании на мезоскопическом уровне использовалась феноменологическая дислокационная модель пластичности с системами скольжения  $\{110\}\langle 111 \rangle$  и  $\{112\}\langle 111 \rangle$  для феррита и  $\{111\}\langle 110 \rangle$  для аустенита, при этом в качестве граничных условий использовались рассчитанные на макроскопическом уровне поля деформаций. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментально наблюдаемой текстурой в центральных слоях, во внешнем слое результаты моделирования с экспериментальными не согласуются. Несовпадение результатов моделирования с экспериментом связано, по-видимому, с отсутствием в модели связи между текстурой и механическими свойствами материала, а также возможным действием других механизмов деформации помимо кристаллографического скольжения по указанным выше системам. В качестве других механизмов можно рассматривать скольжение по иным системам или зернограницное проскальзывание в условиях динамической рекристаллизации или фазовых превращений. В предложенной модели не рассматривается возможность упрочнения поверхности материала за счет примесей внедрения, диффундирующих с поверхности листа в процессе горячей прокатки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00180 мол\_а.

Yu. PERLOVICH, M. ISAENKOVA, P.DOBROKHOTOV,  
D.ZHUK, A.RUBANOV

*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

## **MODELING OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE FORMATION IN HOT-ROLLED SHEETS OF FERRITIC STEEL**

Hot rolling of ferritic steel Fe-0,55%C-2%Cr-1%Mo leads to formation of texture inhomogeneous through sheet thickness: the near-surface layer is characterized by components  $\{112\}\langle 111 \rangle$  and  $\{110\}\langle 112 \rangle$ , while central part of the sheet is characterized by components  $\{100\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{112\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{111\}\langle 112 \rangle$ ,  $\{554\}\langle 225 \rangle$ . Finite element method modeling was carried out at macro- and meso-scale for analysis processes which induce texture formation. Macro-scale simulation was accomplished by direct coupling of mechanics and thermal conductivity equations taking into account a temperature dependences of mechanical and thermal properties of material. Meso-scale modeling was carried out using the phenomenological dislocation-based plasticity model with  $\{110\}\langle 111 \rangle$  and  $\{112\}\langle 111 \rangle$  slip systems for ferrite and  $\{111\}\langle 110 \rangle$  slip system for austenite. For boundary conditions deformation field from macro-scale simulation was used. Result of modeling correspond satisfactorily to the experimental results in the central layer, but they are not consistent with experiment in the outer layer. Reasons of this discrepancy may be no connection between texture and mechanical properties of material or operation of some other mechanisms of deformation in addition to crystallographic slip. In the proposed model the possibility of surface hardening of the material due to interstitial impurities diffusing from the surface of the sheet during hot rolling is not considered.

The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 16-32-00180 мол\_a.

Д. А.РЯБОВ, А.А.ХЛЫБОВ  
*НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия*  
ryabovdm1996@gmail.com, hlybov\_52@mail.ru

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ИЗДЕЛИЯХ С НАПЛАВКОЙ**

Для защиты от коррозии технология строительства корпусов ВВЭР предусматривает наплавление на внутреннюю поверхность корпуса (сталь 15Х2МФА) аустенитных хромоникелевых сварочных материалов. При проведении наплавки, а также при последующей термической обработке (отжиг) в таких конструкциях в зоне сплавления возникают остаточные напряжения, которые могут привести к образованию трещин. Поэтому получение оперативной информации о величине остаточных напряжений является актуальной задачей.

Цель настоящей работы – исследование влияния остаточных напряжений в образцах из стали 15Х2МФА с аустенитной наплавкой на параметры упругих волн и разработка методики оценки остаточных напряжений акустическим методом.

Экспериментальные исследования проводились на образцах с наплавкой размером 10х10х55 мм. Толщина наплавки 5 мм. Было получено, что после отжига (950°C, 25 минут, печь) и закалки (950°C, 25 минут, вода) в исследованных образцах наблюдается деформация до 0,2 мм. В результате проделанной работы определили величину остаточных напряжений акустическим методом. Эти результаты были подтверждены рентгеновским методом. Был проведен компьютерный анализ с использованием пакета ANSYS. Выяснили, что после термической обработки напряжения в наплавке носят растягивающий характер, а в основном металле наблюдаются напряжения сжатия. Причинами появления остаточных напряжений послужили различные коэффициенты термического расширения основного металла и наплавки, а также структурные превращения в стали 15Х2МФА в процессе ТО. Данные подтверждены результатами металлографических исследований.

D.A.RYABOV, A.A.KHLYBOV  
*NNSTU, Nizhny Novgorod, Russia*  
ryabovdm1996@gmail.com, hlybov\_52@mail.ru

## **DETERMINATION OF RESIDUAL VOLTAGES IN THE PRODUCTS WITH FLOATING**

To protect against corrosion, the technology of building WWER shells provides for fusing an austenitic chromium-nickel welding materials onto the inner surface of the body (15H2MFA steel). During surfacing, as well as during subsequent heat treatment (annealing) in such structures, residual stresses arise in the fusion zone, which can lead to the formation of cracks. Therefore, obtaining operational information on the magnitude of the residual stresses is an urgent task.

The purpose of this work is to investigate the effect of residual stresses in samples of 15H2MFA steel with austenitic surfacing on the parameters of elastic waves and to develop a technique for estimating residual stresses by the acoustic method.

Experimental studies were carried out on samples with a 10x10x55 mm cladding. The thickness of surfacing is 5 mm. It was found that, after annealing (950 °C, 25 minutes, furnace) and quenching (950 °C, 25 minutes, water), the deformations to 0.2 mm were observed in the samples studied. As a result of the work done, the residual stresses were determined by the acoustic method. These results were confirmed by the X-ray method. A computer analysis was conducted using the ANSYS package. It was found out that after thermal treatment the stresses in the surfacing are stretchy, and compression stresses are observed in the base metal. The reasons for the appearance of residual stresses were various coefficients of thermal expansion of the base metal and surfacing, as well as structural transformations in 15H2MFA steel during heat treatment. The data are confirmed by the results of metallographic studies.



М.Г.ИСАЕНКОВА, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ, А.В.ОСИНЦЕВ,  
В.А.ФЕСЕНКО, М.М.ЗАРИПОВА  
*Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ,  
г. Москва, Россия*

## **МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ЭФФЕКТОВ ПАМЯТИ ФОРМЫ И СВЕРХУПРУГОСТИ В СПЛАВЕ Ti-22%Ni-6%Zr**

Эффект памяти формы и сверхупругость в металлах и сплавах имеет не только научное, но и большое практическое значение, их применение обеспечивает решение ряда сложных технических проблем. В настоящее время наиболее перспективными сплавами медицинского назначения являются сплавы на основе системы Ti-Nb-Zr, отличающиеся высокой коррозионной стойкостью, низким модулем упругости, сверхупругостью и гипоаллергенностью. Данная работа выполнялась на сплаве Ti-22Nb-6Zr (ат.%), характеризующемся максимальной обратимой деформацией в системе сплавов Ti-Nb-Zr. Образцы для исследования выплавлялись в электродуговой печи, гомогенизировались, закаливались, прокатывались до степеней деформации 90-95%, а затем отжигались при разных температурах в интервале 550-650°C в течение получаса.

Для выявления свойств сверхупругости, проводились циклические испытания на растяжение, а также индентирование исследованных фольг с увеличивающейся амплитудой внедрения индентора при понижении температуры образца от комнатной до  $-(60-70^{\circ}\text{C})$ . Механические испытания выполнялись на образцах, вырезанных вдоль и поперек направления прокатки. По результатам измерений механических свойств установлено, что при циклическом растяжении фольг в направлении прокатки проявляется сверхупругость, а также наблюдается тренировка материала с последующим сохранением максимальной восстанавливающейся деформации. При нагружении фольги в поперечном направлении сверхупругость не наблюдается, более того, некоторые образцы разрушаются уже при деформации 2%.

При понижении температуры испытания при индентировании кривая непрерывного изменения нагрузки с глубиной проникновения индентора претерпевает существенные изменения, которые указывают на появление сверхупругой деформации под индентером. Монотонные кривые нагрузки и разгрузки испытывают перегиб, при этом область пластической деформации существенно сокращается. По кривым разгрузки в данном случае можно рассчитать два модуля упругости, характерных для обычной упругости и сверхупругого поведения сплава. В общем случае основные характеристики кривой непрерывного индентирования зависят от количества мартенситной фазы. Построена зависимость модулей упругости при охлаждении и обратном нагреве фольги до комнатной температуры.

М.ISAENKOVA, Yu.PERLOVICH, A.OSINTSEV,

## **METHODS OF RESEARCH OF SHAPE MEMORY EFFECT AND SUPERELASTICITY IN THE ALLOY Ti-22%Ni-6%Zr**

The shape memory effect and superelasticity in metals and alloys is not only scientific, but also of great practical importance, its application provides the solution of complex technical problems. Currently, the most promising alloys for medical purposes are alloys based on Ti-Nb-Zr, which are distinguished by high corrosion resistance, low modulus of elasticity, superelasticity and hypoallergenicity. This work was performed on Ti-22Nb-6Zr alloy (at.%), characterized by the maximum reversible deformation in the system of Ti-Nb-Zr alloys. Investigation samples were smelted in an electric arc furnace, homogenized, quenched, rolled to degrees of deformation of 90-95%, and then annealed at different temperatures in the range 550-650°C for half an hour.

