

МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

УДК 669.054.2

ЧИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

С.Д. Лавриненко^{1,2}, Н.Н. Пилипенко¹, П.Н. Вьюгов¹

*¹Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина;*

*²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина
E-mail: mpylypenko@kipt.kharkov.ua*

Представлены данные об уровне чистоты металлов, полученных различными физическими методами в ННЦ ХФТИ, на основе проведенных разработок и реализации высокоэффективных методов рафинирования. Приведены характеристики основных конструкционных материалов для некоторых типов реакторов нового поколения и чистых металлов, необходимых для их создания. 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.

Современные тенденции развития реакторных технологий направлены на дальнейшее повышение надежной и безопасной эксплуатации энергоблоков и на обеспечение экономичности и конкурентоспособности ядерной энергетики, что требует повышения энергонапряженности, мощности единичных энергоблоков, увеличения длительности кампаний, более эффективного сжигания топлива, в том числе за счет повышения качества конструкционных материалов [1-6].

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 конструкционных циркониевых материалов с пониженным содержанием гафния для оболочек твэлов, а также дистанционирующих решеток и направляющих каналов в тепловыделяющих сборках с повышенными физико-механическими свойствами [7].

Успехи, достигнутые в области ядерной физики, физики реакторов и реакторного материаловедения в течение последних лет, привели к разработкам ряда перспективных ядерных энергетических систем: реакторов, охлаждаемых свинцовыми сплавами; жидкосольевых реакторов; реакторов, охлаждаемых жидким натрием; сверхкритических водоохлаждаемых реакторов (давление 25 МПа, температура 280...580 °С); высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов; систем с подкритической сборкой, управляемой ускорителем частиц; термоядерных реакторов и др. [1, 5]. Этим проектам свойственны преимущества в экономике, безопасности, надежности и нераспространении ядерных материалов.

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 высоким рабочим температурам, а это, в свою очередь, приводит к разработке новых конструкционных материалов. Материалы новых ЯЭУ должны удовлетворять уникальным требованиям, продиктованным конструкцией высоко-температурных систем, что предусматривает учет воздействия температуры, излучения, теплоносителя, коррозии, а также статических и динамических напряжений. Работоспособность и надежность материалов определяются совокупностью изменений характеристик материалов в результате всего комплекса явлений, протекающих в них в поле облучения во взаимосвязи с изменяющимися параметрами и условиями работы реактора [2, 3].

Основной конструкционных материалов должен служить чистые и высокочистые металлы, поскольку известно, что высокий уровень содержания примесных элементов и газов в сталях и сплавах существенно снижает их механические, коррозионные и радиационные свойства, а следовательно, и ограничивает их применение в действующих и проектируемых реакторах. Оценка типичных V-4Cr-4Ti-сплавов в условиях нейтронного облучения с флюенсом 10^{21} нейтр./см² показала, что наведенная активность материалов с примесями примерно на два порядка выше по сравнению с беспримесными сплавами [8].

Применение высокочистых металлов в качестве исходных компонентов новых конструкционных материалов обеспечит необходимый уровень служебных свойств изделий из таких материалов [9, 10]. 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 конструкционных материалов, представляющих интерес для ядерной энергетики настоящего и будущего.

Перспективным материалом для топливного контура жидкосолевого реактора является высоконикелевый сплав типа хастеллой, на основе высокочистых компонентов (Ni, Fe, Cr и др.). Конструкционными материалами высокотемпе-

ратурного подземного реактора, концепции Теллера, Ишикавы и Вуда могут служить сплавы на основе высокочистых тугоплавких металлов (Ta, W и др.). Чистые металлы, необходимые для создания экспериментального термоядерного реактора ИТЭР: Ве и W высокой чистоты; для сверхпроводников – чистая Cu, высокочистые Nb и Ti; малоактивируемые стали и сплавы с низким содержанием примесей, состоящие из чистых Fe, Ni, Cr, Ti, V и других металлов [9, 10].

Таблица 1

Металлы, применяемые для создания конструкционных материалов ЯЭУ

Металлы	Применение	Рабочая температура, °С
Zr, Hf, Nb, Fe, Sn	Материалы активных зон реакторов на тепловых нейтронах, поглощающие элементы СУЗ	до 350
Fe, Ni, Cr, Mo, Mn, Sc	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

При получении чистых металлов на разных стадиях рафинирования используют различные химические и физико-химические методы, но завершают процесс рафинирования, как правило, физические методы – дистилляция, зонная перекристаллизация, электроперенос и различные их сочетания. В основе этих методов лежат преимущественно физические процессы: испарение и конденсация, кристаллизация, диффузия и электромиграция и др. Преимущества этих методов связаны с возможностью достижения высоких степеней очистки и получением конечного продукта в компактном виде, в том числе в виде монокристаллов с совершенной кристаллической структурой.

На основе исследований поведения отдельных примесей или их групп при рафинировании металлов различными физическими методами в ННЦ ХФТИ были разработаны и реализованы высокоэффективные методы рафинирования металлов:

- на основе дистилляционных процессов, в том числе с конденсацией пара на колонку с градиентом температуры в замкнутом объеме, прогрев и перегонка металла в одном цикле рафинирования и их сочетание в определённой последовательности;

- плавка и зонная перекристаллизация (ЗП) в сверхвысоком вакууме и контролируемых (активных) средах с применением электронно-лучевого нагрева;

- зонная плавка в сочетании с электропереносом;
- различные сочетания вышеперечисленных методов.

