

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ: РАЗРАБОТКА, ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

Аннотации лекций и докладов
10-й Международной
школы-конференции
для молодых ученых
и специалистов

Москва, 19 – 23 октября 2015 г.

Москва 2015

УДК 621.039.531 (06)

ББК 31.46в6

М43

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ
ЭКСПЛУАТАЦИИ: РАЗРАБОТКА, ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ.
Аннотации лекций и докладов 10-й Международной школы-конференции
для молодых ученых и специалистов. Москва, 19 – 23 октября 2015 г. М.:
НИЯУ МИФИ, 2015, 132 с.

В настоящем сборнике представлены аннотации лекций и докладов школы-конференции, проводимой в рамках научной сессии НИЯУ МИФИ. 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 поведения конструкционных и функциональных материалов, ядерного топлива в экстремальных условиях эксплуатации, а также вопросы разработки и использования технологий получения, методов исследования и моделирования таких материалов.

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

Подготовлено в рамках проекта № 2.3.2.207 «Развитие Центра “Ядерные системы и материалы”» Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Ответственные за выпуск:

Б.А. Калинин, Г.Н. Елманов, М.С. Стальцов, Т.В. Михайлова.

Аннотации лекций и докладов получены до 01.10.2015, одобрены программным комитетом и издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2172-4

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2015

Подписано в печать 14.10.2015. Формат 60х84 1/16.

Печ. л. 8,25 Тираж 100 экз. Заказ №

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Типография НИЯУ МИФИ

115409, Москва, Каширское ш. 31

Международный организационный комитет

Председатель:

Баннх Олег Александрович – ИМЕТ РАН (Россия)

Алексеев Павел Николаевич – НИЦ «Курчатовский институт» (Россия)

Владимиров Павел – KIT (Германия)

Воеводин Виктор Николаевич – ННЦ ХФТИ (Украина)

Ганченкова Мария Герасимовна – НИЯУ МИФИ (Россия)

Гарнер Фрэнсис А. – REC (США)

Рисованный Владимир Дмитриевич – АО «Наука и инновации» ГК «Росатом» (Россия)

Калин Борис Александрович – НИЯУ МИФИ (Россия)

Максимкин Олег Прокофьевич – ИЯФ (Казахстан)

Лавренюк Петр Иванович – АО ТВЭЛ (Россия)

Салихов Сергей Владимирович – Минобрнауки РФ (Россия)

Троянов Владимир Михайлович – Госкорпорация «Росатом» (Россия)

Ханинен Ханну – Aalto University (Финляндия)

Шао Лин – Texas A&M University (США)

Шорт Майкл – MIT (США)

Штромбах Ярослав Игоревич – НИЦ «Курчатовский институт» (Россия)

Каражанов Смагул Жангабергенович – Институт энергетических технологий (Норвегия)

Программный комитет

Председатель:

Калин Борис Александрович – НИЯУ МИФИ (Россия)

Агеев Валерий Семенович – АО ВНИИНМ (Россия)

Баранов Виталий Георгиевич – НИЯУ МИФИ (Россия)

Долгов Алексей Борисович – АО «ТВЭЛ» (Россия)

Григорьев Евгений Григорьевич – НИЯУ МИФИ (Россия)

Новиков Владимир Владимирович – АО ВНИИНМ (Россия)

Рисованный Владимир Викторович – ГК Росатом (Россия)

Скупов Михаил Владимирович – АО ВНИИНМ (Россия)

Тихомиров Георгий Валентинович – НИЯУ МИФИ (Россия)

Чернов Иван Ильич – НИЯУ МИФИ (Россия)

Гарнер Фрэнсис А. – REC (USA)

Лин Шао – Texas A&M University (США)

Шорт Майкл – MIT (США)

Олевский Евгений Александрович – НИЯУ МИФИ, Университет Сан-Диего (США)

СОДЕРЖАНИЕ

АННОТАЦИИ ЛЕКЦИЙ	5
АННОТАЦИИ ДОКЛАДОВ	35
СЕКЦИЯ 1. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ: СТАЛИ, ЦИРКОНИЕВЫЕ СПЛАВЫ, ВАНАДИЕВЫЕ СПЛАВЫ, ТУГОПЛАВКИЕ СПЛАВЫ	35
СЕКЦИЯ 2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ЯДЕР- НОЕ ТОПЛИВО	61
СЕКЦИЯ 3. ТЕХНОЛОГИЯ: ПАЙКА, СВАРКА, ПРЕССОВАНИЕ, ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА...	85
СЕКЦИЯ 4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРО- ВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ	115

CONTENTS

ABSTRACTS OF LECTURES.....	5
ABSTRACTS OF REPORTS.....	35
SECTION 1. STRUCTURAL MATERIALS: STEELS, ZIRCONIUM ALLOYS, VANADIUM ALLOYS, REFRACTORY ALLOYS.....	35
SECTION 2. FUNCTIONAL MATERIALS, NUCLEAR FUEL..	61
SECTION 3. TECHNOLOGY: BRAZING, WELDING, PRESSING, ION-PLASMA TREATMENT	85
SECTION 4. METHODS OF RESEARCH AND MODELING OF MATERIALS	115

АННОТАЦИИ ЛЕКЦИЙ
ABSTRACTS OF LECTURES

О.А. БАННЫХ, В.М. БЛИНОВ, Е.И. ЛУКИН
*ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова
РАН, г. Москва, Россия*

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ СТАЛИ СО СТРУКТУРОЙ АЗОТИСТОГО МАРТЕНСИТА

Новым направлением в металловедении высокопрочных коррозионно-стойких сталей является использование азота в качестве основного легирующего элемента, позволяющего одновременно повысить коррозионную стойкость, механические свойства сталей и улучшить их технологичность. Разработанные в ИМЕТ РАН принципы легирования азотосодержащих сталей, позволили создать новые высокопрочные коррозионностойкие свариваемые и технологичные при пластической деформации стали 0X16АН5Б, 06X16АН4ФД, 08X14АН4МДБ, 09X16АН3МФ, 27X15АН3МД2, 40X13АН3М2 и 19X14АМБ, работоспособные при температурах от -70 до +400°C. Исследованы влияние термической обработки на структуру и свойства этих сталей. Разработанные азотосодержащие стали по сравнению с аналогичными углеродистыми сталями имеют более высокую стойкость против питтинговой и щелевой коррозии, устойчивы против коррозионного растрескивания под напряжением. Новые стали успешно прошли опытно-промышленное опробование в качестве высоконагруженных изделий.

О.А. BANNYKH, V.M. BLINOV, E.I. LUKIN
Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of RAS, Moscow, Russia

HIGH-STRENGTH ECONOMICALLY ALLOYED CORROSION-RESISTANT STEELS WITH THE STRUCTURE OF NITROGEN MARTENSITE

The use of nitrogen as the main alloying element allowing one both to increase the corrosion resistance and mechanical properties of steels and to improve their processability is a new trend in physical metallurgy of high-strength corrosion resistant steels. The principles of nitrogen steel alloying, which are developed in IMET RAS, ensure the formation of the structure, which contains predetermined amounts of martensite (70-80%) and austenite (20-30%) and is free from δ -ferrite, σ -phase, and Cr_{23}C_6 carbide. These principles were used as the base for the creation of new high-strength corrosion-resistant weldable and deformable 0Kh16AN5B, 06Kh16AN4FD, 08Kh14AN4MDB, 09Kh16AN3MF, 27Kh15AN3MD2, 40Kh13AN3M2, and 19Kh14AMB steels, which are operative at temperatures ranging from -70 to 400°C. The developed nitrogen-containing steels compared with similar carbon steels are characterized by a higher resistance to pitting and crevice corrosion and are resistant to stress corrosion cracking. The new steels successfully passed trial tests as heavy duty articles.

А.Б. ДОЛГОВ, Ю.А. КУКУШКИН, А.В. УГРЮМОВ
Топливная компания «ТВЭЛ», г. Москва, Россия

ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ АЭС С ВВЭР. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ

Представлены структура, роль в мировом рынке ядерного топлива и основные цели, стоящие перед Топливной компанией «ТВЭЛ». Достижение указанных целей требует постоянного развития существующих конструкций и разработки новых тепловыделяющих сборок (ТВС) для различных типов энергетических реакторов. Перечислены направления работ в обеспечение решения основных технических задач:

1. Обеспечение геометрической стабильности конструкции ТВС (для ВВЭР-1000).
2. Повышение эксплуатационного ресурса ТВС.
3. Повышение эксплуатационной надежности ТВС.
4. Создание разборных (ремонтпригодных) ТВС.
5. Реализация безопасных и экономически эффективных топливных циклов.

Более подробно рассмотрены проблемы повышения глубины выгорания, повышения тепловой мощности реакторных установок, маневренные режимы эксплуатации АЭС и работы по развитию технологий изготовления ядерного топлива. В рамках концепции «нулевого дефекта твэлов» проведен анализ основных факторов, влияющих на показатели надежности топлива.

Технико-экономические характеристики ядерного топлива ВВЭР соответствуют уровню мировых производителей ядерного топлива для энергетических реакторов PWR. Проводится дальнейшая работа по развитию и совершенствованию конструкций твэлов и ТВС ВВЭР, конструкционных и топливных материалов.

A.B. DOLGOV, Y.A. KUKUSHKIN, A.V. UGRYUMOV
JSC "TVEL", Moscow, Russia

NUCLEAR FUEL FOR NPPs WITH VVER: A STATUS AND PERSPECTIVE DESIGN

The structure, role in the nuclear fuel market and the main objectives of the TVEL Fuel Company are presented. The achievement of these objectives requires continuous development of existing FA designs for various power reactors. Main activities to provide solutions of technical problems are as follows:

1. Provision of geometric stability of FA design (for VVER-1000).
2. Improvement of FA lifetime.
3. Improvement of the FA operational reliability.
4. Development of dismountable (repairable) FA.
5. Implementation of safe and economically effective fuel cycles.

Increasing the fuel burnup, increasing the thermal power of reactor units, maneuvering modes of NPP operation and the development of production technologies are reviewed more in detail. The major factors affecting the reliability of fuel are analyzed in the frame of the concept of "zero failure of fuel rods".

Technical and economic characteristics of VVER nuclear fuel correspond to the level of world manufactures of nuclear fuel for PWR reactors. Further work to develop and improve designs of VVER fuel rods and FAs, structural and fuel materials is being done.

**ВТОРОСТЕПЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ ВО ВНУТРЕННИХ
КОМПОНЕНТАХ РЕАКТОРОВ PWR ИЗ АУСТЕНИТНЫХ
СТАЛЕЙ, ПРИОБРЕТАЮЩИЕ ПЕРВОСТЕПЕННОЕ
ЗНАЧЕНИЕ ПРИ БОЛЕЕ ВЫСОКИХ УРОВНЯХ
ПОВРЕЖДЕНИЯ, СВЯЗАННЫХ С УВЕЛИЧЕНИЕМ СРОКА
ЭКСПЛУАТАЦИИ ДО 60-80-ЛЕТ**

Аустенитные нержавеющие стали, особенно AISI 304 и 316, применяются для изготовления элементов активной зоны реакторов с водой под давлением. В некоторых других типах реакторов, в том числе в реакторах CANDU, такие сплавы, как Inconel 600, 718 и X-750 также использовались для изготовления элементов активной зоны. За 40 лет эксплуатации детали тепловыделяющих сборок реакторов с водой под давлением подвергаются высокой степени радиационного повреждения (40-100 сна). Увеличение срок службы реакторов до 60 или 80 лет приведет, соответственно, к большему уровню радиационного повреждения.

В течение 40 лет лицензирования к проблемам первой степени важности относились следующие проблемы: охрупчивание, коррозионное растрескивание под напряжением при облучении и радиационная ползучесть. Также был признан ряд проблем второй степени важности, но не считалось, что эти проблемы ограничивают срок службы ядерного реактора и они не считались опасными. Тем не менее, нелинейный характер ряда процессов второй степени важности дает повод для беспокойства, так как при увеличении срока службы ядерных реакторов они могут превратиться в проблемы первой степени важности. Кроме того, два процесса второй степени важности, которые могут превратиться в процессы первой степени важности, проявляются гораздо сильнее с точки зрения характеристики сильной термализации нейтронного спектра реакторов CANDU, особенно для никелевых сплавов.

Первый из этих процессов второй степени важности - явление распухания, вызванное миграцией пузырьков и пор, которое является сильно нелинейным и не насыщаемым процессом. Распухание в конечном итоге приводит к новому серьезному механизму разрушения сталей 300-й серии. Второй из этих процессов второй степени важности - постепенное содействие переходу посредством трансмутации пяти природных изотопов никеля в изотопы с более высокой атомной массой. Одним из продуктов этой трансмутации является наработка ^{59}Ni , неприродного изотопа, концентрация которого продолжает увеличиваться до тех пор, пока не будет достигнут флюенс тепловых нейтронов около 4×10^{22} нейтр./см².

Наработка ^{59}Ni приводит к очень высокой и непрерывно ускоряющейся скорости образования гелия и водорода, что одновременно происходит, в общем, с неизвестным увеличением скорости смещения атомов и повышенным ядерным нагревом, причем последние два процесса вытекают из сильно экзотермической природы реакций ^{59}Ni (n, α) и (n, p). В ядерных реакторах с охлаждением тяжелой водой эти процессы становятся очень важными для никелевых сплавов, таких как Inconel X-750.

Третий процесс является хорошо известной в настоящее время тенденцией водорода накапливаться в пузырьках и порах и из-за увеличения накопления образовывать высокую плотность пузырьков не только в матрице, но и особенно на границах зерен. По мере увеличения количества пузырьков происходит разупрочнение границ зерен, но что еще более важно, трещины, движущиеся вдоль границ зерен, будут пересекаться с полостями, заполненными водородом, что может привести к ускоренному растрескиванию.

Четвертый процесс - постепенное радиационно-индуцированное движение сталей 300-й серии к стресс-индуцированной нестабильности мартенсита, особенно при очень высоких степенях повреждений. В то время как сплавы на основе никеля не склонны к этому явлению, они склонны к пятому процессу, в котором фазы, упрочняющие матрицу, постепенно разрушаются под действием нейтронного облучения, что приводит к разупрочнению сплава.

Эти процессы второй степени важности, которые могут стать процессами первой степени важности, уже начали заметно проявляться. Основываясь на известных параметрических зависимостях этих пяти процессов, ожидается, что они будут, скорее всего, взаимодействовать очень синергическим образом. Эти процессы следует активно изучать, прежде чем они станут по-настоящему процессами первой степени важности.

**SECOND-ORDER PHENOMENA IN AUSTENITIC INTERNAL
COMPONENTS GROWING TO FIRST ORDER IMPORTANCE
AT THE HIGHER DAMAGE LEVELS ASSOCIATED WITH
PWR PLANT LIFE EXTENSION TO 60 OR 80 YEARS**

Austenitic steels form the internals that frame and support cores of pressurized water reactors. The near-core portion of the baffle-former assembly receives 40-100 dpa over a 40-year life-time. Extending the lifetime to 60-80 years will lead to correspondingly higher exposures.

Within the 40 year licensing period a number of issues of first-order importance have been addressed, especially embrittlement, IASCC and irradiation creep. A number of second-order issues have been recognized but not considered to be life-limiting or deleterious. However, the non-linear nature of a number of second-order processes gives cause to worry that they might become first-order with extension of PWR life-times.

The first second-order process is void swelling which is a non-linear, non-saturable process. The second of these processes is the progressive transmutation of the five naturally occurring isotopes of nickel. One consequence is the production of Ni-59, a non-naturally-occurring isotope that increases in concentration until a thermal neutron fluence of $\sim 4 \times 10^{22}$ n/cm² has been reached. The consequences of Ni-59 production are very high and accelerating production of helium and hydrogen, concurrent with a generally unrecognized increasing rate of atomic displacement and increased nuclear heating, the latter two consequences arising from the highly exothermic nature of the Ni-59 (n, α) and (n, p) reactions.

The third process is the tendency of hydrogen to be stored in helium-nucleated cavities, with increasing storage promoting formation of very high densities of bubbles in the matrix but also on grain boundaries with possible consequences on cracking.

The fourth process is the generally unrecognized but progressive radiation-induced movement of 300 series steels toward stress-induced martensitic instability, especially at very high damage levels.

These processes have already begun to reveal their growing presence. Based on the parametric dependencies of these processes it is expected that they will interact in a very synergistic manner. These processes should be studied proactively before they become truly first-order in importance.

А.Л. УДОВСКИЙ^{1,2}

¹*ФГБУ ИМЕТ РАН им. А.А.Байкова, г. Москва, Россия*

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

**ВЗАИМОСВЯЗЬ АНИЗОТРОПИИ СПИНОВОЙ
ПЛОТНОСТИ В ОЦК РЕШЕТКЕ Fe И РАЗМЕРНОГО
ФАКТОРА В СИСТЕМАХ Fe- (Cr, V, Mo, W) – КАК
ГЛАВНЫЙ ФАКТОР ВОЗНИКНОВЕНИЯ БЛИЖНЕГО
ПОРЯДКА И СЕГРЕГАЦИЙ НА МАЛО-УГЛОВЫХ
ГРАНИЦАХ ОБЛАСТЕЙ КОГЕРЕНТНОГО
РАССЕЯНИЯ/СУБ-ЗЕРЕН**

Установлено, что взаимосвязь анизотропии спиновой плотности в ОЦК-решетке чистого железа и размерный фактор в системах Fe- (CrV, Nb, Mo, Ta, W) являются основными факторами возникновения ближнего порядка и сегрегаций на границах блоков когерентного рассеяния или на маломугловых границах суб – зерен и зерен.

A.L. UDOVSKY^{1,2}

¹*Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of RAS, Moscow, Russia*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

**THE COUPLING BETWEEN ANISOTROPY OF SPIN-DENSITY
IN BCC- LATTICE OF PURE Fe AND DIMENSION FACTOR IN
THE Fe- (Cr, V, Mo, W) SYSTEMS - AS MAIN FACTOR OF THE
APPEARANCE OF SHORT-RANGE ORDER AND
SEGREGATIONS ON SMALL-ANGULAR BOUNDARIES OF
COHERENT DISSIPATIONS AREAS/SUB-GRAINS**

It is installed that the coupling between anisotropy of spin- density in bcc-lattice of pure Fe and dimension factor in the Fe- (Cr V, Mo, W) systems are a main factor of the origin of the arising of short – range order parameter and segregation on grain of block coherent dissipation or small-angle grain boundaries.

В.М. ТРОЯНОВ, Л.М. ЗАБУДЬКО, А.Ф. ГРАЧЕВ,
О.В. ЖДАНОВА

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии
«Росатом» «ИТЦП «ПРОРЫВ», г. Москва, Россия*

ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ГК «РОСАТОМ»

Согласно принятому современному пониманию под ядерным топливом будем понимать сборочную единицу активной зоны – тепловыделяющую сборку (ТВС) с входящими в её состав конструктивными элементами ТВС, твэлами, топливным сердечником, конструктивными материалами твэлов и ТВС. Процесс лицензирования включает в себя обоснование безопасного использования предлагаемых модификаций, в том числе расчётное и экспериментальное обоснование работоспособности модифицированных изделий в нормальных условиях эксплуатации и при нарушениях нормальных условий, включая аварии. Кроме обоснования собственно модифицированных изделий, необходимо показать влияние модификаций на работоспособность и безопасность других компонентов РУ и АЭС, например на работу систем контроля герметичности оболочек (КГО) твэлов, транспортно-технологические операции (ТТО) при обращении с модифицированным топливом, обосновать новые нормы хранения топлива и многое другое. Наконец, модифицированное топливо должно отвечать действующим нормам и правилам, что часто становится совсем сложной задачей хотя бы потому, что в действующих нормах и правилах, например НП-082-07, вносимые модификации могут быть не предусмотрены в принципе и соответствовать вносимые изменения и новые разработки нормам и правилам не могут ни при каких обстоятельствах. Единственным решением здесь может быть внесение изменений в нормы и правила, что является процессом сложным и длительным и требует в свою очередь глубокого обоснования вносимых изменений. Некоторые аспекты лицензирования нового ядерного топлива рассмотрены на примере применения смешанного нитридного уран-плутониевого топлива (СНУП) для РУ «БРЕСТ».

V.M. TROYANOV, L.M. ZABUDKO, A.F. GRACHYOV,
O.V. ZHDANOVA

*Institution "Innovation and Technology Center by "PRORYV" Project, State
Atomic Energy Corporation "Rosatom", Moscow, Russia*

THE STAGES OF STATE ATOMIC ENERGY CORPORATION "ROSATOM" NEW NUCLEAR FUEL FABRICATION

According to the accepted current understanding under the nuclear fuel we will consider the assembled active zone unit (Fuel assembly) with its structural elements, fuel rods, pellet column, structural materials of fuel rods and fuel assemblies. The licensing process includes justification of safe application of the proposed modifications, including design-basis and experimental justification of the modified items under normal operating conditions and in violation of normal conditions, including accidents as well. Besides the justification of modified units itself, it is required to show the influence of modifications on the performance and safety of the other Reactor Unit' and Nuclear Plant' elements (e.g. burst can detection system, transportation and processing operations during fuel handling), as well as to justify the new standards of fuel storage etc. Finally, the modified fuel should comply with the applicable regulations, which often becomes a very difficult task, if only because those regulations, such as the NP-082-07, are not covered modification issues. Making amendments into regulations can be considered as the only solution, but the process is complicated and requires deep grounds for amendments. Some aspects of licensing new nuclear fuel are considered the example of mixed nitride uranium –plutonium fuel application for the BREST reactor unit.

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И РЕАКТОРОВ IV ПОКОЛЕНИЯ

В настоящее время выполняется корректировка энергетической стратегии России на период до 2035 года (ЭС-2035). Это относится и к ее неотъемлемой части – ядерной энергетике (ЯЭ). Реальное состояние ЯЭ страны, ее внутренний потенциал развития, накапливающиеся проблемы и риски, необходимость детальной проработки вопросов переходного периода на рубеже 2030-х годов определяют необходимость актуализации «Стратегии развития ядерной энергетики России». ЯЭ является высокотехнологической областью, в которой Россия является одним из лидеров на протяжении длительного периода, и ее дальнейшее развитие важно не только с точки зрения энергетической безопасности и улучшения структуры топливно-энергетического баланса страны, но и для сохранения технологического лидерства в данной области.

Основные проблемы развития ЯЭ связаны со сравнительно высокими затратами на производство энергии на АЭС, необходимостью обеспечения гарантий безопасности и нераспространения, ограниченностью отечественной сырьевой базы ядерной энергетики, необходимостью утилизации и переработки накапливающегося отработавшего ядерного топлива ОЯТ, безопасным обращением с радиоактивными отходами и их надежным захоронением с учетом экологических требований. Полный потенциал ЯЭ деления может быть реализован только в целостной системе, способной к эффективному использованию энергетического ресурса урана-238 и тория-232.

Международный форум «Поколение IV» (GIF-4) – это одна из наиболее крупных инициатив, направленная на развитие международного сотрудничества в области инновационной ядерной энергетики. Ядерные реакторы IV поколения в системе ЯЭ должны обеспечить в XXI веке устойчивую генерацию энергии, экономическую эффективность, безопасность, надежность, нераспространение и физическую защиту. Мировая экспертиза выбрала для разработки и демонстрации к 2030 году шесть инновационных реакторных технологий Поколения IV:

- (1) Система с быстрым натриевым реактором (SFR);
- (2) Система со сверхвысокотемпературным газоохлаждаемым реактором (VHTR);
- (3) Система с газоохлаждаемым быстрым реактором (GFR);
- (4) Система с легководным реактором со сверхкритическими параметрами теплоносителя (SCWR);
- (5) Система с быстрым реактором, охлаждаемым теплоносителем на основе свинца или его сплавов (LFR);
- (6) Система с жидкосолевым (расплавносолевым) реактором (MSR).

STRATEGY OF DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER AND REACTORS OF GENERATION IV

Currently the adjustment of the power strategy of Russia for the period until 2035 (PS-2035) is carried out. This applies to its essential parts – nuclear power (NP). The real state of the country NP, its internal development potential, the accumulated challenges and risks, the need for a detailed study of the issues of the transitional period at the turn of 2030 will determine the need for actualization a "Strategy of nuclear power development of Russia". NP is a high-tech area in which Russia is one of the leaders for a long period, and its further development is not only important from the point of view of energy security and improvement of structure of fuel and energy balance of the country, but also for preserving technological leadership in this field.

Basic problems of development of NP is associated with relatively high costs for energy production at nuclear power plants, the need to guarantee the security and non-proliferation, the limited domestic resource base of nuclear power, the need for processing and recycling of accumulated spent nuclear fuel, safe management of radioactive waste and their reliable disposal with regard to environmental requirements. The full potential of the NP can be implemented only in a holistic system, capable of efficient use of energy resource of uranium-238 and thorium-232.

International forum "Generation IV" (GIF-4) is one of the major initiatives aimed at developing international cooperation in the field of innovative nuclear power. Nuclear reactors of Generation IV in the system of NP in the XXI century must ensure sustainable power generation, economic efficiency, safety, reliability, nonproliferation and physical protection. Global expertise chose for development and demonstration by 2030 six innovative reactor technologies - Generation IV:

- (1) System with sodium fast reactor (SFR);
- (2) System with very high temperature gas-cooled reactor (VHTR);
- (3) System with gas-cooled fast reactor (GFR);
- (4) System with supercritical water reactor (SCWR);
- (5) System with lead - cooled fast reactor (LFR);
- (6) System with molten salt reactor (MSR).