To reveal the properties of superelasticity, cyclic tensile tests were performed, as well as indentation of the investigated foils with an increasing amplitude of penetration of the indenter as the sample temperature was decreased from room temperature to -(60-70°C). Mechanical tests were carried out on samples cut along and across the rolling direction. According to the results of measurements of mechanical properties, it is established that during cyclic stretching of foils in the direction of rolling, superelasticity manifests itself, and also material training is observed with subsequent preservation of the maximum reversible deformation. When the foil is loaded in the transverse direction, no superelasticity is observed, moreover, some samples are destroyed even with a deformation of 2%.

When the temperature of the indentation is lowered, the continuous load variation curve with penetration depth of the indenter undergoes significant changes, which indicate the appearance of superelastic deformation under the indenter. Monotonic load and discharge graph undergo an inflection, and the plastic deformation region is substantially reduced. From the unloading curves in this case, we can calculate two elastic moduli, typical for the usual elasticity and superelastic behavior of the alloy. In general, the main characteristics of the continuous indentation graph depend on the amount of the martensite phase. The dependence of the elastic moduli on cooling and back heating of the foil to room temperature is constructed.

А.Г.БЕБИЯ, М.П.БОРОНЕНКО, П.Ю.ГУЛЯЕВ.

*Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия  
MarinaB7@yandex.ru*

## **ЭКСПРЕСС – МЕТОД ФАЗОВОГО СОСТАВА ПРОДУКТОВ СВ-СИНТЕЗА**

В статье представлены первые результаты применения усовершенствованного метода, позволяющего идентифицировать процессы образования фаз в ходе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Знание особенностей, присущих фазообразованию конкретной системы, позволит осуществить предварительный экспресс анализ фазового состава продуктов реакции. Приведены результаты корреляционного анализа изображений поверхности синтезируемого керамико-металлического материала и металлографического шлифа. Накопление сравнительной статистики и формирование общей базы выявленных особенностей горения различных систем позволит существенно уточнить экспресс-метод; может стать дополнительным инструментом контроля режима горения; поможет выявить неизвестные факторы, влияющие на свойства получаемого материала. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-42-00106.

A.G.BEBIA, M.P.BORONENKO, P.YU.GULYAEV

*Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia*

## **EXPRESS-METHOD OF PHASE COMPOSITION OF SH-SYNTHESIS PRODUCTS**

The paper presents the first results of the application of the extended method, which provides the identification of phase formation processes in the course of self-propagating high-temperature synthesis. Knowledge of the features inherent in phase formation, the system, allows you to perform a preliminary analysis. The results of the correlation analysis of the surface images of the synthesized ceramic-metallic material and the metallographic section are presented. The accumulation of comparative statistics and the formation of a common base of the revealed features of combustion of various systems makes it possible to determine the express method more precisely; can become an additional content of control of the combustion regime; helps to identify unknown factors that affect the properties of the resulting material. The study was carried out with the partial financial support of the RFBR within the framework of the scientific project No. 15-42-00106.

Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, П.Л.ДОБРОХОТОВ<sup>1</sup>,  
А.К.АМАНОВА<sup>1</sup>, М.В.ЛЕОНТЬЕВА-СМИРНОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>АО ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, г. Москва, Россия

## **ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИСПЫТАНИЙ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ ПОЛЗУЧЕСТЬ И СТАРЕНИЕ**

Проведены испытания труб из сталей ферритно-мартенситного класса ЭК-181 и ЧС139 на высокотемпературную ползучесть (при температуре 700°C и напряжении 50 МПа) и термическое старение (при температурах 650 и 700°C в течение 1000, 7000 и 13300 часов). С помощью рентгеновских методов проведено исследование изменений кристаллографической текстуры и структурного состояния в результате испытаний.

Выявлено, что при испытаниях на термическую ползучесть труб из стали ЧС-139 изменения кристаллографической текстуры в области, близкой к месту разрушения, аналогичны испытаниям на одноосное растяжение при комнатной температуре. Это свидетельствует о сходстве механизмов переориентации зерен при ползучести и растяжении. В стали ЭК-181 при температуре испытания 700°C происходит рекристаллизация с закономерным формированием текстуры рекристаллизации. Ползучесть стали ЭК-181 с рекристаллизованной структурой приводит к ее более быстрому разрушению (2486 ч для ЭК-181, тогда как для ЧС-139 – 3426 ч) при меньшей относительной деформации в зоне разрушения.

Старение труб из сталей ЧС139 и ЭК181 при температурах 650 и 700°C обеспечивает совершенствование их субструктуры: при увеличении выдержки наблюдается монотонное повышение пластичности, уменьшение микротвердости и уширения рентгеновских линий, что свидетельствует о релаксации внутренних упругих микронапряжений. При старении труб происходит образование карбидных фаз  $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$ , MC ( $\text{M}=\text{V}, \text{Ti}, \text{Nb}, \text{W}$ ), идентифицируемых по дополнительным линиям в дифракционном спектре трубы из стали ЭК181 отожженной при температуре 700°C в течение 13300 часов. Отсутствие линий карбидной фазы в дифракционных спектрах состаренных труб из стали ЧС139 свидетельствует о мелкодисперсности выделяющихся карбидов или об их отсутствии.

Yu.A.PERLOVICH<sup>1</sup>, M.G.ISAENKOVA<sup>1</sup>, P.L.DOBROKHOTOV<sup>1</sup>,  
A.K.AMANOVA<sup>1</sup>, M.V.LEONT'EVA-SMIRNOVA<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*High-Tech Scientific Research Institute of Inorganic Materials, Moscow, Russia.*

## **STRUCTURE AND CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE CHANGES OF FERRITIC MARTENSITIC STEEL RESULTING FROM THERMAL CREEP AND AGEING TESTS**

Thermal creep (700°C, 50 MPa) and ageing (650 and 700°C during 1000, 7000 or 13300 h) tests of tubes made from ferritic-martensitic steels EK181 and ChS139 were carried out. With the aid of X-ray techniques the investigation of crystallographic texture and structure condition after tests was conducted.

It was revealed that changes of crystallographic texture in the rupture area of steel ChS139 tube after creep test is similar to those after uniaxial tensile test at room temperature. This indicates the similarity of the mechanisms of grain reorientation for creep and tension. Recrystallization occurs in steel EK181 during creep test at temperature 700°C leading to formation of recrystallization texture. This results in faster failure of steel EK181 (2486 h before rupture) in comparison with steel ChS139 (3426 h).

Thermal ageing of tubes made from steel ChS139 and EK181 at temperatures 650 and 700°C provides substructure enhancement. With the increase of ageing time one can note the plasticity increase, microhardness decrease and x-ray peaks broadening, which testifies of inner elastic microstress relaxation.

Carbides (Fe, Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, MC (M=V, Ti, Nb, W) are formed during ageing, identified by additional lines in the diffraction spectrum of EK181 tube aged at 700°C for 13300 hours. Absence of carbide maxima on spectra of ChS139 steel indicates that either particles are finely dispersed in structure or there are no particles formed at all

Б.П.МИХАЙЛОВ<sup>1</sup>, А.Б.МИХАЙЛОВА<sup>1</sup>, В.Я.НИКУЛИН<sup>2</sup>,  
И.В.БОРОВИЦКАЯ<sup>1</sup>, П.В.СИЛИН<sup>2</sup>

*Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН,  
г. Москва, Россия*

*Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН, г.Москва, Россия  
borismix@yandex.ru*

## **СВОЙСТВА И СТРУКТУРНЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ $MgB_2$ - ЛЕНТ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН ПЛАЗМЫ**

Токонесущие свойства  $J_c$ ,  $J_c(B)$   $MgB_2$  лент являются структурно чувствительными параметрами и в значительной степени изменяются при деформировании и уплотнении  $MgB_2$  прослоек. Большую роль играют размеры и морфология зерен, фазовый состав, наличие и размеры структурных дефектов. Все указанные структурные факторы могут испытывать значительную трансформацию под действием ударных волн плазмы. В докладе представлены результаты воздействия ударных волн генерируемых на установке плазменный фокус на критический ток  $MgB_2$  лент в поперечном и продольном сечении при изменении энергии и количества ударов. Проведенные исследования показали возможность повышения  $J_c$  на 50% в магнитных полях до 2-3 Т за счет измельчения зерен и уплотнения  $MgB_2$  прослоек.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ №15-08-04045, РФФИ № 15-02-05995

В.Р.МИХАЙЛОВ<sup>1</sup>, А.Б.МИХАЙЛОВА<sup>1</sup>, В.Я.НИКУЛИН<sup>2</sup>,  
И.В.БОРОВИЦКАЯ<sup>1</sup>, П.В.СИЛИН<sup>2</sup>

*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS, Moscow, Russia  
Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia*

## **PROPERTIES AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS OF $MgB_2$ -TAPE'S UNDER THE ACTION OF PLASMA SHOCK WAVES**

The current-carrying properties of  $J_c$ ,  $J_c(B)$   $MgB_2$  tapes are structurally sensitive parameters and significantly change during deformation and compaction of  $MgB_2$  interlayers. The grain size, morphology, phase composition, presence and size of structural defects play an important role in this process. All these structural factors can undergo significant transformation under the influence of plasma shock waves. The report presents the results of shock waves impact generated on the plasma focus installation at the critical current of  $MgB_2$  tapes in the transverse and longitudinal cross sections with a change of energy and the number of strokes. The conducted studies showed the possibility of increasing  $J_c$  by 50% in magnetic fields up to 2-3 T. This effect due to the grinding of grains and the compaction of  $MgB_2$  interlayers.