Комплексное рафинирование, основанное на использовании дополняющих друг друга физико-химических, физических методов и осуществленное в контролируемых внешних условиях при широком применении сверхвысоковакуумной техники, обеспечивает достижение наиболее высоких степеней очистки и получение большого количества металлов

в наиболее чистом виде. Именно такой подход к проблеме особо чистых металлов разработан и широко применяется в ННЦ ХФТИ НАН Украины. Методы получения особо чистых металлов непрерывно совершенствуются с целью повышения эффективности очистки, производительности и снижения стоимости.

Дальнейший прогресс в области глубокой очистки металлов связан с поиском наиболее рациональных комплексных схем рафинирования, с предотвращением взаимодействия с остаточными газами и конструкционными материалами металлов установок, применяемых для рафинирования.

Разработанные методы и технологии рафинирования металлов нашли практическое применение в промышленности для производства Ве, Nb, Ta, Zr и многих сплавов с особыми физико-механическими свойствами (жаропрочных, тугоплавких, реакторных, сверхпроводящих и др.). Эти технологии основаны на широком использовании вакуумной техники и на исследованных закономерностях поведения примесей в металлах. Благодаря этим исследованиям ННЦ ХФТИ стал одним из родоначальников нового направления – вакуумной металлургии [11, 12].

Ниже приведены экспериментальные результаты рафинирования физическими методами некоторых металлов, которые являются важными компонентами для производства новых сплавов для ядерной энергетики. Для исследования физико-химических процессов рафинирования использовались металлы, отличающиеся по степени исходной чистоты и методам получения.

Электронно-лучевая плавка (ЭЛП) металлов проводилась на сверхвысоковакуумной установке, откачка которой осуществлялась двумя гетероионными насосами, со скоростью откачки 5000 л/с каж-

дый, а также титановым сублимационным насосом. Применение такой системы вакуумной откачки позволяло получать предельный вакуум в установке $1,7 \cdot 10^{-6}$ Па [11, 13]. В спектре остаточных газов установки отсутствовали тяжелые углеводороды. Рафинирование металлов происходило в вакууме $(1...5) \cdot 10^{-5}$ Па. Рафинировочные переделы проводились по режиму: прогрев \Rightarrow плавка \Rightarrow выдержка металла в расплавленном состоянии \Rightarrow кристаллизация \Rightarrow вытягивание слитка. ЗП с электронно-лучевым нагревом проводилась, как правило, в установках с комбинированными системами откачки [11, 14]. Диффузионные насосы были оборудованы конденсационными и сорбционными ловушками, при получении «безмасляного» сверхвысокого вакуума применялся комплекс сорбционных, криогенных и ионно-сорбционных насосов. Электронно-лучевая зонная перекристаллизация осуществлялась в вакууме $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ Па. Выбор системы откачки для различных методов рафинирования определялся в основном степенью взаимодействия металлов в условиях рафинирования с остаточными газами вакуумной среды.

Титан. 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 оплавлялись. В процессе спекания и оплавления из металла интенсивно удалялись газовые примеси. Их содержание в губчатом металле было настолько большим, что наблюдалась «пузырьковая» стадия газовой выделенности. 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 был получен после ЭЛП исходного йодидного титана. Содержание примесей в йодидном металле после двух электронно-лучевых переделов следующее: Al – $8,0 \cdot 10^{-5}$; P – $1,0 \cdot 10^{-5}$; S – $8,0 \cdot 10^{-5}$; K – $6,0 \cdot 10^{-5}$; Ca – $2,0 \cdot 10^{-4}$; V – $3,0 \cdot 10^{-4}$; Cr – $3,0 \cdot 10^{-4}$; Mn < $9,0 \cdot 10^{-5}$; Fe – $1,5 \cdot 10^{-3}$; Ni – $5,0 \cdot 10^{-3}$; Cu – $3,0 \cdot 10^{-4}$; Zn – $2,0 \cdot 10^{-4}$; As – $8,0 \cdot 10^{-5}$; Sn < $8,0 \cdot 10^{-4}$ мас.%.
 Следует отметить, что ЭЛП титана благоприятно сказывается на вакуумных условиях установки из-за хороших геттерных способностей слоев титана, осаждаемых на стенку камеры за счет испарения при ЭЛП [15, 16].

Цирконий. В качестве исходного материала для исследований использовался йодидный цирконий и металл, полученный методом кальциетермического восстановления его тетрафорида (КТЦ). ЭЛП является весьма эффективным рафинирующим процессом для циркония. Содержание примесей в КТЦ и йодидном цирконии после ЭЛП приведено в табл. 2 [17, 18]. Экспериментальные результаты по зонной плавке металлов показали существование двух механизмов очистки – ЗП и испарения. Поэтому применение зонной плавки позволило получить цирконий более высокой степени чистоты. На рис. 1 показаны результаты измерений относительного остаточного электросопротивления $R_{ост} = R(300 \text{ K})/R(4,2 \text{ K})$ по длине образца циркония после зонной плавки в различном вакууме.

