

УДК 621.039.53.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Н.Н. Пилипенко

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

61108, Харьков, ул. Академическая, 1

E-mail: azhazha@kipt.kharkov.ua

Поступила в редакцию 30 марта 2009 г.

Приведены результаты исследований, посвященных разработкам конструкционных материалов для элементов оборудования ядерно-энергетических установок. Показано, что развитие ядерной энергетики в значительной степени зависит от разработок перспективных конструкционных материалов для реакторов нового поколения и усовершенствования материалов эксплуатируемых ядерно-энергетических установок. Представлены результаты исследований химического состава, структуры и механических свойств слитков сплава Zr1Nb, полученных методом двойного вакуумно-дугового переплава расходных электродов, составленных из тройной шихты. Из полученного сплава Zr1Nb изготовлена и исследована опытно-промышленная партия трэкс- и труб для ТВЭЛ'ов для реакторов типа ВВЭР. Приведены данные об уровне чистоты металлов, полученных различными физическими методами, на основе проведенных разработок и реализации высокоэффективных методов рафинирования. Применение высокочистых металлов в качестве исходных компонентов конструкционных материалов ядерно-энергетических установок в значительной степени определяет дальнейшее развитие ядерной энергетики: циркониевые сплавы и гафний повышенной чистоты необходимы для усовершенствования тепловыделяющих сборок и систем управления и защиты реакторов действующих АЭС; новые высокотемпературные, коррозионно- и радиационно-стойкие конструкционные материалы – основа элементов конструкций реакторов нового поколения, обеспечивающие их высокие эксплуатационные характеристики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конструкционные материалы, циркониевый сплав, гафний, высокочистые металлы, сплавы.

CONSTRUCTION MATERIALS FOR THE ELEMENTS OF EQUIPMENT OF NUCLEAR-POWER PLANTS

N.N. Pylypenko

National science center "Kharkov Institute of Physics and Technologies"

1 Academicheskaya St., Kharkov, Ukraine, 61108

The results of investigations of production of construction materials for the elements of equipment of nuclear-power plants are described. It was demonstrated that development of nuclear power engineering largely relies on developments of new perspective construction materials for new generation reactors and improvement of materials of the exploited nuclear-power plants. Results of researches of chemical composition, structure, and mechanical properties of Zr1Nb alloy ingots produced by double vacuum-arc melting (VAM) method are presented. Experimental-industrial batch of trex-pipes and pipes for fuel assemblies for VVER-type reactors was produced from ingots of Zr1Nb VAM-alloy. Data about the level of purity of metals of got different physical methods are resulted, on the basis of the conducted developments and realization of high-performance methods of refining. Using of high-pure metals as initial components of the construction materials of nuclear-power plants largely determines further development of nuclear energy: high-purity zirconium alloys and hafnium are needed for the improvement of the fuel assemblies and reactor control and safety system of operating nuclear-power plants; new high temperature, corrosion- and radiation-proof construction materials – basis of elements of constructions of new generation reactors, providing its high operating properties.

KEY WORDS: construction materials, zirconium alloy, hafnium, high-pure metals, alloys.

КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ ОБЛАДНАННЯ ЯДЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

М.М. Пилипенко

National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology»

1, Academicheskaya St., Kharkov, Ukraine, 61108

Приведено результати досліджень, присвячених розробкам конструкційних матеріалів для елементів обладнання ядерно-енергетичних установок. Показано, що розвиток ядерної енергетики в значній мірі залежить від розробок перспективних конструкційних матеріалів для реакторів нового покоління і удосконалення матеріалів експлуатованих ядерно-енергетичних установок. Представлено результати досліджень хімічного складу, структури і механічних властивостей злитків сплаву Zr1Nb, одержаних методом подвійної вакуумно-дугової переплавки електродів, що витрачаються, складених з потрійної шихти. Виготовлена і досліджена дослідно-промислова партія трекс- і твельних труб із сплаву Zr1Nb для реакторів типу ВВЕР. Приведено дані про рівень чистоти металів, одержаних різними фізичними методами, на основі проведених розробок і реалізації високоєфективних методів рафінування. Використання високочистих металів як вихідних компонентів конструкційних матеріалів ядерно-енергетичних установок в значній мірі визначає подальший розвиток ядерної енергетики: цирконієві сплави і гафній підвищеної чистоти необхідні для удосконалення тепловиділяючих збірок і систем управління і захисту реакторів діючих АЕС; корпусні сталі підвищеної чистоти забезпечать збільшення ресурсу, надійність і безпеку роботи корпусів реакторів; нові високотемпературні, корозійно- і радіаційно-стійкі конструкційні матеріали – основа елементів конструкцій реакторів нового покоління, забезпечать їх високі експлуатаційні характеристики.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: конструкційні матеріали, цирконієвий сплав, гафній, високочисті метали, сплави.