The work was supported by the RFBR project No. 15-08-04045, RFBR No. 15-02-0599.

М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, В.А.ФЕСЕНКО<sup>1</sup>,  
Я.А.БАБИЧ<sup>1</sup>, Н.А.КРАПИВКА<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко, г. Киев, Украина*

## **ИЗМЕНЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КВАЗИМОНОКРИСТАЛЛОВ ИЗ НИЗКОМОДУЛЬНОГО СПЛАВА Zr-25Nb В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ**

В работе [1] показано, что использование имплантатов из низкомо-  
дульных материалов позволит улучшить результаты лечения переломов  
длинных костей и уменьшить процент послеоперационных осложнений.  
Учитывая сложность нагрузок, испытываемых металлофиксатором, уста-  
навливаемым в бедренной кости, необходимо оптимизировать свойства  
материала в различных направлениях.

Данная работа посвящена анализу изменения механических свойств  
монокристаллов из низкомодульного сплава Zr-25%Nb, прокатанных в  
различных ориентациях. Измерение механических свойств проводилось с  
использованием кривых непрерывного индентирования. Оценивали мик-  
ротвердость, модуль упругости и коэффициент пластичности материала,  
который определяется долей работы, затрачиваемой на пластическую де-  
формацию при индентировании.

Обнаружена существенная анизотропия упругих и пластических  
свойств исследованного материала. Монокристалл представляет собой  
квазимонокристалл ОЦК-фазы с мелкодисперсной омега-фазой. Модуль  
упругости такого квазимонокристалла из сплава Zr-25%Nb изменяется в  
широких пределах от 50 до 120 МПа. При этом максимальной пластично-  
стью при индентировании характеризуется направление  $\langle 100 \rangle$ , а мини-  
мальной - направление  $\langle 111 \rangle$ . При прокатке монокристаллов не происхо-  
дит увеличения размеров в том направлении, которое совпадает с направ-  
лением  $\langle 110 \rangle$ . Наибольшие изменения размеров наблюдаются в направ-  
лении  $\langle 100 \rangle$ .

### *Использованная литература:*

[1] Юхимчук А.А., Калашников А.В. Компьютерное моделирование напряже-  
ний и деформации бедренной кости при использовании интрамедуллярных метал-  
лических фиксаторов различной упругости. – Вестник ортопедии, травматологии и  
протезирования, 2015, 3, с. 56-62.

M. ISAENKOVA<sup>1</sup>, YU. PERLOVICH<sup>1</sup>, V. FESENKO<sup>1</sup>,  
Y. BABICH<sup>1</sup>, N. KRAPIVKA<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Institute of Problems of Strength by (named) G.S. Pisarenko, Kiev,  
Ukraine*

## **CHANGES OF ANISOTROPY OF MECHANICAL PROPERTIES OF QUASI-SINGLE CRYSTALS FROM THE LOW MODULUS ALLOY Zr-25Nb IN THE PROCESS OF ROLLING**

Using of implants from low-modulus materials will improve the results of treatment of fractures of long bones and reduce the percentage of postoperative complications was shown in work [1]. Taking into account the complexity of the loads tested by the metal stem installed in the femur, it is necessary to optimize the properties of the material in different ways.

This paper is devoted to an analysis of the change in mechanical properties of single crystals from a low-modulus Zr-25% Nb alloy rolled in different orientations. Measurement of mechanical properties was carried out using P-h curves of instrumented indentation. The microhardness, modulus of elasticity and the plasticity coefficient of the material, which is determined by the portion of work spent on plastic deformation during indentation were estimated.

A significant anisotropy of the elastic and plastic properties of the material studied was observed. A single crystal is a quasi-single crystal of a bcc phase with a finely dispersed omega phase. The modulus of elasticity of such a quasi-single crystal from the Zr-25% Nb alloy varies over a wide range, from 50 to 120 MPa. The maximum plasticity during indentation is characterized by the direction  $\langle 100 \rangle$ , and the minimum direction -  $\langle 111 \rangle$ . In rolling of single crystals there is no increase in size in the direction that coincides with the  $\langle 110 \rangle$  direction. The largest changes in size was observed in the  $\langle 100 \rangle$  direction.

### *References:*

[1] Yukhimchuk A.A., Kalashnikov A.V. Computer modeling of stress and deformation of the femur using intramedullary metal retainers of various elasticity.– Bulletin of orthopedics, traumatology and prosthetics, 2015, 3, c. 56-62.



Р.Н. ЯСТРЕБИНСКИЙ, В.И. ПАВЛЕНКО, О.В. КУПРИЕВА  
*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.  
Шухова, г. Белгород, Россия*  
yrndo@mail.ru

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРИДА ТИТАНА

В работе представлены результаты исследований модифицирования поверхности дробы гидрида титана боросилоксанами, с целью повышения ее термической стабильности при высоких температурах и защиты титана от окисления для возможного использования в качестве термостойкого нейтронно-защитного материала в ядерной энергетике. Разработана теоретическая модель модифицирования дробы гидрида титана боросиликанатом по золь-гель-технологии из водных растворов органосиликаната натрия и борной кислоты. Технология модифицирования гидрида титана заключается в предварительной химической активации поверхности дробы кремнийорганическим олигомером - органосиликанатом натрия (ОСН) с последующей обработкой борной кислотой, выделением твердой фазы гидрида титана и последующей сушкой при 100 °С. В процессе синтеза боросиликаната натрия и его термической обработке в температурном интервале 100-500 °С наблюдались сложные структурно-фазовые перестройки. При температуре 100 °С образовывался аморфно-кристаллический силиканат  $\text{CH}_3(\text{Si}_{30.4}\text{B}_{1.6}\text{O}_{64})\text{Na}$  моноклинной сингонии с большими параметрами кристаллической решетки. Термообработка боросиликанатного покрытия при 300 °С приводила к изменению рентгенографических характеристик кристаллической фазы и образованию  $\text{NaBSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$  моноклинной структуры с непрерывными слоями кремнекислородных тетраэдров. Дальнейшая кристаллизация боросиликаната при температуре 500 °С приводит к образованию силиканата каркасного типа  $\text{NaBSi}_3\text{O}_8$  триклинной сингонии. Выше 500 °С боросиликанат натрия переходит в стеклообразное состояние.

## **INCREASE IN THERMAL STABILITY OF HYDRIDE OF THE TITANIUM**

The paper presents the results of studies of the modification of the surface of a fraction of titanium hydride with borosiloxanes in order to increase its thermal stability at high temperatures and protect titanium from oxidation for possible use as a heat-resistant neutron-protective material in nuclear power engineering. A theoretical model has been developed for modifying a fraction of titanium hydride with borosilicate by sol-gel technology from aqueous solutions of sodium organosilicinate and boric acid. The technology for modifying titanium hydride consists in the preliminary chemical activation of the surface of the fraction by a silicone oligomer - sodium organosilicinate (OCN) followed by treatment with boric acid, separation of the solid phase of titanium hydride and subsequent drying at 100 °C. During the synthesis of sodium borosilicate and its thermal treatment in the temperature range 100-500 °C, complex structural-phase rearrangements were observed. At 100 °C, an amorphous-crystalline silicate of  $\text{CH}_3(\text{Si}_{30.4}\text{B}_{1.6}\text{O}_{64})\text{Na}$  monoclinic syngony with large crystal lattice parameters was formed. The thermal treatment of the borosilicate coating at 300 °C led to a change in the radiographic characteristics of the crystalline phase and the formation of a monoclinic  $\text{NaBSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$  structure with continuous layers of silicon-oxygen tetrahedra. Further crystallization of borosilicate at a temperature of 500 °C leads to the formation of a silicate of the skeleton type  $\text{NaBSi}_3\text{O}_8$  of triclinic syngony. Above 500 °C, sodium borosilicate passes into a glassy state.

А.Ф.ГИБАДУЛЛИНА, И.Б.ПОЛОВОВ  
*ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г.  
Екатеринбург, Россия  
Gibadullina.A@gmail.com*

## **СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИКЕЛЕВОГО СУПЕРСПЛАВА VDM ® ALLOY C-4**

Настоящая работа посвящена изучению структуры и свойств суперсплава на никелевой основе VDM ® Alloy C-4 (UNS 06455), который может быть использован в качестве конструкционного материала, контактирующего с расплавами галогенидов. Однако, исследуемый сплав при повышенных температурах обладает склонностью к образованию вторичных фаз, отрицательно влияющих на его механические и коррозионные свойства.

Представлены данные о кинетике образования избыточных фаз для сортаментов «лист» и «труба» в диапазоне 550 – 1100 °С в ходе выдержки в течение периода от 30 мин до 2000 ч. Показано влияние различных режимов термической обработки на структуру и свойства материала. Проанализированы результаты испытаний на склонность к межкристаллитной коррозии материала в различных состояниях по ASTM G-28 и РД 24.200.15-90, в том числе и для сварных соединений.

A.F.GIBADULLINA, I.B.POLOVOV  
*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russia*

## **STRUCTURE AND PROPERTIES OF NICKEL SUPERALLOY VDM ® ALLOY C-4**

The current research work is focused on nickel-based superalloy VDM ® Alloy C-4 (UNS 06455) structure and properties. This material can be potentially used in contact with molten salt. However, this alloy has a tendency to form the secondary phases at high temperatures. Their formation leads to degradation of mechanical and corrosion properties of the material.