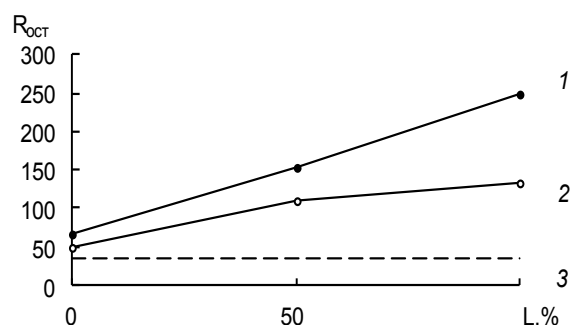


Рис. 1. Изменения $R_{ост}$ вдоль длины образцов циркония после зонной плавки в вакууме: 1 – $2 \cdot 10^{-7}$ Па; 2 – $5 \cdot 10^{-6}$ Па; 3 – исходный образец

Видно, что плавка в более низком вакууме обеспечивает получение более чистого металла. С увеличением числа проходов наблюдается общее повышение чистоты металла, испарение примесей и увеличение разделения примесей по слитку, зонное разделение. Проведение шести проходов в вакууме $6 \cdot 10^{-6}$ Па со скоростью перемещения зоны 1,2 см/ч дало возможность получить высокочистый Zr с $R_{ост} = 250$ и значением микротвердости 590 МПа. Содержание кислорода, азота и углерода равно $2,0 \cdot 10^{-3}$, $1,7 \cdot 10^{-3}$ и $9,0 \cdot 10^{-3}$ мас.% соответственно, содержание металлических примесей не превышало 10^{-5} мас.%.
 Были исследованы механические свойства циркония высокой чистоты (табл. 3), влияние примесей кислорода и азота на прочностные характеристики и пластичность циркония.

Таблица 2

Содержание примесей в цирконии после ЭЛП

Примесь	Содержание примесей, $\times 10^3$ мас.%		
	Йодидный цирконий		КТЦ после ЭЛП
	исходный	после ЭЛП	
Cu	4	0,1	0,4
Fe	9	0,8	0,5
Al	4	0,8	0,5
Ni	40	0,6	3,5
Mg	0,4	0,3	–
Mn	1,5	0,1	–
Cr	1,3	0,2	0,9
Si	18	4,5	–
Ti	2	0,4	–

Таблица 3
Зависимость механических свойств циркония от его чистоты

Суммарное содержание примесей, мас. %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
$5 \cdot 10^{-2}$	200	120	28,0
$1 \cdot 10^{-2}$	130	85	34,0
$5 \cdot 10^{-3}$	103	25	49,5

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 (СУЗ) АЭС 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 ядерной 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 научно-исследовательских работ по усовершенствованию процессов получения гафния ядерной чистоты.

Рафинирование гафния проводилось методом ЭЛП. Исходным материалом служил гафний, полученный методом кальциетермического восстановления его тетрафторида. Проведенные эксперименты по рафинированию гафния методом ЭЛП показали, что при увеличении удельной мощности плавки не только ускоряется процесс рафинирования гафния от металлических примесей, но происходит и рафинирование от кислорода за счет его удаления в виде монооксида металла HfO. Этот процесс известен как дистилляционное раскисление.

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 $\tau = a + b \ln C_0$, 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. Расчеты также показали, что в процессе ЭЛП затруднительна очистка гафния от кремния, а очистка от более летучих примесей уменьшается в ряду $Zn > Be > Mn > Cr > Cu > Al > Fe > V > Co > Ni > Si$ [15, 16, 19]. Полученные параметры были использованы для оптимизации ЭЛП гафния. После двух последовательных ЭЛП получен гафний чистотой $\geq 99,9$ мас.%, его химический состав следующий: $N_2 - 1,0 \cdot 10^{-3}$; $Al - 1,0 \cdot 10^{-3}$; $W < 1,0 \cdot 10^{-3}$; $Fe - 5,0 \cdot 10^{-3}$; $O_2 - 1,0 \cdot 10^{-2}$; $Si - 3,5 \cdot 10^{-3}$; $Mn < 1,0 \cdot 10^{-4}$; $Cu - 2,0 \cdot 10^{-4}$; $Ni < 1,0 \cdot 10^{-3}$; $Nb < 2,0 \cdot 10^{-3}$; $C - 5,0 \cdot 10^{-3}$; $F < 1,0 \cdot 10^{-3}$; $Cr - 2,0 \cdot 10^{-4}$ мас.%.
Железо. Рафинирование исходных материалов (губчатого карбонильного железа и прутков армко-железа) осуществлялось в электронно-лучевой печи. 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, а карбонильного железа – 558 МПа. Изменение содержания примесей в карбонильном железе в результате проведения ЭЛП приведено в табл. 4, из которой видно, что наиболее трудно удаляемыми при ЭЛП в вакууме являются примеси Co и Ni. Снизить их содержание до более низкого уровня позволил метод дистилляции. Содержание примесей в металле после дистилляции (низ дистилляционной колонки, $T \sim 1500$ °C) показано в табл. 4. Проведение дистилляции карбонильного железа, переплавленного методом ЭЛП, позволило получить металл чистотой более 99,98 мас.%. Уровень чистоты железа в значительной степени определялся содержанием никеля и кобальта [15].