ПОГЛОЩАЮЩИЕ НЕЙТРОНЫ МАТЕРИАЛЫ С НЕОГРАНИЧЕННОЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ

За основной критерий при оценке радиационной стойкости поглощающих нейтроны материалов принимается их размерная стабильность при нахождении в активной зоне ядерных реакторов. При этом размерная стабильность должна быть обеспечена как в стационарных, так и в аварийных режимах, связанных с перегревом вплоть до температуры 1200°C.

Разработан новый класс поглощающих нейтроны материалов на основе оксидов редкоземельных и тугоплавких материалов с разупорядоченной флюоритной структурой с широкой областью гомогенности входящих в него компонентов $n\text{Ln}_2\text{O}_3m\text{MeO}_2$. Для ядерных реакторов на тепловых нейтронах и реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300 в качестве редкоземельных элементов предложено использовать гафнат диспрозия состава 50%Dy₂O₃50%НfО₂.

Теоретически и экспериментально подтверждена практически неограниченная радиационная стойкость таблеток гафната диспрозия при облучении до флюенса быстрых нейтронов $2 \times 10^{23} \text{см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$), что объясняется наличием большого количества стехиометрических вакансий кислорода (до 25%) в кристаллической решетке, большой ее исходной дефектностью.

Высокую радиационную стойкость имеют и дисперсные поглощающие нейтроны материалы на основе оксидов редкоземельных элементов в металлических тугоплавких матрицах $\text{Ln}_2\text{O}_3 + \text{Me}$. В условиях активных зон ядерных реакторов на быстрых нейтронах размерная стабильность определяется распуханием металлической матрицы. После облучения образцов 50%Eu₂O₃ + 50%Мо флюенсом быстрых нейтронов $1 \times 10^{23} \text{см}^{-2}$ ($E > 0,1 \text{ МэВ}$) увеличение объема не превышало 4%. Перспективной является композиция Eu₂O₃ + Со, которая после облучения может быть использована в качестве активного сердечника для гамма-источников.

D.V. RISOVANYI

CJSC "Science and Innovation" of the State Corporation "Rosatom", Russia

THE NEUTRON ABSORBING MATERIALS WITH AN UNLIMITED RADIATION RESISTANCE

When estimating the radiation resistance of neutron absorbing materials, their dimensional stability in the core of nuclear reactors is taken as the main criterion. At that, the dimensional stability must be ensured both in stationary and emergency conditions associated with an overheating up to the temperature of 1200 °C.

A new class of neutron absorbing materials on the basis of oxides of rare earth and refractory materials with a disordered fluorite structure and a wide range of homogeneity of its components such as $n\text{Ln}_2\text{O}_3m\text{MeO}_2$ has been developed. Dysprosium hafnate of the composition of 50% Dy_2O_3 50% HfO_2 has been proposed to use as rare earth elements for the thermal neutron reactors and the BREST-OD-300 fast neutron reactor with a lead coolant.

A practically unlimited radiation resistance of the tablets of dysprosium hafnate under irradiation by fast neutrons to a fluence up to $2 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$), which is explained by a large number of stoichiometric oxygen vacancies (up to 25%) in the crystal lattice and its big defect structure, has been confirmed theoretically and experimentally.

Dispersed neutron absorbing materials based on oxides of rare earth elements in the refractory metal matrixes of $\text{Ln}_2\text{O}_3 + \text{Me}$ have a high radiation resistance. In conditions of the cores of fast neutron reactors, the dimensional stability is determined by swelling of the metal matrix. An increase of the volume of "50% Eu_2O_3 +50%Mo" samples did not exceed 4% after their irradiation by fast neutrons to a fluence of $1 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ ($E > 0.1 \text{ MeV}$). The composition of $\text{Eu}_2\text{O}_3 + \text{Co}$ which can be used as an active core for gamma sources after irradiation is prospective.

О.Н. СИЗОНЕНКО¹, Е.Г. ГРИГОРЬЕВ², А.Д. ЗАЙЧЕНКО¹,
Н.С. ПРИСТАШ¹, А.С. ТОРПАКОВ¹, Е.В. ЛИПЯН¹, В.А. ТРЕГУБ¹,
А.Г. ЖОЛНИН², А.В. ЮДИН², А.А. КОВАЛЕНКО¹

¹ *Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, Украина*

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

ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ДИСПЕРСНОУПРОЧНЕННЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ЧАСТИЦАМИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Новый подход в разрабатываемых плазменных технологиях сводится к тому, что дисперсноупрочняющие добавки (в частности – TiC, TiB₂) не вводятся механически в порошковую смесь в качестве дополнительного компонента при смешивании порошков, как в известных методах, а образуются при высоковольтных электрических разрядах (ВЭР) в дисперсной системе «углеводородная жидкость – порошок», а сохранность ультрадисперсной структуры обеспечивается в процессе консолидации методом искро-плазменного спекания (ИПС).

ВЭР в дисперсной системе «углеводородная жидкость – порошок» за счет действия плазменного канала, электромагнитных полей, механического воздействия ударных волн, гидропотоков и объемной микрокавитации приводит к синтезу наноуглерода, диспергированию порошков металлов и синтезу бимодально распределенных микро- (от 10⁻⁶ до 10⁻⁷ м) и наноразмерных (от 10⁻⁷ до 10⁻⁹ м) композиционных порошков упрочняющих фаз.

При ИПС с отличительными особенностями, заключающимися в пропуске пульсирующего тока (суперпозиция постоянного и переменного тока) через порошок при одновременном механическом уплотнении, возбуждается плазмообразование в газовой фазе, заполняющей промежутки между частицами. ИПС позволяет целенаправленно контролировать скорость роста зерен и тем самым получать многофункциональные дисперсноупрочненные наноструктурированными частицами композиционные материалы.

Процессы ВЭР синтеза микро- и наноразмерных порошков новых соединений из элементарных порошков металлов и их смесей и дальнейшее применение высокоскоростного ИПС полученных порошков создают условия для повышения прочности (на 10–20 %), твердости и износостойкости (на 30–60 %) получаемых материалов.

O.N. SIZONENKO¹, E.G. GRIGORYEV², A.D. ZAICHENKO¹,
N.S. PRISTASH¹, A.S. TORPAKOV¹, YE.V.LIPYAN¹,
V.A. TREGUB¹, A.G. ZHOLNIN², A.V. YUDIN²,
A.A. KOVALENKO¹

¹ *Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv, Ukraine*

² *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

PLASMA TECHNOLOGIES OF OBTAINMENT OF MULTIFUNCTIONAL COMPOSITE MATERIALS, DISPERSION-HARDENED BY NANOPARTICLES

The new approach in developed plasma technologies consists in that dispersion-hardening additives (TiC, TiB₂ in particular) are not mechanically added to powder mixture as additional component, as in conventional methods, but are instead synthesized during high voltage electric discharges (HVED) in disperse system “hydrocarbon liquid – powder”; preservation of ultrafine structure is ensured due to use of spark plasma sintering (SPS) as a consolidation method.

HVED in disperse system “hydrocarbon liquid – powder” due to impact of plasma discharge channel, electromagnetic fields, shock waves mechanical impact, hydro flows and volume microcavitation leads to synthesis of nanocarbon, metal powders dispersion and synthesis of micro- (from 10⁻⁶ to 10⁻⁷ m) and nanosized (from 10⁻⁷ to 10⁻⁹ m) composite powders of hardening phases.

SPS is the passage of pulsed current (superposition of direct and alternating current) through powder with the simultaneous mechanical compressing. The formation of plasma is initiated in gaseous phase that fills gaps between particles. SPS allows targeted control of grain growth rate and thus allows obtainment of multifunctional composite materials dispersion hardened by nanoparticles.

Processes of HVED synthesis of micro- and nanosized powders of new compositions from elemental metal powders and their mixtures with the subsequent application of high-speed SPS of obtained powders create conditions for increase of strength (by 10 – 20 %), hardness and wear-resistance (by 30 – 60 %) of obtained materials.

М. ШОРТ

Массачусетский Технологический Институт, г. Бостон, США

РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ, СТОЙКИХ К ОСАЖДЕНИЮ ПРОДУКТОВ КОРРОЗИИ

Засорение или осаждение продуктов коррозии на топливных стержнях продолжает создавать проблемы для атомной энергетики. Это особенно проблематично в Соединенных Штатах, так как электростанции работают в условиях рыночной экономики, создающей дополнительное давление для уменьшения рентабельности и увеличения теплопередачи. Истоками засорения является осаждение продуктов коррозии с других внутренних поверхностей реакторов на топливные стержни вследствие сочетания кипения с прилипанием к поверхности. Хорошо известно, что уменьшение кипения уменьшает степень загрязнения отложениями, хотя так в США не считают.

В настоящее время наша научная группа подходит к проблеме засорения с точки зрения снижения адгезии материала и с точки зрения контроля. Силы адгезии между частицами продуктов отложений и поверхностями оболочек непосредственно измеряются с помощью силовой спектроскопии в атомно-силовом микроскопе (AFM-FS). Новые материалы, в том числе карбиды, нитриды и более экзотические покрытия, проходят в настоящее время испытания в качестве потенциальных материалов, обладающих стойкостью к отложению загрязнений на их поверхности.

Сейчас исследуются такие материалы, как ZrN, ZrC, TiN и TiC, так как степень прилипания продуктов коррозии к их поверхности существенно меньше. Уже проводятся испытания этих материалов в реакторной петле с водой под давлением, чтобы квалифицировать стойкость этих материалов к коррозии и отложению продуктов коррозии на их поверхности. В реакторной петле моделируются все термические и химические условия, а также условия работы теплоносителя ядерного реактора с водой под давлением (PWR), за исключением только нейтронного облучения.

M. SHORT

Massachusetts Institute of Technology, Boston , USA

THE DEVELOPMENT OF FOULING-RESISTANT MATERIALS FOR NUCLEAR REACTORS

Fouling, or the deposition of corrosion products on fuel rods, continues to create challenges for nuclear power operation. It is particularly problematic in the United States, as power plants are run in a market economy, providing extra pressure to decrease operating margins and increase heat transfer.

The origins of fouling lie in the deposition of corrosion products from other reactor internal surfaces on the fuel rods, due to a combination of boiling and surface adhesion. It is well known that reducing boiling reduces fouling deposits, though this is not an option in the U.S. Instead, our group is approaching the problem of fouling from a perspective of adhesion reduction and control.

Adhesion forces between particles of foulants and cladding substrates are directly measured using force spectroscopy in an atomic force microscope (AFM-FS). New materials, including carbides, nitrides, and more exotic coatings are being tested as potentially fouling-resistant. Trends observed include greatly reduced adhesion for ZrN, ZrC, TiN, and TiC. Tests are also underway to qualify the corrosion- and fouling-resistance of these materials in a pressurized water reactor loop, which simulates all the thermal, fluid, and chemical conditions inside a pressurized water reactor (PWR) except for the radiation.

ОРЕЛИ ЖАНТИЛЬ

*Центр ядерных и материаловедческих наук, Унив. Париж-Юг и ИЦНИ,
Университет Париж-Сакле, Орсей, Франция*

СОЗДАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛООКСИДОВ В СПЛАВАХ Fe-Cr С ПОМОЩЬЮ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

ДУО (дисперсно-упрочненные оксидами) стали, в которых упрочнение достигается введением в матрицу стали наночастиц окислов металлов (чаще всего - иттрия и титана), являются перспективными конструкционными материалами будущих атомных и термоядерных реакторов. Значительный интерес для дальнейшего улучшения свойств ДУО сталей и совершенствования способов их приготовления представляет выяснение конкретных физических механизмов образования частиц оксидов. Четкое понимание этих механизмов позволит оптимизировать и, возможно, заметно удешевить производство таких сталей, что откроет возможности для их широкого промышленного применения. Привлекательным экспериментальным подходом, позволяющим подробно исследовать механизмы синтеза наночастиц в контролируемых условиях, является метод ионной имплантации. В данном докладе, на основе работ по синтезу наночастиц оксида алюминия в модельных сплавах типа Fe-Cr, рассказывается о возможностях и достоинствах этого подхода.

Высокочистый модельный сплав Fe-10Cr был имплантирован ионами Al и O при комнатной температуре и продемонстрировал целый ряд интересных и неожиданных результатов. Например, наблюдения образующейся микроструктуры с помощью просвечивающей электронной микроскопии показали, что наночастицы начинают выпадать в матрице Fe-Cr уже в процессе ионной имплантации при комнатной температуре. Это крайне необычно, поскольку стандартный метод синтеза ионного пучка предполагает дополнительный последующий высокотемпературный отжиг для того, чтобы вырастить частицы новой фазы из имплантированных атомов. Зарождение и рост наблюдаемых наночастиц, имеющих диаметр до нескольких нм, указывает на подвижность имплантированных атомов уже при комнатной температуре, что является, очевидно, следствием радиационно-стимулированной диффузии. В состав наблюдаемых наночастиц входили не только алюминий и кислород, но и один из матричных элементов (хром). Это указывает на то, что основные составляющие стали могут играть очень разную роль в синтезе нановыделений. Еще одной необычной особенностью, выявленной высоко-разрешающими ПЭМ экспериментами, является неравновесная кристаллографическая структура частиц оксида алюминия (кубическая решетка типа γ -Al₂O₃ вместо обычной решетки корунда). В докладе будет представлен также ряд других необычных наблюдений, способствующих лучшему пониманию особенностей механизмов зарождения и роста наночастиц.

Исходя из полученных экспериментальных результатов и существующих литературных данных, в докладе обсуждается возможный механизм образования ансамбля наноразмерных оксидных частиц в ДУО сплавах.

Полученные для модельных сплавов результаты могут быть достаточной обоснованно экстраполированы и на промышленные материалы. Действительно, ионная имплантация адекватно воспроизводит многие ключевые аспекты микроструктурных процессов, протекающих в материале при обычной технологии производства ДУО стали методами порошковой металлургии.

AURÉLIE GENTILS

CSNSM, Univ Paris-Sud and CNRS, Université Paris-Saclay, Orsay, France

NANO-SIZE METALLIC OXIDE PARTICLE SYNTHESIS IN FE-CR ALLOYS BY ION IMPLANTATION

ODS (Oxide Dispersed Strengthened) steels reinforced with metal dispersions of nano-oxides (based on Y, Ti and O elements) are promising structural materials for future nuclear reactors. The detailed understanding of the mechanisms involved in the precipitation of these nano-oxides would improve manufacturing and mechanical properties of these 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 report demonstrates the feasibility and advantages of the ion beam synthesis approach as applied to aluminium oxide particle synthesis in Fe-Cr model alloys.

High purity Fe-10Cr alloys were implanted with Al and O ions at room temperature and demonstrated quite a number of interesting and unexpected results. For example, transmission electron microscopy observations demonstrated that the nano-oxides had appeared in the Fe-10Cr matrix 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. The observed nanoparticles were composed of aluminium and oxygen, but additionally included one of the matrix elements (chromium). This indicates that the major steel constituents can play very different roles in the nanooxide synthesis. Another unusual feature revealed by high-resolution TEM experiments is a non-equilibrium crystallographic structure of aluminium oxide compound (cubic $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ type rather than more common corundum). Some other observations strongly contributing to the understanding of the underlying mechanisms of nanoparticle nucleation and growth will be discussed.

A mechanism involving the precipitation of nano-oxide dispersed in ODS alloys is proposed in this presentation based on the obtained experimental results and the existing literature data. The results on model alloys are fully applicable to industrial materials. Indeed, ion implantation nicely reproduces many key aspects of the microstructural processes involved in conventional powder metallurgy based technique of ODS steel production.

В.В. УГЛОВ

*Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь
Национальный-исследовательский Томский Политехнический
университет, г. Томск, Россия*

МОДИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Компрессионные плазменные потоки (КПП), генерируемые квазистационарными плазменными ускорителями могут быть эффективно использованы для модификации материалов благодаря сравнительно длительному времени разряда (~ 100 мкс), высокой температуре (1-3 эВ) и большой скорости частиц $((4-7) \cdot 10^6$ см/с). Взаимодействие КПП с поверхностью материалов может сопровождаться следующими процессами: эрозия поверхности, плавление поверхностного слоя, конвективный массоперенос в расплаве, сверхбыстрое охлаждение и кристаллизация модифицированного слоя. Три основных направления будут рассмотрены в работе: непосредственное воздействие на материалы; перемешивание системы «покрытие-подложка»; осаждение тонких пленок и легирование дополнительным компонентом, вводимым в плазменный поток.

Непосредственное воздействие КПП на материалы позволяет сформировать поверхностный слой с улучшенными свойствами за счет синтеза соединений, содержащих атомы плазмообразующего газа, например, нитриды; изменения морфологии и размера зерен; модификации исходных фаз; формирование дефектной структуры в результате сверхбыстрого охлаждения. Перемешивание системы «покрытие-подложка» позволяет сформировать поверхностный слой толщиной несколько десятков микрометров, содержащий атомы покрытия, подложки и плазмообразующего газа. Концентрация легирующего элемента регулируется изменением толщины покрытия и параметров обработки. Такой подход позволяет синтезировать поверхностный слой заданного фазового состава. Пересыщенные твердые растворы и интерметаллиды могут быть синтезированы в металлах, силициды – в поверхностном слое кремния. Осаждение тонких пленок и легирование поверхностного слоя может быть осуществлено путем введения дополнительного компонента в плазменный поток. Такой подход может быть использован для формирования наноразмерных кластеров (содержащих вводимый компонент и атомы подложки) на поверхности.

V.V.UGLOV

Belarusian State University, Minsk, Belarus

National Research Tomsk Politehnicheskii University, Tomsk, Russia

MATERIALS MODIFICATION BY COMPRESSION PLASMA FLOWS

Compression plasma flows (CPF) generated in quasi-stationary plasma accelerators can be effectively used for materials modification due to a comparatively long discharge time ($\sim 100 \mu\text{s}$), a high temperature (1-3 eV) and a high velocity of plasma particles ($(4-7) \cdot 10^6 \text{ cm/s}$). The impact of compression plasma flows with the material surface can be accompanied by the following processes: surface erosion, melting of a surface layer, convective mass transfer in the melt; rapid cooling and crystallization of a modified layer. Three main directions of CPF application will be considered in this report: direct treatment of materials; mixing of a “coating-substrate” system; thin film deposition and surface layer alloying by additional component injected into plasma flow.

Direct treatment of materials allows to form a surface layer with enhanced properties mainly due to the following effects: synthesis of compounds containing elements of a plasma forming gas (e.g. nitrides), change of grains size and morphology, initial phases modification, formation of developed defect structure as a result of a high cooling rate. Mixing of a “coating-substrate” system lead to the formation of a layer with the thickness of a few tens of micrometers containing elements of coating, substrate and a plasma forming gas. Concentration of alloying elements in this layer can be controlled by the change of a coating thickness value and treatment parameters. This approach allows to form the surface layer of a specified phase composition. Supersaturated solid solutions and intermetallides can be synthesized in the metal systems, silicides – in silicon surface layer. Thin films formation and alloying of the surface layer can be also carried out by injection of additional component into the plasma flow. This type of treatment can also be used for the deposition of nanosized clusters (containing both injected component and elements of a substrate) on the surface.

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССА ГИП ДЛЯ КРИТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Способность процесса горячего изостатического прессования (ГИП) «залечивать» дефекты литых и консолидировать до реально 100% плотности порошковые материалы быстрой кристаллизации из жаропрочных сплавов широко используется в аэрокосмической отрасли, для этого разработаны достаточно эффективные научные инструменты, математические модели и технологические процессы.

Исследования и научные разработки последних лет показывают возможности развития технологии ГИП в новых направлениях и для новых материалов и конструкций, работающий в экстремальных условиях, в частности в атомной энергетике, как для создания новых конструкций из порошковых материалов с хорошо контролируемой структурой и свойствами, повышенной надежностью и работоспособностью, так и для решения актуальнейшей проблемы хранения отходов атомных производств и отработавшего ядерного топлива, которое может иметь колоссальный экономический и природоохранный эффект.

Крупногабаритные детали сложной формы установок по производству атомной энергетики могут быть изготовлены методом ГИП по технологии “near net shape” с формами и размерами, близкими к окончательным взамен литых и сварных, и их габариты ограничены лишь только размерами имеющихся в настоящее время в мире камер газостатов

Предлагаемая технология ГИП позволяет изготовление отдельных узлов из наиболее коррозионно-стойких сплавов, недоступных для классических технологий.

На основе предлагаемой технологии ГИП, возможно также «залечить» как исходные множественные дефекты в стенках отработавших тепловыделяющих сборках атомных реакторов (ОТВС), так и устранить пористость и проходы в сварных швах внешних пеналов, в которых они транспортируются к местам хранения, и, тем самым, в значительной степени заблокировать выход атомов радиоактивного вещества. При этом возможно значительное уменьшение объемов пеналов и, соответственно, увеличение реальной емкости хранилищ.

Эта технология уже активно применяется в мировой практике для консолидации отходов атомных производств, и может быть применена для консервации и надежного хранения любых химически и радиационно опасных твердых отходов.

NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR CRITICAL APPLICATIONS IN NUCLEAR POWER ENGINEERING BASED ON PM HIP

The ability of a hot isostatic pressing (HIP) to "heal" casting defects and consolidate the powder materials of refractory alloys up to 100% in density by fast crystallization is widely used in the aerospace industry. Sufficiently effective scientific instruments, mathematical models and technological processes have been developed for that.

Investigations and scientific developments of the last years show the possibilities of the development of HIP-technologies in new directions and for new materials and constructions working in extreme conditions, in particular in the nuclear industry, both for the creation of new constructions from powder materials with a well-controlled structure and properties, an increased reliability and workability and solving the crucial problem of the storage of nuclear wastes and spent nuclear fuel that can have an enormous economic and nature conservation effect.

Large-size details of a complex form for installations, for the production of nuclear power engineering, with shapes and sizes close to the final ones can be produced by a HIP-method using the "near net shape" technology instead of cast and welded technologies, and their sizes are only limited by the sizes of gasostatic extruder chambers currently available in the world.

The proposed HIP-technology allows the production of individual units from the most corrosion-resistant alloys that cannot be produced by classical technologies.

Based on the proposed HIP-technology, it is also possible to "heal" both initial multiple defects in the walls of the spent fuel assemblies of nuclear reactors and eliminate the porosity and passages in the welded seams of external *packages* in which they are transported to storage locations and thereby to significantly block the release of the atoms of radioactive substances. At that, it is possible to significantly decrease the volume of packages and, correspondingly, increase the real volume of storages.

This technology is already widely used in the world practice for the consolidation of nuclear wastes and it can be used for conservation and safe storage of any chemical and radiation-hazardous solid wastes.

В. А. KALIN, A.N.SUCHKOV

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

Москва, Россия

E-mail: bakalin@mephi.ru

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В КЛАССЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРИПОЕВ

Разработка новых материалов основывается на формировании структурно-фазового состояния, обеспечивающего заданные свойства, путем выбора основы и легирующего комплекса. Разработка аморфных сплавов-припоев для высокотемпературной пайки имеет свои особенности, обусловленные ограниченным жизненным циклом и способом получения. В работе представлен цикл аналитических и экспериментальных материаловедческих исследований, включающий обоснование композиции нового аморфного сплава-припоя для пайки изделий из сплавов циркония при температуре не выше 800⁰С и при температуре распая неразъемных соединений выше 1200⁰С.

В результате физико-химического анализа элементов таблицы Менделеева и двойных и тройных диаграмм состояния сплавов выбраны легирующие элементы, выплавлены различные варианты экспериментальных сплавов, из которых методом быстрой закалки расплава на холодильнике получены аморфные ленты, аттестация которых проведена методами рентгеновских исследований и дифференциально-термического анализа. Полученные ленты использованы для получения неразъемных соединений из ячеек дистанционирующих решеток тепловыделяющих сборок ядерного реактора на тепловых нейтронах ВВЭР-440, изготовленных из сплава Zr-1%Nb.

Паяные образцы в виде пары ячеек испытаны на коррозию в автоклавах в перегретой воде при температуре 350⁰С, давлении 160 МПа и длительностью до 6000 час и испытаны на разрушение на разрывной машине. В результате исследования предложен и запатентован следующий состав припоя: Zr– 5.5 Fe – (2.5–3.5) Be – 1 Nb – (5–8) Cu – 2Sn – 0.4Cr – (0.5–1.0) Ge. Температура плавления сплава-припоя 780⁰С, рекомендуемая температура пайки 800⁰С.

B.A. KALIN, A.N.SUCHKOV

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

E-mail: BAKalin@mephi.ru

BASIC PRINCIPLES OF CREATING A NEW GENERATION OF HIGH-TEMPERATURE BRAZING FILLER ALLOYS

The development of new materials is based on the formation of a structural-phase state providing the desired properties by selecting the base and the complex of alloying elements. The development of amorphous filler alloys for a high-temperature brazing has its own features that are due to the limited life cycle and the production method of brazing filler alloys. The work presents a cycle of analytical and experimental materials science investigations including justification of the composition of a new amorphous filler alloy for brazing the products from zirconium alloys at the temperature of no more than 800 °C and at the unbrazing temperature of permanent joints of more than 1200 °C.

Alloying elements have been chosen and various variants of experimental alloys have been smelted as a result of the physicochemical analysis of elements of the Mendeleev Periodic Table and binary and ternary phase diagrams of alloys. The experimental alloys have been used for manufacture of amorphous ribbons by rapid quenching, of which the certification has been made by X-ray investigations and a differential-thermal analysis. These ribbons were used to obtain permanent joints from the spacer grid cells (made from the alloy Zr-1% Nb) of fuel assemblies of the thermal nuclear reactor VVER-440.