The data on the kinetics of secondary phases formation for “sheet” and “tube” samples in the range from 550 to 1100 °C after exposure during various period of time (from 30 min to 2000 hours) were presented. The influence of different regimes of heat treatment on material structure and properties was shown. The data concerning sustainability against the intergranular corrosion of the material in different conditions (including welds) were analyzed using ASTM G-28 and RD 24.200.15-90 techniques.

С.Н.НИКИТИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия  
mephi200809@yandex.ru*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ СТАЛИ МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОМОДУЛЯЦИИ**

Разработка новых металлов и сплавов требует знания теплофизических свойств, одним из которых является теплоемкость. Данная работа посвящена определению теплоемкости стали методом дифференциальной сканирующей калориметрии с применением термомодуляции до температуры 1300 °С. Определение теплоемкости проводилось с использованием двух подходов: динамического и изотермического. Использование данного метода позволяет проводить исследование неравновесных сплавов, позволяет исключить возможное окисление образца во время высоко температурного эксперимента.

S.N.NIKITIN

*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

## **DETERMINATION OF THE SPECIFIC HEAT CAPACITY OF STEEL BY THE METHOD OF DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY USING THERMODEMULATION**

The development of new metals and alloys requires knowledge of thermo-physical properties, one of which is the heat capacity. This paper is devoted to the determination of the heat capacity of corrosion-resistant steel by differential scanning calorimetry using thermal modulation to a temperature of 1300 °C. The heat capacity was determined using two approaches: dynamic and isothermal. The use of this method makes it possible to investigate nonequilibrium alloys and allows to exclude possible oxidation of the sample during a high temperature experiment.

М.Г.ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, Ю.А.ПЕРЛОВИЧ<sup>1</sup>, В.А.ФЕСЕНКО<sup>1</sup>,  
М.М.ЗАРИПОВА<sup>1</sup>, Н.А.КРАПИВКА<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> *Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко, г. Киев, Украина*

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И ТЕКСТУРЫ НИЗКОМОДУЛЬНОГО СПЛАВА Zr-25Nb ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ РАЗНЫХ ОРИЕНТАЦИЙ**

В работе представлены результаты изучения закономерностей формирования текстуры прокатки в монокристаллах сплава Zr-25%Nb, отличающихся исходной ориентацией относительно внешних главных направлений в листе: нормального (НН) и направления прокатки (НП). Варьирование исходной ориентации монокристалла позволило выявить устойчивые ориентации, среди которых оказались текстурные компоненты  $\{001\}\langle 100 \rangle$ ,  $\{001\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{111\}\langle 110 \rangle$  и  $\{111\}\langle 112 \rangle$ . На последовательных этапах пластической деформации прокаткой регистрировали прямые полюсные фигуры, на основании которых определяли ориентацию монокристалла и наносили НН и НП на стандартный стереографический треугольник. По профилю рентгеновских линий оценивали изменение структурного состояния деформированного материала, а также измеряли размеры прокатываемой пластины по всем направлениям: НН, НП и ПН (поперечное).

Для определенных ориентаций монокристаллов в матрице квазимонокристалла удалось обнаружить мелкодисперсную  $\omega$ -фазу, обуславливающую появление в дифракционном спектре образца протяженных гало. Наличие в сплаве Zr-25%Nb  $\omega$ -фазы практически не снижает пластичности материала и не влияет на кристаллографические механизмы текстуробразования, присущие ОЦК-металлам. Деформация  $\beta$ -сплава осуществляется преимущественно путем скольжения по системам  $\{112\}\langle 111 \rangle$  и  $\{110\}\langle 111 \rangle$ . При степенях деформации более 80% наблюдается двойникование по плоскости  $\{112\}$ , которое легко идентифицируется по появлению новых текстурных максимумов на характерных расстояниях от исходных. Обнаружено, что при прокатке монокристаллов не происходит увеличения их размеров в том направлении, которое совпадает с направлением  $\langle 110 \rangle$ . При этом отмечается переориентация направлений, которую нельзя объяснить ни одной из указанных выше систем скольжения при заданном напряженном состоянии в листе.

M.ISAENKOVA<sup>1</sup>, Yu.PERLOVICH<sup>1</sup>, V.FESENKO<sup>1</sup>,  
M.ZARIPOVA<sup>1</sup>, N.KRAPIVKA<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>*Institute of Problems of Strength by G.S. Pisarenko, Kiev, Ukraine*

## **REGULARITIES OF CHANGES IN STRUCTURE AND TEXTURE OF LOW MODULUS ALLOY ZR-25NB AT COLD ROLLING OF MONOCRYSTALS WITH DIFFERENT ORIENTATIONS**

The paper presents the results of studying the regularities of formation of the rolling texture in single crystals of Zr-25% Nb alloy, differing in their initial orientation relative to the external principal directions in the sheet: normal (ND) and rolling direction (RD). Varying the initial orientation of the single crystal made it possible to reveal stable orientations, among which were textural components  $\{001\} \langle 100 \rangle$ ,  $\{001\} \langle 110 \rangle$ ,  $\{111\} \langle 110 \rangle$  and  $\{111\} \langle 112 \rangle$ . In successive stages of plastic deformation by rolling, direct pole figures were recorded, on the basis of which the orientation of the separate grains was determined and ND and RD were drawn on a standard stereographic triangle. The change in the structural state of the deformed material was evaluated by the X-ray line profile, and the dimensions of the rolled plate were measured in all directions: ND, RD and transverse direction (TD).

For certain orientations of single crystals, in the matrix of a quasi-single crystal it was possible to detect a finely dispersed  $\omega$  phase, which causes the appearance of an extended halo in the diffraction spectrum. The presence of  $\omega$  phase in the Zr-25% Nb alloy practically does not reduce the ductility of the material and does not affect the crystallographic texture formation mechanisms inherent in bcc metals. Deformation of the  $\beta$ -alloy is carried out mainly by sliding along the  $\{112\} \langle 111 \rangle$  and  $\{110\} \langle 111 \rangle$  systems. At deformation degrees of more than 80% twinning along the  $\{112\}$  plane is observed, which is easily identified by the appearance of new textural maxima at characteristic distances from the initial ones. It is found that at cold rolling single crystals, their dimensions do not increase in the direction that coincides with  $\langle 110 \rangle$  directions. In this case, a reorientation of directions is noted, which can not be explained by any of the above-mentioned sliding systems for a given stressed state in the sheet.

## **УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ**

Поверхностное пластическое деформирование (ППД), осуществляемое различными способами, получило широкое распространение как метод улучшения основных показателей качества поверхностного слоя и эксплуатационных характеристик деталей машин и инструментов.

Методы ППД, осуществляемые различными способами, имеют ряд преимуществ, по сравнению с другими методами обработки, а именно, благодаря пластическому течению металла деформированные выступы заполняют впадины профиля, увеличивая опорную длину и несущую способность поверхности.

Одним из методов ППД является ультразвуковая ударная обработка. Ультразвуковая обработка представляет собой прогрессивную технологию обработки металла давлением, позволяя заменить ряд классических методов ППД по схемам качение и скольжение – накатывание и выглаживание. Введение в зону обработки ультразвуковых колебаний снижает сопротивление пластической деформации, что приводит к уменьшению статического усилия деформирования и дает возможность обработки жестких деталей

Физическая природа, характеризующая процесс ультразвуковой ударной обработки, достаточно сложна и связана с такими явлениями, как удар, деформация, поверхностное трение и адгезионные явления, диссипация и преобразование механической энергии удара в тепло и др.

Упрочнение и формирование поля остаточных напряжений в процессе ультразвуковой ударной обработки изделия является результатом комплексного воздействия на материал мощных колебаний с частотой ультразвука и собственно пластического деформирования поверхностного слоя вследствие многократных периодических ударов инструмента.

M.O.KUVSHINOV, A.A.KHLYBOV  
*Nizhny Novgorod State Technical University n.a.R.E.Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russia*

## **ULTRASOUND SURFACE PLASTIC DEFORMATION**

Surface plastic deformation (PPD), carried out by various methods, has become widely used as a method of improving the basic quality parameters of the surface layer and the performance characteristics of machine parts and tools.

The PPD methods carried out in various ways have a number of advantages over other processing methods, namely, due to the plastic flow of the metal, the deformed protrusions fill the cavities of the profile, increasing the bearing length and bearing capacity of the surface.

One of the methods of PPD is ultrasonic shock treatment. Ultrasonic processing is a progressive technology of metal working with pressure, allowing to replace a number of classical methods of PPD according to schemes rolling and sliding - rolling and smoothing. Introduction to the treatment zone of ultrasonic vibrations reduces the resistance of plastic deformation, which leads to a decrease in the static strain force and enables processing of rigid parts

The physical nature that characterizes the process of ultrasonic shock treatment is quite complex and is associated with such phenomena as impact, deformation, surface friction and adhesion phenomena, dissipation and transformation of the mechanical impact energy into heat, etc.

Strengthening and formation of the residual stress field in the process of ultrasonic sound processing of the product is the result of a complex effect on the material of powerful oscillations with the frequency of ultrasound and intrinsic plastic deformation of the surface layer as a result of repeated periodic impacts of the instrument.