Современные тенденции развития реакторных технологий направлены на дальнейшее повышение надежной и безопасной эксплуатации энергоблоков и на обеспечение экономичности и конкурентоспособности ядер-

ной энергетики, что требует повышения энергонапряженности, мощности единичных энергоблоков, увеличения длительности кампаний, более эффективного сжигания топлива, в том числе за счет повышения качества конструкционных материалов.

Дальнейшее повышение эксплуатационной надежности топлива и улучшение технико-экономических показателей топливных циклов в первую очередь связано с увеличением ресурсных характеристик конструкционных материалов и изделий из них. Усовершенствование конструкционных материалов для активных зон реакторов типа ВВЭР предусматривает использование циркониевых сплавов с пониженным содержанием гафния в качестве конструкционных материалов оболочек ТВЭЛ'ов, а также дистанционирующих решеток и направляющих каналов в тепловыделяющих сборках с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Успехи, достигнутые в области ядерной физики, физики реакторов и реакторного материаловедения в течение последних лет, привели к разработкам ряда перспективных ядерных энергетических систем: реакторы, охлаждаемые свинцовыми сплавами; сверхкритические водоохлаждаемые реакторы; высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы; реакторы, охлаждаемые жидким натрием; жидко-солевые реакторы; системы с подкритической сборкой, управляемой ускорителем частиц [1].

Анализ рабочих условий и основных характеристик перспективных ядерно-энергетических установок (ЯЭУ) показывает, что стремление к максимальному повышению эффективности энергетических установок предполагает переход ко все более жестким условиям эксплуатации, а это, в свою очередь, требует разработки новых конструкционных материалов. Материалы новых ЯЭУ должны удовлетворять уникальным требованиям, продиктованным конструкцией высокотемпературных систем, что предусматривает учет воздействия облучения, теплоносителя, а также статических и динамических напряжений. Работоспособность и надежность материалов определяются совокупностью измененных характеристик материалов в результате всего комплекса явлений, протекающих в них в поле облучения во взаимосвязи с изменяющимися параметрами и условиями работы реактора [2]. Применение малоактивируемой стали для изготовления корпуса реакторов и внутрикорпусного оборудования позволяет в 5 раз снизить дозовые нагрузки на обслуживающий персонал и в 20 раз уменьшить характерное время спада наведенной активности по сравнению с применяемыми материалами [3].

Высокий уровень содержания примесных элементов и газов в сталях и сплавах существенно снижает их механические свойства, коррозионную и радиационную стойкость, а, следовательно, и ограничивает их применение в действующих и проектируемых реакторах. Оценка типичных V-4Cr-4Ti сплавов в условиях нейтронного облучения флюенсом 10^{21} н/см² показала, что наведенная активность материалов с примесями примерно на два порядка выше по сравнению с беспримесными сплавами [4].

Применение высокочистых металлов в качестве исходных компонентов новых конструкционных материалов должно обеспечить необходимый уровень служебных свойств изделий из таких материалов [5,6]. В табл. 1 приведены металлы, применяемые для создания некоторых конструкционных материалов ядерных энергетических установок. Рассмотрение этих данных позволило наметить круг металлических элементов, которые являются необходимыми компонентами для создания материалов, представляющих интерес для ядерной энергетики будущего.

Табл. 1. Металлы, применяемые для создания конструкционных материалов ЯЭУ

| Металлы | Применение | Рабочая температура, °С |
|--------------------|--|-------------------------|
| Zr, Hf, Nb, Fe, Sn | Сплавы активной зоны реакторов на тепловых нейтронах, поглощающие элементы СУЗ | До 350 |
| Fe, Ni, Cr, Mo, Mn | Стали и сплавы различного типа (аустенитные и ферритно-мартенситные стали; хромоникелевые, никелевые и др. сплавы) | До 700 |
| V, Cr, Ti | Малоактивируемые сплавы | |
| Ni, Mo, Cr | Жаропрочные и коррозионно-стойкие сплавы | До 850 |
| Nb, Ta, Mo, W, C | Современные жаропрочные сплавы, композиционные материалы | Выше 700 |

Цель работы – изучение закономерностей рафинирования тугоплавких и химически активных металлов, разработка физических основ усовершенствования существующих и создания новых конструкционных материалов на основе высокочистых металлов для ядерно-энергетических установок.

ЦИРКОНИЕВЫЙ СПЛАВ

К основным конструкционным материалам активным зонам реакторов на тепловых нейтронах с водным теплоносителем относятся циркониевые сплавы, обладающие низким сечением захвата тепловых нейтронов, хорошей радиационной и коррозионной стойкостью [7]. Даже очень малые добавки примесей эффективно влияют на физико-механические свойства циркониевых сплавов, что может повлечь за собой изменение их механических и коррозионных свойств, а также оптимальных режимов деформационной и термической обработки.