Таблица 4
Содержание примесей в карбонильном железе

Примесь	Содержание примесей, $\times 10^3$ мас. %		
	исходное	после ЭЛП	дистиллят
Mn	120	2	0,1
Al	20	10	0,3
Cu	150	10	4
Co	17	17	8
Ni	150	100	20
Si	200	50	2
C	50	10	1
O	30	20	2
N	6	3	<1

Никель. Двойной ЭЛП в высоком вакууме исходного электролитического никеля чистотой 99,987 мас. % позволил получить металл чистотой 99,994 мас.%. В результате рафинирования снизи-

лись содержания Fe, Co, P, Al, Mg и существенно снизились концентрации As, Zn, Se, Cl. Экспериментально показана эффективность рафинирования никеля методом ЭЛП как от металлических приме-

сей, так и от примесей внедрения. Проведение электронно-лучевого переплава никеля приводит к снижению содержания примесей внедрения – кислорода, азота, углерода до величин 0,0005, 0,00006 и 0,002 мас.% соответственно. Такое содержание примесей внедрения практически не оказывает влияния на свойства никеля. Подтверждением этого служат исследования твёрдости никеля. С повышением чистоты никеля его твёрдость уменьшается с $HV = 1690$ МПа для исходного никеля, до значений 800...900 МПа после двукратной ЭЛП. Методом зонной плавки получены высокочистые монокристаллы никеля с величиной относительного остаточного электросопротивления $R_{ост} = 1000$ и микротвёрдостью 950 МПа. Исследованиями показано существенное улучшение качества металла после рафинирования [20].

Медь. Процесс рафинирования меди исследовался методом ЭЛП и дистилляцией [21]. В качестве материалов для исследований применялись техническая и бескислородная медь. В результате двукратной ЭЛП получена медь с $R_{ост} = 340$. ЭЛП в высоком вакууме эффективна при рафинировании меди как от металлических примесей, так и от примесей внедрения. Снизить содержание примесей железа, кремния и никеля, лимитирующих чистоту меди, можно при помощи процесса дистилляции. Применение ЭЛП с последующей дистилляцией полученного металла позволило получить медь чистотой 99,99 мас.%. Содержание примесей в полученных образцах меди следующее: $As < 2,0 \cdot 10^{-5}$; $Ag - 4,0 \cdot 10^{-4}$;

$Sb < 1,0 \cdot 10^{-5}$; $Fe - 6,0 \cdot 10^{-4}$; $Ni - 2,0 \cdot 10^{-4}$; $Pb < 4,0 \cdot 10^{-5}$; $Sn < 2,0 \cdot 10^{-5}$; $S - 2,0 \cdot 10^{-4}$; $P < 1,0 \cdot 10^{-5}$; $Zn < 1,0 \cdot 10^{-5}$; $Bi < 1,0 \cdot 10^{-4}$; $O_2 \sim 1,0 \cdot 10^{-4}$ мас.%.

Ванадий. В качестве исходных материалов для исследований использовались прутки технического ванадия, электролитический ванадий марки ВЭЛ-1, йодидный металл. Исследования показали, что проведение ЭЛП электролитического ванадия снижает содержание металлических примесей в нем, хотя практически нет очистки от железа и никеля, а количество кремния даже возрастает [11, 13, 22]. Проведение зонной плавки позволяет довольно эффективно удалять примеси алюминия, железа, никеля, меди и хрома. Кремний удаляется слабо, а примеси тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена, тантала и ниобия) при длительной перекристаллизации накапливаются в ванадии [15]. В табл. 5 проведено сравнение эффективности очистки прутков технического ванадия методами ЭЛП и ЗП. Зонная плавка ванадия проводилась со скоростью движения зоны 4 см/ч. Из сравнения данных табл. 5 видно, что ЗП позволяет очистить образец ванадия более эффективно, чем ЭЛП. Кремний, содержание которого в техническом металле высоко, является лимитирующей примесью для процесса зонной плавки. Для изучения процесса ЗП использовался ванадий, полученный йодидным рафинированием. Распределение отношения электросопротивлений и микротвёрдости вдоль образца приведено на рис. 2 [23].

Таблица 5

Содержание примесей в техническом ванадии, после ЭЛП и ЗП

Вид металла	Содержание примесей, $\times 10^4$ мас.%						
	Fe	Cr	Cu	Mo	Si	Mg	Al
Исходный	1000	30	5	60	1500	16	200
После ЭЛП в вакууме $5 \cdot 10^{-4}$ Па	200	<30	2,4	40	1500	5	20
После ЗП в вакууме $2 \cdot 10^{-5}$ Па	17	<30	<1,4	20	1300	<0,5	<10

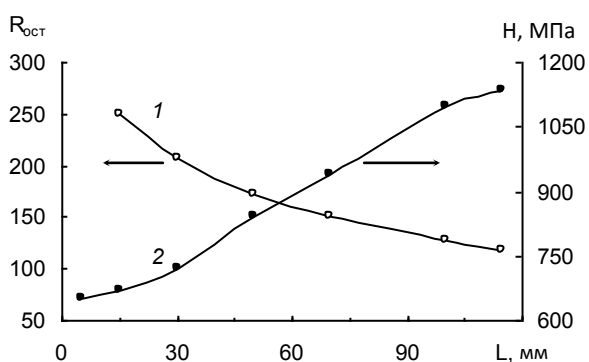


Рис. 2. Распределение остаточного сопротивления (1) и микротвёрдости (2) вдоль длины образца йодидного ванадия после одного прохода зонной плавки