The brazed samples in the form of a pair of cells have been exposed to corrosion tests in autoclaves in superheated water at a temperature of 350 °C, a pressure of 160 MPa and a duration up to 6,000 h. They have been also exposed to destructive tests using a tensile machine. The experimental results obtained have made it possible to propose and patent a brazing filler alloy of the following composition: Zr-5.5Fe-(2.5-3.5)Be-1Nb-(5-8)Cu-2Sn-0.4Cr-(0.5-1.0)Ge. Its melting point is 780 °C and the recommended brazing temperature is 800°C.

Т.В. ВАХИТОВА
Granta Design Ltd
E-mail: tatiana.vakhitova@grantadesign.com

ПРИМЕНЕНИЕ CES EDUPACK В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ ДИСЦИПЛИН, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И ДИЗАЙНА

Профессора Инженерного факультета Кембриджского Университета создали образовательный проект, который в итоге привел к основанию компании Granta Design в 1994 году.

Разработки Granta Design используются в образовании, для академических исследований, а также в индустрии.

Компания активно развивается в тесном сотрудничестве с Университетами и объединениями преподавателей материаловедения и инженерного дела по всему миру.

На сегодняшний день она активно взаимодействует с порядка 1000 Высшими Учебными Заведениями и научно-исследовательскими организациями во всем мире.

Образовательный продукт CES EduPack создан компанией Granta Design для преподавателей высших учебных заведений. Этот продукт особенно интересен для преподавателей инженерных дисциплин, дизайна, конструирования и материаловедения.

Большинство образовательных учреждений используют продукт CES EduPack для помощи преподавателям в качестве междисциплинарного ресурса.

Продукт привлекателен тем, что его можно использовать для обучения на разных факультетах, а также для разных групп обучаемых – от студентов начальных курсов до дипломников и аспирантов.

Презентация включает в себя следующие основные части:

1. CES EduPack для преподавателей инженерных дисциплин, дизайна, конструирования и материаловедения.
2. Презентация программы (устройство) и кейс для работы со студентами – демонстрация в программе.
3. Базы данных по материалам
4. Поддержка преподавателей и совместные проекты: учебные материалы (Teaching Resources Website), преподавательский симпозиум в Кембридже и тренинги он-лайн.

T.V. VAKHITOVA
Granta Design Ltd
E-mail: Tatiana.vakhitova@grantadesign.com

CES EDUPACK FOR MATERIALS-RELATED TEACHING IN SCIENCE, ENGINEERING AND DESIGN

For 20 years Granta Design has focused on education and the development of teaching resources for materials-related courses in engineering, design, and science. More than 1000 Universities and Colleges worldwide use Granta's teaching and software resources. Granta Design organises international Materials Education Symposia in Europe, the USA, and Asia and collaborates with Educational Networks like SEFI, ASEE, and FEMS. Granta Design has strong links with the academic community around the world and maintains strong ties with the University of Cambridge, where the first materials education software was developed by Professor Mike Ashby and Professor David Cebon—the founders of Granta Design. The talk will introduce Granta Design, its main educational and research software packages, approaches to teaching materials, and collaboration with academic community worldwide.

Granta Design's software includes the specially developed educational package (CES EduPack), for use in undergraduate to masters-level courses, and Granta's research software (CES Selector), used for advanced teaching and research.

**ФАЗОВЫЕ БЕЗДИФFUЗИОННЫЕ $\gamma \rightarrow \alpha$ -ПРЕВРАЩЕНИЯ И
ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
И КОРРОЗИОННЫХ СВОЙСТВ АУСТЕНИТНЫХ
НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ, ОБЛУЧЕННЫХ
НЕЙТРОНАМИ И ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ**

Рассмотрены закономерности процессов фазовых $\gamma \rightarrow \alpha'$, $\alpha' \rightarrow \gamma$ -превращений, индуцированных холодной деформацией, облучением и/или температурным воздействием в реакторных хромоникелевых аустенитных нержавеющей сталей 12Х18Н10Т и 08Х16Н1М3. Приведены энергетические и механические параметры зарождения и развития мартенситной α -фазы при деформации сталей, необлученных и облученных нейтронами и заряженными частицами. Выявлены механизмы локализации статической деформации и установлена их связь с мартенситным $\gamma \rightarrow \alpha'$ -превращением.

Показано, что в результате облучения стали 12Х18Н10Т тяжелыми ионами Кг с энергией 1,56 МэВ/нуклон и флюенсом $1 \cdot 10^{15}$ част/см² в поверхностном слое образца зарождается так называемый α -мартенсит облучения.

Представлены результаты систематизированных исследований процесса обратного мартенситного $\alpha' \rightarrow \gamma$ -превращения в аустенитных метастабильных нержавеющей сталей, облученных тепловыми (ВВР-К) и быстрыми (БН-350) нейтронами. Установлена стадийность процессов отжига магнитных и прочностных свойств сталей и температурные диапазоны стадий. Обнаружено, что при отжиге облученных (59 сна) нейтронами деформированных образцов в районе температуры отжига 400°C наблюдается эффект прироста количества ферромагнитной α' -фазы и микротвердости.

Изложенные результаты исследований могут быть использованы при оценке работоспособности высокооблученных нержавеющей аустенитных сталей на стадии извлечения, транспортировки и хранения отработанных ТВС атомных реакторов на быстрых нейтронах.

O.P. MAKSIMKIN

Institute of nuclear physics, Almaty, Kazakhstan

PHASE DIFFUSIONLESS $\gamma \rightarrow \alpha$ TRANSFORMATIONS AND THEIR EFFECT ON PHYSICAL, MECHANICAL AND CORROSION PROPERTIES OF AUSTENITIC STAINLESS STEELS IRRADIATED WITH NEUTRONS AND CHARGED PARTICLES

The work presents relationships of $\gamma \rightarrow \alpha'$ and $\alpha' \rightarrow \gamma$ -transformations in reactor austenitic stainless steels 12Cr18Ni10Ti and 08Cr16Ni11Mo3 induced by cold work, irradiation and/or temperature. Energy and mechanical parameters of nucleation and development of deformation-induced martensitic α' -phase in the non-irradiated and irradiated steels are given. The mechanisms of localized static deformation were investigated and its effect on martensitic $\gamma \rightarrow \alpha'$ transformation is determined.

It has been shown that irradiation of 12Cr18Ni10Ti steel with heavy Kr ions (1.56MeV/nucleon, fluence of $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) results in formation of α' -martensite in near-surface layer of the sample.

Results of systematic research on reversed $\alpha' \rightarrow \gamma$ -transformation in austenitic metastable stainless steels irradiated with slow (VVR-K) and fast (BN-350) neutrons are presented. The effect of annealing on strength and magnetic characteristics was determined. It was found that at the temperature of 400°C in the irradiated with neutrons samples (59 dpa) an increase of ferromagnetic α' -phase and microhardness was observed.

The obtained results could be used during assessment of operational characteristics of highly irradiated austenitic steels during transportation and storage of Fuel Assemblies for fast nuclear reactors.

СЕКЦИЯ 1

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ:
СТАЛИ, ЦИРКОНИЕВЫЕ СПЛАВЫ,
ВАНАДИЕВЫЕ СПЛАВЫ,
ТУГОПЛАВКИЕ СПЛАВЫ

SECTION 1

STRUCTURAL MATERIALS:
STEELS, ZIRCONIUM ALLOYS,
VANADIUM ALLOYS,
REFRACTORY ALLOYS

О.О. ЗАБУСОВ

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

ПРОБЛЕМЫ ЗЕРНОГРАНИЧНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОРПУСОВ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ ВВЭР

В связи с общемировой тенденцией к продлению срока службы эксплуатирующихся атомных реакторов, в первую очередь, реакторов типа ВВЭР, особое внимание в последнее время обращается на процессы, происходящие в материалах корпусов реакторов и способные в течение длительного срока эксплуатации привести к повышенному уровню деградации механических характеристик (сопротивляемости хрупкому разрушению). Если ранее при оценке ресурса корпуса реактора учитывался, в основном, упрочняющий механизм деградации (повышение предела текучести под действием облучения), то при продлении срока службы до 60 лет и более необходимо учитывать и неупрочняющий механизм (зернограничное охрупчивание стали).

В связи с этим НИЦ «Курчатовский институт» инициировал проведение ряда работ по исследованию вклада этого механизма в общее охрупчивание корпусных сталей. В статье описаны основные результаты этих работ. Приведены результаты измерений концентрации фосфора на границах зерен в образцах, изготовленных из корпусов реакторов первых поколений ВВЭР и в образцах-свидетелях реакторов ВВЭР-1000. Приведены данные по оценке вклада неупрочняющего механизма в общий сдвиг критической температуры хрупкости.

O.O. ZABUSOV

*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

ISSUES OF INTERGRANULAR EMBRITTLEMENT OF VVER-TYPE NUCLEAR REACTORS PRESSURE VESSEL MATERIALS

In light of worldwide tendency to extension of service life of operating nuclear power plants – VVER-type in the first place – recently a special attention is concentrated on phenomena taking place in reactor pressure vessel materials that are able to lead to increased level of mechanical characteristics degradation (resistibility to brittle fracture) during long term of operation. Formerly the hardening mechanism of degradation (increase in the yield strength under influence of irradiation) mainly had been taken into consideration to assess pressure vessel service life limitations, but when extending the service life up to 60 years and more the non-hardening mechanism (intergranular embrittlement of the steels) must be taken into account as well.

In this connection NRC “Kurchatov Institute” has initiated a number of works on investigations of this mechanism impact to the total embrittlement of reactor pressure vessel steels. The main results of these investigations are described in this article. Results of grain boundary phosphorus concentration measurements in specimens made of first generation of VVER-type pressure vessels materials as well as VVER-1000 surveillance specimens are presented. An assessment of non-hardening mechanism impact to the total ductile-to-brittle transition temperature shift is given.

И.И. ЧЕРНОВ, М.С. СТАЛЬЦОВ, Б.А. КАЛИН, И.А. БОГАЧЕВ,
Л.Ю. ГУСЕВА, П.С. ДЖУМАЕВ, О.В. ЕМЕЛЬЯНОВА,
М.В. ДРОЖЖИНА, К.В. МАНУКОВСКИЙ, И.Д. НИКОЛАЕВА
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ НА РАЗВИТИЕ ГЕЛИЕВОЙ ПОРИСТОСТИ

Методом просвечивающей электронной микроскопии изучено влияние исходного структурно-фазового состояния (СФС) ферритно-мартенситных сталей ЭК-181, ЭП-450 и ЭП-450-ДУО (с 0,5 мас. % наноразмерных частиц Y_2O_3) на формирование гелиевой пористости и газовое распухание. Разное СФС стали ЭК-181 создавалось закалкой, отжигом, нормализацией и высоким отпускком, интенсивной пластической деформацией кручением (ИПДК). Облучение проводилось ионами He^+ -40 кэВ при 923 К до флюенса $5 \cdot 10^{20} \text{ He}^+/\text{м}^2$.

Показано, что закалка на мартенсит вызывает формирование мелких пузырьков ($\bar{d} \sim 2 \text{ нм}$) высочайшей плотности ($\rho \sim 10^{25} \text{ м}^{-3}$). После нормализации с последующим отпускком, а также отжига при ионном облучении в ферритных зернах стали сформировались очень крупные ограненные пузырьки, что привело к высокому газовому распуханию облученного слоя $S = 4,9 \pm 1,2$ и $3,8 \pm 0,9$ % соответственно. Нано- и микрокристаллическая структура, созданная ИПДК, при температуре облучения полностью вырождается и при ионном облучении образуются пузырьки таких же параметров, что и в отожженной стали. В стали ЭП-450-ДУО сформировались пузырьки меньшего размера и плотности, что привело к снижению гелиевого распухания в 4 раза ($S = 0,8 \pm 0,2$ %) по сравнению с распуханием матричной стали ЭП-450 ($S = 3,1 \pm 0,7$ %).

I.I. CHERNOV, M.S. STALTSOV, B.A. KALIN, I.A. BOGACHEV,
L.YU. GUSEVA, P.S. DZHUMAEV, O.V. EMELYANOVA,
M.V. DROZHZHINA, K.V. MANUKOVSKY, I.D. NIKOLAEVA
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

INFLUENCE OF STRUCTURAL-PHASE STATE OF FERRITIC- MARTENSITIC STEELS ON THE HELIUM POROSITY DEVELOPMENT

Transmission electron microscopy has been used to study the effect of the initial structural-phase state (SPhS) of ferritic-martensitic steels EK-181, EP-450 and EP-450-ODS (with 0.5 wt.% nanoparticles of Y_2O_3) on the of helium porosity formation and gas swelling. Different SPhS of steel EK-181 was produced by water quenching, annealing, normalizing plus tempered, intensive plastic deformation by torsion (HPDT). Irradiation was carried out by He^+ -40 keV ions at 923 K up to fluence of $5 \cdot 10^{20} He^+/m^2$.

It is shown that the water quenching causes formation of small bubbles ($\bar{d} \sim 2$ nm) of the highest density ($\rho \sim 10^{25} m^{-3}$). After normalization followed by tempering as well as annealing, very large faceted bubbles are formed in ferrite grains resulting in high level of gas swelling of the irradiated layer with $S = 4,9 \pm 1,2$ and $0,9 \pm 3,8\%$ respectively. Nano- and microcrystalline structure created by HPhT completely degenerate at irradiation temperature and ion irradiation formed bubbles of the same parameters as in the annealed steel. Bubbles formed in EP-450-ODS steel are smaller in size and density, which led to a decrease of helium swelling by 4 times ($S = 0,8 \pm 0,2\%$) as compared to the swelling of the matrix steel EP-450 ($S = 3,1 \pm 0,7\%$).

Э.В. ЛИ, С.А. НИКУЛИН, А.Б. РОЖНОВ, В.А. БЕЛОВ,
С.О. РОГАЧЕВ
НИТУ «МИСиС», г. Москва, Россия

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ

Для оценки степени охрупчивания материала оболочек ТВЭЛ после аварии типа LOCA (Loss of Coolant Accident – Авария с потерей теплоносителя) в настоящее время используют критерий остаточной пластичности, определенный при испытаниях на сжатие кольцевых образцов в момент первого спада нагрузки. Данный критерий не всегда адекватно характеризует состояние материала, т.к. сквозная трещина может возникнуть после первого спада. Поэтому необходима разработка альтернативных методик оценки степени охрупчивания материала оболочек после ВТО.

Для изучения кинетики и механизмов разрушения трубчатых образцов при нагружении после ВТО была разработана специальная методика испытаний на сжатие кольцевых образцов с одновременным измерением АЭ и металлографическим анализом развития повреждений. Такие испытания показали, что сквозная трещина в образцах при нагружении образуется не в момент первого спада нагрузки, а несколько позже. На основе проведенных исследований было установлено, что относительная деформация образца в момент образования сквозной трещины для сплава Э110 равна 5-7 %, а сплава Э110Г равна ~23 %, а не 0-1,1 % и 8-9,5 %, как это было определено по принятой ранее методике испытаний на сжатие колец, что говорит о гораздо большем реальном запасе пластичности материала.

Также была разработана методика оценки трещиностойкости на кольцевых окисленных образцах с центральным отверстием в качестве концентратора напряжений и нагружением внутренним давлением.

E. LI, S. NIKULIN, A. ROZHN OV, V. BELOV, S. ROGACHEV
NUST "MIS&S", Moscow, Russia

MECHANICAL CHARACTERISTIC EVALUATION OF ZIRCONIUM ALLOYS AFTER HIGH TEMPERATURE OXIDATION

To evaluate the embrittlement degree of the fuel cladding material after LOCA accident, the residual ductility criterion determined at the time of the first load drop during ring sample compression test is used. This criterion does not always adequately represent the real condition of the material, as through-wall crack may occur later than the first load drop. Therefore it is necessary to develop alternative methods to assess the embrittlement degree of the cladding material after oxidation.

A special technique of ring sample compression test with simultaneous measurement of AE and crack metallographic analysis has been developed to study the kinetics and mechanisms of tube specimen destruction under load. This test revealed that through-wall crack in a sample under loading is not formed at the first load dropping, but later. Based on these studies, we found that the relative deformation at the moment of through-wall crack formation is 5-7 % for the E110 alloy and is approximately 23 % for the E110G alloy and is not equal to 0-1.1 % and 8-9.5 %, respectively, as it was determined by the previously accepted method of ring compression test. These higher values indicate a much greater plasticity reserve.

Also the crack resistance evaluating technique was developed for oxidized ring samples with a central hole as a stress concentrator and loading by internal pressure.

Ю.А. ПЕРЛОВИЧ¹, М.Г. ИСАЕНКОВА¹, В.А. ФЕСЕНКО¹,
О.А. КРЫМСКАЯ¹, Г.П. КОБЫЛЯНСКИЙ², Ю.Д. ГОНЧАРЕНКО²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия

²ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград, Россия

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕКСТУРЫ И СТРУКТУРЫ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ ИЗ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОДОЗНОГО НЕЙТРОННОГО ОБ- ЛУЧЕНИЯ

Изучены изменения текстуры и структуры оболочечных труб из циркониевых сплавов под воздействием нейтронного облучения. В работе использованы методы рентгеновской дифрактометрии. Для этого в горячей лаборатории НИИАР автоматизирован рентгеновский дифрактометр, снабженный текстурной приставкой, позволяющей выводить в отражающее положение зерна с любыми заданными кристаллографическими ориентациями. Поскольку субструктура исходных оболочечных труб неоднородна и зерна α -Zr находятся в различных структурных состояниях, наблюдаемые в трубах изменения также неоднородны.

Эти изменения в оболочечных трубах, проработавших в реакторе БОР-60 в течение 6 лет, были расщеплены на локализованные в зернах с разными кристаллографическими ориентациями с помощью нового рентгеновского метода обобщенных полюсных фигур. Показано, что увеличением дозы облучения интегральные текстурные параметры Кернса закономерно меняются в сторону ослабления текстуры, что воздействие нейтронного облучения на оболочечные трубы из сплава Э635 сильнее, чем на трубы из сплава Э110, что нейтронное облучение уменьшает межплоскостные расстояния и снижает полуширины рентгеновских линий тем сильнее, чем дальше отражающее зерно отклонено от текстурного максимума.

YU.A. PERLOVICH^{1,a}, M.G. ISAENKOVA¹, V.A. FESENKO¹,
O.A. KRYMSKAYA¹, G.P. KOBLYANSKIY²,
YU.D. GONCHARENKO²

¹ *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

² *PCSSC NIIAR, Russia*

^a *E-mail: yuperl@mail.ru*

CHANGES OF TEXTURE AND STRUCTURE IN CLADDING TUBES FROM ZR-BASED ALLOYS UNDER INFLUENCE OF HIGH-DOZE NEUTRON IRRADIATION

Texture and structure changes in cladding tubes from Zr-based alloys under influence of neutron irradiation were studied. The work was conducted by use of X-ray diffractometric methods. With this aim in the “hot” laboratory of NIIAR the X-ray diffractometer was automatized and equipped with the texture set, which allows to locate grains with any crystallographic orientations into the reflecting position. Since the substructure of initial cladding tubes are inhomogeneous and grains of α -Zr are in different structure conditions, changes, observed in tubes, are inhomogeneous also.

These changes in cladding tubes, worked in the reactor BOR-60 during 6 years, were split into those, localized in grains with different crystallographic orientations, by the new X-ray method of generalized pole figures. It was shown, that as the irradiation dose grows, integral texture Kearns parameters systematically change in the direction of texture weakening; that the influence of neutron irradiation on cladding tubes from the alloy E635 is stronger, than on tubes from the alloy E110; that as an angular distance of reflecting grains from texture maxima becomes greater, both their interplanar spacings and half-widths of X-ray lines decrease by neutron irradiation.

М.Г. ИСАЕНКОВА, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, В.А. ФЕСЕНКО
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ И НЕОДНОРОДНОСТИ СУБСТРУКТУРЫ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Поведение циркониевых сплавов при технологической обработке и эксплуатации изделий в значительной мере определяется кристаллографическими особенностями действующих в этих сплавах структурообразующих механизмов, а также кристаллографическими текстурами, формирующимися в полуфабрикатах и изделиях. Знание механизмов и закономерностей формирования текстуры в циркониевых сплавах является необходимым условием получения изделий с заданной анизотропией физико-механических свойств. Кроме того, текстура служит чувствительным индикатором разнообразных процессов, протекающих в циркониевых сплавах под воздействием той или иной технологической обработки. В НИЯУ МИФИ создан комплекс рентгеновских методик для исследования структуры и текстуры изделий из циркониевых сплавов, позволивший накопить обширные данные по текстурным аспектам их технологической обработки и обеспечивающий возможность предельно полного описания их структурных особенностей. В настоящее время оригинальные методики адаптируются применительно к современному оборудованию D8 DISCOVER производства фирмы Bruker.

В данной работе обобщены исследования авторов, которые направлены на развитие методологической базы рентгеновских методов в материаловедении циркония и систематизированы новые экспериментальные результаты, полученные с использованием разработанных методов. Описаны закономерности формирования кристаллографической текстуры и субструктурной неоднородности в оболочечных трубах из циркониевых сплавов на различных этапах их изготовления, т.е. в процессе горячей и холодной деформации, рекристаллизации, фазовых превращений и взаимодействия описанных процессов.

M.G. ISAENKOVA^a, YU.A. PERLOVICH, V.A. FESENKO
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*
E-mail: isamarg@mail.ru

REGULARITIES OF FORMATION OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE AND SUBSTRUCTURE INHOMOGENEITY IN CLADDING TUBES FROM Zr-BASED ALLOYS ON DIFFERENT STAGE OF THEIR PRODUCTION

Behavior of Zr-based alloys by technological treatment and exploitation of products is determined to the significant degree by crystallographic features of structure-formation mechanisms, operating in these alloys, as well as by crystallographic textures, which form in semi-products and products. Knowledge of mechanisms and regularities of texture formation in Zr-based alloys is necessary for obtaining of fuel claddings with the specified anisotropy of physical-mechanical properties. Besides, the texture is a sensitive indicator of various processes, taking place in Zr-based alloys under that or another technological treatment. At NRNU MEPhI the complex of X-ray methods for study of structure and texture of products from Zr-based alloys was created. It allowed to accumulate extensive data on texture aspects of their technological treatment and provided the possibility of maximally complete description of their substructure features. Presently original methods are adapted as applied to the contemporary X-ray diffractometer Bruker D8 DISCOVER.

This paper summarizes researches of the authors, which are directed on the development of the methodological basis of X-ray studies in the materials science of zirconium and on the systematization of new experimental results obtained by using of developed methods. The paper describes regularities of the formation of the crystallographic texture and the substructure inhomogeneity of cladding tubes from zirconium alloys at various stages of their manufacturing, i.e. during hot and cold deformation, recrystallization, phase transformations and interactions of the above processes.

Б.А. КАЛИН, Н.В. ВОЛКОВ, Р.А. ВАЛИКОВ, А.С.ЯШИН,
Т.В. ЯКУТКИНА
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО СОСТОЯНИЯ НА КИНЕТИКУ ОКИСЛЕНИЯ ИОННО-МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ИЗ СПЛАВА Э110

В работе рассматривается влияние исходного состояния (наличие примесей, подготовка поверхности), а также поверхностного легирования на кинетику окисления оболочек твэлов из сплава Э110. В результате проведенных исследований сделан вывод, что применение ионной полировки взамен традиционной химической полировки помогает снизить скорость окисления циркониевых сплавов. Также изучено влияние легирующих элементов, внедряемые в приповерхностные слои оболочек твэлов методом ионного перемешивания, на кинетику окисления сплава Э110.

**B.A. KALIN, N.V. VOLKOV, R.A. VALIKOV, A.S. YASHIN,
T.V. YAKUTKINA**
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia
E-mail: Romansbk@bk.ru*

THE IMPACT OF THE INITIAL STATE ON THE OXIDA- TION KINETICS OF ION-MODIFIED FUEL CLADDING FROM ALLOY E110

In this paper examines the influence of the initial state (the presence of impurities, surface preparation) and surface alloying on the kinetics of the oxidation of fuel cladding from alloy E110. Conducted investigations have shown that the use of ionic polishing instead of traditional chemical polishing helps to reduce the rate of oxidation of zirconium alloys. Also we studied the effect of alloying elements introduced to the surface layers of claddings by ion mixing on the kinetics of the alloy E110 oxidation.

Б.А. КАЛИН, Н.В. ВОЛКОВ, Р.А. ВАЛИКОВ, А.С. ЯШИН,
Т.В. ЯКУТКИНА

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

E-mail: NVVolkov@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ТОНКИХ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА Э110 В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ

Проведены эксперименты по имитации процесса износа оболочки в случае её контакта с дистанционирующей решеткой. В качестве пары трения выбраны «сфера-плоскость». Для исследований были использованы фрагменты оболочек из сплава Э110 в виде трубок диаметром 9.15 мм и длиной 50 мм (толщина стенки 1 мм). Часть оболочек была подвергнута ионной очистке и полировке под воздействием пучка ионов Ag^+ со средней энергией 3 кэВ. Для создания на поверхности трубок тонких оксидных пленок толщиной до 1 мкм образцы окислялись в пароводяной среде ($T = 300^\circ C$, $p = 17$ МПа, время до 100 ч). Установлено, что на начальном этапе износ металлических образцов (2-5 мин) происходит в условиях упруго-пластической деформации. Наличие на поверхности образцов тонкой оксидной пленки (толщиной до 200 нм) способствует снижению износа за счет равномерного перераспределения ее фрагментов по дорожке трения и износ также происходит в условиях упруго-пластической деформации. Присутствие на поверхности образцов оксидной пленки толщиной 700 нм и более износ характерен для условий абразивного трения.