Существенный вклад атомной энергетики в выработку электроэнергии в Украине диктует необходимость повышения участия страны в производстве ядерного топлива за счет развития уранового и циркониевого про-

изводства и развития элементов ядерно-топливного цикла. В этой связи предусматривается развитие производства ядерно-чистого циркония, создание производств передельной TREX-трубы, циркониевого проката и комплектующих изделий для ядерного топлива. На сегодня в Украине промышленное производство металлического циркония в объемах потребностей страны отсутствует, в то время как все необходимые технологии рафинирования, получения циркония реакторной чистоты и изделий из них отработаны в ННЦ ХФТИ, ИЭС им. Е.О.Патона, ФТИМС НАН Украины. В настоящее время проводится комплекс материаловедческих и технологических исследований, направленных на обоснование создания производства циркониевых сплавов и изделий на их основе для ядерного топлива реакторов ВВЭР из отечественного сырья [8-12].

Слитки из сплава кальцийтермического циркония с 1% ниобия (КТЦ-110), аналога штатного российского сплава Э110, получают в Украине методом электронно-лучевой плавки (ЭЛП). Основным недостатком трубных заготовок для труб-оболочек, изготовленных из слитков, полученных этим методом, является крупнозернистая структура, которая при последующем трубном переделе приводит к разнотекстурности и, следовательно, к неоднородности физико-механических свойств готовых тонкостенных труб. Крупнозернистая структура такого сплава, а также более высокое содержание кислорода до 0,14 мас.% (в сплаве Э110 до 0,1 мас.%) ухудшает технологические свойства материала при горячем и холодном переделе, а повышение содержания кислорода приводит к росту вероятности образования необратимых дефектов структуры в процессе деформации труб [13].

Для получения слитков сплава Zr1Nb с высокими технологическими свойствами были проведены исследования по применению двойного вакуумно-дугового переплава (ВДП) расходимых электродов, составленных с применением тройной шихты. Исходные электроды составлялись из сплава КТЦ-110, прутков йодидного циркония (для снижения содержания кислорода) и трубок из сплава Zr1Nb (для моделирования отходов трубного производства), а также легирующего элемента - ниобия. Применение метода двойного ВДП позволило эффективно улучшить химический состав и структурное состояние слитков сплава циркония с 1 мас.% ниобия. При первом ВДП произошло снижение содержания кислорода за счет добавки йодидного циркония и очистка сплава от легколетучих и неметаллических примесей, второй переплав обеспечил гомогенность легирующего компонента и примесей по сечению и высоте слитка, создал более однородную структуру и дальнейшую очистку от металлических примесей и углерода. Содержание примесей и легирующего элемента в слитках полученного сплава приведено в табл.2, там же для сравнения приведены данные технических условий на сплав Э110.

Исследованиями установлено, что по химическому составу, качеству поверхности, внутренней структуре и механическим свойствам сплав, полученный методом двойного ВДП, имеет преимущества перед сплавом, полученным методом ЭЛП [14]. Более однородная и дисперсная структура полученных слитков позволит улучшить качество горячепрессованной TREX-трубы и технико-экономическую эффективность процесса получения труб в целом. Структура слитков сплава Zr1Nb после двойного ВДП показана на рис.1.

Табл. 2. Содержание примесей в слитках сплава Zr1Nb после двойного ВДП, мас.%

| Примесь | Al | B | Be | C | Ca | Cd | Cl | Cr | Cu | F | Fe | Hf |
|---------|-----------------|----------|----------|------------|---------|----------|---------|--------------|---------------|---------|-------|-------------|
| Zr1Nb | 0,00011-0,00022 | <0,00001 | <0,00001 | 0,008-0,01 | <0,0005 | <0,00001 | <0,0005 | 0,001-0,0016 | 0,0024-0,0045 | <0,0005 | 0,012 | 0,015-0,036 |
| Э110* | 0,008 | - | 0,003 | 0,02 | 0,03 | 0,00003 | 0,003 | 0,02 | 0,005 | 0,003 | 0,05 | 0,05 |

| Примесь | K | Li | Mn | Mo | N | Ni | O | Pb | Si | Ti | Nb |
|---------|---------|----------|---------|--------|---------------|-------------|-----------|--------|-------------|---------|-----------|
| Zr1Nb | <0,0005 | <0,00001 | <0,0005 | <0,001 | 0,0008-0,0014 | 0,002-0,003 | 0,07-0,93 | <0,001 | 0,001-0,002 | <0,0001 | 0,94-1,02 |
| Э110* | 0,004 | 0,0002 | 0,002 | 0,005 | 0,006 | 0,02 | 0,1 | 0,005 | 0,02 | 0,005 | 0,9-1,1 |

* Для сплава Э110 в соответствии с ТУ 95.166-98.