Е.А.КУЛЕШОВА<sup>1,2</sup>, А.Д.ЕРАК<sup>1</sup>, А.П.БАНДУРА<sup>1</sup>, С.А.БУБЯКИН<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  
ad.erak25@gmail.com*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КВАЗИХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ**

Проведены испытания корпусной стали ВВЭР-1000 на вязкость разрушения. Методом фрактографического анализа изломов образцов SEN(B), испытанных на трещиностойкость, определены структурные параметры и типы источников зарождения хрупкой трещины («лидеров»). Установлено, что определяющей стадией разрушения образца SEN(B)-типа является стадия зарождения первичной микротрещины на лидере. По результатам исследований проведена оценка средней скорости стабильного (докритического) роста хрупкой трещины в образцах в процессе испытаний. Показано, что чем больше время зарождения первичной микротрещины в образце, тем выше средняя скорость последующего стабильного роста макротрещины. Также показаны возможные причины разброса значений трещиностойкости при испытаниях в идентичных условиях.

Е.А.KULESHOVA<sup>1,2</sup>, А.Д.ЕРАК<sup>1</sup>, А.П.BANDURA<sup>1</sup>, S.A.BUBJAKIN<sup>1</sup>

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

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

## **STUDY OF QUASIBRITTLE FRACTURE PROCESS OF STEELS DURING FRACTURE TOUGHNESS TEST**

Fracture toughness tests of VVER-1000 pressure vessel steel were made. By means of fractographic analyzes of fracture surfaces of the tested SEN(B) samples structural parameters and types of brittle fracture sources (origins) were determined. Nucleation of an initial brittle microcrack was established to be defining fracture stage of SEN(B) sample. Base on the investigation results assessment of the average velocity of stable macrocrack propagation has been made. It was shown that the more nucleation time of the initial microcrack is the more average velocity of stable macrocrack propagation is. Possible reasons of fracture toughness values scatter after tests in an identical conditions were shown.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ВАКАНСИЙ И АТОМОВ В В2 СТРУКТУРАХ**

Механизм диффузии в упорядоченных системах должен обеспечивать сохранение дальнего порядка в расположении атомов. Однако, не смотря на большое количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных этому вопросу, механизмы диффузии в таких системах до настоящего времени не установлены. В работах [1,2] был предложен вариант механизма, который обеспечивает выполнение вышеупомянутого условия и полученные величины барьеров для которого имеют меньшие значения по сравнению с другими известными механизмами. Кроме того в этих работах отмечено, что при широком интервале температур вакансии перемещаются в связанном состоянии, совершая скачки по разным под-решеткам. Поэтому рассматривается бивакансионный механизм диффузии-исо скачками атомов в вакансии из второй координационной сферы.

В работе разработана модель на основе кинетического метода Монте-Карло и комплекс программ для изучения миграции бивакансий и атомов в структурах типа В2.

Проведено моделирование миграции вакансий и атомов и вычислены коэффициенты самодиффузии атомов в В2 структурах при различных значениях высот активационных барьеров для скачков атомов в вакансию. Определены эффективные энергии миграции атомов обоих сортов и оценены корреляционные эффекты.

Получены значения энергий активации самодиффузии и предэкспоненциального множителя для атомов сорта А и В в системе, с параметрами близкими к характеристикам интерметаллида NiAl.

### *Использованная литература:*

- 1 Ganchenkova M.G., Nazarov A.V. Simulation of the defect complex migration in the ordered structures // Computational Materials Science. – 2000. – Vol. 17. – № 2 – 4. – p.319
- 2 Ganchenkova M.G., Nazarov A.V. Modeling of diffusion in ordered structures of В2-type, in Diffusion Mechanism in Crystalline Materials // C.R.A.Catlow et al (eds), MRS Symp. Proc. Ser. – 1998. – Vol. 527. – P.221 – 226.

## **ATOMISTIC SIMULATION OF VACANCY AND ATOMS MIGRATION IN B2-ORDERING BINARIES**

The diffusion mechanism in ordered systems should ensure the conservation of long-range order in the arrangement of atoms. However, despite the large number of theoretical and experimental papers devoted to this issue, the diffusion mechanisms in such systems have not been established to date. In [1,2], a version of the mechanism has been suggested that ensures the fulfillment of the above-mentioned condition and the obtained barrier values for which are smaller than those of other known mechanisms. In addition, it is noted in these papers that for a wide temperature range vacancies move in a bound state, jumping on the different sublattices. Therefore, the di-vacancy diffusion mechanism with jump atoms to vacancies from the second coordination sphere is considered.

A model based on the Kinetic Monte Carlo and a set of programs for studying the migration of divacancies and atoms in B2-type structures have been developed.

The migration of vacancies and atoms is simulated and the self-diffusion coefficients of atoms in B2 structures are calculated for different activation barriers for atomic jumps in vacancy. The effective energy of migration of atoms of both varieties is determined and correlation effects are estimated.

The activation energies of self-diffusion and the pre-exponential factor for atoms of type A and B in the system with parameters close to the NiAl intermetallic are obtained.

### *Использованная литература:*

- 1 Ganchenkova M.G., Nazarov A.V. Simulation of the defect complex migration in the ordered structures // Computational Materials Science. – 2000. – Vol. 17. – №2 – 4. – p.319
- 2 Ganchenkova M.G., Nazarov A.V. Modeling of diffusion in ordered structures of B2-type, in Diffusion Mechanism in Crystalline Materials // C.R.A.Catlow et al (eds), MRS Symp. Proc. Ser. – 1998. – Vol. 527. – P.221 – 226.

В.С.КУЗЬМИН, Д.В.ПОСОХОВ  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, г. Томск, Российская Федерация  
vsk23@tpu.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗБАВЛЕНИЯ НИКЕЛЕВОЙ  
ДОБАВКОЙ МАТРИЦЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ  
ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ  
САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА**

В данной работе изучена возможность получения матричного материала на основе перовскито-подобной матрицы, полученной с помощью добавления Ni для улучшения фазообразования соединения  $\text{NdAlO}_3$  методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Предлагаемая матрица для иммобилизации радиоактивных отходов является перовскитная керамика.

V.S.KUZMIN, D.V.POSOKHOV  
*Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

**INVESTIGATION STUDY OF ALUMINUM BASED SHS-  
PRODUCED MATRIX DILUTION WITH NICKEL ADDITION.**

This work deals with possibility of matrix material obtaining from perovskite-like matrix, obtained by adding of Ni for  $\text{NdAlO}_3$  phase generation improvement via self-propagating high-temperature synthesis. Perovskite ceramics is proposed matrix for radioactive waste immobilization. Perovskite ceramics is considered to be applied as reliable matrix for the final disposal of radioactive waste.

Б.А.ТАРАСОВ, М.Д.САВЕЛЬЕВ, А.В.ОСИНЦЕВ,  
Д.П.ШОРНИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
г. Москва, Россия  
BATarasov@mephi.ru*

## **КРАТКОВРЕМЕННЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ Fe-Cr-Al-Si**

Целью данной работы является изучение кратковременных механических свойств сплавов на основе Fe-Cr-Al-Si.

В рамках данной работы рассматриваются сплавы с содержанием хрома от 5 до 14 мас.%, алюминия от 0 до 4 мас.% и кремния от 0 до 4 мас.%. Образцы были испытаны в трех различных состояниях - в деформированном состоянии (80% х.д.), а так же после отжигов при температуре 450 и 650 °C длительностью 1000 ч.

В результате получены характеристики прочности и пластичности сплавов в деформированном состоянии, а так же после провоцирующих отжигов. Показано, что в исследованной области составов, и условий отжигов не наблюдается охрупчивания сплавов, а прочность сплавов прямо пропорционально зависит от суммы содержания легирующих элементов Al+Si.

B.A.TARASOV, M.D.SAVELYEV, A.V.OSINTSEV,  
D.P.SHORNIKOV

*National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia*

## **SHORT-TERM MECHANICAL PROPERTIES OF Fe-Cr-Al-Si ALLOYS**

The purpose of this work is to study the short-term mechanical properties of Fe-Cr-Al-Si-based alloys.

Within the framework of this work, alloys with a chromium content of 5 to 14 wt%, aluminum from 0 to 4 wt%, and silicon from 0 to 4 wt% are considered. The samples were tested in three different states - in the deformed state (cold rolling by 80%), and also after annealing at a temperature of 450 and 650 °C with a duration of 1000 h.

As a result, the characteristics of the strength and plasticity of alloys in the deformed state, as well as after provoking annealing, were obtained. It is shown that no embrittlement of alloys is observed in the investigated composition region and annealing conditions, and the strength of the alloys is directly proportional to the sum of the alloying elements Al + Si.

Б.А.ТАРАСОВ, М.С.ТАРАСОВА, И.И.КОНОВАЛОВ,  
Э.М.ГЛАГОВСКИЙ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
г. Москва, Россия  
BATarasov@mephi.ru*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ФЕРРИТО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ**

В данной работе предложен способ прогнозирования длительной прочности феррито-мартенситных сталей на основе данных по скорости установившейся ползучести в области низких напряжений.

Показано, что для температур более 600 °С и времен до разрушения более  $10^4$  ч резкое уменьшение максимальных напряжений может быть описано путем учета суммарной деформации по механизмам скольжения дислокаций и межзеренного проскальзывания. В работе получены феноменологические выражения, описывающие скорость ползучести и время до разрушения в широком интервале напряжений и температур для 9 и 12% хромистых феррито-мартенситных сталей.