B.A. KALIN, N.V. VOLKOV, R.A. VALIKOV, A.S. YASHIN,
T.V. YAKUTKINA
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia
E-mail: NVVolkov@mail.ru*

INFLUENCE OF THIN OXIDE FILMS ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF E110 ALLOY TUBULAR SPECIMENS UNDER DRY FRICTION CONDITIONS

Experiments to simulate wear process of fuel cladding in case its contact with spacer grid were carried out. System «sphere-plane» selected as friction pair. Tubular parts of fuel claddings from E110 alloy diameter of 9.15 mm and length of 50 mm (wall thickness 1 mm) were used for investigations. Some claddings were subjected to ion cleaning and polishing under the influence of Ar^+ ion beam with average energy of 3 keV. Samples were oxidized in steam-water conditions ($T=300^\circ\text{C}$, $p=17\text{ MPa}$, time up to 100 h) to create thin oxide films with a thickness of 1 mkum on the tubes surface. It is found that wear of the metallic samples takes place in elastically plastic deformation conditions at initial stage (2-5 min). Presence of thin oxide film (of thickness up to 200 nm) on the samples surface contributes to reduce wear due to the uniform redistribution its fragments on the friction track, and wear also samples takes place in elastically plastic deformation conditions. Presence of oxide film with thickness of 700 nm on the samples surface increases wear in conditions of abrasion friction.

А.В. ШУЛЬГА

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

**МНОГОУРОВНЕВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
БОРА И УГЛЕРОДА В ЗОНЕ РАЗРУШЕНИЯ
БЫСТРОЗАКАЛЕННОГО ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО
СПЛАВА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ
ТРЕКОВОЙ И АКТИВАЦИОННОЙ АВТОРАДИОГРАФИИ**

Представлены результаты исследования зоны разрушения быстрозакаленного суперсплава на основе никеля после испытаний на растяжение. Основное внимание уделено многоуровневому исследованию (макро-, мезо-, микро-уровни) прямыми ядерно-физическими методами трековой и активационной авторадииографии распределения бора и углерода в области распространения трещин. Испытания на растяжение проведены при температурах до 1150 °С. Для авторадииографических исследований распределения углерода и бора применялись ядерный реактор ИРТ МИФИ-2000 и циклотрон, а также растровая микроскопия и микрорентгеноспектральный анализ (нано-уровень). Значительное снижение содержания бора в зоне разрушения, впервые обнаруженное в работе, свидетельствует о нарушении стабильности СФС в зоне разрушения, и обусловлено интенсивным перемещением дислокаций.

A.V. SHULGA

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

**MULTISCALE STUDY OF THE BORON AND CARBON
BEHAVIOR IN THE FRACTURE ZONE OF THE RAPIDLY
QUENCHED NICKEL-BASED SUPERALLOY BY THE
NUCLEAR PHYSICS METHODS OF THE TRACK AND
ACTIVATION AUTORADIOGRAPHY**

The results of the study of the fracture zone of the rapidly quenched nickel-based superalloy after tensile tests are presented. The main attention was attended to the multiscale investigation of boron and carbon distribution in the range of the cracks propagation by the direct methods of the track and activation autoradiography. Tensile tests were performed at the temperatures up to 1150°C. The nuclear reactor MEPhI IRT-2000 and cyclotron were applied for the autoradiography studies. Significant depleting of boron in the fracture zone which was revealed can be explained due to the intensive moving of the dislocation.

Е.А.СМИРНОВ, Д.Н. ДЕМИДОВ, А.Б. ЦЕПЕЛЕВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ И ГРАНИЦ ЗЕРЕН НА КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИАЦИОННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЖЕЛЕЗА И АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

В металлах и сплавах с примесями и границами зерен, исследовано влияние примесей и их комплексов с дефектами на характеристики радиационных дефектов (РД) и радиационно – стимулированной диффузии (РСД), а так же на параметры процессов зарождения и роста вакансионных пор. Для железа и аустенитных сталей проведены оценки температурных зависимостей стационарной концентрации РД для материалов с различной энергией связи комплексов «дефект – примесь», эффективных значений скорости взаимной рекомбинации РД для материалов с комплексами, влияния образования примесных комплексов и объёмной доли границ зерен на скорость роста вакансионных пор и радиационной ползучести. Анализируется возможность варьирования характеристик комплексов дефект – примесь и размера зерна для подавления процессов радиационной ползучести и вакансионного распухания.

E.A. SMIRNOV, D. N. DEMIDOV, A.B.TSEPELEV
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*
E-mail: dmitrydem11@gmail.com, eamirnov36@mail.ru, tsep@imet.ac.ru

THE INFLUENCE OF IMPURITIES AND GRAIN BOUNDARIES ON THE KINETIC CHARACTERISTICS OF THE RADIATION DAMAGE OF IRON AND AUSTENITIC STEELS

In metals and alloys with impurities and grain boundaries, to study the effect of impurities and their complexes with defects on the characteristics of the radiation defects (RD) and radiation – stimulated diffusion (RSD), as well as the parameters of the processes of nucleation and growth of vacancy voids. For iron and austenitic steels conducted to evaluate the temperature dependence of steady-state concentration of RD for materials with different binding energy complexes "defect - impurity" effective velocity values of mutual recombination taxiway materials complexes, the effect of formation of impurity complexes and volume fraction of grain boundaries on the growth rate of vacancy voids and radiation creep. The possibility of varying the characteristics of the complex defect - impurity and grain size for the suppression of radiation creep and vacancy swelling.

А.Б. ЦЕПЕЛЕВ^{1,2}

¹ФГБУН Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова
РАН, г. Москва, Россия

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

РАДИАЦИОННОЕ РАЗУПРОЧНЕНИЕ СПЛАВА Fe-Mo ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Исследован эффект радиационно-стимулированного изменения механических свойств сплава Fe-5 масс.% Mo после электронного облучения при комнатной температуре и 400°C. Механические испытания проводились методом вдавливания цилиндрического пуансона в дисковые микрообразцы диаметром 3 мм. Обнаружен эффект радиационного разупрочнения сплава, усиливающийся с повышением температуры облучения. Для разделения термических и радиационных эффектов изменения свойств проведены испытания образцов, прошедших термообработку в условиях, полностью имитирующих условия облучения (температура и время отжига). Установлено, что термический отжиг и облучение при 400°C приводят к разнонаправленным эффектам упрочнения и разупрочнения Fe-Mo сплава соответственно. Сделан вывод, что облучение подавляет эффект упрочнения сплава при термическом отжиге и стимулирует более значительные изменения его структурно-фазового состояния, вызывающие разупрочнение.

A.B. TSEPELEV^{1,2}

¹ *Leading Researcher, Institute of Metallurgy and Materials Science of the
Russian Academy of Sciences (IMET RAS), Moscow, Russia*

² *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

RADIATION-INDUCED SOFTENING OF FE-MO ALLOY UNDER HIGH-TEMPERATURE ELECTRON IRRADIATION

Effects of radiation-induced change of mechanical properties of Fe-5 wt.% Mo alloy irradiated with electrons (2 MeV) at room temperature and 400°C have been investigated. Mechanical properties were estimated by Miniaturized Disk Bend Test method. Effect of radiation softening of the alloy is ascertained the value of which was increased with temperature rise. With the purpose of separation of thermal and radiation effects, the tests were carried out for specimens annealed in the same thermal conditions as during irradiation (temperature and duration of annealing). Thermal annealing and electron irradiation at 400°C is found to bring to multidirectional effects of the alloy strengthening and softening respectively. It is concluded that irradiation suppresses the effect of thermal-induced strengthening of the alloy and stimulates a softening effect due to more significant changes of the structure and phase composition.

М.С. СТАЛЬЦОВ, И.И. ЧЕРНОВ, Б.А. КАЛИН, О.Н. КОРЧАГИН,
В.М. АНАНЬИН
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

АНОМАЛИИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, ПОВЕДЕНИЯ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА В СПЛАВАХ V-Ti (ОБЗОР СОБСТВЕННЫХ РАБОТ)

В работе представлены результаты исследований поведения гелия и водорода в сплавах ванадия с титаном в зависимости от содержания легирующей добавки. В частности, приведены результаты исследований гелиевого набухания, термодесорбционных исследований поведения гелия и водорода, результаты измерения внутреннего трения, измерения количества удерживаемого водорода, внедренного различными способами. Показано, что добавки титана оказывают немонотонное влияние на поведение внедренных газов, как и на физико-механические и радиационные свойства, что известно из литературы. Предположено, что такое аномальное влияние титана на различные свойства имеет место из-за особенностей взаимодействия атомов ванадия и титана с примесями внедрения.

M.S. STALTSOV, I.I. CHERNOV, B.A. KALIN, O.N. KORCHAGIN,
V.M. ANAN'IN
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

ABNORMALITIES OF PHYSICS AND MECHANICAL PROPERTIES, BEHAVIOR OF HELIUM AND HYDROGEN IN THE V-Ti ALLOYS (OVERVIEW)

The paper presents the results of studies of physics and mechanical, helium and hydrogen behavior in the vanadium-titanium alloys depending on the titanium content. In particular, the results of helium swelling research, thermal desorption studies of helium and hydrogen behavior, the internal friction results, measuring the amount of hydrogen retained introduced by various method. It was shown that the addition of titanium have non monotonic influence on the behavior of implanted helium and hydrogen, as well as on the physical-mechanical and radiation properties known in literature. It is expected that such an abnormal influence of titanium on the various properties occurs because of the interaction of atoms of vanadium and titanium with interstitial impurities.

Б.А. ТАРАСОВ, М.С. ЮРЛОВА, И.А. БОГАЧЕВ, В.Г. БАРАНОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*
E-mail: BATarasov@mephi.ru

НЕКОТОРЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЕЧЕННОЙ МЕТОДОМ СПС СТАЛИ ЭП-450 ДУО

В работе приведены результаты проводящихся в МИФИ работ по получению и исследованию дисперсно-упрочненной оксидами ферритно-мартенситной стали ЭП-450. Данная сталь является перспективным материалом для изготовления оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах нового поколения. Рассмотрены методические аспекты получения заготовок стали ЭП-450 ДУО методом плазменно-искрового спекания, а так же приведены некоторые результаты структурного исследования полученных заготовок после горячей прокатки. Представлены результаты механических испытаний полученных образцов.

В.А. TARASOV, M.S. YURLOVA, I.A. BOGACHEV,
V.G. BARANOV
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics
Institute, Moscow, Russia*
E-mail: BATarasov@mephi.ru

SOME MECHANICAL PROPERTIES OF SINTERED EP450 ODS STEEL

In this work the results of ongoing in MEPHI project by processing and studying of oxide dispersion strengthened ferritic-martensitic steel EP-450 are submitted. This steel is a promising material for the new generation fast breeder reactors fuel claddings. The methodological aspects of producing EP-450 ODS steel billets by spark plasma sintering as well as some results of a structural studying of received billets after hot rolling are set forth. The results of samples mechanical tests are obtained.

Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, В.А. ФЕСЕНКО
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

НЕОДНОРОДНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ МАРТЕНСИТА ДЕФОРМАЦИИ В ПРОКАТАННОМ СПЛАВЕ Fe-28%Ni-5%Mo

Исследованы закономерности неоднородного протекания мартенситных превращений при низкотемпературной деформации накручиванием на оправку прокатанных поликристаллических образцов из сплава Fe-28%Ni-5%Mo (ат. %) вдоль направления прокатки (НП). В соответствии с результатами рентгеновского фазового анализа $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение в прокатанных фольгах из сплава Fe-28%Ni-5%Mo при изгибной низкотемпературной деформации путем накручивания на оправку происходит главным образом на растянутой стороне фольги. Рентгеновский текстурный анализ позволил определить ориентационное соотношение $\gamma \rightarrow \alpha$ мартенситного превращения, реализующееся в данном сплаве: $\{110\}_{\gamma} \parallel \{112\}_{\alpha}$, $\langle 112 \rangle_{\gamma} \parallel \langle 0\bar{2}1 \rangle_{\alpha}$. Низкотемпературное накручивание фольги на оправку вызывает в аустенитной стали не только формирование мартенсита, также и активизацию традиционных механизмов пластической деформации и, в частности, двойникование. С помощью рентгеновских методов установлено, что $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение при низкотемпературном изгибе локализуется в пределах различных групп зерен на противоположных сторонах образца. В растянутых слоях фольги мартенсит деформации образуется в зернах, кристаллическая решетка которых наиболее искажена предшествующей холодной прокаткой. Ориентация таких зерен соответствует периферии текстурных максимумов. В пределах сжатых слоев мартенсит деформации формируется преимущественно в слабо наклепанных зернах, ориентация которых соответствует текстурным максимумам.

YU.A. PERLOVICH¹, M.G. ISAENKOVA, V.A. FESENKO
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*
¹ *E-mail: yuperl@mail.ru*

INHOMOGENEOUS FORMATION OF THE DEFORMATION MARTENSITE IN ROLLED FE-28%NI-5%MO ALLOY

Regularities of inhomogeneous passing of martensitic transformations (MT) under low-temperature deformation by winding on an arbor of rolled polycrystalline samples from Fe-28%Ni-5%Mo (at. %) along rolling direction (RD) were investigated. According to results of X-ray phase analysis, $\gamma \rightarrow \alpha$ transition in the rolled foil from Fe-28%Ni-5%Mo alloy under bend low-temperature deformation by winding on arbor occurs mainly at the extended side of foil. The X-ray texture analysis allowed to determine the orientation relationship for $\gamma \rightarrow \alpha$ MT transition in Fe-28%Ni-5%Mo alloy under such bending: $\{110\}_{\gamma} \parallel \{112\}_{\alpha}$, $\langle 112 \rangle_{\gamma} \parallel \langle 0\bar{2}1 \rangle_{\alpha}$. Low-temperature winding of foil on arbor causes in austenitic phase not only formation of deformation martensite, but also operation of usual plastic deformation mechanisms and, in particular, twinning. It was established by means of X-ray methods, that $\gamma \rightarrow \alpha$ – transformation under low-temperature bend deformation is localized within different groups of grains at opposite sides of the sample. Within extended layers of foil the deformation martensite forms in grains with the lattice, most distorted in the course of previous rolling, - their orientations correspond to periphery of texture maxima. Within compressed layers deformation martensite forms predominantly in grains of texture maxima with relatively low strain hardening.

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

ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ТРУБ ИЗ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ ПОЛЗУЧЕСТЬ

Исследован процесс изменения структуры и кристаллографической текстуры оболочечных труб из аустенитной стали ЧС-68ИД при их термической ползучести. Испытания оболочечных труб проведены при температуре 700°C на воздухе путем их растяжения в осевом направлении под воздействием напряжения 160 МПа до разрушения. По данным фазового и текстурного анализа изученных труб выявлен ряд процессов, сопровождающих их пластическую деформацию при испытании на ползучесть в условиях повышенной температуры.

Основными компонентами текстуры исходной трубы, а также различных участков трубы, испытанной на ползучесть, являются $\{110\}<001>$ и $\{112\}<11\bar{1}>$. В зоне разрушения усиливается компонента текстуры растяжения с осью $<111>$ вдоль оси трубы, что является следствием активизации процессов скольжения дислокаций в деформированной области образующейся шейки испытываемой трубы. В то же время характер изменения текстуры трубы в области ее разрушения указывает на развитие там процесса динамической рекристаллизации, связанное с суммарным воздействием всех факторов, контролирующих протекание в трубе ползучести. Кроме того, обнаружена активизация мартенситных превращений в области максимальной деформации трубы в результате её испытаний на ползучесть.

YU. PERLOVICH, M. ISAENKOVA^a, V. FESENKO,
P. DOBROKHOTOV, A. TSELISHCHEV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*
^a *E-mail: mgisaenkova@mephi.ru*

THE CHANGES OF STRUCTURE AND CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE OF CLADDING TUBES FROM AUSTENITIC STEEL UNDER THERMAL CREEP TESTING

The process of changes in structure and crystallographic texture of cladding tubes from austenitic steel ChS-68 under thermal creep testing were studied. Testing of tubes was conducted at the temperature 700 °C in the air by their stretching in axial direction under the stress 160 MPa until rupture. By data of phase and texture analysis a number of processes, accompanying plastic deformation of tubes during thermal creep tests at elevated temperature, were identified.

The main texture components of original tube, as well as texture components of different parts of the tested tube are $\{110\}\langle 001 \rangle$ and $\{112\}\langle 11\bar{1} \rangle$. In the rupture zone the component of the texture of tension with axis $\langle 111 \rangle$ along the tube axis becomes stronger. This effect is connected with activation of dislocation slip in the deformed area of tested tube near the new-formed neck. At the same time the character of texture changes in the zone of tube rupture indicates to development of the dynamic recrystallization, conditioned by the total influence of all factors, which control the passage in the tube of thermal creep. In addition, it was revealed the activation of martensitic transformations in the zone of maximal deformation of tube as a result of its creep tests.

О.А. КРЫМСКАЯ¹, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ¹, М.Г. ИСАЕНКОВА¹,
Н.С. МОРОЗОВ¹, В.А. ФЕСЕНКО¹, И.В. РЯХОВСКИХ²,
Т.С. ЕСИЕВ²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

²*ООО «Газпром ВНИИГАЗ», г. Москва, Россия*

ВЛИЯНИЕ ПОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ СТАЛЬНЫХ ТРУБ

На основе данных рентгеновского анализа текстуры и структуры материала труб магистральных газопроводов показано, что в процессе их изготовления формируется послойная неоднородность труб, степень которой оказывает влияние на склонность труб к коррозионному растрескиванию под напряжением (КРН) в процессе эксплуатации.

Образцы труб вырезались из участков газопроводов, находившихся в различных условиях эксплуатации. При этом проводились исследования сегментов с обнаруженными дефектами КРН и без них. Построены распределения параметров кристаллической решетки и полуширины рентгеновских линий по толщине стенки трубы, проведен анализ кристаллографической текстуры внешних и внутренних слоев. Полученные данные свидетельствуют о значительной послойной неоднородности всех образцов. При этом несмотря на различный характер текстурной неоднородности труб газопроводов, более неоднородное распределение текстурных или структурных характеристик приводит к увеличению стойкости к КРН.

Наблюдаемый эффект можно объяснить насыщением поверхностного слоя горячекатаного листа и полученной из него трубы примесями внедрения, в результате чего его параметр решетки в плоскости прокатки оказывается выше, чем у нижележащих слоев. Это приводит к тому, что внутренние слои оказывают на поверхностный слой сжимающее воздействие в плоскости прокатки, препятствуя развитию в нем трещин. Кроме того, раскрытие трещин может тормозиться при достижении слоя с измененной текстурой вследствие высокой взаимной разориентации зерен разных слоев и необходимости изменения плоскости движущейся трещины, что требует увеличения приложенных напряжений.

O.A. KRYMSKAYA^{1,a}, YU.A. PERLOVICH^{2,b}, M.G. ISAENKOVA¹,
N.S. MOROZOV¹, V.A. FESENKO¹, I.V. RYAKHOVSKIKH²,
T.S. ESIEV²

¹ *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

² *LLC «VNIIGAZ», Moscow, Russia*

E-mail: ^aoakrymskaya@mephi.ru, ^byuperl@mail.ru

EFFECT OF LAYERWISE STRUCTURE INHOMOGENEITY ON STRESS-CORROSION CRACKING OF STEEL TUBES

Based on X-ray texture and structure analysis data of the material of main gas pipelines it was shown that the layerwise inhomogeneity of tubes is formed during their manufacturing. The degree of this inhomogeneity affects on the tendency of tubes to stress-corrosion cracking under exploitation.

Samples of tubes were cut out from gas pipelines located under various operating conditions. Herewith the study was conducted both for sections with detected stress-corrosion defects and without them. Distributions along tube wall thickness for lattice parameters and half-width of X-ray lines were constructed. Crystallographic texture analysis of external and internal tube layers was also carried out. Obtained data testifies about considerable layerwise inhomogeneity of all samples. Despite the different nature of the texture inhomogeneity of gas pipeline tubes, the more inhomogeneous distribution of texture or structure features causes the increasing of resistance to stress-corrosion. The observed effect can be explained by saturation with interstitial impurities of the surface layer of the hot-rolled sheet and obtained therefrom tube. This results in rising of lattice parameters in the external layer of tube as compared to those in underlying metal. Thus, internal layers have a compressive effect on external layers in the rolling plane that prevents cracks opening at the tube surface. Moreover, the high mutual misorientation of grains within external and internal layers of tube results in the necessity to change the moving crack plane, so that the crack growth can be inhibited when reaching the layer with a modified texture.

В.И. ПОЛЬСКИЙ, В.Л. ЯКУШИН, П.С. ДЖУМАЕВ,
В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, Д.В. САФОНОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ПОВЫШЕНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАКИРОВАНИЯ

В работе исследованы изменения структурно-фазового состояния, элементного состава и коррозионной стойкости образцов из малоуглеродистой низколегированной стали, применяемой в машиностроении, после нанесения лазерной наплавки (ЛН). Установлена степень коррозионного разрушения и характер коррозии образцов из малоуглеродистой низколегированной стали с нанесёнными ЛН. Измерена скорость коррозии и установлены выделения наблюдаемые при полном разрушении наплавки. Установлены закономерности формирования структуры при нанесении различных составов порошков ЛН. Установлен оптимальный состав порошка ЛН, препятствующий коррозии образцов из малоуглеродистой низколегированной стали.

V.I. POLSKY, V.L. YAKUSHIN, P.S. DZHUMAЕV,
V.N. PETROVSKY, D.V. SAFONOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

INCREASING CORROSION RESISTANCE OF CARBON STEELS BY SURFACE LASER CLADDING

This paper presents results of investigation of the microstructure, elemental composition and corrosion resistance of the samples of low-alloy steel widely used in the engineering, after the application of laser cladding. The level of corrosion damage and the corrosion mechanism of clad steel samples were established. The corrosion rate and installed discharge observed at the total destruction of surfacing were obtained. The regularities of structure formation in the application of different powder compositions were obtained. The optimal powder composition that prevents corrosion of samples of low-carbon low-alloy steel was established.

СЕКЦИЯ 2
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ,
ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО

SECTION 2
FUNCTIONAL MATERIALS,
NUCLEAR FUEL

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

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ UMo ТОПЛИВА С Fe И Fe-Cr

Уран-молибденовые сплавы являются перспективным видом ядерного топлива для реакторов на быстрых нейтронах. В данной работе проводилось исследование особенностей взаимодействия уран-молибденовых сплавов с железом и хромистой сталью при повышенной температуре 750 °С в течение 5 часов. Установлено, что константа скорости роста слоя взаимодействия для диффузионной пары UMo /FeCr составляет порядка $5,4 \cdot 10^{-12}$ м²/с при 750 °С, определен фазовый состав слоев взаимодействия для обеих диффузионных пар. Взаимодействие идет по границам зерен, о чем свидетельствуют не провзаимодействующие зерна UMo сплава в структуре диффузионной зоны.

S.N. NIKITIN, D.P. SHORNIKOV, B.A. TARASOV,
V.G. BARANOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia
E-mail:mephi200809@yandex.ru*

INTERACTION UMo FUEL WITH Fe AND FeCr

Uranium-molybdenum alloys is a perspective view of nuclear fuel for fast reactors. In this work, a study was conducted of the interaction of uranium-molybdenum alloy with iron and chromium steel at an elevated temperature of 750 °C for 5 hours. It is found that the constant rate growth of the interaction layer for diffusion couple UMo / FeCr is about $5,4 \cdot 10^{-12}$ m²/s at 750 °C. Determined the phase compositions of the interaction layers for the both diffusion couples. The interaction comes along the grain boundaries, as evidenced not interacts UMo alloy grain in the structure of the diffusion zone.

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

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ НИТРИДОМ УРАНА И КОРРОЗИОННО-СТОЙКОЙ СТАЛЬЮ

В ходе реакторных испытаний имеет место взаимодействие нитридного топлива и коррозионно-стойкой стали в диапазоне выгорания 8-11 % ТА. По результатам диффузионных испытаний в течение 200 ч показано, что взаимодействие наступает в диапазоне температур 1000-1100 °С. Отмечено усиление взаимодействия в случае испытания UN с повышенным содержанием кислорода (1000-2000 ppm). Также показано усиление взаимодействия UN и стали ЭП-823 в присутствии цезия. Не выявлено влияние теллура и йода на усиление взаимодействия. Показана хорошая совместимость стали ЭП-450 ДУО и хромистой стали, легированной алюминием и кремнием при 1000 °С.

D.P. SHORNIKOV, S.N. NIKITIN, B.A. TARASOV,
V.G. BARANOV, M.S. YURLOVA
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*

THE INTERACTION BETWEEN NITRIDE URANIUM AND STAINLESS STEEL

Uranium nitride is most popular nuclear fuel for Fast Breeder Reactor New Generation. In-pile experiments at reactor BOR-60 was shown an interaction between nitride fuel and stainless steel in the range of 8-11% burn up (HA). In order to investigate this interaction has been done diffusion tests of 200 h and has been shown that the reaction occurs in the temperature range 1000-1100 °C. UN interacted with steel in case of high pollution oxygen (1000-2000 ppm). Also has been shown to increase interaction UN with EP-823 steel in the presence of cesium. In this case the interaction layer had a thickness about 2-3 μm . The interaction layer had a thickness about 2-3 μm . Has been shown minimal interaction with new ODS steel EP-450. The interaction layer had a thickness less than 2 μm . Did not reveal the influence of tellurium and iodine increased interaction. Was show compatibility at 1000 °C between UN and EP-450 ODS steel, chrome steel, alloying aluminum and silicon

С.А. ПОКРОВСКИЙ, В.Г. БАРАНОВ, А.В. ТЕНИШЕВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОКСИДА УРАНА С ДОБАВКАМИ (Al,Gd)O₃

В работе были определены теплофизические характеристики (температуропроводность до 2000 °С, теплоемкость до 1250 °С и теплопроводность до 1250 °С) оксидного ядерного топлива с добавками выгорающего поглотителя нейтронов в виде (Al,Gd)O₃, также для сравнения были проведены исследования образцов UO₂ с гадолинием в виде Gd₂O₃ и чистого диоксида урана. Показано, что введение гадолиния в виде (Al,Gd)O₃ значительно слабее снижает температуропроводность, а, следовательно, и теплопроводность диоксида урана, чем Gd₂O₃, вследствие того, что первый не образует твердый раствор с UO₂. Кроме того, выполнены SEM исследования с использованием рентгеновских спектрометров поверхности исследуемых образцов.