Проведенные исследования по использованию полученных слитков для производства трубных заготовок, TREX-труб, изготовлению опытно-промышленной партии труб для ТВЭЛ'ов и изучению их основных показателей показали, что полученный сплав отвечает требованиям технических условий на сплав Э110 и может быть использован для производства оболочечных труб для ТВЭЛ'ов реакторов ВВЭР-1000 [15].

ГАФНИЙ

Одной из составных частей производства ядерного топлива и повышения безопасности эксплуатации АЭС является изготовление поглощающих материалов элементов органов регулирования и защиты ядерных реакторов. Заметное увеличение срока службы кластерных сборок систем управления и защиты АЭС (СУЗ) может быть достигнуто в случае использования в поглощающих элементах СУЗ реакторов с водой под давлением комбинированного (n,α)-(n,γ)-поглотителя. Гафний относится к числу (n,γ)-поглотителей, и масштабы его производства на настоящий момент уже удовлетворяют потребности атомной энергетики. По своим свойствам гафний имеет несомненные преимущества, и в перспективе он может одновременно выполнять функции и поглотителя нейтронов, и конструкционного материала. На физико-механические свойства гафния существенное влияние оказывает наличие примесей, поэтому для повышения качества гафния был проведен комплекс науч-

но-исследовательских работ по усовершенствованию процессов получения гафния ядерной чистоты.

Проведены расчеты времени выдержки ванны расплава гафния при ЭЛП, необходимого для снижения концентрации примеси до величины $1 \cdot 10^{-4}$ мас.%. Время выдержки оценивалось из уравнения $t = a + b \ln C_0$, где C_0 – концентрация примеси, a и b – коэффициенты, зависящие от температуры расплава, вида и концентрации примеси. Такие расчеты выполнены для примесей железа, алюминия, меди, никеля, титана, кремния, хрома и др. На рис.2 приведены расчетные данные изменения содержания примеси железа в гафнии при различных температурах расплава. Расчеты также показали, что в процессе ЭЛП затруднительна очистка гафния от кремния, а очистка от более летучих примесей уменьшается в ряду $Zn > Be > Mn > Cr > Cu > Al > Fe > V > Co > Ni > Si$.

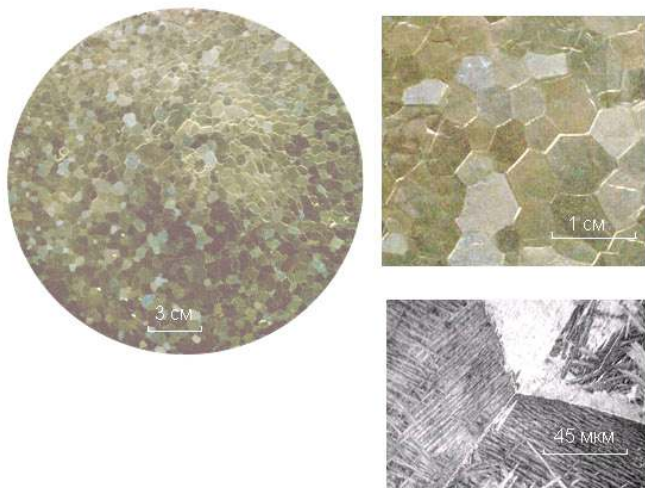


Рис.1. Структура сплава Zr1Nb после двойного ВДП.

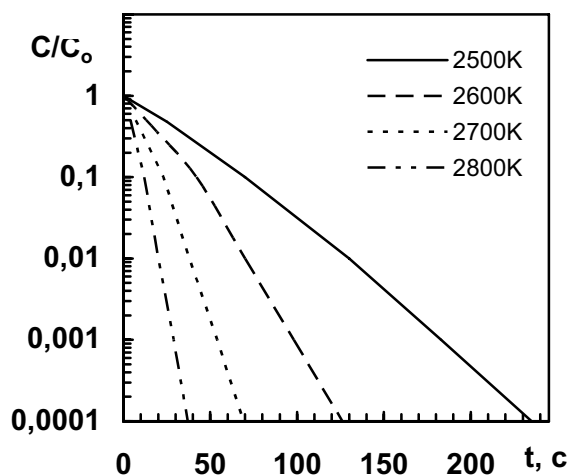


Рис. 2. Расчетное изменение содержания Fe до $1 \cdot 10^{-4}$ мас.% в гафнии при различных температурах расплава.