Наиболее чистый ванадий был получен рафинированием методом электропереноса на проволочных образцах металла после двукратной

ЭЛП порошка электролитического ванадия [22]. Исследования показали, что в ванадии при прохождении постоянного электрического тока высокой плотности примеси внедрения мигрируют в катодную часть образца, т. е. эффективный заряд этих примесей положителен. Из численного решения уравнения электропереноса следует, что при 1650 °С в течение 200 ч при плотности тока примерно $5 \cdot 10^3$ А/см² в результате электропереноса ожидается значительное уменьшение содержания кислорода, азота и углерода. Экспериментально показано, что при соблюдении указанных выше условий значение $R_{ост}$ ванадия в результате рафинирования электропереносом увеличивается с 50 до 1600 [11, 22-24]. Химический состав ванадия высокой чистоты с $R_{ост} = 1200$, полученного электропереносом, такой (масс-спектральный метод, ат.%): $Na < 1,0 \cdot 10^{-5}$; $K - 1,0 \cdot 10^{-5}$; $Ca - 4,0 \cdot 10^{-5}$; $Cu - 5,0 \cdot 10^{-5}$; $Mg < 1,0 \cdot 10^{-5}$; $Zn < 9,0 \cdot 10^{-5}$; $Al - 9,0 \cdot 10^{-5}$; $Si - 2,0 \cdot 10^{-3}$; $Ti - 4,0 \cdot 10^{-5}$; $P - 1,0 \cdot 10^{-4}$; $As - 3,0 \cdot 10^{-5}$; $S < 4,0 \cdot 10^{-5}$; $Mn < 1,0 \cdot 10^{-5}$; $Fe - 2,0 \cdot 10^{-5}$; $Cl - 7,0 \cdot 10^{-5}$;

Nb – $4,0 \cdot 10^{-5}$; Cr – $1,0 \cdot 10^{-3}$; F – $1,0 \cdot 10^{-3}$; Ni – $3,0 \cdot 10^{-5}$; Ga – $3,0 \cdot 10^{-5}$; Zr < $5,0 \cdot 10^{-5}$; Mo – $2,0 \cdot 10^{-5}$; C < $1,0 \cdot 10^{-2}$; N₂ < $1,0 \cdot 10^{-2}$; O₂ < $9,0 \cdot 10^{-3}$ [22].

Анализ полученных результатов показывает, что для достижения более высокой степени очистки ванадия необходимо оптимальное сочетание различных методов рафинирования, которое обеспечило бы удаление из ванадия, прежде всего, таких примесных элементов, как кремний, тугоплавкие металлы, углерод, азот, кислород. В этом плане интересно проведение вакуумной бестигельной дистилляции ванадия, которая позволяет уменьшить содержание кремния в металле более чем в десять раз, а также эффективно избавиться от примесей тугоплавких металлов [25].

Скандий. Предварительно было проведено моделирование процесса дистилляции. Показано, что положение максимума массы металла, осевшей вдоль дистилляционной колонки, определяется геометрией колонки и тигля, скоростью испарения, градиентом температуры вдоль колонки. В табл. 6 приведен химический состав исходного скандия СКМ-3 и дистиллированного металла после одного, двух и трех циклов дистилляций.

Таблица 6
Химический состав исходного скандия и металла после трех дистилляций

Примесь	Содержание примесей, мас.%			
	Исходный	Число циклов дистилляций		
		1	2	3
Cu	0,01	0,003	0,002	0,0007
Ti	0,02	0,003	0,0015	0,00022
Fe	0,1	0,06	0,01	0,0035
Ca	0,2	0,0004	–	–
Mg	0,02	0,002	–	–
Al	0,01	0,002	0,001	0,0007
Zr	0,01	0,006	–	–
Y	0,01	0,0014	–	–
Cr	–	0,013	0,006	0,004
Массовая часть Sc, %	99,62	99,92	99,98	99,99

Параметры дистилляции скандия следующие: T_{исп} ~ 1500...1530 °C, T_{конд} = 1300...1100 °C, скорость испарения 2,5 г/ч. Видно, что после трех дистилляций скандий достигает чистоты 99,99 мас.%.
Экспериментально установлено, что зависимость концентрации примесей в скандии после нескольких

циклов дистилляции описывается выражением:

$$C = \sum_i C_0^i \exp(-A_i \cdot N), \quad (1)$$

где C₀ⁱ – концентрация i-примеси, мас.%; A_i – коэффициенты, постоянные для каждой примеси; N – число циклов дистилляции.

Из данных табл. 6 были определены коэффициенты A_i в формуле (1) для различных металлов-примесей, которые составляют: Ca – 6,2; Fe – 1,05; Cu – 0,83; Ti – 1,50; Cr – 0,59; Al – 0,52. Зная эти коэффициенты, можно оценить степень очистки после 4, 5 и 6 циклов дистилляций. Следует отметить, что указанная оценка степени очистки скандия не учитывает возможности изменения активности каких-либо примесей (например, железа) с увеличением числа циклов [15, 26, 27].