S.A. POKROVSKIY, V.G. BARANOV, A.V. TENISHEV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia
E-mail: Onil709@inbox.ru*

THERMAL PROPERTIES OF (Al, Gd)O₃ DOPED URANIUM DIOXIDE

Thermal characteristics (i.e. thermal diffusivity up to 2000 °C, heat capacity up to 1250 °C and thermal conductivity up to 1250 °C) of (Al,Gd)O₃ doped oxide nuclear fuel, pure UO₂ and Gd₂O₃ doped UO₂ are determined. It is shown that Gd injection in the form of (Al,Gd)O₃ lowers thermal diffusivity less then 15% in the range of 30 – 1250 °C whereas Gd₂O₃ causes 40% reduction in this characteristic. SEM studies showed that the (Al,Gd)O₃ does not form a solid solution with UO₂, unlike Gd₂O₃, and is stored as a separate phase. That explains the high thermal conductivity.

Р.Ш. КАВАЗАУРИ, С.А. ПОКРОВСКИЙ, В.Г. БАРАНОВ,
А.В. ТЕНИШЕВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОКСИДА УРАНА С РАЗЛИЧНЫМ ОТКЛОНЕНИЕМ ОТ СТЕХИОМЕТРИИ

В настоящей работе была отработана методика окисления чистого диоксида урана, до заданного отклонения от стехиометрии термогравиметрическим методом на установке NETZSCH STA 409 CD с твердоэлектродной гальванической ячейкой для контроля кислородного потенциала среды. Были получены 4, образца диоксида урана с разным отношением кислород-металл: $O/M = 2.002$, $O/M = 2.005$, $O/M = 2.015$, $O/M = 2.033$. Для полученных образцов были определены основные теплофизические характеристики: теплоемкость, температуропроводность, теплопроводность. Теплоемкость всех образцов совпадает в пределах 5% погрешности. Температуропроводность и теплопроводность образцов снижается при увеличении отклонения от стехиометрии, для образца с $O/M = 2.033$ разница обоих величин со стехиометрическим диоксидом урана близка к 50%

R. KAVAZAURI, S.A. POKROVSKIY, V.G. BARANOV,
A.V.TENISHEV
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia
E-mail: Onil709@inbox.ru*

THERMAL PROPERTIES OF NONSTOICHIOMETRY URANIUM

In this study the thermogravimetry technique of pure uranium dioxide oxidation to a predetermined stoichiometry deviation is perfected. Oxidation is carried out on NETZSCH STA 409 CD with solid galvanic cell for purged gas oxygen potential control. Four UO_{2+x} samples with different O/M ratio (2.002, 2.005, 2.015, 2.033) were obtained. Base thermal characteristics (thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity) were determined. The heat capacity of samples coincide within the 5% error. Thermal diffusivity and thermal conductivity of the samples decreased with increasing deviation from stoichiometry, for the sample with $O / M = 2.033$, the difference of both values with a stoichiometric uranium dioxide is close to 50%.

А.А. ПАВЛОВ¹, М.Л. ТАУБИН^{1,2}, Д.А. ЧЕСНОКОВ¹,
А.А. ЯСКОЛКО^{1,2}

¹ ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» г. Подольск, Россия

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

ИССЛЕДОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В данной работе представлены результаты исследований характеристик монокристаллических и наноструктурных материалов применительно к их использованию в высокоинтенсивных рентгеновских трубках с вращающимся анодом и термоэлектронным катодом.

Показано, что использование монокристаллических сплавов вольфрама в качестве материала анода, снижает повреждаемость фокусной дорожки анода и, как следствие, увеличивает ресурс рентгеновской трубки. Использование же монокристалла вольфрама для катода увеличивает эмиссионные характеристики рентгеновской трубки.

Большой же эффект, как и ожидалось, следует ожидать от использования наноматериалов при разработке рентгеновских трубок с повышенными эксплуатационными характеристиками. Так, авторами экспериментально показано, что изготовление катода из нанокompозита вольфрама существенно увеличивает сопротивление ползучести материала катода и, как следствие, ресурс работы рентгеновской трубки компьютерного томографа, при которой эмиттер катода испытывает при вращении в гентри механические перегрузки до 35 G.

Показано, что применение в качестве материала катода вольфрама с нанокристаллической структурой повышает в полтора раз эмиссионные характеристики рентгеновской трубки.

В работе представлены также результаты формирования углеродных нанотрубок на основе из монокристалла вольфрама и данные по испаряемости вольфрама.

A.A. PAVLOV¹, M.L. TAUBIN^{1,2}, D.A. CHESNOKOV¹,
A.A. YASKOLKO^{1,2}

¹*Federal State Unitary Enterprise "Science Research Institute" LUCH ",
Podolsk, Moscow region, Russia*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

INVESTIGATION OF NANOSTRUCTURAL AND MONOCRYSTALS MATERIALS FOR UNITS OF HIGH INTENSIVE X-RAY SOURCES

Results of development and creation of nanocomposite of refractory metals with increased strength characteristics for anodes and emissive parameters for cathodes for using in design of miniature sources for radiation therapy are analyzed this report.

It is shown, that though monocrystals have shown the better characteristics in comparison with traditional polycrystals both as anodes and as cathodes, more radical way of increase of operational characteristics of the miniature sources is in application of the refractory nanostructural materials. Application of nanocrystal and monocrystals materials have to increase allowable unit loads of a miniature sources by reducing porosity, increasing strength and plasticity of anode and cathode materials.

The authors think that this effect results from forming nanoscale little bubbles filled with potassium at the grain boundaries. Results of forming CNT on single crystal tungsten base (without catalyst) and evaporation of W monocrystals are introduced. Scheme of miniature sources of x-ray and thermal fluxes with thermal emission cathode are represented.

Д.Н. ИГНАТЬЕВ², А.А.ПАВЛОВ¹, Е.С.СОЛНЦЕВА¹,

М.Л. ТАУБИН², А.А. ЯСКОЛКО²

¹ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» г. Подольск, Россия

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

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ НАНОКОМПОЗИТА ВОЛЬФРАМА

В настоящей статье исследовались термическая стабильность и высокотемпературная деформацию вольфрама прошедшего предварительную механообработку (одноосною прокатку и прокатку в перекрестных направлениях). Представлены результаты исследований термической стабильности и факторов, определяющих эффект снижения высокотемпературной деформации модифицированного вольфрама.

D.N. IGNATIEV, A.A. PAVLOV, E.S. SOLNTSEVA, M.L.TAUBIN,
A.A. YASKOLKO

*Federal State Unitary Enterprise "Science Research Institute" LUCH ",
Podolsk, Moscow region, Russia*

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia
E-mail: taubin@sialuch.ru*

THERMAL STABILITY AND HIGH-TEMPERATURE DEFORMATION OF TUNGSTEN NANOCOMPOSITE

The heat treatment and tensile strength investigation of pre machining (uniaxial rolling and rolling in the cross direction) polycrystalline tungsten at elevated temperature is conducted. The effect of heat treatment on the high temperature deformation of tungsten is studied. As a result of annealing at 2670 K after uniaxial rolling revealed a marked increase in high temperature creep resistance of tungsten.

И.Е. ЛЮБЛИНСКИЙ^{1,2}, А.В. ВЕРТКОВ¹, М.Ю. ЖАРКОВ¹,
В.А. ВЕРШКОВ³

¹АО «Красная Звезда», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

³ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

РАЗРАБОТКА ЛИТИЕВОГО И ВОЛЬФРАМОВОГО ЛИМИТЕРОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-10 В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Использование комплекса мощного (до 3 МВт) ЭЦР нагрева плазмы в токамаке Т-10 сталкивается с проблемой загрязнения плазмы при введении дополнительной мощности более 2 МВт. Причиной этого является существующий комплекс графитовых диафрагм, который включает в себя кольцевую и рельсовую диафрагмы. Поскольку все они расположены в одном патрубке, то имеют относительно малую эффективную площадь, контактирующую с плазмой и испытывают сильный локальный перегрев и эрозию. Кроме того, использование графитовых лимитеров приводит к образованию на поверхности стенки камеры пленок, существенно увеличивающих поступление примесей и увеличивающих рециклинг рабочего газа. Для решения этих проблем разработан и готовится к реализации новый комплекс вольфрамовых и литиевого лимитеров. Как предполагается, применение вольфрама в качестве материала обращенного к плазме позволит исключить поступление графита, а охлаждение периферии плазмы за счет переизлучения на литии приведет к снижению потока энергии на вольфрамовые диафрагмы. В качестве источника лития будет использована вспомогательная литиевая диафрагма, располагающаяся в тени вольфрамовых. Параметры и конструкция лимитеров приводятся в работе. Литиевая диафрагма – источник лития размещается в верхнем вертикальном порту камеры токамака Т-10 и может перемещаться относительно LCMS. Перемещение лимитера в области SOL позволяет регулировать приходящий на него поток энергии и, как следствие, поток лития в плазму. Обращенная к плазме поверхность лимитера изготавливается из капиллярно-пористой системы (КПС) с литием. Материал КПС (вольфрамовый войлок с радиусом пор 30 мкм) обеспечивает стабильность литиевой поверхности лимитера под воздействием пондеромоторных сил и возможность ее постоянного возобновления за счет капиллярных сил. В работе приведена оценка необходимого потока лития с поверхности литиевого лимитера в плазму для обеспечения условий нормальной работы вольфрамовых лимитеров при мощности ЭЦР нагрева 3 МВт в течение 400 мс. Показано, что в этом случае $Z_{эфф}$ плазмы не должна превышать величины $Z_{эфф} = 2$. Кроме того, на основе результатов исследования поведения лития в токамаке Т-11М оценивался поток лития на стенку токамака. Предположено, что за компанию 1000 импульсов, на стенку уходит ~ 10 г, что сравнимо с поступлением лития при использовании испарителя-литиизатора для кондиционирования стенок Т-10 в предыдущих экспериментах. Таким образом, в работе показано, что модернизация лимитеров на токамаке Т-10 позволит обеспечить при приемлемых потоках лития режимы ЭЦР нагрева с мощностью до 3 МВт.

I.E. LYUBLINSKI^{1,2}, A.V. VERTKOV¹, M.YU. ZHARKOV¹,
V.A. VERSHKOV³

¹*SC "Red Star", Moscow, Russia*

²*National Research Nuclear University (MEPhI), Moscow, Russia*

³*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

E-mail: lyublinski@yandex.ru

DEVELOPMENT OF LITHIUM AND TUNGSTEN LIMITERS FOR TEST ON T-10 TOKAMAK AT HIGH HEAT LOAD CONDITION

Application of a complex of powerful (up to 3 MW) ECR plasma heating in T-10 tokamak is pulled down with a problem of the strong plasma pollution at power input more than 2 MW. As it has been determined, the reason of it is the strong local overheat and erosion of existing circular and rail graphite limiters situated in the same section of the tokamak and having low effective surface of plasma interaction. Among other things, the use of such limiters leads to formation of carbon films on a surface of a tokamak chamber wall essentially increasing of impurity flux and hydrogen recycling. For the solution of these problems the new complex of tungsten and lithium limiters is developed and prepared to implementation. As it is supposed, application of tungsten as a plasma facing material will allow excluding carbon influx into vacuum chamber. An additional lithium limiter arranged in a shadow of tungsten one will be used as a lithium source for plasma periphery cooling due to a reradiation on lithium that will lead to decrease in power deposition on tungsten limiters. Parameters and design of limiters are presented. Lithium limiter is disposed in upper vertical port of the vacuum chamber and can move with respect to LCMS that allows regulating of incoming power flux and, as consequence, a lithium influx into plasma. Plasma facing surface of a limiter is made of capillary-porous system (CPS) with lithium. Porous matrix of CPS (tungsten felt with radius of pores of 30 microns) provides stability of liquid lithium surface under MHD force effect and an opportunity of its constant renewal due to capillary forces. The necessary lithium flux from a lithium limiter surface is estimated for maintenance of normal operation mode of tungsten limiters at ECRH power of 3 MW during 400 ms. It is shown, that Z_{eff} of plasma would not exceed of 2 in this case. Besides the lithium flux to the tokamak wall was estimated on the basis of experimental results on investigation of lithium behavior in tokamak T-11M. It is shown, that about 13.5 g of lithium deposit will be on the wall for the campaign of 1000 discharges, that it is close to lithium amount used for T-10 conditioning by evaporator in the previous experiments. Thus, it is shown, that upgrade of limiters in tokamak T-10 will allow providing of ECR plasma heating with power up to 3 MW at reasonable lithium flux.

Д.Н. ИГНАТЬЕВ^{1,2}, М.Л. ТАУБИН^{1,2}, Д.А. ЧЕСНОКОВ¹,
А.А. ЯСКОЛКО^{1,2}

¹ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» г. Подольск, Россия

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

ДВУХСЛОЙНЫЙ АНОД РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ КОМПЬЮТЕРНОГО ТОМОГРАФА

В данной статье представлен метод формирования вольфрамового слоя на поверхности графита. Описанный метод может быть использован для создания анода мощных рентгеновских трубок медицинского назначения в частности компьютерного томографа.

В работе исследуются теплофизические свойства графитовой основы и осажденного вольфрамового покрытия, а также прочность полученного покрытия.

Рассчитаны тепловые поля анода компьютерного томографа мощностью 100 кВт.

D.N. IGNATYEV^{1,2}, M.L. TAUBIN^{1,2}, D.A. CHESNOKOV¹,
A.A. YASKOLKO^{1,2}

¹*Federal State Unitarian Enterprise «Scientific Research Institute Scientific
Industrial Association «LUCH», Podolsk, Moscow region, Russia*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia
E-mail :dachesnokov@mail.ru*

TWO-PLY ANODE X-RAY TUBE CT SCANNER

This report presents on the method of formation of tungsten layer on the graphite surface. The described method can be used to create powerful anode x-ray tubes for medical purposes in particular a computer tomograph.

We study the thermal properties of the graphite base and coating the deposited tungsten, and strength of the resulting coating.

Calculated thermal fields anode CT 100 kW.

О.Н.СЕВРЮКОВ, В.Т. ФЕДОТОВ, А.А. ПОЛЯНСКИЙ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

НЕЙТРОНОПОГЛОЩАЮЩИЕ АМОРФНЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ПЛАКИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

В настоящей работе разработаны составы нейтронопоглощающих плакирующих сплавов на основе никеля содержащих элементы - В, Gd, Hf, Mn. Отработаны методики нанесения покрытий из этих сплавов на конструкционные стали. В работе показано, что «аморфное» нейтронопоглощающее покрытие является более однородным, чем «кристаллическое». Получены экспериментальные данные по прочности сцепления плакирующих покрытий со стальной подложкой и их нейтронопоглощающей способности.

O.N. SEVRYUKOV, V.T. FEDOTOV, A.A. POLYANSKY
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

NEUTRON-ABSORBING AMORPHOUS ALLOYS FOR CLADDING COATINGS

This paper shows developed compositions of neutron-absorbing cladding alloys based on nickel and containing such elements as B, Gd, Hf and Mn. The techniques for application of coatings from these alloys on the surface of structural steels have been improved. It has been shown that the amorphous neutron-absorbing coating is more uniform than the crystalline one. The experimental data on the adhesion of cladding coatings with a steel substrate and their neutron-absorbing capacity have been obtained.

В.Г. БАРАНОВ, Ю.Н. ДЕВЯТКО, В.В. МИХАЛЬЧИК,
А.В. ТЕНИШЕВ, О.В. ХОМЯКОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ЭВОЛЮЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОР ПО РАЗМЕРАМ В ПРОЦЕССЕ СПЕКАНИЯ ОКСИДНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Исследован процесс эволюции 2D функции распределения пор по размерам в оксидном ядерном топливе. Экспериментально установлены закономерности изменения функции распределения пор по размерам в зависимости от скорости нагрева образца, температуры выдержки и кислородного потенциала. Показано, что на промежуточной стадии спекания средний размер пор практически не меняется при сокращении общего количества пор.

V.G. BARANOV, Y.N. DEVYATKO, A.V. TENISHEV,
V.V. MIKHALCHIK, O.V. KHOMYAKOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*

GRAIN SIZE EVOLUTION DURING OXIDE FUEL SINTERING

The process of evolution of the 2D function of pore size distribution in the oxide nuclear fuel is investigated. The patterns of change in the pore size distribution function depending on the rate of heating of the sample, holding temperature and oxygen potential are experimentally established. It is shown that at an intermediate stage of sintering the average pore size does not change when reducing the total number of pores.

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

ИМИТАТОРЫ ПЛУТОНИЯ И АМЕРИЦИЯ В СМЕШАННОМ УРАН-ПЛУТОНИЕВЫЙ НИТРИДНЫЙ ТОПЛИВЕ

В настоящей работе на основании оценки физико-химических и термодинамических свойств выбраны имитаторы Pu и Am. Аналогами Pu являются Ce и Y, а аналогами Am – Dy. Разработана методика получения модельного ЧУП-топлива на основе нитридов лантанойдов и UN. Методом гидрирования-дегидрирования-нитрования получены порошки нитрида урана, церия, иттрия и диспрозия, проведено их смешение, прессование и спекание, получены образцы модельного нитридного ядерного топлива с имитацией плутония и америция. По результатам структурных исследований показано, что все образцы представляют собой твердый раствор нитридов РЗЭ в UN.

D.P. SHORNIKOV, S.N. NIKITIN, B.A. TARASOV,
V.G. BARANOV, M.S. YURLOVA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

IMITATORS OF PLUTONIUM AND AMERICIUM IN A MIXED URANIUM-PLUTONIUM NITRIDE FUEL

Uranium nitride and mix uranium nitride (U-Pu)N is most popular nuclear fuel for Russian Fast Breeder Reactor. The works in hot cells associated with the radiation exposure of personnel and methodological difficulties. To know the main physical-chemical properties of uranium-plutonium nitride it necessary research to hot cells. In this paper, based on an assessment of physico-chemical and thermodynamic properties of selected simulators Pu and Am. Analogues of Pu is Ce and Y, and analogues Am - Dy. The technique of obtaining a model nitride fuel based on lanthanides nitrides and UN. Hydrogenation-dehydrogenation-nitration method of derived powders nitrides uranium, cerium, yttrium and dysprosium, held their mixing, pressing and sintering, the samples obtained model nitride fuel with plutonium and americium imitation. According to the results of structural studies have shown that all the samples are solid solution nitrides rare earth (REE) elements in UN.

Р.С. КУЗЬМИН, В.Г. БАРАНОВ, В.В. МИХАЛЬЧИК,
А.В. ТЕНИШЕВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

СПЕКАНИЕ ДИОКСИДА УРАНА С КОНТРОЛИРУЕМОЙ СКОРОСТЬЮ УСАДКИ

Метод спекания с контролируемой скоростью усадки (КСУ) применен к прессованным компактам на основе диоксида урана, изготовленным в промышленных условиях. Спекание проводилось в dilatометре в восстановительной атмосфере $\text{Ar-8\%H}_2$, при варьировании скоростей усадки в интервале 0,01 – 0,3 %/мин с выдержкой 8 ч при температуре 1600 °C. Показано, что значения плотности спеченных таблеток и среднего размера зерна возрастают с понижением скоростей усадки. Показано, что в отличие от результатов [1, 2] снижение скорости нагрева не всегда приводит к уменьшению скорости усадки. В изотермическом режиме получена заданная скорость усадки 0,1-0,15 %/мин. Температурно-временные режимы, полученные с использованием КСУ, близки к производственным режимам спекания в проходных печах.

R.S. KUZMIN, V.G. BARANOV, V.V. MIKHALCHIK,
A.V. TENISHEV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*
E-mail: Onil709@mail.ru, VGBaranov@mephi.ru

RATE CONTROL SINTERING OF THE URANIUM DIOXIDE

The application of rate controlled sintering (RCS) technique for fabricating oxide fuel pellets in industrial conditions is investigated. Green pellets of UO_2 (with no additives) which underwent industrial-type compacting were sintered in reducing $\text{Ar-8\%H}_2$ medium using dynamic and isothermal RCS modes with exposure at 1600 °C during 8 hours. Decreasing shrinkage rate resulted in growth of sintered density for the dynamic RCS mode. Opposite to the results of earlier works [1,2], decreasing heating rate did not result in reducing sintering rate. Isothermal mode allowed sintering rate to be maintained between 0.1–0.15 %/min. Temperature–time modes obtained using RCS are close to the operation mode of through-type furnace used for mass production.

В.Г. БАРАНОВ, А.В. ЛУНЕВ, В.В. МИХАЛЬЧИК,
А.В. ТЕНИШЕВ, Д.П. ШОРНИКОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ПОВЕДЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ СМЕШАННЫХ НИТРИДОВ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Образцы смешанного модельного нитридного топлива были получены путем нитрирования из исходных металлов. Для исследования термической стабильности образцы смешанных нитридов подвергались изотермическим выдержкам в гелии. Увеличение температуры выдержки приводит к увеличению потери массы образцов. Усложнение состава моноснитрида урана также приводит к ускорению потери массы, причем по сравнению с чистым моноснитридом урана этот процесс происходит значительно быстрее. На поверхности чистого моноснитрида урана были обнаружены металлические выделения. Микрорентгеноспектральный анализ показал, что это выделения урана. Тем не менее, по сравнению с чистым нитридом урана смешанные модельные нитриды более активно испаряются и при более низких температурах.

V.G. BARANOV, A.V. LUNEV, V.V. MIKHALCHIK,
A.V. TENISHEV, D.P. SHORNIKOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

HIGH TEMPERATURE BEHAVIOR OF SIMULATED MIXED NITRIDES

Specimen of uranium-based mixed nitrides were synthesized by high-temperature nitriding of metal powder. To investigate thermal stability, samples were annealed in a helium atmosphere. During these experiments, the effect of increasing the exposure temperature is studied. Raising the exposure temperature results in a multifold increase of mass loss. A comparison with data on pure uranium nitride shows that increasing the complexity of the nitride systems also results in higher mass loss. Later microscopic investigation of test samples revealed that metal precipitates may be found only on the surface of test samples. Electron probe micro-analysis indicates these precipitates to be uranium metal. Nevertheless, compared to pure uranium nitride, uranium-based mixed nitrides exhibit active evaporation at lower temperatures.

А.В. ТЕНИШЕВ, В.Г. БАРАНОВ, Р.С. КУЗЬМИН,
С.А. ПОКРОВСКИЙ

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

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДИЛАТОМЕТРИЯ ОБРАЗЦОВ МОДЕЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Проведены высокотемпературные дилатометрические исследования модельных систем на основе диоксида урана с добавками выгорающего поглотителя нейтронов как в виде Gd_2O_3 так и в виде $AlGdO_3$, а также имитаторов продуктов деления. Показано, что на фоне высокотемпературной усадки образцов в некоторых случаях наблюдается резкий переход к расширению, что связано с увеличением объема образцов за счет образования жидких фаз. В образцах диоксида урана содержащих значительные количества Al, Gd и ИПД при температурах от 1950 до 2250 С наблюдается начало плавления эвтектик сложного состава. Таким образом, при усложнении исходного состава оксидного ядерного топлива и анализе его поведения при высоких температурах необходимо учитывать, что образование жидких фаз возможно при температуре на 1000 С меньшей по сравнению с температурой плавления чистого стехиометрического диоксида урана.

A.V. TENISHEV, V.G. BARANOV, R.S. KUZMIN
S.A. POKROVSKIY

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

HIGH TEMPERATURE DILATOMETRY OF SIMULATED OXIDE NUCLEAR FUEL

High temperature dilatometry of model systems based on uranium dioxide with additives of burnable neutron absorbers both as Gd_2O_3 and as $AlGdO_3$, and fission products simulators (FPS) was performed. It shows that in some cases instead of high temperature samples shrinkage there is a sharp transition to the expansion, which is associated with an increase of the samples volume due to the formation of liquid phases. The beginning of a complex composition eutectic melting starts at temperatures from 1950 to 2250 °C in the uranium dioxide samples containing significant amounts of Al, Gd, and FPS. Thus, in the analysis of oxide nuclear fuel behavior at high temperatures should be considered that the formation of liquid phases is possible at a temperature of 1000 °C lower than a melting point of pure stoichiometric uranium dioxide if its initial composition became more complex.

В.П. КОПЫТИН, В.Г. БАРАНОВ, А.В. ТЕНИШЕВ,
Р.С. КУЗЬМИН, С.А. ПОКРОВСКИЙ, В.В. МИХАЛЬЧИК,
М.А. БУРЛАКОВА

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

ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ИЗ ОБРАЗЦОВ UO_2 , СОДЕРЖАЩИХ ИМИТАТОРЫ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ И ВЫГОРАЮЩИЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ НЕЙТРОНОВ

Актуальность проблемы обусловлена тем, что технологический газ, выделяясь из топливных таблеток уранового топлива, в процессе выгорания топлива снижает теплопроводность зазора сердечник–оболочка, усиливает водородное охрупчивание материала оболочки твэла, вызывает ее науглероживание, а также транспортные процессы в топливе. В данной работе отработана методика исследования термодесорбции газов из топливного материала UO_2 в интервале температур 300-2000 К при скорости равномерного нагрева образцов 15 К/мин в вакууме. Получены характерные кинетические зависимости выделения газов из образцов UO_2 , содержащих имитаторы продуктов деления (ИПД) и выгорающий поглотитель нейтронов (ВПН). В зависимости от количества содержащихся в образце ИПД и ВПН термодесорбционные спектры (ТДС) газов изменяются. Изменяется состав выделяющегося газа, количество пиков в ТДС и происходит их смещение в сторону более высоких температур. Это свидетельствует о том, что внесение ИПД и ВПН приводит к изменению структуры материала образца и созданию так называемых ловушек, которые имеют различную энергию связи с газами. Это могут быть сетки дислокаций, поры, а также содержащиеся в матрице UO_2 ИПД и ВПН. Аналогичные процессы будут происходить в топливной таблетке и в реальных условиях работы АЭС.