Полученные сведения были использованы для оптимизации процесса рафинирования гафния при электронно-лучевой плавке [15]. После двух последовательных электронно-лучевых плавок получен гафний чистой $\geq 99,9$ мас.%, его химический состав (в мас.%) следующий: $N_2 - 1,0 \cdot 10^{-3}$; $Al - 1,0 \cdot 10^{-3}$; $W < 1,0 \cdot 10^{-3}$; $Fe - 5,0 \cdot 10^{-3}$; $O_2 - 1,0 \cdot 10^{-2}$; $Si - 3,5 \cdot 10^{-3}$; $Mn < 1,0 \cdot 10^{-4}$; $Cu - 2,0 \cdot 10^{-4}$; $Ni < 1,0 \cdot 10^{-3}$; $Nb < 2,0 \cdot 10^{-3}$; $C - 5,0 \cdot 10^{-3}$; $F < 1,0 \cdot 10^{-3}$; $Cr - 2,0 \cdot 10^{-4}$.

Проведены исследования температурной зависимости механических свойств гафния в области температур $20-1000^\circ C$, выявлены температурные аномалии механических свойств гафния [17].

ВЫСОКОЧИСТЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПЛАВОВ

При получении высокочистых металлов используют различные химические и физико-химические методы, но завершают процесс рафинирования, как правило, физические методы [18, 19]. В основе этих методов лежат преимущественно физические процессы: испарение и конденсация, диффузия и кристаллизация, электромиграция и другие. Преимущества данных методов перед другими связаны с возможностью получения материала высокой степени чистоты в компактном виде, в том числе и в виде монокристаллов.

Для рафинирования металлов использовались такие методы рафинирования: дистилляция; плавка и зонная перекристаллизация в сверхвысоком вакууме и контролируемых средах с применением электронного нагрева; электроперенос в сверхвысоком вакууме или в инертных средах; высокотемпературный отжиг; различные сочетания выше перечисленных методов. Ниже приведены экспериментальные результаты рафинирования физическими методами некоторых из металлов, которые являются важными компонентами для производства новых сплавов для атомной промышленности.

При рафинировании титана в качестве исходных материалов для ЭЛП использовались титановая губка ТГ-90 и йодидный титан. Плавка губчатого титана осуществлялась в два этапа. На первом этапе в кристаллизатор печи ЭЛП засыпались кусочки губчатого титана, которые затем спекались и оплавливались. В процессе спекания и оплавления интенсивно удалялись газовые примеси из металла. Их содержание в губчатом металле было настолько большим, что наблюдалась “пузырьковая” стадия выделения газов. Затем полученный полуфабрикат переплавлялся классическим капельным методом с вытягиванием слитка. Методом ЭЛП были получены слитки титана диаметром 150 мм чистотой 99,99 мас.%. Более чистый титан получен после ЭЛП при использовании в качестве исходного материала йодидный металл [20].

Рафинирование железа проводилось в электронно-лучевой печи, исходными материалами служили губчатое карбонильное железо и прутки армко-железа. Плавка губчатого карбонильного железа проводилась по методике, описанной для губчатого титана, а армко-железа – капельным переплавом. Твердость по Бринеллю исходных образцов армко-железа составляла 830 МПа, после переплава – 624 МПа, карбонильного железа после плавки – 558 МПа. Изменение содержания примесей в карбонильном железе в результате проведения ЭЛП по-

казывает, что наиболее трудноудаляемыми при электронно-лучевой плавке в вакууме являются примеси Co и Ni. Снизить их содержание до более низкого уровня позволил метод дистилляции. Проведение дистилляции карбонильного железа, переплавленного методом электронно-лучевой плавки, позволило получить металл чистотой более 99,98 мас.% [21].

Двойной электронно-лучевой переплав в высоком вакууме исходного электролитического никеля чистотой 99,987 мас.%, позволил получить металл чистотой 99,994 мас.%. В результате рафинирования снизилось содержания Fe, Co, P, Al, Mg и существенно снизилась концентрация As, Zn, Se, Cl. Экспериментально показана эффективность рафинирования никеля методом ЭЛП, как от металлических примесей, так и от примесей внедрения. Исследовано газовыделение из никеля при ЭЛП. Методом зонной плавки получены высокочистые монокристаллы никеля с величиной относительного остаточного электросопротивления $R_{ост} = R(300K)/R(4,2K) = 1000$ и микротвёрдостью 950 МПа. Исследованиями показано существенное улучшение качества металла после рафинирования [22].