Ниобий. Исходным материалом для ЭЛП служил ниобий кальциеалюмотермического восстановления (КАТ). Результаты последовательных ЭЛП КАТ ниобия представлены в табл. 7. Содержание металлических примесей после двух последовательных переплавов ниобия в печи ЭЛП следующее: Al – 0,004; Fe – 0,0001; Cr < 0,001; Ni < 0,0004; Si – 0,005; Cu – 0,0006; Ca < 0,003 мас.%.
Проведение отжига в активных средах (например, в кислороде), а затем в сверхвысоком вакууме проволочных образцов ниобия позволяет повысить чистоту металла до R_{ост} = 2500, что соответствует содержанию основного элемента более 99,995 мас.%, без учета тантала [15].

Металл более высокой степени чистоты был получен после рафинирования методом зонной плавки ниобия, полученного водородным восстановлением хлорида ниобия. Содержание примесей в таком металле с R_{ост} = 12000 по данным нейтронно-активационного анализа было следующим:

Na – $5,0 \cdot 10^{-5}$; Cs < $1,0 \cdot 10^{-6}$; Cu < $1,0 \cdot 10^{-4}$; Ag < $1,0 \cdot 10^{-4}$; Au < $8,0 \cdot 10^{-9}$; Rb < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Zn < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Cd < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Ga < $2,0 \cdot 10^{-8}$; Se < $2,0 \cdot 10^{-7}$; La < $3,0 \cdot 10^{-6}$; Eu < $5,0 \cdot 10^{-8}$; Lu < $1,0 \cdot 10^{-6}$; Yb < $3,0 \cdot 10^{-6}$; Dy < $3,0 \cdot 10^{-7}$; Th < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Hf < $5,0 \cdot 10^{-6}$; As < $8,0 \cdot 10^{-7}$; Sb < $8,0 \cdot 10^{-7}$; Ta – $8,0 \cdot 10^{-5}$; Cr < $2,0 \cdot 10^{-5}$; Te < $1,0 \cdot 10^{-5}$; W – $1,0 \cdot 10^{-5}$; Mn < $5,0 \cdot 10^{-8}$; Fe < $5,0 \cdot 10^{-4}$; Co < $2,0 \cdot 10^{-6}$; Re – $4,0 \cdot 10^{-6}$; Ir < $2,0 \cdot 10^{-7}$; Br < $5,0 \cdot 10^{-8}$; Ar < $5,0 \cdot 10^{-6}$ мас.% [11, 14].

Таблица 7

Результаты рафинирования ниобия

Материал	Содержание примесей, $\times 10^3$ мас.%				R _{ост}	НВ, МПа
	C	O	N	H		
Исходный	40	210	18	6	–	–
1-й ЭЛП	5	5	3,5	0,5	94	500
2-й ЭЛП	3	4	1,6	< 0,5	172	420
3-й ЭЛП	1,4	–	< 1	< 0,5	450	384

Тантал. В качестве исходных материалов использовались прутки и порошки тантала чистотой 99,8 мас.%. Вакуумная ЭЛП снижает содержание

металлических примесей в тантале по сравнению с их содержанием в исходном материале на один–два порядка, заметно также снижается и содержание

примесей внедрения ($\times 10^{-4}$ мас.%): Al – 3...20; Si – 3...20; Cr < 5; Fe – 5...10; Cu < 1; H₂ – 1...6; C – 3...20; N₂ – 1...10; O₂ – 5...50. Основным процессом очистки тантала при ЭЛП является дегазация и испарение легколетучих примесей.

Для повышения эффективности рафинирования тантала от примесей и получения тантала в монокристаллическом виде применялись 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.%. Содержание примесных элементов в тантале такой чистоты следующее: Ag < $7,0 \cdot 10^{-6}$; In < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Rh < $1,0 \cdot 10^{-5}$; As < $1,0 \cdot 10^{-5}$; K < $3,0 \cdot 10^{-6}$; Ru < $1,0 \cdot 10^{-4}$; В – $3,0 \cdot 10^{-5}$; Mg < $1,7 \cdot 10^{-6}$; S < $2 \cdot 10^{-6}$; Ba < $2,0 \cdot 10^{-5}$; Mn < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Sb < $7,0 \cdot 10^{-5}$;

Bi < $5,0 \cdot 10^{-4}$; Mo < $2,0 \cdot 10^{-4}$; Se < $5,0 \cdot 10^{-5}$; Br < $2,0 \cdot 10^{-5}$; Na < $1,0 \cdot 10^{-6}$; Si – $6,6 \cdot 10^{-6}$; C – $4,0 \cdot 10^{-3}$; Nb – $2,4 \cdot 10^{-4}$; Sn < $1,0 \cdot 10^{-4}$; Cl – $2,0 \cdot 10^{-5}$; Ca < $3,0 \cdot 10^{-6}$; Sr < $1,0 \cdot 10^{-4}$; Co < $3,0 \cdot 10^{-5}$; Ni < $4,0 \cdot 10^{-5}$; Th < $6,0 \cdot 10^{-5}$; Cr < $1 \cdot 10^{-5}$; O < $3,0 \cdot 10^{-3}$; Ti < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Cs < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Os < $7,0 \cdot 10^{-5}$; Tl < $2,0 \cdot 10^{-4}$; Cu < $1,0 \cdot 10^{-5}$; P < $1,0 \cdot 10^{-5}$; V < $9,0 \cdot 10^{-6}$; Fe – $1,2 \cdot 10^{-5}$; Pb < $6,0 \cdot 10^{-5}$; W < $4,0 \cdot 10^{-4}$; Ga < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Pd < $5,0 \cdot 10^{-5}$; Zn < $1,0 \cdot 10^{-4}$; Ge < $1,0 \cdot 10^{-5}$; Rb < $2,0 \cdot 10^{-5}$; F < $1,0 \cdot 10^{-6}$; I < $4,0 \cdot 10^{-5}$; Re < $3,0 \cdot 10^{-4}$ мас.%.