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

## **PREDICTION OF LONG-TERM STRENGTH OF FERRITIC- MARTENSITIC STEELS**

In this paper, we propose a method for predicting the long-term strength of ferrite-martensitic steels based on data on the rate of steady-state creep in the low-stress region.

It is shown that for temperatures above 600 °C and times before failure more than  $10^4$  h, a sharp decrease in the maximum stresses can be described by taking into account the total deformation by the mechanisms of dislocations slip and intergranular sliding. Phenomenological expressions describing the creep rate and time to failure in a wide range of stresses and temperatures for 9 and 12% chromium ferrite-martensitic steels have been obtained.

А.А.ГУСЕВ , А.В.НАЗАРОВ

*Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»  
alexey-gsv@mail.ru avn46@mail.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИФфуЗИОННЫХ СКАЧКОВ УГЛЕРОДА В ОЦК ЖЕЛЕЗЕ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ**

В работе проведено моделирование диффузионных скачков атомов углерода в ОЦК железе. Предложен вариант метода молекулярной динамики который в полной мере учитывает флуктуационный характер этого процесса. В этой модели также учитывается тепловое расширение кристалла и упругие искажения решетки в окрестности дефектов. Это позволяет учитывать влияние давления на концентрацию и диффузионную подвижность точечных дефектов. Расчеты проведены на основе как парного потенциала Джонсона, так и многочастичного потенциала Экланда. Диффузионная подвижность атомов углерода была изучена при различных температурах. Из расчетов получены значения коэффициентов диффузии углерода, энергии активации и предэкспоненциальный множитель. Кроме того, методом молекулярной статики получены значения энергии активации. Проведен анализ большого числа траекторий атомов и оценен вклад двойных скачков в диффузионную подвижность. Преплагаются возможные причины различия энергий активации полученных методами молекулярной статики и молекулярной динамики.

A.A.GUSEV , A.V.NAZAROV

*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, Russia  
alexey-gsv@mail.ru avn46@mail.ru*

## **MOLECULAR DYNAMICS SIMULATION OF DIFFUSION JUMPS FEATURES OF CARBON IN BCC IRON**

The series of carbon diffusion jumps in BCC iron was simulated. In this work we present a variant of molecular dynamics, which completely takes into account the fluctuating nature of that process. The model also considers heat expansion and elastic deformation of crystal lattice in the vicinity of defects. It allows to take into account how does pressure affect the concentration and diffusive mobility of point defect. Calculations was performed using pairwise potential provided by Johnson and EAM manybody potential provided by Ackland. Diffusion mobility was simulated at different temperatures. We obtained values of diffusion coefficient, activation energy, and pre-exponential factor. Activation energy was also calculated using molecular statics (variational) method. Analysis of large quantity of atomic trajectories was performed and the contribution of double jumps in diffusion mobility was estimated. Possible causes of activation energy values discrepancy for molecular dynamics and molecular static are offered.

А.В.НАЗАРОВ<sup>1</sup>, А.А.МИХЕЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ,  
г.Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский Государственный университет дизайна и технологий,  
г. Москва, Россия  
avn46@mail.ru*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ В ОКРЕСТНОСТИ ПОР И ОЦЕНКИ АНИЗОТРОПИИ ИХ СКОРОСТИ РОСТА**

При облучении материалов образуется большое количество пор и пузырьков инертного газа, что существенно изменяет физико-механические свойства металлов. Цель этой работы - изучить как упругие поля, возникающие около нанопор, и давление газа в этих пустотах влияют на диффузионные потоки вакансий и скорость роста пор. Обычно поля смещений вблизи пор определяются уравнениями теории упругости. Такое описание имеет свои недостатки, поскольку оно не учитывает дискретную атомную структуру материалов. В этой работе используется новый вариант метода Молекулярной Статики для изучения атомной структуры вблизи нанопор. В нашей модели используется итерационная процедура, в которой атомная структура в окрестности пор и параметр, определяющий смещения атомов, помещенных в упругий континуум, определяются самосогласованным образом. Результаты моделирования показывают, что смещения атомов вблизи нанопор существенно различаются для разных кристаллографических направлений.

Недавно нами получено уравнение диффузии вакансий при наличии поля напряжений. Теперь мы используем это уравнение и смещения атомов вблизи нанопор, полученные путем моделирования, для оценки скорости роста поверхности пор для различных кристаллографических направлений. Мы получили уравнение для нормальной составляющей плотности потока вакансий к поверхности сферы для некоторых кристаллографических направлений, а затем рассчитали скорость смещения элемента поверхности пор в указанных направлениях для различных пересечений вакансиями в зависимости от температуры.



A.V. NAZAROV<sup>1</sup>, A.A. MIKHEEV<sup>2</sup>

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

*<sup>2</sup>Moscow State University of Design and Technology, RUSSIA*

*avn46@mail.ru*

## **SIMULATION OF ATOMIC STRUCTURE NEAR VOIDS AND EVALUATION ANISOTROPY OF THEIR GROWTH RATE**

Under irradiation, it is possible for large numbers of voids and inert gas bubbles to form, which significantly alter the physical and mechanical properties of metals. The aim of our work is to examine how elastic stress, arising from nanovoids, and gas pressure in these voids influence the diffusion vacancy fluxes and the growth rate of the voids. Generally, displacement fields near voids are determined by the equations of elasticity theory. Such a description has its disadvantages as it does not take into account the discrete atomic structure of materials. In this work, we use a new variant of Molecular Static method for investigation of the atomic structure near nanovoids. In our model an iterative procedure is employed, in which the atomic structure in the void vicinity and the parameter determining the displacement of atoms embedded into an elastic continuum are obtained in a self-consistent manner. Results show that the atom displacements near nanovoids are significantly different for varies crystallographic directions.

Not long ago we have obtained an equation of vacancy diffusion in the presence of stress field. Now we use this equation and the atom displacements near nanovoids obtained by simulations to evaluate growth rate of the void surface for varies crystallographic directions. We find the equation for the normal component of the flux density to the surface of the sphere for some crystallographic directions and then calculate shifting rate of the void surface element in mentioned directions for the different supersaturations of the vacancies as a function of temperature.

М.В.САВВИН, А.В.НАЗАРОВ

*Национальный Исследовательский Ядерный Университет МИФИ, г.  
Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ МИГРАЦИИ ВАКАНСИЙ И АТОМОВ В УПОРЯДОЧИВАЮЩИХСЯ СТРУКТУРАХ**

В этой статье компьютерное моделирование используется для изучения эффектов корреляции при миграции вакансий и диффузии атомных компонентов в бинарных упорядочивающихся сплавах. Сначала мы получаем набор равновесных состояний методом Монте-Карло для разных температур, а затем моделируем миграцию вакансий и самодиффузию атомов кинетическим методом Монте-Карло с использованием полученных атомных структур. Получены зависимости корреляционного множителя от температуры и параметра ближнего порядка, а также корреляционных множителей при миграции вакансий и корреляционных множителей при самодиффузии атомов.

Корреляционные множители вакансий и атомных компонентов используются для оценки коэффициента взаимной диффузии и эффекта Киркендалла в рамках альтернативной теории взаимной диффузии с учетом влияния неравновесных вакансий.

M.V. SAVIN, A.V. NAZAROV

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

## **ATOMISTIC SIMULATION OF CORRELATION EFFECTS FOR VACANCY MIGRATION AND FOR THE ATOMIC COMPONENT DIFFUSION IN ORDERING BINARIES**

In this paper, computer simulation is used to study correlation effects for vacancy migration and for the atomic component diffusion in the binary ordering alloys. At first we obtain a set of equilibrium states by Monte Carlo method for different temperatures and then we simulate the vacancy migration and atom self-diffusion by Kinetic Monte Carlo using atomic structures of mentioned states. Correlation factor dependencies from the temperature and short-range order parameter are derived and for the vacancy correlation factor and for correlation factors of the atom self-diffusion.

The vacancy correlation factor and the atomic component correlation factors are used to evaluate interdiffusion coefficient and Kirkendall effect in framework of the alternative theory of interdiffusion taking into account an influence of non-equilibrium vacancies.

Е.В. ГЛАДКИХ, И.И. МАСЛЕНИКОВ, А.С. УСЕИНОВ  
*ФГБНУ ТИСНУМ, г. Троицк, Россия*  
ekat.gladkih@yandex.ru

## **ИНДЕНТИРОВАНИЕ ШАРИКОМ КАК МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СООТНОШЕНИЯ ПРИКЛАДЫВАЕМОЙ НАГРУЗКИ И ДЕФОРМАЦИИ МАТЕРИАЛА**

Эффективным методом определения показателя деформационного упрочнения и предела текучести материала является получение зависимости напряжение-пластическая деформация посредством вдавливания в образец сферического индентора. Индентирование шариком применяется для контроля трубопроводов и сварных швов. В данной работе для исследования свойств как металлов, так и полимеров был использован сфероконический корундовый наконечник с радиусом закругления 18 мкм. Диапазон нагрузок составлял до 2.5 Н. Определение свойств материалов было проведено как при помощи традиционного индентирования с частичной разгрузкой, так и при помощи метода динамического индентирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения № 14.577.21.0274 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0274).