В качестве исходных материалов для исследования очистки ванадия от примесей использовались прутки технического ванадия, электролитический ванадий марки ВЭЛ-1, йодидный металл. В результате рафинирования методом ЭЛП снизилось содержание многих металлических примесей. Однако видна малая эффективность очистки от Fe и Ni, а количество Si возрастает. Проведение зонной плавки позволило достаточно эффективно удалить примеси Al, Fe, Ni, Cu и Cr. Кремний удаляется незначительно, а примеси тугоплавких металлов (W, Mo, Ta и Nb) при длительной перекристаллизации накапливаются в ванадии. Зонная плавка позволяет очистить образец ванадия более эффективно, чем электронно-лучевая плавка. Кремний, содержание которого в техническом металле высоко, является лимитирующей примесью для процесса зонной плавки. Наиболее чистый ванадий был получен при рафинировании методом электропереноса на проволочных образцах металла после двукратной ЭЛП порошка электролитического ванадия. Значение $R_{ост}$ ванадия в результате рафинирования электропереносом увеличивается с 50 до 1600 [18, 23]. Анализ полученных результатов показывает, что для достижения более высокой степени очистки ванадия необходимо оптимальное сочетание различных методов рафинирования, которое обеспечило бы удаление из ванадия таких элементов, как кремний, тугоплавкие металлы, углерод, азот, кислород.

Вакуумная ЭЛП исходных прутков и порошков тантала чистотой 99,8 мас.% снижает содержание металлических примесей на один два порядка по сравнению с их содержанием в исходном материале, заметно также снижается и содержание примесей внедрения. Основным процессом очистки тантала при ЭЛП является дегазация и испарение легколетучих примесей. Для повышения эффективности рафинирования тантала от примесей и получения его в монокристаллическом виде применялась бестигельная зонная плавка в сверхвысоком вакууме и контролируемых (активных) средах и зонная плавка с электропереносом. Монокристаллы тантала, полученные зонной плавкой в контролируемой среде кислорода, имели чистоту 99,999 мас.% [23]. Полученные совершенные монокристаллы тантала диаметром 7-10 мм и длиной 150-180 мм с разориентацией элементов субструктуры $< 0,01^\circ$ имели микротвёрдость 750 МПа.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕАКТОРОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Безопасность, надёжность и экономичность реакторов нового поколения во многом будет определяться поведением конструкционных материалов, работающих в жестких условиях. Конструкционные материалы должны обеспечивать необходимый уровень служебных свойств элементов конструкций перспективных ЯЭУ.

В НИЦ ХФТИ проводятся исследования, направленные на разработку новых конструкционных материалов, которые можно эксплуатировать в рабочих условиях перспективных ядерных и термоядерных реакторных установок. В настоящее время проводятся работы по получению высокочистых сплавов системы V-Cr-Ti с использованием комплексных методов рафинирования с целью сведения к минимуму остаточной наведенной активности сплавов и повышения их радиационной стойкости в условиях работы термоядерных реакторов. Развернуты работы по разработке и выбору конструкционных материалов для ядерных реакторов с водой сверхкритических параметров на основе высокочистых металлов (Fe, Ni, Zr и др.) и исследованию их работоспособности в условиях работы таких реакторов (25 МПа, 500°C).

В последние годы интенсивно проводятся работы по разработке и исследованию конструкционного материала для контура циркуляции топливной соли перспективных жидко-солевых реакторов (ЖСР). Всесторонний анализ основных физико-химических свойств известных материалов, пригодных для работы в условиях эксплуатации топливного контура ЖСР, позволил дать преимущество сплавам на основе никеля (типа Хастеллой). Наибольшие трудности при создании сплава на никелевой основе заключаются в поиске необходимого набора легирующих элементов, поскольку среди них часто находятся элементы, которые взаимно нейтрализуют положительное влияние на сплав каждого элемента отдельно. Кроме того, только оптимальное содержание этих элементов и их чистота обеспечивают сплаву весь необходимый набор свойств. Нежелательные примеси увеличивают склонность сплавов к коррозии и ослабляют их механические свойства.

Использование в качестве исходных компонентов металлов высокой чистоты (Ni, Mo, Cr, Ti, Al, Fe, Si), применение вакуума и очищенного аргона при выплавке сплавов, позволило получить сплавы типа Хастеллой с малым содержанием нежелательных примесей [24]. Полученные образцы сплавов испытывались в условиях,

близких к условиям работы топливного контура ЖСР: образцы находились в солевом расплаве ($ZrF_4 + NaF$) при $650^\circ C$ и подвергались длительному (до 700 ч) облучению на линейном ускорителе электронов. На рис.3 представлена микроструктура образцов сплава типа Хастеллой после коррозионных испытаний в течение 100 и 700 ч в плоскости перпендикулярной прокатке, каких-либо заметных следов межкристаллитной коррозии на образцах не обнаружено. Механические свойства образцов сплава после коррозионных испытаний практически не изменяются при увеличении времени выдержки образцов в расплаве солей [25].