В результате зонного рафинирования получены ориентированные монокристаллы тантала диаметром 7...10 мм и длиной 150...180 мм с разориентацией элементов субструктуры < 0,01° и микротвердостью 750 МПа [15, 23, 28].

Данные уровня чистоты и методов получения чистых металлов, которые являются необходимыми компонентами для создания материалов для ядерной энергетики, обобщены в табл. 8.

Таблица 8

Чистые металлы для ядерной энергетики

Металл	Метод рафинирования	Примеси, лимитирующие очистку	Содержание основного вещества, мас.%	R _{ост} = R(300 К)/R(4,2 К)
Cu	ЭЛП + Д	Si, Ag, Fe, Ni, S	99,998	340
Ni	ЭЛП, ЗП	Fe, Co, Si	99,994	1000
Fe	ЭЛП + Д	Ni, Si, Co	99,96	230
Ti	ЭЛП	Fe, C	99,99	–
Zr	ЭЛП + ЗП	Si, Hf, O, N	99,99	250
Hf	ЭЛП	Si, O, N	99,9	–
V	ЭЛП + ЗП + ЭП	Fe, Ni, Si	99,998	1600
Sc	Д	Cr, Fe	99,99	–
Nb	ЭЛП + ЗП	W, Ta, C	99,9995	12000
Ta	ЭЛП + ЗП	W, Nb, Re, C	99,999	290

Д – дистилляция; ЭП – электроперенос.

Материалы для реакторов нового поколения. В НИЦ ХФТИ проводятся исследования, направленные на разработку новых конструкционных материалов, которые можно эксплуатировать в рабочих условиях перспективных ядерных и термоядерных реакторных установок. В последние годы интенсивно проводятся работы по разработке и исследованию конструкционного материала для контура циркуляции топливной соли перспективных жидкосольевых 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 позволили получить сплавы типа хастеллой с малым содержанием нежелательных примесей [29-32]. Полученные сплавы содержали: Ni – основа, Mo – 11,7; Cr – 6,7; Ti – 0,47; Al – 0,83; Fe – 1,5; Mn – 0,5; Si – 0,15 мас.%.

Эти образцы сплавов испытывались в условиях, близких к условиям работы топливного контура ЖСР: образцы находились в солевом расплаве (ZrF₄ + NaF) при 650 °С и подвергались длительному (до 700 ч) облучению на линейном ускорителе электронов. На рис. 3 показана 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 [31].

Механические характеристики образцов после электронного облучения в расплаве солей фторидов при температуре 650 °С в течение 700 ч приведены в табл. 9 [29-34]. Проведены экспериментальные

исследования влияния импульсного излучения большой мощности на свойства сплавов, а также исследования морфологической эволюции поверхности образцов при плазменной обработке.

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.

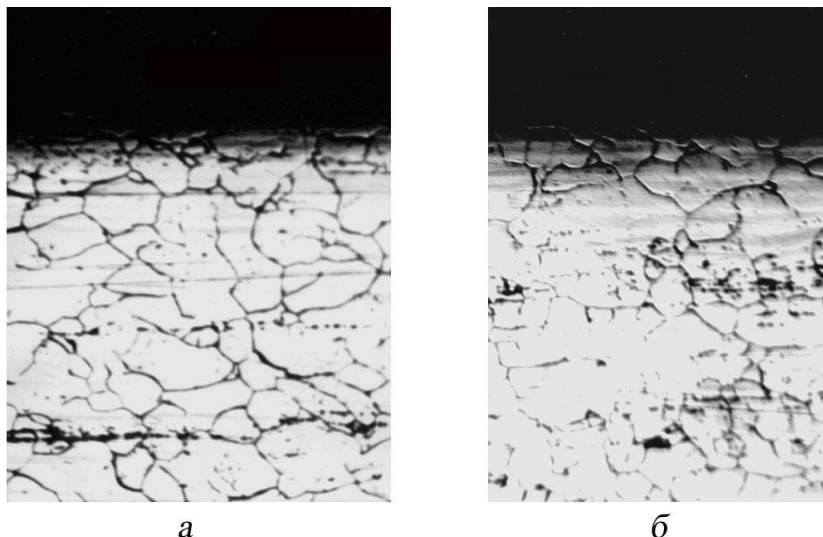


Рис. 3. Микроструктура образцов сплавов типа хастеллой после коррозионных испытаний при 650 °С в течение 100 (а) и 700 ч (б). Увеличение 380

Таблица 9

Механические свойства сплавов после облучения электронами

E_{dep} , эВ/ат.	T, °С	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
5066	20	626	333	35
64		848	576	54
5066	650	276	213	15
64		362	255	15
Исходный, без облучения	20	900	395	63
	600	397	288	14
После коррозионных испытаний при 650 °С, 700 ч	20	1070	875	43
	650	510	440	9

ВЫВОДЫ

Поведение конструкционных материалов при эксплуатации ядерных реакторов в значительной степени определяет безопасную и экономичную работу атомных станций. Поэтому дальнейшее развитие ядерной энергетики в значительной степени зависит от разработок новых перспективных конструкционных материалов для реакторов нового поколения и усовершенствования материалов, эксплуатируемых ядерно-энергетических установок за счет применения высокочистых металлов в качестве исходных компонентов и использования новых технологий их изготовления, что обеспечит повышение ресурса работы, надежность и безопасность элементов конструкций ядерных реакторов.