E.V. GLADKIH, I.I. MASLENIKOV, A.S. USEINOV  
*FSBI TISNCM, Troitsk, Russia*  
ekat.gladkih@yandex.ru

## **INSTRUMENTED BALL INDENTATION AS A METHOD OF DETERMINATION OF STRESS-STRAIN RELATION**

Strain hardening exponent and yield strength can be determined via stress-plastic strain curve obtained by indentation with the spherical shape indenter. Ball indentation is used for the pipeline and weld joints control. In current work a 18 um sphero-conical corundum tip was used for investigation metal and plastic properties. The load range was up to 2.5 N. The mechanical properties were determined using both traditional partial-unloading indentation and dynamic mechanical analysis.

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the agreement No. 14.577.21.0274 (unique identifier of the project RFMEFI57717X0274).

Г.Н.ЕЛМАНОВ, П.С.ДЖУМАЕВ, Е.А.ИВАНИЦКАЯ,  
Т.Л. МИЩЕНКО, А.Н.СУЧКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
Москва, Россия  
gnelmanov@mephi.ru*

**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  
 $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ .

**А.В.КОСТЮХИНА<sup>1</sup>, А.А.МОКРУШИН<sup>2</sup>**

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

*<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт Научно-производственного объединения «ЛУЧ», г. Подольск, Россия  
kostuhinaN@yandex.ru*

## **АНИЗОТРОПИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ СПЛАВА Э110**

Целью настоящей работы было исследование деформационного поведения сплава Э110 при комнатной температуре, а также проверка гипотезы об изотропности его деформационного упрочнения. Были проведены эксперименты с использованием кольцевых и сегментных образцов, изготовленных из оболочек твэлов. В результате были получены кривые упрочнения (истинные диаграммы деформирования) сплава Э110 для осевого и тангенциального направлений. Проведенные исследования позволили установить наличие на диаграмме деформирования нескольких участков (двух для осевого направления и трех для тангенциального), отличающихся показателем степени упрочнения. Определена погрешность аппроксимации в случае использования кусочно-степенных функций, а также степенных функций с одинаковыми степенями упрочнения. Установлено, что на начальном участке деформирования прочность сплава Э110 в тангенциальном направлении выше таковой для осевого направления, на конечном участке - ниже.

**A.V. KOSTYUKHINA<sup>1</sup>, A.A. MOKRUSHIN<sup>2</sup>**

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

*<sup>2</sup>Luch Research Institute and Scientific Industrial Association  
(NII NPO Luch), Podolsk, Russia*

## **ANISOTROPY OF STRAIN HARDENING OF AN E110 ALLOY**

The purpose of this work was to study the deformation behavior of the E110 alloy at room temperature, and to test the hypothesis of the isotropy of its strain hardening. The ring and segment samples were tested. Samples were made from fuel rod claddings. As a result, the hardening curves (true deformation diagrams) of the E110 alloy for axial and tangential directions were obtained. These curves have several sections that differ in the degree of hardening, namely 2 sections for the axial direction and 3 sections for the tangential. The approximation error was determined in the case of using piecewise-power functions, and power functions with equal degrees of hardening. It was found that at the initial deformation section the strength of the E110 alloy in the tangential direction is higher than that for the axial direction. At the final section of the diagram, the strength in the axial direction is higher.

И.В. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, Г.Н. ЕЛМАНОВ<sup>2</sup>, К.Е. ПРИХОДЬКО<sup>1,2</sup>,  
В.С. МАШЕРА<sup>3</sup>, Е.С. ГОРЕЛИКОВ<sup>3</sup>, С.А. ГУДОШНИКОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия;*

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

<sup>3</sup> *Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСИС», Москва, Россия*

## **ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ АМОРФНЫХ Co<sub>69</sub>Fe<sub>4</sub>Cr<sub>4</sub>Si<sub>12</sub>B<sub>11</sub> МИКРОПРОВОДОВ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ**

Проведено исследование структуры, состава, фрактограмм излома и характеристик гигантского магнитного импеданса (ГМИ) аморфных микропроводов в стеклянной оболочке из сплавов системы Co-Fe-Si-B в зависимости от режимов химического травления и термической обработки. Показано, что сочетание различных методов обработки микропроводов может приводить к заметному улучшению характеристик ГМИ. Приведено описание влияния микроструктурной трансформации на изменение индуктивной компоненты магнитного импеданса.

I.V. KOZLOV<sup>1</sup>, G.N. ELMANOV<sup>2</sup>, K.E. PRIKHODKO<sup>1,2</sup>,  
V.S. MASHERA<sup>3</sup>, E.S. GORELIKOV<sup>3</sup> and S.A. GUDOSHNIKOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Kurchatov Institute, Moscow, Russia;*

<sup>2</sup> *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering  
Physics Institute), Moscow, Russia;*

<sup>3</sup> *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia*

## **THE EVOLUTION OF MICROSTRUCTURE IN THE AMORPHOUS Co<sub>69</sub>Fe<sub>4</sub>Cr<sub>4</sub>Si<sub>12</sub>B<sub>11</sub> MICROWIRES WITH THERMAL TREATMENT**

The effect of heat treatment and chemical etching on the microstructure and composition evolution as well as on the Giant Magnetoimpedance (GMI) characteristics of ultrathin Co-Fe-Si-B amorphous microfibers was investigated by means of scanning electron microscopy and diagonal GMI component technique. It was shown that a combination of the different processing techniques leads to the significant improvement of microwire's GMI characteristics. The aim of this study was to describe the effect of microstructural transformation on the variation of inductive impedance component.

В.М.ХАТКЕВИЧ, С.А.НИКУЛИН  
НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия  
hatvm87@mail.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ В РАЗЛИЧНОМ СТРУКТУРНОМ СОСТОЯНИИ**

В работе изучена чувствительность к надрезу стали 08X17T после высокотемпературного объёмного азотирования, а также стали 20ГЛ после термического упрочнения закалкой, при испытании на растяжение с регистрацией сигналов акустической эмиссии. Показано, что АЭ является высокочувствительным методом изучения процесса деформации и разрушения образцов с концентратором напряжений независимо от структурного состояния металла. Механизм упрочнения стали 08X17T после высокотемпературного объёмного азотирования и последующего отжига обеспечивает большее сопротивление трещинообразованию при испытании образцов с концентратором напряжений, чем закалка в стали 20ГЛ, при близком уровне прочности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор № RFMEFI57815X0139).*

V.M.KHATKEVICH, S.A.NIKULIN  
NUST "MISIS", Moscow, Russia

## **APPLICATION OF ACOUSTIC EMISSION FOR THE DEFORMATION AND FRACTURE ANALYSIS OF THE STEELS HAVING DIFFERENT STRUCTURES**

The sensitivity to the notch of 08Kh17T steel (type AISI 439) after high-temperature volume nitriding, as well as 20GL steel (type GrA2Q) after thermal hardening by quenching during the tensile test with registration of acoustic emission signals has been studied. It is shown that AE is a highly sensitive method for studying the process of the deformation and fracture of the samples with a stress concentrator regardless of the structural state of the metal. The mechanism of hardening of 08Kh17T steel after high-temperature volume nitriding and subsequent annealing provides greater resistance to cracking when testing specimens with a stress concentrator than hardening of 20GL steel, at a same strength level.

О.Н.СЕВРЮКОВ, А.А.ИВАННИКОВ, В.Е.МИСНИКОВ,  
М.А.ПЕНЯЗЬ, И.В.ФЕДОТОВ, А.С.ПЕКЛИЧ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,  
г. Москва, Россия*  
ivannikov7@rambler.ru

## **ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВА СТЕМЕТ 1301 ДЛЯ СОЕДИНЕНИЯ МОЛИБДЕНА СО СТАЛЬЮ 12Х18Н10Т**

При разработке дивертора токамака с емкостью для подпитки жидким металлом возникает необходимость соединения разнородных материалов. В узле переходника с молибденовой трубки (молибден марки МЧ) на стальную (12Х18Н10Т) предполагается использовать паяное соединение.

В работе рассматривается метод получения прочного и герметичного соединения, способного выдерживать термоциклические нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации. В связи с ограничением по температуре пайки в качестве припоя выбран никелевый сплав СТЕМЕТ 1301 (Ni-3,5Fe-7,5Cr-4,5Si-2,6В, масс.%).

Для определения оптимальных посадочных размеров цилиндрических деталей проведено моделирование сборки под пайку с помощью программного комплекса ANSYS. Рассмотрено распределение напряжений в соединяемой конструкции после проведения процесса пайки.

Термоциклические испытания и исследование герметичности паяных макетных образцов показали, что они обладают высокой термостойкостью в интервале температур 20–400°С.

Экспериментально определено, что предел прочности соединений на срез при соблюдении оптимальных зазоров достигает: 500±50 МПа.



O.N.SEVRYUKOV, A.A.IVANNIKOV, V.E.MISNIKOV,  
M.A.PENYAZ, I.V.FEDOTOV, A.S.PEKLICH.  
*National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow.*

## **THE APPLICATION OF ALLOY STEMET 1301 TO JOIN Mo WITH 12Cr18Ni10Ti**

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 to steel pipe (12Cr18Ni10Ti).

Method considered in this work is the method of producing a durable and airtight connection. It capable of withstanding thermal cycling load that arise during exploitation. Due to a limitation on brazing temperature nickel alloy STEMET 1301 (Ni-3,5Fe-7,5Cr-4,5Si-2,6B, wt.%) is chosen as the brazing alloy.

Using the software package ANSYS the simulation was carried out to determine the optimal landing sizes of cylindrical parts. Stress distribution in the assembly was considered after conducting of brazing process.