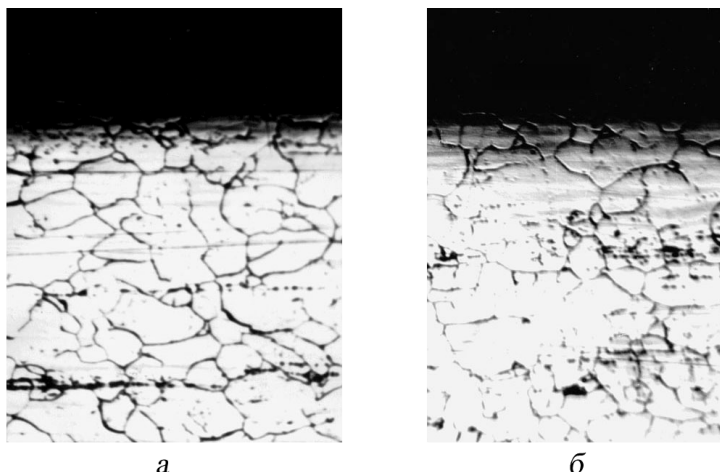


Рис.3. Микроструктура образцов сплавов Хастеллой после коррозионных испытаний при $650^\circ C$ в течение 100 (а) и 700 ч (б). Увеличение 380.

Проведены экспериментальные исследования влияния импульсного излучения большой мощности на свойства сплавов типа Хастеллой, а также исследования морфологической эволюции поверхности образцов при плазменной обработке (плотность энергии 25 Дж/см^2 и доза до $1,2 \cdot 10^{19}$ ион/ см^2). Установлено, что на начальной стадии плазменной обработки морфологические изменения на поверхности образцов приводят к незначительному увеличению шероховатости, а при увеличении дозы облучения наблюдается постепенное, но не очень сильное плавление поверхностного слоя материала, приводящее к прекращению роста шероховатости или даже ее уменьшению. Показано, что у исходных и облученных импульсами рентгеновского излучения большой мощности образцов активность акустической эмиссии существенно отличаются. Общее количество зарегистрированных импульсов акустической эмиссии с увеличением дозы облучения падает, и максимум кривой активности акустической эмиссии смещается в область высоких нагрузок (больших значений времени) [26].

Результаты проведенных испытаний, а также исследований структуры и состава сплавов в исходном состоянии и после облучения в среде расплавленных солей позволили сделать вывод о том, что сплавы типа Хастеллой, полученные из высокочистых металлов, могут успешно применяться в качестве конструкционного материала топливного контура ЖСР.

ВЫВОДЫ

В работе изложены основные результаты исследований, посвященных разработкам конструкционных материалов для элементов оборудования существующих и перспективных ЯЭУ. Показано, что:

- дальнейшее развитие ядерной энергетики в значительной степени зависит от разработок перспективных конструкционных материалов для реакторов нового поколения и усовершенствования материалов эксплуатируемых ЯЭУ: циркониевые сплавы и гафний повышенной чистоты необходимы для усовершенствования тепловыделяющих сборок и систем управления и защиты реакторов действующих АЭС; новые высокотемпературные, коррозионно- и радиационностойкие конструкционные материалы – основа элементов конструкций реакторов нового поколения, обеспечивающие их высокие эксплуатационные характеристики;
- применение метода двойной вакуумно-дуговой плавки позволило эффективно улучшить химический состав и структурное состояние слитков сплава циркония с 1 мас.% ниобия, изготовленного из отечественного сырья для изготовления изделий для реакторов ВВЭР. Полученные из этих сплавов трубы по основным показателям отвечают требованиям на трубы-оболочки для ТВЭЛ'ов;
- расчетное и экспериментальное изучение процессов рафинирования позволило получить гафний ядерной чистоты;
- экспериментальное определение закономерностей поведения примесей при рафинировании химически активных и тугоплавких металлов дало возможность выйти на более высокий уровень их чистоты;
- никелевые сплавы типа Хастеллой, полученные из высокочистых металлических компонентов, могут успешно применяться в качестве конструкционного материала топливного контура жидко-солевых реакторов;
- высокие требования к конструкционным материалам в части содержания в них примесных элементов и