V.P. KOPYITIN, V.G. BARANOV, A.V. TENISHEV, R.S. KUZMIN,
S.A.POKROVSKIY, V.V. MIKHALCHIK, M.A. BURLAKOVA
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

GAS EMISSION FROM THE UO_2 SAMPLES, CONTAINING FISSION PRODUCTS AND BURNABLE ABSORBER

The process gas released from the fuel pellets of uranium fuel during fuel burn-up reduces the thermal conductivity of the rod-shell gap, enhances hydrogen embrittlement of the cladding material, causes its carbonization, as well as transport processes in the fuel. In this study a technique of investigating the thermal desorption of gases from the UO_2 fuel material were perfected in the temperature range 300-2000 K for uniform sample heating rate of 15 K / min in vacuum. The characteristic kinetic dependences are acquired for the gas emission from UO_2 samples, containing simulators of fission products (SFP) and the burnable neutron absorber (VPN). Depending on the amount of SFP and VPN contained in the sample thermal desorption gas spectra (TDGS) vary. The composition of emitted gas varies, as well as the number of peaks in the TDGS and the peaks shift to higher temperatures. This indicates that introduction of SFPs and VPN alters the sample material structure and cause the creation of so-called traps which have different bonding energies to the gases. The traps can be a grid of dislocations, voids, and contained in the UO_2 matrix SFP and VPN. Similar processes will occur in the fuel pellets in the real conditions of the NPP as well.

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

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОЛЗУЧЕСТЬ СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО ТОПЛИВА

На основе анализа данных о термической ползучести UN в зависимости от структурно-фазового состояния рассмотрены наиболее вероятные механизмы ползучести. Предложено уравнение, связывающее термическую и радиационную ползучесть нитридного топлива с такими важными технологическими параметрами, как содержание плутония, пористость, размер зерна, содержание примесей переходных металлов и кислорода, содержание углерода. При стационарных параметрах работы нитридного топлива технической чистоты $\psi_0 \sim 10^{-4}$ ползучесть определяется, как термической компонентой по механизму типа межзеренного скольжения, так и радиационной компонентой, которая начинает играть существенную роль при температурах ниже 1100 °C. Оба вида ползучести в первом приближении имеют линейную зависимость от напряжения.

I.I. KONOVALOV, B.A. TARASOV, E.M. GLAGOVSKY
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*

STRUCTURAL-PHASE STATE AND CREEP MIXED NITRIDE FUEL

The most likely mechanisms of UN creep are considered by the analysis of thermal creep UN data depending on structural-phase state. An equation relating the thermal and radiation creep nitride fuel with such important technological parameters as plutonium content, porosity, grain size, the content of impurities of transition metals and oxygen, the carbon content has been suggested. At stationary operating parameters nitride fuel technical purity ($\psi_0 \sim 10^{-4}$) creep defines by the thermal component at mechanism of intergranular slip and by the radiation component, which is playing a significant role at temperatures below 1100 °C. Both types of creep in a first approximation have a linear dependence on the tension.

Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, В.А. ФЕСЕНКО,
О.А. КРЫМСКАЯ, С.В. ЧЕКАНОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

СВЕРХУПРУГИЙ СПЛАВ Ti-22%Nb-6%Zr: РЕНТГЕНОВСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Данная работа посвящена изучению особенностей деформации сверхупругого сплава Ti-22%Nb-6%Zr. Сверхупругость этого сплава реализуется за счет обратимой деформации при мартенситном превращении (МП) $\beta \rightarrow \alpha''$, начинающейся при напряжениях ниже предела текучести β -фазы.

Установлено, что увеличение межплоскостных расстояний в результате МП $\beta \rightarrow \alpha''$ способствует росту упругой деформации β -фазы растянутого образца, по крайней мере, до $\varepsilon=2,5\%$, и препятствует упругой деформации β -фазы сжатием поверхностного слоя образца при деформации менее 1%. Используя метод обобщенных полюсных фигур для изучения ориентационной зависимости МП в сверхупругом сплаве Ti-22%Nb-6%Zr показано, что: при сжатии деформационный наклеп, обусловленный МП $\beta \rightarrow \alpha''$, значительно выше в зернах с плоскостью прокатки $\{100\}$, нежели в зернах с плоскостью прокатки $\{111\}$; микродеформация решетки нагруженных зерен β - и α'' -фаз перераспределяется таким образом, что обеспечивает макродеформацию образца; наиболее интенсивное превращение $\beta \rightarrow \alpha''$ осуществляется в зернах, для которых $\Delta d / d_{av} > 0$, т.е. которые более всего склонны к увеличению объема их решетки.

Yu.A. PERLOVICH, M.G. ISAENKOVA, V.A. FESENKO,
O.A. KRYMSKAYA, S.V. CHEKANOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

SUPERELASTIC ALLOY Ti-22%Nb-6%Zr: X-RAY STUDY OF DEFORMATION FEATURES

In given work features of deformation of superelastic Ti-22%Nb-6%Zr alloy were studied. Superelasticity of this alloy is conditioned by passing of elastic deformation of the β -phase lattice into its reversible deformation by $\beta \rightarrow \alpha''$ martensite transformation (MT), beginning from stresses, which are smaller, than the yield point of β -phase.

It was revealed that an increase of interplanar spacings in the course of $\beta \rightarrow \alpha''$ MT promotes growth of β -phase elastic deformation by stretching of sample, at least, up to $\varepsilon=2.5\%$ and impedes elastic deformation of β -phase by compression of the surface layer of sample down to deformation above $\varepsilon=1\%$. Using X-ray method of generalized pole figures for study of orientation dependence of MTs in superelastic Ti-22%Nb-6%Zr alloy it was shown that: under compression the strain hardening due $\beta \rightarrow \alpha''$ transformation is significantly greater in grains with rolling plane $\{100\}$ than in grains with a rolling plane $\{111\}$; the lattice microdeformation at β - and α'' - phase grains under loading is redistributed so that it extremely assist the sample macrodeformation (most of all); most intense $\beta \rightarrow \alpha''$ transformation occurs in grains, where $\Delta d / d_{av} > 0$, most prone to increasing of its lattice volume.

О.В. ЕМЕЛЬЯНОВА, П.С. ДЖУМАЕВ, В.Л. ЯКУШИН,
В.И. ПОЛЬСКИЙ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И ТЕРМОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ХРОМИСТЫХ ФЕРРИТНО-МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОТОКАМИ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ

В данной работе представлены результаты исследования микроструктуры и термической стабильности поверхностных слоев хромистых ферритно-мартенситных сталей, модифицированных потоками высокотемпературной импульсной плазмы ВТИП. Обработка образцов сталей проводилась потоками импульсной азотной плазмы с удельной энергией падающего потока от 19 до 28 Дж/см². Исследования влияния плазменной обработки на изменение структурно-фазового состояния, топографии поверхности и элементного состава проведены с применением метода растровой электронной микроскопии (РЭМ) рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Показано, что независимо от исходного структурно-фазового состояния, плазменная обработка приводит формированию в поверхностном слое субмикроструктурной гомогенной структуры с характерными размерами порядка 100 нм. Получаемый модифицированный поверхностный слой демонстрирует значительную термическую стабильность при отжиге при температуре 650С в течение 3 ч.

O. EMEL'YANOVA, P. DZHUMAEV, V. YAKUSHIN, V. POLSKY
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND THERMAL STABILITY OF PULSED PLASMA PROCESSED CHROMIUM FERRITIC-MARTENSITIC STEELS

This paper presents results of the investigation of the microstructural evolution and thermal stability of the promising Russian ferritic-martensitic steels (EP 823, EP 900, EK 181 and ChS 139) for the nuclear and fusion applications after surface modification by high temperature pulsed plasma flows (HTPPF). Investigations of microstructure, topography and elemental content changes caused by nitrogen plasma irradiation with energy density $19\text{--}28\text{ J/cm}^2$ and pulse duration $20\text{ }\mu\text{s}$ were carried out. Microstructure and elemental content changes occurring in the modified surface layer were characterized by means of scanning electron microscopy (SEM) and x-ray microanalysis (EDS and WDS). It was shown that independently of initial microstructure and phase composition, HTPPF treatment of ferritic-martensitic steels leads to formation of ultrafine homogeneous structure in the near surface layers with typical grain size $\sim 100\text{ nm}$. Results of microstructure investigations demonstrate significant thermal stability of nanostructure formed by HTPPF treatment after annealing at $650\text{ }^\circ\text{C}$ during 3 h.

СЕКЦИЯ 3
ТЕХНОЛОГИЯ: ПАЙКА, СВАРКА,
ПРЕССОВАНИЕ, ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ
ОБРАБОТКА

SECTION 3
TECHNOLOGY:
BRAZING, WELDING, PRESSING,
ION-PLASMA TREATMENT

О.Н. СЕВРЮКОВ, Е.В.ГУСЕВА, А.А.ПОЛЯНСКИЙ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ ЗОНЫ ПАЙКИ СОЕДИНЕНИЙ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Настоящая работа посвящена исследованию структурно-фазового состояния паяных соединений разнородных материалов, полученных с использованием быстрозакаленных припоев, до и после испытаний в рабочих условиях. В качестве изучаемых объектов выбраны конструктивные элементы рабочей камеры Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР: макеты первой стенки (бериллиевая облицовка, соединённая с теплоотводящей бронзой методом высокотемпературной пайки) и дивертора (вольфрамовая облицовка с наплавленной медью, пайка медь-бронза), а также датчики давления, основным элементом которых является паяное соединение титан-сталь. Методами металлографии и электронной микроскопии проведен анализ исследуемых образцов, получены данные о структурно-фазовом состоянии паяных соединений и его эволюции в результате циклического термического или механического воздействия.

O.N. SEVRYUKOV, E.V. GUSEVA, A.A. POLYANSKY
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

PECULIARITIES OF THE STRUCTURAL-PHASE STATE OF A BRAZING ZONE OF DISSIMILAR METAL JOINTS

The present work is devoted to the study of the structural-phase state of the brazed joints of dissimilar materials obtained by rapidly quenched filler metals before and after tests in the working conditions. The constructive elements of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) working chamber were selected: mock-ups of the first wall (a beryllium cladding joined with the heat-removing bronze by high-temperature brazing) and the diverter (a tungsten cladding with built-up copper, brazing of copper with bronze), as well as pressure sensors, the main element of which is a brazed joint of titanium with steel. An analysis of the investigated samples and the data on the structural-phase state of the brazed joints and its evolution as a result of a cyclic thermal or mechanical impact was carried out by metallography and electron microscopy.

А.А. ИВАННИКОВ, Б.А. КАЛИН, А.Н. СУЧКОВ, М.А. ПЕНЯЗЬ,
М.С. ЮРЛОВА
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

РАЗРАБОТКА БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ БЕЗБОРИСТЫХ ПРИПОЕВ ДЛЯ ПАЙКИ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

В современной ракетной и атомной технике устойчивое применение находят коррозионностойкие стали. Создание неразъемных соединений из этих сталей является сложной задачей, которую можно решить с помощью сварки или пайки. В последнее время перспективным является применение быстрозакаленных борсодержащих припоев. Однако использование таких сплавов-припоев приводит к образованию в зоне пайки хрупких боридов, наличие которых ухудшает коррозионную стойкость и механические характеристики соединений. Поэтому разработка новых припоев, не содержащих бор, для пайки коррозионностойких сталей является актуальной задачей.

Изучение двойных систем Ni-Be и Ni-Si показало перспективность замены бора в никелевых припоях бериллием, в соответствии, с чем возникла задача изучения фазовых равновесий в тройной системе Ni-Be-Si.

В работе рассмотрены сплавы системы Ni-Si-Be с различным содержанием Si и Be. В ходе их изучения методами металлографии и дифференциально-термического анализа установлено наличие двух легкоплавких составляющих. Измерена микротвердость и проведены рентгенофазовый и микрорентгеноспектральный анализы ряда сплавов системы Ni-Si-Be.

На основе этих данных разработаны составы, из которых могут быть получены с помощью сверхбыстрой закалки припои в виде ленты, пригодные для высокотемпературной вакуумной пайки сталей при температуре 1100-1160°C.

A.A. IVANNIKOV, B.A. KALIN, A.N. SUCHKOV, M.A. PENYAZ,
M.S. YURLOVA

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

DEVELOPMENT OF RAPIDLY QUENCHED NICKEL-BASED NON-BORON FILLER METALS FOR BRAZING CORROSION RESISTANT STEELS

Corrosion-resistant steels are stably applied in modern missile and nuclear technology. Creating of permanent joints of these steels is a difficult task that can be solved by means of welding or soldering. In these days application of rapidly-quenched boron-containing filler metals is promising. However, the use of such alloys leads to the formation of brittle borides in brazing zone, which degrades the corrosion resistance and mechanical properties of the compounds. Therefore, the development of non-boron alloys for brazing stainless steels is important task.

The study of binary systems Ni-Be and Ni-Si revealed the perspective of replacing boron in Ni-based filler metals by beryllium, so there was the problem of studying of phase equilibrium in the system Ni-Be-Si.

The alloys of the Ni-Si-Be with different contents of Si and Be are considered in this paper. The presence of two low-melting components is revealed during of their studying by methods of metallography analysis and DTA. Microhardness is measured and X-ray and electron microprobe analyzes are conducted for a number of alloys of Ni-Si-Be.

The compositions are developed on the basis of these data. Rapidly-quenched brazing alloys can be prepared from these compositions, and they are suitable for high temperature brazing of steels.

К.Е. ПРИХОДЬКО^{1,2}, Б.А. ГУРОВИЧ¹, М.М.ДЕМЕНТЬЕВА¹
¹*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
г. Москва, Россия*
²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ИЗУЧЕНИЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЕНКАХ NbN В ПРОЦЕССЕ ОБЛУЧЕНИЯ СМЕШАННЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

В настоящей работе продемонстрировано использование подхода селективного замещения атомов для модификации структуры и свойств тонких сверхпроводниковых пленок NbN при облучении низкоэнергетическими смешанными ионными пучками при малых дозах воздействия. Все исследования фазового состава проводились методами просвечивающей электронной микроскопии. Подробно освещена методика определения фазового состава по дифракционным картинам, полученным от светлоразрывных изображений высокого разрешения с помощью преобразования Фурье. Показано, что в процессе ионного облучения происходят фазовые переходы, сопровождающиеся образованием оксинитридов ниобия из исходного NbN.

K. E. PRIKHODKO^{1, 2}, B. A. GUROVICH¹, M.M. DEMENTYIEVA¹
¹*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*
²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*

STUDY OF PHASE TRANSITIONS IN NBN ULTRATHIN FILMS UNDER COMPOSITE ION BEAM IRRADIATION

This work demonstrates implementation of Selective Displacement of Atoms (SDA) technique to change the crystal structure and atomic composition of thin superconductive film of NbN under low dose composite ion beam irradiation. All structure investigations were performed using High Resolution Transmission Microscopy (HRTEM) technique by the analysis of Fourier transformation of bright field HRTEM images. It was found that composite ion beam irradiation induces the formation of niobium oxynitrides phases.

Б.А. ГУРОВИЧ¹, К.Е. ПРИХОДЬКО^{1,2}, М.А. ТАРХОВ¹,
Е.А. КУЛЕШОВА¹, Б.В. ГОНЧАРОВ¹, Д.А. ГОНЧАРОВА¹,
Е.Д. ОЛЬШАНСКИЙ¹, В.Л. СТОЛЯРОВ¹,
А.Г. ДОМАНТОВСКИЙ¹, Д.А. КОМАРОВ¹, Л.В. КУТУЗОВ¹
¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
г. Москва, Россия
²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия

СОЗДАНИЕ КРИОГЕННЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО NbN ЗА СЧЕТ МОДИФИКАЦИИ ЕГО СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СВОЙСТВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В работе рассмотрено использование смешанного ионного облучения для создания сопротивлений, работающих при температуре 4.2 К. Сопротивления были сформированы на основе модифицированной под действием ионного облучения тонкой пленки сверхпроводящего нитрида ниобия. Показана возможность управляемого изменения типа электрической проводимости в ходе облучения пленки от характерного для металлов до характерного для изоляторов. Продемонстрирована возможность формирования резистивных элементов в широком диапазоне номиналов за счет изменения топологии защитной маски при проведении облучения.

B.A. GUROVICH¹, K.E. PRIKHODKO^{1,2}, M.A. TARKHOV¹,
E.A. KULESHOVA¹, B.V. GONCHAROV¹, D.A. GONCHAROVA¹,
E.D. OLSHANSKY¹, V.L. STOLYAROV¹, A.G. DOMANTOVSKY¹,
D.A. KOMAROV¹, L.V. KUTUZOV¹
¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia
²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

FORMATION OF CRYO-RESISTORS FROM NbN THIN FILM MODIFIED UNDER ION IRRADIATION

The paper considers the use of composite ion irradiation to create resistive functional elements, working at a cryogenic temperature of 4.2 K. Resistive elements were formed based on a superconducting thin film of niobium nitride modified under the composite ion beam irradiation. It was demonstrated the possibility of change on a control way the type of electrical conductivity of the film under irradiation from the metal type to the insulator one. We have also showed the possibility to form resistive elements in a wide range of nominal values by selecting the protective mask topology for irradiation.

Д.В. МИНЬКО¹, Е.К. БЕЛЯВИН¹, О.О. КУЗНЕЧИК²,
Е.Г. ГРИГОРЬЕВ³

¹Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

²Институт порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь

³Национальный исследовательский университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ИМПУЛЬСНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

Приведены результаты электронно-лучевой и атомно-силовой микроскопии поверхностных слоев углеродистой и легированной стали с содержанием углерода 0,4–0,5 %, 0,9–0,95 % и содержанием хрома до 1% и до 18 % обработанной импульсной плазмой в воздушной среде при атмосферном давлении. Установлено, что при определенных условиях импульсно-плазменного воздействия возникает эффект полировки поверхности, а также формирование закалочных структур виде игольчатого мартенсита, способствующего повышению микротвердости и, как следствие, износостойкости стали.

D.V. MIN'KO¹, E.K. BELYAVIN¹, O.O. KUZNECHIK²,
E.G. GRIGORYEV³

¹Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Belarus

²Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

INVESTIGATION OF THE MORPHOLOGY OF STRUCTURAL STEEL AFTER PULSED PLASMA TREATMENT

Results are given of the electron beam and atomic force microscopy of the surface layers of carbon and alloyed steels with a carbon content of 0.4-0.5 and 0.9-0.95% and a chromium content up to 1 and 18% which were treated by pulsed plasma in the air at atmospheric pressure. It is found that an effect of the surface polishing, as well as the formation of quenching structures in the form of needle-shaped martensite promoting an increase of the microhardness and, consequently, the wear resistance of the steel occur under certain conditions of the pulsed plasma action.

О.О. КУЗНЕЧИК¹, Д.В. МИНЬКО², Е.К. БЕЛЯВИН²,
Е.Г. ГРИГОРЬЕВ³

¹*Институт порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь*

²*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь*

³*Национальный исследовательский университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА НА СТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ПОВЫШЕННОГО ТРЕНИЯ И АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА

Приведена основанная на электроискровом спекании технология электроконтактной наплавки в воздушной среде на стальную поверхность порошков самофлюсующихся сплавов на основе никеля и железа. Приведены система адаптивной параметрической стабилизации режимов электроконтактной наплавки, структура и физико-механические свойства получаемых износостойких покрытий. Показана возможность использования этой технологии в производстве калибровочных втулок правильно-отрезных станков.

О.О. KUZNECHIK¹, D.V. MIN'KO², E.K. BELYAVIN²,
E.G. GRIGORYEV³

¹*Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus*

²*Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Belarus*

³*National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

ELECTROCONTACT SURFACING OF WEAR-RESISTANT COATINGS FROM SELF-FLUXING ALLOYS BASED ON NICKEL AND IRON ON THE STEEL SURFACE OF THE DETAILS OF UNITS WITH AN INCREASED FRICTION AND AN ABRASIVE WEAR

The technology of electrocontact surfacing in the air, based on electrospark sintering, onto the steel surface of the powders of self-fluxing alloys based on nickel and iron is presented. The system of an adaptive parametric stabilization of the electrocontact surfacing regimes, the structure and physicomachanical properties of the resulting wear-resistant coatings are presented. The possibility of using this technology in the production of calibrated sleeves of straightening-cutting machines is shown.

И.А. СОСНОВСКИЙ¹, О.О. КУЗНЕЧИК², Е.К. БЕЛЯВИН³,
Е.Г. ГРИГОРЬЕВ⁴

¹*Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь*

²*Институт порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь*

³*Белорусский национальный технический университет г. Минск, Беларусь*

⁴*Национальный исследовательский университет «МИФИ», г. Москва, Россия*

ИНДУКЦИОННАЯ ЦЕНТРОБЕЖНАЯ НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКИХ И АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МЕДИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОДИСПЕРСНОГО МОДИФИКАТОРА В ВИДЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА СТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Приведена технология индукционной центробежной наплавки в воздушной среде на внутреннюю поверхность порошков самофлюсующихся сплавов на основе меди с использованием нанодисперсного модификатора в виде оксида алюминия. Показано, что введение в состав исходной шихты тонкодисперсного бемита, на определенных технологических режимах, может способствовать его превращению в нанодисперсный оксид алюминия. Приведены, структура и триботехнические свойства получаемых с помощью приведенной технологии антифрикционных и износостойких покрытий. Показана возможность использования этой технологии в производстве высоконагруженных подшипников скольжения карьерной техники.

I.A. SOSNOVSKY¹, O.O. KUZNECHIK², E.K. BELYAVIN³,
E.G.GRIGORYEV⁴

¹*Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus*

³*Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Belarus*

⁴*National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

**INDUCTION CENTRIFUGAL SURFACING OF
WEAR-RESISTANT AND ANTI-FRICTION COATINGS FROM
COPPER-BASED SELF-FLUXING ALLOYS USING A
NANODISPERSED MODIFIER IN THE FORM OF
ALUMINUM OXIDE ONTO THE STEEL SURFACE OF
HEAVY-LOADED SLIDE BEARINGS**

The technology of induction centrifugal surfacing in the air onto the internal surface of the powders of copper-based self-fluxing alloys using a nanodispersed modifier in the form of aluminum oxide is presented. It is shown that the introduction of finely dispersed boehmite into the original batch may contribute to its transformation into nanodispersed aluminum oxide under definite technological regimes. The structure and tribotechnical properties of anti-friction and wear-resistant coatings obtained by the presented technology are given. The possibility of using this technology in the production of heavy-loaded slide bearings for the mining equipment is shown.

О.Н. СЕВРЮКОВ, В.Т. ФЕДОТОВ, А.А. ПОЛЯНСКИЙ,
С.А. ПОКРОВСКИЙ, Р.С. КУЗЬМИН
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

**ПОЛУЧЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАЗЦОВ-
СВИДЕТЕЛЕЙ (ПЛАВКИХ МОНИТОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ)
ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО МОНИТОРИНГА
КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ**

Объектом исследований являлись сплавы на основе свинца и кадмия, используемые в качестве плавких мониторов для контроля максимальной температуры облучения (ПМТ) образцов из конструкционных сталей при облучении в исследовательском реакторе ИР-8. В результате работы выбраны и апробированы исходные материалы для изготовления сплавов; разработана технологическая схема производства сплавов для ПМТ и проведены экспериментальные исследования свойств этих сплавов.

O.N. SEVRYUKOV, V.T. FEDOTOV,
A.A. POLYANSKY, S.A. POKROVSKI, R.S. KUZMIN
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

**PRODUCTION AND THERMAL ANALYSIS OF WITNESS-
SAMPLES FOR THE TEMPERATURE CONTROL OF
STRUCTURAL STEELS UNDER IRRADIATION**

The object of investigation were lead and cadmium based alloys that are used as fuse monitors to control the maximum irradiation temperature (fuse temperature monitors, FTM) of samples from structural steels under irradiation in a research reactor IR-8. The result of the work was selected and tested initial materials for production of alloys. A technological scheme of the production of alloys for FTM has been developed and experimental studies of the properties of these alloys have been carried out.

О.Н. СЕВРЮКОВ, А.А. ПОЛЯНСКИЙ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ И НЕЙТРОНОПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

Объектом исследования являлись аморфизирующиеся сплавы с повышенным содержанием бора для плакирования поверхности металлов, не содержащие бора быстрозакаленные сплавы для защитных покрытий на высокобористом плакирующем слое, образцы стали с высокобористым и безбористым защитным покрытием. Цель работы - исследование коррозионной стойкости покрытия в воде при температуре 40°C в условиях открытого доступа кислорода, в течение 1000 часов, а также особенностей микроструктуры плакированных образцов до и после коррозионных испытаний. В результате работы получены данные о коррозионной стойкости образцов стали X18H10T с защитным слоем из быстрозакаленного сплава состава никель 19мас. %хрома-10мас. %кремния на высокобористом покрытии.