Thermal cycling and leakproofness test of brazed layout samples showed that they possess a high thermal resistance in temperature range of 20–400°C.

It was experimentally discovered that shear strength with the condition of optimum gaps is  $500 \pm 50$  MPa.

С.Г.ВАСИЛЬЕВ, А.В.МОЛЯРОВ  
*НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия*  
nf4uqq@gmail.com

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 09Г2С ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

В атомной энергетике большое внимание уделяется разработке пассивных систем защиты для обеспечения безопасности ВВЭР. Одной из таких систем является УЛР – «ловушка расплава». Для моделирования работы такой конструкции и расчетов требуется знать свойства материалов, из которых она изготовлена при высоких температурах.

Известно, что сталь 09Г2С обладает высокими показателями свариваемости и ударной вязкости в широком диапазоне температур. В данной работе проводились высокотемпературные испытания на растяжение образцов стали 09Г2С при температурах от 500 до 750 °С. В работе обсуждаются полученные характеристики механических свойств, характер диаграмм деформации и строение изломов после механических испытаний.

S.G.VASILYEV, A.V.MOLYAROV  
*NUST «MISIS», Moscow, Russia*

## **MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL 09G2S AT HIGH TEMPERATURES**

A lot of attention is paid to development of VVER safety passive systems in nuclear industry. One of them is MLD – «melt trap». It is necessary to know the MLD material properties at high temperatures for work modelling of such devices.

It is known that steel 09G2S has high index of weldability and impact toughness at wide temperature range. Tensile tests of 09G2S samples at temperatures from 500 to 750 °C have been performed. This work discusses obtained characteristics of mechanical properties, character of the stress-strain curves and structure of fracture surface after mechanical tests.

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>4</sup>, Ю.В.ФУНТИКОВ<sup>1</sup>, А.С.ШАРАПОВ<sup>2</sup>,  
М.В.ЧЕРКАЩЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГНЦ «Курчатовский институт» – Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И.Алиханова,

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

<sup>3</sup>Всероссийский институт неорганических материалов им. А.А.Бочвара,

<sup>4</sup>Институт металлургии и материаловедения им.А.А.Байкова,

г.Москва, Россия

al-udovsky1@yandex.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ БЛИЖНЕГО УПОРЯДОЧЕНИЯ И ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ МОДЕЛЬНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА**

Методами ядерного гамма-резонанса и аннигиляции позитронов исследовались изменения ближнего упорядочения и сопутствующие им изменения электронной плотности и дефектообразования. Определены зависимости мессбауэровских параметров от типа сплава. Показано, что имеет место отличие распределение ближайших соседей атомов железа. Исследование распределения дефектов показало слабую зависимость этого распределения от легирования материала.

V.I.GRAFUTIN<sup>1</sup>, I.A.EVSTUKHINA<sup>2</sup>, V.P.KOLOTUSHKIN<sup>3</sup>,  
V.YU.MILOSERDIN<sup>2</sup>, A.YU.MISCHENKO<sup>2</sup>, S.G.RUDAKOV  
A.L.UDOVSKY<sup>4</sup>, YU.V.FUNTIKOV<sup>1</sup>, A..S.SHARAPOV<sup>2</sup>,  
M.V.CHERCASCHENKO<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>SSC “Kurchatov Institute” – Institute of theoretical and experimental physics  
named by A.I.Alikhanov,

<sup>2</sup>National research nuclear university MPhI,

<sup>3</sup>SSC-All-Russian institute of inorganic materials named by A.A. Bochvar,

<sup>4</sup>Institute of metallurgy and material science name by A.A.Baykov,  
Moscow, Russia

## **INVESTIGATION OF SHORT-RANGE ORDERING AND ELECTRON DENSITY CHANGES IN SIMULATING ALLOYS BASED ON IRON**

Changes of short-range ordering and electron density changes and defects generation following short ordering changes were studied by nuclear gamma-resonance and positron annihilation methods. Dependence of messbauer parameters on alloys type was determined. It was shown that the distribution of atoms, neighboring to iron, was non-equivalent to random. Study of defects in the alloys showed a slight dependence of their concentration on material doping.

И.В.ФЕДОТОВ, О.Н.СЕВРЮКОВ, А.Н.СУЧКОВ, Б.А.КАЛИН,  
А.А.ИВАННИКОВ, Ю.М.НЕМЧИНОВ  
*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*

## **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПАЙКА МОЛИБДЕНОВОГО СПЛАВА TZM И ГРАФИТА МПГ-6 ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ АНОДА АППАРАТА КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ**

В настоящее время одной из основных проблем конструирования узлов энергонапряженной техники являются вопросы соединения разнородных материалов. При изготовлении рентгеновских трубок для вращающегося анода аппарата компьютерной томографии требуется надежный метод неразъемного соединения диска из низколегированного сплава TZM с графитовым охладителем. Такое соединение должно функционировать в условиях высоких температур (до 1500 °С) и касательных напряжений, вызванных быстрым вращением анода (до 9000 об/мин).

В данном исследовании для соединения молибденового диска из сплава TZM и графитового охладителя предложен порошковый припой состава Ti-40Zr-8.5Nb-1.5Be (% масс.) и выбран режим пайки (1400 °С, 40 мин). Изучен структурно-фазовый состав паяного шва сплав TZM – графит МПГ-6. Определено влияние поверхностной механической обработки графита на прочность паяного соединения. Проведена оценка термостойкости паяного соединения (в интервале от 20 до 1700 °С). На основании полученных результатов осуществлена пайка макета анода рентгеновской трубки, который на предварительных испытаниях выдержал 5 циклов вращения со скоростью 5000 об/мин. в течении 1 минуты с резкой остановкой за 2 секунды без видимого разрушения.

I.V.FEDOTOV, O.N.SEVRUKOV, A.N.SUCHKOV, B.A.KALIN,  
A.A.IVANNIKOV, U.M.NEMCHINOV  
*NRNU MEPhI, Moscow, Russia*

## **MOLYBDENUM ALLOY TZM AND GRAPHITE MPG-6 BRAZING FOR THE DESIGN OF COMPUTED TOMOGRAPHY DEVICE ANODE**

Currently, the main problems of energy-stressed equipment units designing is the connection of dissimilar materials. A reliable method of permanent connecting for TZM disk with graphite cooler is required for manufacturing rotating anode of X-ray tubes in the computed tomography devices. Such connection should function under conditions of high temperatures (up to 1500 °C) and tangential stresses caused by rapid rotation of the anode (up to 9000 rpm).

In this study, a Ti-40Zr-8.5Nb-1.5Be (% wt.) powder filler metal and brazing mode (1400 °C, 40 min) is proposed to join TZM disk and graphite cooler. The structural-phase composition of the brazed seam TZM – graphite alloy was studied. The influence of surface mechanical treatment of graphite on the strength of the brazed joint was defined. The heat resistance of the soldered joint was estimated (in the range from 20 to 1700 °C). Based on the obtained results, the X-ray tube anode model was brazed, which, in preliminary tests, passed 5 rotation cycles at the speed of 5000 rpm. within 1 minute and a sharp stop in 2 seconds without visible destruction.

А.В. ПОПОВА<sup>1</sup>, В.И. ОДИНЦОВ<sup>1</sup>,  
И.В. КОЗЛОВ<sup>2</sup>, Г.Н. ЕЛМАНОВ<sup>3</sup>,  
Е.В. КОСТИЦИНА<sup>4</sup>, Е.С. ГОРЕЛИКОВ<sup>4</sup>, С.А. ГУДОШНИКОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия;

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия;

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

<sup>4</sup> Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСИС», Москва, Россия;

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МИКРОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА**

В работе проведено изучение семи типов аморфных ферромагнитных микропроводов в стеклянной оболочке с составом металлической жилы  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ , изготовленных методом Улитовского – Тейлора при различных технологических условиях. На основе полученных экспериментальных данных выполнено исследование возможности изготовления микропроводов с заданными магнитными свойствами.

A.V. POPOVA<sup>1</sup>, V.I. ODINTSOV<sup>1</sup>,  
I.V. KOZLOV<sup>2</sup>, G.N. ELMANOV<sup>3</sup>  
E.V. KOSTITSYNA<sup>4</sup> E.S. GORELIKOV<sup>4</sup> and S.A.  
GUDOSHNIKOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup> IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia;

<sup>2</sup> Kurchatov Institute, Moscow, Russia;

<sup>3</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering  
Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>4</sup> National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia;

## **INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON MAGNETIC PROPERTIES OF CO-RICH AMORPHOUS FERROMAGNETIC MICROWIRES**

A study of seven types of glass coated amorphous ferromagnetic microwires with the  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  metal core composition was done. These microwires were manufactured by the Taylor - Ulitovsky method, under various technological conditions. An investigation of the possibility of fabricating microwires with specified magnetic properties was carried out, based on the obtained experimental data.

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>НИЯУ 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>NRNU 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 – МАТЕРИАЛЫ ИННОВАЦИОННОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ: РАЗРАБОТКА, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И ПРИМЕНЕНИЕ.

Материалы 15-й Международной школы-конференции  
для молодых ученых и специалистов.

Москва, 23 – 27 октября 2017 г.

Подписано в печать 12.10.2017. Формат 60х84 1/16.

Печ. л. 11,5 Тираж 220 экз. Заказ №

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Типография НИЯУ МИФИ  
115409, Москва, Каширское ш. 31