газов могут быть удовлетворены лишь при использовании в качестве исходных компонентов металлов высокой степени чистоты и применении новых технологий их изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A technology roadmap for generation IV nuclear energy systems, issued by U.S. DOE nuclear energy research advisory committee and the Generation IV international forum (GIF - 002-00). - Washington, 2002. - 91 p.
2. Неклюдов И.М. Проблемы работоспособности материалов основного оборудования АЭС Украины // Прогрессивные материалы и технологии. - Киев: Академперіодика, 2003. - Т.1. - С.277-295.
3. Горынин И.В. Надежные материалы – основа безопасности атомной энергетики // Мировая энергетика. - 2006. - №7(31). - С.90-91.
4. Неклюдов И.М., Ажажа В.М., Ковтун Г.П., Пилипенко Н.Н. Влияние чистоты на качество материалов ядерной и термо-ядерной энергетики // Материалы IV Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании» (30 мая - 6 июня 2008 г., Варна, Болгария). - Днепропетровск, Варна. - 2008. - Т.1. - С.416-420.
5. Ажажа В.М., Лавриненко С.Д., Пилипенко Н.Н. Чистые и особоочищенные металлы в атомной энергетике // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. - 2007. - № 4. - С.3-12.
6. Пилипенко Н.Н. Роль высокочистых металлов в создании новых материалов для элементов конструкций АЭС // ВАНТ. Сер. Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники. - 2008. - № 1. - С.10-17.
7. Шиков А.К., Никулин А.Д., Никулина В.А. и др. Современное состояние и перспективы развития производства циркония и его сплавов и изделий из них // Физика и химия обработки материалов. - 2001. - № 6. - С.5-14.
8. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Линдт К.А., Мухачев А.П., Пилипенко Н.Н. Цирконий и его сплавы: технологии производства, области применения: Обзор. - Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998. - 89 с.
9. Красноурюцкий В.С., Лавриненко С.Д., Ажажа В.М. та інші. Розробки і обґрунтування підвищення ресурсу, надійності і безпеки елементів активної зони атомний реакторів – твелів та ТВЗ // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. - Київ: ІЕЗ ім. Є.О.Патона, 2006. - С.228-231.
10. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Пилипенко Н.Н. Получение сплава циркония и изделий из него в Украине // Физика и химия обработки материалов. - 2009. - № 1. - С.5-8.
11. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Пилипенко Н.Н. Вакуумные условия и ЭЛП циркония // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2006. - №4. - С.144-151.
12. Пилипенко Н.Н. Получение циркония ядерной чистоты // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2008. - № 2. - С.66-72.
13. Вахрушева В.С., Коленкова О.А., Сухомлин Г.Д. Влияние содержание кислорода на пластичность, повреждаемость и параметры акустической эмиссии металла труб из сплава Zr-1%Nb // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2005. - №5. - С.104-109.
14. Ажажа В.М., Болков А.Ф., Борц Б.В. и др. Вакуумно-дуговой способ получения трубной заготовки из сплава Zr1%Nb // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2005. - №5. - С.110-114.
15. Ажажа В.М., Борц Б.В., Бутенко І.М. та ін. Виробництво партії трубних заготовок трекс-труб та виготовлення дослідно-промислової партії твелівних труб із сплаву Zr1Nb із вітчизняної сировини // Наука та інновації. - 2006. - Т.2, №6. - С.18-30.
16. Дмитренко А.Е., Пелых В.Н., Пилипенко Н.Н. Рафинирование гафния методом электронно-лучевой плавки // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2004. - №3. - С.112-115.
17. Пилипенко Н.Н., Доля И.Б., Вьюгов П.Н. и др. Механические свойства гафния // Неорганические материалы. - 2006. - Т.42, № 6. - С.684-688.
18. Тихинский Г.Ф., Ковтун Г.П., Ажажа В.М. Получение сверхчистых редких металлов. - М.: Металлургия, 1986. - 160 с.
19. Девятых Г.Г. Разработка высокочистых материалов // Современное материаловедение 21 век. - Киев: Наукова думка, 1998. - С.309-317.
20. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Пилипенко Н.Н. Получение высокочистых металлов (Sc, Ti, Fe, Zr, Hf, Cu, V, Nb, Ta) // Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра. - Киев: Политехника, 2002. - С.79-84.
21. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Пилипенко Н.Н. Рафинирование железа физическими методами // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2001. - №2. - С.107-109.
22. Ажажа В.М., Бобров Ю.П., Вирич В.Д. и др. Рафинирование никеля методом электронно-лучевой плавки // Вісник ХНУ. Сер. фізична “Ядра, частинки, поля”. - 2003. - № 601. - Вип. 2(22). - С.118-122.
23. Ажажа В.М., Вьюгов П.Н., Лавриненко С.Д., Пилипенко Н.Н. Электронно-лучевая зонная плавка ванадия, ниобия, тантала // Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра. - Киев: Политехника, 2002. - С.220-221.
24. Azhazha V.M., Bakai A.S., Lavrinenko S.D. et al. Alloys for molten-salt reactors // ВАНТ. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2005. - №.4. - С.40-47.
25. Ажажа В.М., Бакай А.С., Бобров Ю.П. и др. Исследование сплава типа Хастеллой для жидкосольевых реакторов // Proceeding of Ninth International Conference on Material issues in design, manufacturing and operation of nuclear power plants equipment (Pushkin - Saint Petersburg, 6-8 June 2006). - Saint Petersburg: CRISM Prometey, 2006. - Vol.2. - P.280-289.
26. Ажажа В.М., Бакай А.С., Батраков А.Б. и др. Влияние импульсного излучения большой мощности на акустическую эмиссию сплавов типа Хастеллой // Труды XVIII Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (8-13 сентября 2008, Алушта, Крым). - Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008. - С.64.