O.N. SEVRYUKOV, A.A. POLYANSKY
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

THE CORROSION RESISTANCE AND NEUTRON-ABSORBING PROPERTIES OF COATINGS BASED ON AMORPHOUS ALLOYS

The object of the present study was the corrosion-resistant amorphizing alloys with an increased content of boron for cladding the surface of metals, rapidly quenched alloys without boron for protective coatings on a high-boron cladding layer, as well as steel samples with a protective coating with a high content of boron and without boron. The aim of the work is to investigate the corrosion resistance of a coating in water at the temperature of 40 °C in conditions of an open access of oxygen for 1000 h, as well as the features of the microstructure of clad samples before and after the corrosion tests. New data on the corrosion resistance of Cr18Ni10Ti steel samples with a protective layer from a rapidly quenched alloy Ni-19Cr-10Si (in wt.%) on a high-boron coating have been obtained.

А.А. ИВАННИКОВ, В.Т. ФЕДОТОВ, А.Н. СУЧКОВ,
М.А. ПЕНЯЗЬ, И.В. ФЕДОТОВ, Б.А. ТАРАСОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИПОЕВ СИСТЕМЫ Ni-Cr-Si-Be ДЛЯ ПАЙКИ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Методом сверхбыстрой закалки расплава получены нанокристаллические ленточные сплавы-припои системы Ni-Cr-Si-Be. Этими припоями проведена вакуумная высокотемпературная пайка сталей аустенитного (12X18H10T) и ферритно-мартенситного класса (12X21H5T). Выявлены основные закономерности формирования структурно-фазового состояния паяных соединений, особенности взаимодействия расплавленного припоя с паяемыми материалами, определены оптимальные температурно-временные параметры процесса пайки.

A.A. IVANNIKOV, V.T. FEDOTOV, A.N. SUCHKOV,
M.A. PENYAZ, I.V. FEDOTOV, B.A. TARASOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

APPLICATION OF FILLER METALS OF SYSTEM Ni-Cr-Si-Be FOR BRAZING CORROSION RESISTANT STEELS

Amorphous and nano-crystalline ribbon-type filler metals of Ni-Cr-Si-Be are obtained by rapid quenching. These filler metals are used in high-temperature vacuum brazing of ferritic-martensitic (12Kh21N5T) and austenitic (12Kh18N10T) steels. The basic laws of structure-phase state foundation of brazed joints are determined. The features of the interaction of melted filler metal and brazed materials are identified. The optimal temperature-time parameters of brazing process are identified as well.

Г.Н. ЕЛМАНОВ, П.С. ДЖУМАЕВ, Е.А. ИВАНИЦКАЯ,
В.И. СКРЫТНЫЙ, Е.С. ЖАРИКОВ, А.Д. РУСЛАНОВ,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия
E-mail: gnelmanov@mephi.ru

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ (NI, FE, CR)-B-SI НА ПРОЦЕСС ИХ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Методами дифференциального термического анализа (DTA), рентгеноструктурного анализа (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (SEM) исследованы структурно-фазовые превращения в процессе многостадийной кристаллизации аморфных сплавов доэвтектических составов $\text{Ni}_{71,5}\text{Cr}_{6,8}\text{Fe}_{2,7}\text{B}_{11,9}\text{Si}_{7,1}$ and $\text{Ni}_{63,4}\text{Cr}_{7,4}\text{Fe}_{4,3}\text{Mn}_{0,8}\text{B}_{15,6}\text{Si}_{8,5}$, классифицируемых Американским Сварочным Сообществом как AWS BNi-2. Проанализировано влияние химического состава сплавов на температуры и экзотермические тепловые эффекты фазовых превращений, а также на фазовый состав сплавов на трех стадиях кристаллизации. Предложено термодинамическое объяснение наблюдаемых тепловых эффектов. Было показано, что увеличение количества бора в аморфных сплавах увеличивает температуру первичной кристаллизации, снижает температуру образования метастабильной τ -фазы со структурой типа M_{23}B_6 , повышает ее стабильность, увеличивает количество силицида никеля Ni_3Si . Рассматривается также процесс первичной кристаллизации на свободных и контактных поверхностях лент из аморфных сплавов, полученных закалкой из расплава.

G.N. ELMANOV, P.S. DZHUMAEV, E.A. IVANITSKAYA,
V.I. SKRYTNYI, E.S. ZHARIKOV, A.D. RUSLANOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*
E-mail: gnelmanov@mephi.ru

INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF RAPIDLY QUENCHED AMORPHOUS ALLOYS (NI, FE, CR) -B-SI ON ITS CRYSTALLIZATION PROCESS

The subject of research includes the structure and phase transformations during a multistage crystallization of metallic glasses with hypoeutectic compositions $\text{Ni}_{71,5}\text{Cr}_{6,8}\text{Fe}_{2,7}\text{B}_{11,9}\text{Si}_{7,1}$ and $\text{Ni}_{63,4}\text{Cr}_{7,4}\text{Fe}_{4,3}\text{Mn}_{0,8}\text{B}_{15,6}\text{Si}_{8,5}$ labelled according to American Welding Society as AWS BNi-2. The metallic glasses were obtained in the form of tapes with a thickness of 0.04–0.05 mm by the rapid solidification (rapid quenching) techniques. Experimental methods: differential thermal analysis (DTA), X-ray diffraction analysis (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The influences of the alloys chemical composition on the temperatures and the exothermic heat effects of phase transformations, as well as on the phase composition of alloys at three stages of crystallization were analyzed. We present a thermodynamic explanation of the observed heat effects. It has been shown that increasing the amount of boron in the amorphous alloy increases the primary crystallization temperature, reduces the temperature of formation of metastable τ -phase with M_{23}B_6 -type structure, and increases its stability and the amount of nickel silicide Ni_3Si . The process of primary crystallization on free and contact surfaces of the tapes of amorphous alloys obtained by the rapid solidification techniques of the melt is considered too.

Б.А.КАЛИН, Н.В.ВОЛКОВ, Р.А.ВАЛИКОВ, А.С. ЯШИН,
Т.В.ЯКУТКИНА
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

МНОГОКОМПОНЕНТНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МАТЕРИАЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПУЧКОВ ИОНОВ С ШИРОКИМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ

В работе рассмотрены различные факторы, влияющие на эффективность ионного перемешивания. Установлено, что в основе проникновения атомов многослойных пленок в поликристаллическую подложку лежит процесс энергопередачи от ионов и ПВА пленок к последующим каскадам смещений. При этом процесс проникновения внедряемых атомов на большие глубины определяется плотностью дефектов, радиационно-стимулированной миграцией внедренных атомов и их физико-химическим взаимодействием с атомами матрицы, которые могут быть описаны в рамках модели изотропного перемешивания. Показано, что при легировании атомами из многослойных пленок возможно формирование градиентных слоев, которые определяются радиационными пробегами в подложке внедряемых атомов и их миграцией под облучением пучком ионов с широким энергетическим спектром.

B.A. KALIN, N.V. VOLKOV, R.A. VALIKOV,
A.S. YASHIN, T.V.YAKUTKINA
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

MULTICOMPONENT ALLOYING OF NEAR-SURFACE LAYERS OF MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF ION BEAMS WITH WIDE ENERGY SPECTRUM

Various factors that influence on the efficiency of ion mixing are considered in this paper. It is found, that penetration of the atoms from multilayer films to polycrystalline substrate based on the process of energy transfer from ions and PKA of the films to subsequent displacement cascades. At the same time process of the penetration of implanted atoms to great depths determined by defects density, radiation-stimulated migration of implanted atoms and their physic-chemical interaction with matrix atoms, which can be described in frames of isotropic mixing model. It is shown, that gradient layers can be formed during alloying by the atoms from multilayer films, which determined by radiation runs of implanted atoms in substrate and their migration under irradiation by the ion beam with wide energy spectrum.

Б.А. КАЛИН¹, Н.В. ВОЛКОВ¹, Р.А. ВАЛИКОВ¹, А.С. ЯШИН¹,
В.П. КРИВОБОКОВ², С.Н. ЯНИН², О.Х. АСАИНОВ²,
Ю.Н. ЮРЬЕВ²

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

² *Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, г. Томск, Россия*

ФИНИШНАЯ ИОННО-ПУЧКОВАЯ ОБРАБОТКА ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛИННОМЕРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Представлены результаты использования методов ионно-пучковых технологий для проведения финишной обработки металлических изделий. Эксперименты выполнены на установке ИЛУР-03, которая позволяет проводить операции очистки, полировки и дополнительного легирования приповерхностных слоев материала цилиндрических образцов неограниченной длины при помощи радиального пучка ионов Ar^+ с энергией до 5 кэВ. В качестве образцов использовались трубки из циркониевого сплава Э110 длиной до 500 мм. Показано, что выбранные режимы автоматической обработки снижают шероховатость поверхности по всей длине образцов и увеличивают однородность приповерхностного слоя без наблюдаемого воздействия на объемные свойства материала. Проведенная обработка способствует образованию оксидных пленок с повышенными защитными свойствами.

Б.А. KALIN¹, N.V. VOLKOV¹, R.A. VALIKOV¹, A.S.YASHIN¹,
V.P.KRIVOBOKOV², S.N.YANIN², O.Kh.ASAINOV², Yu.N.YUREV²

¹ *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*

² *National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

FINISH ION BEAM TREATMENT OF THE LONG RANGE CYLINDRICAL PRODUCTS OUTER SURFACE IN AUTOMATIC MODE

The results of using of ion-beam technologies methods for finish treatment of metal products are presented. The experiments were performed at the instalaton ILUR-03, which allows the operation of cleaning, polishing and additional doping of the near-surface layers of the material of unlimited length cylindrical samples using radial Ar^+ ions beam with energy up to 5 keV. The tubes from zirconium alloy E110 up to 500 mm length were used as samples for investigation. It is shown that selected automatic treatment modes reduce the surface roughness over the entire length of the samples and increase uniformity of the near-surface layer without observable effect on the bulk properties of material. Treatment performed promotes the formation of oxide films with improved defensive properties.

А.С. ЯШИН

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

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ШИРОКОАПЕРТУРНОГО ИОННОГО ПУЧКА

В данной работе представлены результаты исследований по изучению состояния цилиндрической поверхности под воздействием широкоапертурного ионного пучка. Эксперименты проводились на фрагментах оболочечных труб из сплава Э110 (Zr-1%Nb) длиной до 500 мм. Внешняя поверхность трубок обрабатывалась ионами Ar^+ с энергией 0.1-1.0 кэВ до доз $(1-10) \times 10^{18}$ ион $см^{-2}$ на установке КВК-10. Из-за особенностей конструкции установки угол падения частиц на поверхность изменялся от 0 до 90°. Обнаружено, что в результате проведенной обработки образуется сглаженный рельеф поверхности и повышается однородность приповерхностного слоя материала. Предложенный статистический метод позволил на основе результатов обработки профилограмм выявить особенности состояния поверхности поликристаллических образцов со случайной и систематической компонентами.

A.S. YASHIN

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

FEATURES OF RELIEF FORMATION OF THE POLYCRYSTALLINE SAMPLES UNDER THE INFLUENCE OF A WIDE-APERTURE ION BEAM

The results of investigation of the state of the cylindrical surface after influence of wide-aperture ion beam are presented in this paper. Experiments were carried out on the parts of cladding tubes from E110 alloy (Zr-1%Nb) up to 500 mm length. The outer surface of the tubes was treated by Ar^+ ions with energy 0.1-1.0 keV up to doses $(1-10) \times 10^{18}$ ion cm^{-2} on the installation KVK-10. Due to design features of the installation, the angle of incidence of particles on the surface varied from 0 to 90°. It is found that as a result of treatment made, smoothed relief of the surface forms and uniformity of near-surface layer structure improves. The statistical method suggested allowed to reveal features of the polycrystalline samples surface state with random and regular components, based on the results of profilograms analysis.

В.МИРОНОВ, А.ТАТАРИНОВ

Рижский технический университет, г. Рига, Латвия

ОТДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ МЕДНЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ СТАЛЬНОЙ ПОДЛОЖКИ

Ряд технологий связаны с необходимостью отделения металлических покрытий от подложки. Наиболее часто требуется отделение медных покрытий от стальной основы. Для этих целей используют методы механической очистки, травления и др. Для повышения производительности и улучшения качества продукта возможно использование импульсного электромагнитного поля.

В настоящей работе рассмотрены возможности применения импульсного электромагнитного поля для удаления медных покрытий. Исследовано влияние толщины и пористости покрытия, параметры оборудования и индуктора, а также технологических аспектов на процесс удаления медных тонких покрытий от стальной основы.

V. MIRONOV, A. TATARINOV

Riga Technical University, Laboratory of Powder Materials, Riga, Latvia

DETACHMENT OF COPPER COATINGS FROM THE STEEL SUBSTRATE BY PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD

A range of technologies are connected with the necessity of detachment of metal coatings from the substrate. The most often, the detachment of copper coatings from steel substrates is required. For this purpose, mechanical methods of cleaning and etching are typically used. In order to increase productivity and improve quality of the product, the use of a pulsed electromagnetic field is proposed.

In this paper, we consider the applicability of pulsed electromagnetic fields for the removal of copper coatings. The effects of thickness and porosity of the coating, the parameters of the equipment and the electromagnetic inductor, as well as technological aspects of the detachment process of thin copper coatings from steel substrates were investigated.

СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ПОРОШКАХ α -ТРИКАЛЬЦИЙФОСФАТА ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ

α -трикальцийфосфат (α -ТКФ) используется в качестве основного компонента цементов, применяемых для заполнения костных дефектов. Процесс растворения порошков α -ТКФ, необходимый для изготовления цементов, контролируется поверхностными реакциями, и для повышения скорости растворения порошка за счет увеличения поверхности контакта частиц с жидкостью его измельчают.

В настоящей работе методами рентгеноструктурного анализа и растровой электронной микроскопии выполнено исследование структурных изменений в порошках α -ТКФ, подвергнутых измельчению в планетарной мельнице и последующему отжигу при температуре 1300 °С. После обработки в планетарной мельнице наблюдалось систематическое размытие рефлексов рентгеновского спектра α -ТКФ; существенного изменения его периодов решетки и атомных параметров не установлено; фиксировались слабые рефлексы фазы $(\text{CF}_2)_n$, интенсивность которых возрастала с увеличением времени помола. Средний размер частиц порошка уменьшался в пределах от ~ 10 до ~ 2 мкм. Из результатов Ритвелдовского уточнения следует, что основной вклад в уширение рентгеновских линий вносит измельчение ОКР (от 250 до 80 нм). Величина микроискажений изменялась в пределах от $1 \cdot 10^{-6}$ до $2 \cdot 10^{-4}$. Деформация, осуществляемая по дислокационному механизму, по-видимому, невелика, рассматриваются возможные механизмы деформации. После отжига обнаружено присутствие фазы с апатитной структурой, количество которой возрастало с увеличением времени механоактивации. Порошки после отжига характеризовались однородной микроструктурой с содержанием фтора в зернах ~ 6 и 3 вес.%. Такая структура характерна для бифазных материалов с хорошо и слабо растворимыми компонентами, соответственно: α -ТКФ и апатит.

STRUCTURAL TRANSFORMATIONS IN α -TRICALCIUM PHOSPHATE POWDER UNDER MECHANICAL ACTIVATION AND SUBSEQUENT HEAT TREATMENT

α -tricalcium phosphate (α -TCP) is used as the main component of cement applied for filling bone defects. The dissolution α -TCP powder required for the cement production is controlled by surface reactions and to enhance the rate of dissolution of the powder by increasing the contact surface with the liquid particles being milled. In this paper, the methods of X-ray diffraction and scanning electron microscopy study carried out to investigate of structural changes in α -TCP powders subjected to milling in a planetary mill and followed by annealing at 1300 °C.

After treatment in the planetary mill the systematically broadening of α -TCP X-ray reflexes was observed; a significant change in its lattice periods and atomic parameters are not found. It was fixed a small reflections of $(\text{CF}_2)_n$ phase, the intensity of which increases with increasing milling time. The average particle size was reduced in the range of from about 10 to about 2 microns. From the results of Ritveld refine it follows that the main contribution to the broadening of X-ray lines makes broadening through microblock diminution (from 250 to 80 nm). Microdistortions value ranged from $1 \cdot 10^{-6}$ to $2 \cdot 10^{-4}$. The deformation is carried out by the dislocation mechanism appears to be small, the possible deformation mechanisms discussed. After annealing revealed the presence of phase with the apatite structure, percentage of which increases with increasing time of mechanical activation. The powders were characterized after the annealing homogeneous microstructure with a fluorine content in the grains ~ 6 and 3 wt. %. Such a structure is typical for the biphasic materials with well and poorly soluble components, respectively: α -TCP and apatite.

П.С. ДЖУМАЕВ, В.Л. ЯКУШИН, В.И. ПОЛЬСКИЙ,
О.Н. СЕВРЮКОВ, М.С. ЮРЛОВА
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ ПОТОКАМИ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ, ПЛАКИРОВАННЫХ СПЛАВАМИ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ

Представлены результаты экспериментального исследования влияния обработки потоками высокотемпературной импульсной плазмы на структурно-фазовое состояние и коррозионную стойкость исходных и плакированных малоуглеродистых и низколегированных сталей. Отработана методика плакирования образцов из малоуглеродистых и низколегированных сталей быстрозакаленными из расплава лентами сплава на основе никеля марки СТЕМЕТ 1305, позволяющая получать достаточно однородный по структурно-фазовому состоянию и элементному составу плакирующий слой толщиной 35–40 мкм с хорошей адгезией к подложке. Установлено, что модифицирование исходных и предварительно плакированных образцов из низколегированных сталей потоками импульсной плазмы позволяет снизить скорость их коррозии в 3–30 раз, тогда как плакирование без последующей обработки потоками плазмы не приводит к повышению коррозионной стойкости образцов из-за отслоения плакирующего слоя при коррозионных испытаниях. Выявлены оптимальные режимы плакирования и плазменной обработки для повышения коррозионной стойкости. Установленное повышение коррозионной стойкости модифицированных потоками плазмы образцов при испытаниях на межкристаллитную коррозию обусловлено происходящими при плазменной обработке изменениями микроструктуры и фазового состава приповерхностных слоев. Вследствие создания в приповерхностных слоях двумерной субмикроструктурной (~100–200 нм) структуры и равномерного распределения легирующих элементов наблюдается смена механизма коррозии с межкристаллитной на практически равномерную фронтальную.

P.S. DZHUMAEV, V.L. YAKUSHIN, V.I. POLSKY,
O.N. SEVRYUKOV, M.S. YURLOVA
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*

INFLUENCE OF THE PULSED PLASMA FLOWS TREATMENT ON THE CORROSION RESISTANCE OF THE LOW-ALLOY STEEL PLATED WITH NI-BASED ALLOY

Results of the investigation of the influence of the high temperature pulsed plasma flows (HTPPF) treatment regimes on the corrosion resistance of low-alloy steel 20KhGNM in initial state and plated by rapidly quenched nickel based alloy STEMET 1305 are presented. A technique for plating samples of low-carbon and low-alloy steels by rapidly quenched nickel based alloy STEMET 1305 (Ni-18Cr-10Si). It allows obtaining a sufficiently homogeneous in the elemental composition and microstructure of the clad layer with the thickness of 35-40 microns and good adhesion to the steel substrate. It is shown that the plating of samples of low-alloy steel with nickel alloy STEMET 1305 and their subsequent processing of pulsed gas plasma flows can reduce the corrosion rate of up to 30 times, while the cladding with no further processing of the plasma flow does not increase the corrosion resistance of the samples due to the delamination of the clad layer during the corrosion tests. Optimal modes of cladding and plasma treatment to improve corrosion resistance are obtained. Increase of the corrosion resistance of HTPPF-modified samples is caused by changing of the microstructure of near surface layers. Formation of the sub-microcrystalline structure (mean cell size ~100-200 nm) and homogeneous distribution of alloying elements in modified layer lead to the change of the corrosion mechanism from intergranular to equal corrosion.

А.А. СИДОРЕНКО, П.В. МОРОХОВ, О.Н. СЕВРЮКОВ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия
E-mail: sidann5021993@rambler.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПАЙКИ И СОСТАВА ПРИПОЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАЯНОГО СОЕДИНЕНИЯ СПЛАВОВ ТИТАНА ВТ6 И ОТ4

В данной работе проводили исследование влияния параметров пайки (температура, время выдержки) и состава припоя на прочностные характеристики паяного соединения сплавов титана ВТ6 и ОТ4, выполненных припоями СТЕМЕТ 1202 и СТЕМЕТ 1410. Припой СТЕМЕТ 1410 для пайки данных сплавов применяется впервые. Разработаны технологические режимы пайки титановых сплавов ВТ6-с и ОТ4 при температурах 800, 840, 870 °С с временами выдержки 30 минут и 2 часа. Для выявления структурных особенностей паяного шва проведен комплекс металлографических исследований. Исследованы микроструктурные особенности паяного шва на различных стадиях изотермического затвердевания в процессе диффузионной пайки. Для определения прочностных характеристик паяного соединения проведены измерения микротвердости в зоне паяного шва и осуществлены механические испытания на одноосное растяжение. Исследована взаимосвязь структуры паяного соединения с его прочностью. При оптимальном режиме пайки 840 °С, 2 часа прочность паяных соединений оказалась на уровне основного материала.

A.A. SIDORENKO, P.V. MOROKHOV, O.N. SEVRYUKOV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*

**INVESTIGATE INFLUENCE OF BRAZING PARAMETERS
AND THE COMPOSITION OF THE FILLER METAL ON THE
STRENGTH CHARACTERISTICS OF TITANIUM ALLOYS
VT6 AND OT4**

In this paper we investigate influence of brazing parameters (temperature, time) and the composition of the filler metal on the strength characteristics of titanium alloys VT6 and OT4 brazing by STEMET 1202 and STEMET 1410. Filler alloy STEMET 1410 is used for the first time for brazing this titanium alloys. The technological modes brazing titanium alloys VT6-c and OT4 at temperatures of 800, 840, 870 ° C with a holding time of 30 minutes and 2 hours. A complex metallographic is carried out for identify the structural features of the solder joint. Microstructural features soldered seam is investigated at various stages during the isothermal solidification diffusion brazing. To determine the strength characteristics of the solder joint microhardness measured in the area of the soldered seam and implemented mechanical uniaxial tensile test. The interrelation of the structure of the solder joint with his strength are researched. Strength of brazing joints holding 2 hours below 840 ° C was at the level of the base material.

ЕРМАКОВА Н.С., ЮРЛОВА М.С., ГРИГОРЬЕВ Е.Г.
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия
E-mail: yurmary@mephist.ru*

СВОЙСТВА ТЯЖЕЛЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СПАРК-ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

Тяжелые сплавы на основе вольфрама (ТВС) используются в качестве радиационной защиты от облучения, в атомной промышленности, в ракетной технике, в качестве компонентов боеприпасов. ТВС получают методами порошковой металлургии, и в частности, методом электроимпульсного плазменного спекания. Однако свойства сплавов, полученных этим способом, сильно отличаются в зависимости от выбора режима спекания.

В работе изучено влияние режимов спарк-плазменного спекания на микроструктуру и механические свойства тяжелых вольфрамовых сплавов ВНЖК-90 и ВНЖК-93; приведены основные зависимости плотности и прочностных характеристик от температуры и скорости спекания; сделаны выводы о зависимости микроструктуры сплавов от способа получения исходных порошков. Установлено, что при спарк-плазменном спекании достижение теоретической плотности компактов из тяжелых сплавов возможно при твердофазном спекании. Показано, что для исследуемых сплавов максимальный уровень механических свойств при спарк-плазменном спекании наблюдается при температуре спекания 1300 °С. Установлено, что изменение скорости нагрева не вносит вклад в изменение плотности образцов. В то же время на механические свойства скорость спекания оказывает существенное влияние.

N.S. ERMAKOVA, M.S. YURLOVA, E.G. GRIGORYEV
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*
E-mail: yurmary@mephist.ru

PROPERTIES OF TUNGSTEN HEAVY ALLOYS, PREPARED BY SPARK-PLASMA SINTERING

Tungsten heavy alloys (WHAs) are used as protection from radiation exposure, in the nuclear industry, in the missile art, as components of ammunition. They produced by powder metallurgy and, in particular, by field-assisted sintering. The properties of the alloys obtained by this method are very different and depends on the choice of the sintering conditions.

In this paper the effect of spark-plasma sintering parameters on the microstructure and mechanical properties of tungsten heavy alloys VNZHK-90 and VNZHK-93 are studied. The basic dependences of the density and strength characteristics from the sintering temperature and velocity are shown. Conclusions about the dependence of the method of preparation of the starting powders on the microstructure of alloys are formulated. It was found that by spark-plasma sintering technique it is possible to achieve the theoretical density of compact heavy alloys during solid-phase sintering. It is shown that the maximum level of alloys mechanical properties is observed when sintering temperature 1300 ° C. It is found that the change in the rate of heating does not contribute to change in the density of the samples. At the same time, on the mechanical properties the shrinkage rate has a significant effect.

А.Г. ЖОЛНИН¹, А.П. МЕЛЕХОВ¹, Р.С.ХАФИЗОВ¹,
С.А. ВАКУЛЕНКО¹, Н.А.РУБИНКОВСКИЙ¹, А.В.САМОХИН²,
Н.В.АЛЕКСЕЕВ², Е.Г. ГРИГОРЬЕВ¹

¹ *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

E-mail: azholnin@list.ru

² *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии
наук (ИМЕТ РАН), Москва, Россия*

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МИКРОПРИМЕСЕЙ К НАНОПОРОШКУ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ СПЕЧЕННОГО СПАРК-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ МАТЕРИАЛА

Проведено сравнительное исследование результатов спарк-плазменного спекания (СПС) двух видов нано-порошков оксида алюминия, полученных методами взрыва проводника и синтезом в плазме. При близких параметрах обоих порошков (сферическая форма частиц, их размеры, фазовый состав) и одинаковых режимах СПС свойства получаемых компактов значительно отличаются как по механическим характеристикам, так и по микроструктуре. Причина различий в свойствах получаемых компактов заключается в технологических примесях в порошках, полученных разными способами.

Искусственное добавление примесей, содержащихся в нанопорошке, полученном электровзрывом проводника, к порошку, изготовленному синтезом в плазме и не содержащем этих примесей, позволило выявить их влияние на формирование микроструктуры и свойства образцов спеченных спарк-плазменным методом.

A.G. ZHOLNIN¹, A.P. MELEHOV¹, R.S. HAFIZOV¹,
S.A. VAKULENKO¹, N.A. RUBINKOVSKIY¹, A.V. SAMOHIN²,
N.V. ALEKSEEV², E.G. GRIGORIEV¹

¹ *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia*

E-mail: azholnin@list.ru

² *Institute of Metallurgy and Material Science, RAS, Moscow, Russia*

EFFECT OF TRACE ADDITION TO ALUMINUM OXIDE NANOPOWDERS ON THE MICROSTRUCTURE OF THE SINTERED BY SPARK-PLASMA

A comparative study of the results of spark-plasma sintering (SPS) of the two types of aluminum oxide nanopowders obtained by the methods of the explosion of the conductor and the synthesis of plasma. If similar parameters of both powders (spherical shape of the particles, their size, phase composition) and identical modes of SPS properties of the resulting compacts are significantly different both in mechanical properties and microstructure. The reason for the differences in the properties of the obtained compact is technological impurities in the powders obtained by different methods.

Artificial addition of impurities contained in the nanopowder obtained electroexplosion conductor for powders made by synthesis in plasma, and not containing these impurities, have revealed their effect on the formation of the microstructure and properties of the sintered samples spark-plasma method.

СЕКЦИЯ 4
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

SECTION 4
METHODS OF RESEARCH
AND MODELING OF MATERIALS

Ю.Н. ДЕВЯТКО¹, В.В. НОВИКОВ², В.И. КУЗНЕЦОВ²,
О.В. ХОМЯКОВ¹, Д.А. ЧУЛКИН²
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия
²АО «ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара», г.Москва, Россия

МОДЕЛИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИОКСИДА УРАНА

Построены физические модели теплоёмкости при постоянном объёме и теплопроводности диоксида урана на основе данных по его фоновым спектрам. Объяснен аномальный рост коэффициента теплопроводности оксидного ядерного топлива в высокотемпературной области. Показано, что вкладом от степеней свободы носителей заряда в наблюдаемый коэффициент теплопроводности диоксида урана можно пренебречь вплоть до температуры плавления. Разработанные модели теплофизических свойств не содержат подгоночных параметров.

YU.N. DEVYATKO¹, V.V. NOVIKOV², V.I. KUZNETSOV²,
O.V. KHOMYAKOV¹, D.A. CHULKIN²
¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering
Physics Institute), Moscow, Russia
²SC “VNIINM”, Moscow, Russia
E-mail: homaykov_o_v@rambler.ru

MODELS OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF URANIUM DIOXIDE

Physical models of specific heat at constant volume and thermal conductivity of uranium dioxide are developed based on phonon spectrum data. It is explained an abnormal growth of thermal conductivity coefficient of oxide nuclear fuel in high temperature region. It is shown that the contribution from charge carrier's degrees of freedom into observed thermal conductivity coefficient of uranium dioxide can be neglected up to melting point. Developed models of thermophysical properties do not contain fitting parameters.

А.В. НАЗАРОВ¹, А.А.МИХЕЕВ², И.В. ЕРШОВА¹,
А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия

²Московский государственный университет дизайна и технологий,
Москва, Россия

КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ СЕГРЕГАЦИЙ В УПРУГОМ ПОЛЕ КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В ГЦК МЕТАЛЛАХ

Новые уравнения для диффузионных потоков междоузельных примесных атомов, учитывающие влияние упругих напряжений, используются с целью изучения перераспределения атомов примеси в упругих полях дислокаций. Применяются два уровня моделирования: первый – нахождение коэффициентов, определяющих влияние компонент тензора деформации на диффузионные потоки атомов примесей в ГЦК структурах для различных типов диффузионных скачков по междоузельным позициям. Для реализации этого в рамках метода молекулярной статики была разработана модель, учитывающая конфигурацию атомов как в окрестности равновесной позиции для междоузельного атома примеси так и в окрестности седловой точки.

Второй уровень это моделирование образования сегрегаций междоузельных атомов, которое базируется на решении нелинейных уравнений диффузии, учитывающих упругие деформации, создаваемые дислокациями. Результаты показывают, что распределение междоузельных атомов вблизи дислокации имеет довольно сложный характер, а распределение концентрации вакансий качественно отличается от распределения атомов углерода.

A.V. NAZAROV¹, A.A. MIKHEEV², I. VERSHOVA¹,
A.G. ZALUZHNYI¹

¹ *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

² *Moscow State University of Design and Technology, Moscow, Russia*

KINETIC OF SEGREGATION FORMATION IN THE VICINITY OF EDGE DISLOCATION IN FCC METALS

We use new equations for the interstitial impurity diffusion fluxes under strain to study impurity atom redistribution in the vicinity of dislocations taking into account the strain generated by mentioned defects. Two levels of simulation are applied. First one is evaluation of coefficients that determine the influence of strain tensor components on interstitial diffusion fluxes in FCC structures for different kinds of atom jumps. For this purpose we have developed a model into the framework of molecular static method taking into account an atom environment as near the interstitial site as for the saddle-point configuration. The second level is modeling of interstitial segregation formation based on nonlinear diffusion equations taking strains generated by defects. The results show, that the distributions of the interstitials near the dislocations have quite complicated characters and the vacancy distribution has qualitatively different character as compared with carbon distribution.

А.Л. УДОВСКИЙ^{1,2}, Д.А. ВАСИЛЬЕВ¹

¹ФГБУ ИМЕТ РАН им. А.А.Байкова, г. Москва, Россия

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

ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ПЕРВОПРИНЦИПНЫХ РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ОЦК СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Fe-Cr

В работе рассмотрено применение физико-эмпирических моделей для термодинамического описания ОЦК сплавов системы Fe-Cr и фазового равновесия, а также предсказано поведение температурных зависимостей теплоемкости сплавов. Этот подход позволил осуществить верификацию результатов квантово механических расчетов полученными разными авторами по энтальпии смешения при 0К, которые были использованы для оценки химической составляющей энтальпии смешения. Анализ рассчитанных фрагментов диаграммы состояния и температурных зависимостей теплоемкостей для двух составов сплавов, и сопоставление их с экспериментальными данными, позволил оценить степень достоверности использованных различных приближений при проведении квантово механических расчетов и тем самым осуществить их верификацию для дальнейшего практического использования.

A.L. UDOVSKY^{1,2}, D.A. VASILYEV¹

¹Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of RAS, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

VERIFICATION OF AB-INITIO CALCULATION RESULTS USING THERMODYNAMIC SIMULATION OF PHASE EQUILIBRIUM AND THE TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE HEAT CAPACITY OF THE BCC Fe-Cr ALLOYS

The paper deals with the application of physical-empirical models for the thermodynamic description of the bcc Fe-Cr alloys and phase equilibrium, as well as to predict the behavior of the temperature dependences of the specific heat of alloys. This approach allowed to perform verification of ab-initio calculations results obtained by different authors for mixing enthalpy at 0K which were used to assess the chemical part of the mixing enthalpy. Analysis of calculated phase diagram fragments and the temperature dependences of heat capacities for two alloy compositions and their comparison with experimental data, has allowed us to estimate the degree of reliability of various approximations used in ab-initio calculations, and thereby realize their verification for further practical use.

А.Л.УДОВСКИЙ^{1,2}, М.В.КУПАВЦЕВ¹

¹ФГБУ ИМЕТ РАН им. А.А.Байкова, г. Москва, Россия

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

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ σ - ФАЗЫ В СИСТЕМЕ Fe-Cr

Разработана трех-подрешеточная модель для описания распределения атомов компонентов с различными координационными числами (12, 14, 15) в зависимости от состава и температуры. Энергетические параметры модели были привязаны к результатам квантово-механических расчетов, полученных для парамагнитных состояний различных упорядоченных комплексов со структурой сигма - фазы системы Fe-Cr при 0К. Разработан алгоритм и компьютерная программа решения системы уравнения состояния, которые позволили рассчитать концентрационные зависимости распределения парциальных долей атомов компонентов по различным подрешеткам сигма-фазы в интервале 300-1100 К. Рассчитаны температурные зависимости заполнения атомов по трем модельным подрешеткам для сплавов составов, 40,50 и 60 ат. %Cr. Получено удовлетворительное согласие между результатами расчетов и экспериментальными данными, измеренными с помощью нейтронно-структурных исследований. Предпринята попытка расчета равновесия между ОЦК растворами и сигма - фазой системы Fe-Cr. Получено удовлетворительное согласие результатов расчета с экспериментальными данными по температуре и некоторое расхождение с экспериментальными данными по составу при образования сигма - фазы из ОЦК – раствора при 800К. Проведено обсуждение результатов моделирования, полученных квантово - механическим и статистико – термодинамическим методами.

A.L. UDOVSKY^{1,2}, M.V. KUPAVTSEV¹

¹*Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of RAS, Moscow, Russia*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

THE COMPARISON OF DIFFERENT APPROACHES TO THE MODELING OF THE STRUCTURAL PROPERTIES OF σ -PHASE OF THE Fe-Cr SYSTEM

In this paper the three- sublattice model (3SLM) for description of distribution of atoms (with different coordination numbers 12, 14 and 15) of two components into σ -phase structure, which depend on composition and temperature, is developed. Energetic parameters of 3SLM were calculated by fitting to results obtained by ab-initio simulations conducted for paramagnetic states of differently ordered complexes with the sigma-phase's structure for Fe - Cr system at 0 K. Respective algorithm and computer program for solving set equations of the state have allowed to calculate an atom distribution of components upon the sub-lattices of σ -phase at 300 – 1100 K. The temperature dependences of atoms seated on the three model sub-lattices for 40, 50 and 60 at% Cr alloys were calculated. There is satisfactory agreement between calculated results and the experimental data obtained by neutron structural researches. The equilibrium between bcc solutions and σ - phase of the Fe-Cr system was calculated. The satisfactory agreement between calculated result and experimental data on temperature, and some divergences on composition at formation σ -phase from bcc- solution, were received at 800K. Simulation results obtained by ab-initio and statistic – thermodynamic approaches were discussed.

Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, О.А. КРЫМСКАЯ,
Д.И. ЖУК
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДЕНТИРОВАНИЯ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

С помощью метода конечных элементов исследовано индентирование материалов с эффектом памяти формы и последующее восстановление отпечатка. Результаты численных расчетов сравнены с экспериментальными исследованиями для двух типов материалов с эффектом памяти формы, с односторонним мартенситным превращением и с эффектом сверхупругости. Использовался 200 мкм сферический индентор. По результатам расчетов построены графики различных характеристик для нагружения, разгрузки и термического восстановления отпечатка для различных материалов с эффектом памяти формы. Восстановление отпечатка, сделанного индентором Берковича (трехгранная пирамида) сопоставлено с восстановлением сферического отпечатка.

Yu.A. PERLOVICH, M.G. ISAENKOVA, O.A. KRYMSKAYA,
D.I. ZHUK
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

THERMO-MECHANICAL FINITE ELEMENT MODELING OF SHAPE MEMORY MATERIALS' MICROINDENTATION

Indentation of shape memory materials and later heating with recovery of indent is studied in this work using finite element modeling. Results of simulations of two types of shape memory materials, with one-way shape memory effect and with superelastic properties compared to experimental indentation with 200 μ m spherical indenter. Based on results of finite element modeling, several useful quantities plotted for loading, unloading and thermal recovery for various materials with shape memory effect. Recovery of imprint made with Berkovich (three-sided pyramid) compared to recovery of imprint made with spherical indenter.

Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, О.А. КРЫМСКАЯ,
Д.И. ЖУК
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ НЕПРЕРЫВНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Создана конечно-элементная модель процесса испытания материала индентором Берковича. Используя разработанную модель индентора и испытываемого материала, проведены серии расчетов для установления закономерностей поведения материалов при их индентировании. Построены зависимости результатов индентирования от механических характеристик материалов, на основании которых рассчитаны безразмерные функции, используемые в разработанной методике определения упругопластических характеристик материала по кривым непрерывного индентирования. Результаты обработки кривых непрерывного индентирования стали 20 сравниваются с данными стандартной методики измерения механических свойств по диаграмме сжатия исследуемого материала. Величины пределов текучести, полученных двумя описанными способами, различаются друг от друга на 10%, что свидетельствует о приемлемой точности определения механических свойств материалов по данным непрерывного индентирования.

Yu.A. PERLOVICH, M.G. ISAENKOVA, O.A. KRYMSKAYA,
D.I. ZHUK
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

DETERMINATION OF MATERIAL'S MECHANICAL PROP- ERTIES IN DEPTH SENSING INDENTATION BASED ON RE- SULTS OF FINITE ELEMENT MODELING

Finite element model of indentation process with Berkovich pyramid indenter was created. Using this model of indenter and indented material, several series of calculations were made. These calculations lead to determination of material behavior specialties during indentation. Relations between material properties and its' behavior during instrumented indentation were used to create dimensionless functions needed to construct method, suitable to determine materials' mechanical properties with results of depth sensing indentation. Results of mechanical properties' determination using depth sensing indentation for "steel 20" were compared to properties obtained with standard compression tests. These two results differ by less than 10% for yield stress which evidence of a good accuracy for depth sensing indentation methods.

Е.А. СМІРНОВ, Г.Н. ЕЛМАНОВ

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

РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В UO_2 И $(\text{U,Pu})\text{O}_2$

Проведен анализ механизмов диффузии и характеристик миграции точечных дефектов в во флюоритных структурах UO_2 и $(\text{U,Pu})\text{O}_2$. Показана возможность сложных смешанных механизмов миграции анионных и катионных вакансионных и междоузленных дефектов Френкеля в зависимости от стехиометричности материалов. Для температур 1303-1673 К проведена статистическая обработка литературных данных по характеристикам радиационно-ускоренной диффузии (РУД) металлических атомов в UO_2 и $(\text{U,Pu})\text{O}_2$. Получена приближенная температурная зависимость коэффициента РУД. В рамках представлений о механизмах диффузионных процессов во флюоритных структурах предложена приближенная температурная зависимость коэффициента РУД кислорода в UO_2 и $(\text{U,Pu})\text{O}_2$.

E.A. SMIRNOV, G.N. ELMANOV

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

RADIATION ENHANCED DIFFUSION PROCESSES IN UO_2 AND $(\text{U,Pu})\text{O}_2$

The diffusion mechanisms and migration characteristics of point defects in the fluorite structures of UO_2 and $(\text{U, Pu}) \text{O}_2$ were analyzed. The possibility of complex migration mechanisms of anionic and cationic vacancy and interstitial Frenkel defects depending on the stoichiometry of materials was shown. The statistical analysis of published data of the characteristics of radiation-enhanced diffusion (RED) of metal atoms in UO_2 and $(\text{U, Pu}) \text{O}_2$ for temperatures 1303-1673 K was carried out. An approximate temperature dependence of RED coefficient was obtained. Within the framework of understanding of the mechanisms of diffusion processes in fluorite structure the approximate temperature dependence of the RED coefficient of oxygen for UO_2 and $(\text{U, Pu}) \text{O}_2$ was proposed.

Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, С.Н. КАПЛИЙ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ЭКСПРЕССНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ТОЧНЫХ ОБРАТНЫХ ПОЛЮСНЫХ ФИГУР

Применительно к металлическим материалам с кристаллическими решетками ГЦК и ОЦК предложен новый рентгеновский метод построения текстурных обратных полюсных фигур (ОПФ) по кривым наклона образца при его быстром вращении, характеризующийся высокой точностью и экспрессностью. В отличие от распространенного в настоящее время метода построения ОПФ при использовании функции распределения ориентаций (ФРО), синтезируемой по нескольким частичным прямым полюсным фигурам, предлагаемый метод исходит из простейшей геометрической интерпретации процедуры измерения, требует минимального времени работы рентгеновского дифрактометра (менее одного часа) и не более нескольких секунд расчетного времени на компьютере.

Yu.A. PERLOVICH, M.G. ISAENKOVA, S.N. KAPLIY
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

EXPRESS METHOD OF CONSTRUCTION OF ACCURATE INVERSE POLE FIGURES

With regard to metallic materials with FCC and BCC crystal lattice a new method for constructing the X-ray texture inverse pole figures (IPF) by using tilt curves of spinning sample, characterized by high accuracy and rapidity, was proposed. In contrast to the currently widespread method to construct IPF by use of orientation distribution function (ODF), synthesized in several partial direct pole figures, the proposed method is based on a simple geometrical interpretation of the measurement procedure, requires a minimal operating time of the X-ray diffractometer (less than one hour) and only a few seconds of computer data treatment.

Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, М.Г. ИСАЕНКОВА, В.А. ФЕСЕНКО,
О.А. КРЫМСКАЯ
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ТЕКСТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЙ

Одной из характеристик, контролируемых при производстве труб из сплавов на основе циркония, являются интегральные текстурные параметры Кернса, или f -параметры, которые определяют анизотропию физико-механических свойств изделия. Эти параметры представляют собой сумму эффективных долей базисных нормалей $[0001]$, ориентированных вдоль выбранного направления в образце. При этом до сих пор не существует стандартизированной процедуры их расчета.

Широкое распространение и доступность рентгеновских дифрактометров, высокая статистическая значимость получаемых результатов и развитие программного обеспечения для текстурного анализа обуславливают оптимальность определения f -параметров по полным прямым полюсным фигурам ППФ (0001), рассчитанным через функцию распределения зерен по ориентациям (ФРО).

В настоящей работе проведен анализ ошибок восстановления ФРО по нескольким неполным ППФ с помощью программы LaboTex. При этом сравнение расчетных данных проводилось с экспериментальными полными ППФ (0001), полученными методом «сшивки», который состоит в согласовании неполных ППФ, зарегистрированных с трех взаимно перпендикулярных сечений образца. Рассмотрены различные типы текстур, различное количество и комбинации неполных ППФ. Для этого с продольной, поперечной и радиальной поверхностей образца трубы CANDU записаны по 6 неполных ППФ: (0001), $\{11\bar{2}0\}$, $\{11\bar{2}2\}$, $\{10\bar{1}2\}$, $\{10\bar{1}3\}$, $\{10\bar{1}0\}$. На основании сравнения экспериментально построенных и рассчитанных по ФРО полных ППФ, а также f -параметров оптимизированы методики их определения для изделий из сплавов на основе циркония.

Yu.A. PERLOVICH, M.G. ISAENKOVAB, V.A. FESENKO,
O.A. KRYMSKAYA
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

OPTIMIZATION OF THE PROCEDURE FOR DETERMINING INTEGRAL TEXTURE PARAMETERS OF PRODUCTS FROM Zr-BASED ALLOYS USING THE ORIENTATION DISTRIBUTION FUNCTION

Integral texture Kearns parameters, or f -parameters, are the one of the characteristics that is controlled during the tube production of Zr-based alloys now. These parameters define the anisotropy of physical and mechanical properties of the products. f -parameters are the sum of effective fractions of basal normals [0001] aligned in a selected sample direction. However, so far there is no standardized procedure for their calculation.

The widespread availability of X-ray diffractometers, the high statistical significance of the results and the software development for texture analysis causes the optimality of the determining of f -parameters by complete direct pole figures (0001) calculated through orientation distribution function (ODF).

Accuracy analysis of the ODF extraction by several incomplete pole figures using LaboTex software was carried out in the frame of present paper. The comparison of the calculated data was performed with experimental complete pole figures (0001) obtained by «sewing» method, which consists in combination of incomplete pole figures registered for three mutually perpendicular sections of the sample. Various texture types, different number and combinations of incomplete pole figures were considered. For this purpose, 6 incomplete pole figures – (0001), $\{11\bar{2}0\}$, $\{11\bar{2}2\}$, $\{10\bar{1}2\}$, $\{10\bar{1}3\}$, $\{10\bar{1}0\}$ – were registered for each of three mutually perpendicular surfaces of the CANDU-tube sample (longitudinal, transverse and radial). By comparison of experimental and calculated by ODF complete pole figures as well as f -parameters, procedures of their determination were optimized for products from Zr-based alloys.

М.Г. ИСАЕНКОВА, Ю.А. ПЕРЛОВИЧ, В.А. ФЕСЕНКО
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва, Россия*

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ ТЕКСТУРНЫХ ПРЯМЫХ ПОЛНЫХ ПОЛЮСНЫХ ФИГУР ПО РЕНТГЕНОВСКИМ ДАННЫМ

Рассмотрены применяемые в настоящее время методы построения текстурных полных прямых полюсных фигур (ПППФ) на основе результатов рентгеновских дифрактометрических измерений применительно к изделиям из сплавов на основе циркония и, в частности, используемых в атомном реакторе оболочечных труб, для которых особенно важна точность определения интегральных текстурных параметров. Основное внимание уделено техническим вопросам, решаемым с помощью компьютерной обработки обширных массивов получаемых экспериментальных данных. В их числе внесение поправок на дефокусировку, приемы построения полных прямых полюсных фигур и определение интегральных текстурных параметров. Описаны методы восстановления полных прямых полюсных фигур по частичным, записанным до углов наклона образца $\psi=70-80^\circ$: метод экстраполяции данных на неисследованную область стереографической проекции и метод «сшивки» или взаимного согласования частичных полюсных фигур, измеренных для трех взаимно перпендикулярных поверхностей изделия. Выявлены пределы применимости указанных методов, зависящие от формы исследуемого изделия и степени полойной текстурной неоднородности. На основании большого числа экспериментальных данных установлена точность определения интегральных параметров, используемых для расчета физико-механических свойств металлов с гексагональной кристаллической структурой, которая составляет 0,02 с учетом текстурной неоднородности штатных изделий из сплавов на основе циркония.

M.G. ISAENKOVA, Yu.A. PERLOVICH, V.A. FESENKO
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics
Institute), Moscow, Russia*

MODERN METHODS OF EXPERIMENTAL CONSTRUCTION OF TEXTURE COMPLETE DIRECT POLE FIGURES BY USING X-RAY DATA

Currently used methods for constructing texture complete direct pole figure (CDPF) based on the results of X-ray diffractometric measurements were considered with respect to the products of Zr-based alloys and, in particular, used in a nuclear reactor cladding tubes, for which the accuracy of determination of integral texture parameters is of the especial importance. The main attention was devoted to technical issues which are solved by means of computer processing of large arrays of obtained experimental data. Among considered questions there are amendments of the defocusing, techniques for constructing of complete direct pole figures and determination of integral textural parameters. The methods of reconstruction of complete direct pole figures by partial direct pole figures recorded up to tilt angles of sample $\psi=70-80^\circ$: the method of extrapolation of data to an uninvestigated region of the stereographic projection, and the method of "linking" of partial pole figures measured for three mutually perpendicular plane sections of the product. The limits of applicability of these methods, depending on the shape of the test product and the degree of inhomogeneity of the layer-by-layer texture, were revealed. On the basis of a large number of experimental data, the accuracy of the integral parameters used for calculation of the physical and mechanical properties of metals with a hexagonal crystal structure was found to be equal to 0.02, when taking into account the texture heterogeneity of regular products from Zr-based alloys.

В.И. СКРЫТНЫЙ, В.Н. ЯЛЫЦЕВ

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

ВЗАИМНЫЕ РАЗВОРОТЫ КРИСТАЛЛОВ

В работе рассмотрены ориентационные соотношения между кристаллами на основе функции взаимных разворотов. С учетом симметрии кристаллов представлено распределение предельных углов разворота для кубических и гексагональных материалов. Рассчитаны максимальные значения предельных углов разворота для ряда кристаллографических осей. Приведено распределение разворотов, соответствующих появлению решеток совпадающих узлов. Также представлены результаты расчетов плотности распределения межфазных углов взаимного разворота кубических и гексагональных кристаллов.

V.I. SKRYTNY, V.N. YALTSEV

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

MUTUAL DISORIENTATIONS OF CRYSTALS

Orientation relationships between crystals are considered on the base on disorientation distribution function. The distribution of limiting disorientation angles is obtained taking into account the symmetry of crystals. Maximum values of limiting disorientation angles for some crystallographic axis are calculated. Distribution density of disorientation angles corresponding to formation of coincidence site lattices is considered. Estimations of interphase disorientations between cubic and hexagonal crystals are carried out.

В.И. СКРЫТНЫЙ, В.Н. ЯЛЫЦЕВ

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

**ДВОЙНЫЕ БРЭГГОВСКИЕ ОТРАЖЕНИЯ В
МОНОКРИСТАЛЛАХ И ПОЛИКРИСТАЛЛАХ С
ТЕКСТУРОЙ**

Проведен анализ особенностей регистрации двойных брэгговских отражений в моно и поликристаллах. Предложена схема регистрации двойных брэгговских отражений в монокристаллах с использованием рентгеновского синхротронного излучения и в поликристаллах с текстурой.

V.I. SKRYTNY, V.N. YALTSEV

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

**DOUBLE BRAGG REFLECTIONS IN SINGLE CRYSTALS AND
TEXTURED POLYCRYSTALS**

Analysis of the detection of the double Bragg reflection in single crystals and polycrystals is carried out. Technique of the detection of the double Bragg reflection in single crystals and textured polycrystalline samples using X-ray synchrotron radiation is proposed.