Применение чистых и высокочистых металлов в качестве исходных компонентов конструкционных материалов ЯЭУ в значительной степени определяет дальнейшее развитие ядерной энергетики:

- циркониевые сплавы и гафний повышенной чистоты необходимы для усовершенствования ТВС и СУЗ реакторов действующих АЭС;

- корпусные стали повышенной чистоты обеспечат увеличение ресурса, надежность и безопасность работы корпусов реакторов;

- новые высокотемпературные, коррозионно- и радиационно-стойкие конструкционные материалы – основа элементов конструкций реакторов нового поколения, обеспечивающих их высокие эксплуатационные характеристики;

– сверхпроводящие материалы с сочетанием высоких значений критических параметров сверхпроводимости, прочности, пластичности и других физических свойств обеспечат надежное управление системами термоядерных реакторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. И.М. Неклюдов. Проблемы работоспособности материалов основного оборудования АЭС Украины // *Прогрессивные материалы и технологии*. Киев: «Академпериодика», 2003, т. 1, с. 277-295.

3. И.В. Горынин. Надежные материалы – основа безопасности атомной энергетики // *Мировая энергетика*. 2006, №7(31), с. 90-91.

4. Н.М. Бескорвайный, Б.А. Калинин, П.А. Платонов, И.И. Чернов. *Конструкционные материалы ядерных реакторов*. М.: «Энергоатомиздат», 1995, 704 с.

5. Н.А. Азаренков, Л.А. Булавин, И.И. Залобовский, В.Г. Кириченко, И.М. Неклюдов, Б.А. Шилев. *Ядерная энергетика: Учебное пособие*. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2012, 480 с.

6. Б.А. Калинин, П.А. Платонов, Ю.В. Тузов, И.И. Чернов, Я.И. Штротбах. *Физическое материаловедение: Учебник для вузов / Под ред. Б.А. Калина*. Т. 6. *Конструкционные материалы ядерной техники*. М.: НИЯУ МИФИ, 2012, 736 с.

7. В.В. Новиков, В.А. Маркелов, В.Н. Шишов, М.М. Перегуд, В.Ф. Кошков. Совершенствование циркониевых сплавов для обеспечения повышенных эксплуатационных параметров топлива ВВЭР // *Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого межгосударственного сотрудничества*: Материалы Совместного совещания-семинара Российской академии наук и Национальной академии наук Украины: 21–23 октября 2008 года, ЛОК «Колонтаево» (г. Электросталь). М.: «Наука», 2009, с. 236-250.

8. И.М. Неклюдов, В.М. Ажажа, Г.П. Ковтун, Н.Н. Пилипенко. Влияние чистоты на качество материалов ядерной и термоядерной 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.

9. В.М. Ажажа, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко. Чистые и особо чистые металлы в атомной энергетике // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2007, №4, с. 3-12.

10. Н.Н. Пилипенко. Роль высокочистых металлов в создании новых материалов для элементов конструкций АЭС // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2008, №1, с. 10-17.

11. Г.Ф. Тихинский, Г.П. Ковтун, В.М. Ажажа. *Получение сверхчистых редких металлов*. М.: «Металлургия», 1986, 160 с.

12. В.Ф. Зеленський, І.М. Неклюдов, В.М. Ажажа та ін. Розвиток досліджень в області фізики твердого тіла, матеріалознавства та нових технологій в УФТІ – ННЦ ФХТІ // *УФЖ*. 1998, т. 43, №9, с. 1050-1072.

13. Ю.П. Бобров, А.Е. Дмитренко, Д.В. Коблик, С.Д. Лавриненко, М. Лаубенштейн, С.С. Нагорный, Н.Н. Пилипенко, Ю.С. Стадник, И.Г. Танцюра, В.Д. Вирич. Электронно-лучевая плавка ванадия // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2014, №1(89), с. 27-31.

14. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, С.Д. Лавриненко. Получение высокочистого ниобия методом зонной плавки // *ВАНТ. Серия «Физика и техника высокого вакуума»*. 1974, в. 2(3), с. 18-19.

15. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко. Получение высокочистых металлов (Sc, Ti, Fe, Zr, Hf, Cu, V, Nb, Ta) // *Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра*. Киев: «Политехника», 2002, с. 79-84.

16. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко, А.Ф. Болков, А.М. Лахов, К.А. Линдт, А.П. Мухачев. Электронно-лучевая плавка титана, циркония и гафния // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2002, №6, с. 95-99.

17. Н.Н. Пилипенко. Получение циркония ядерной чистоты // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2008, №2, с. 66-72.

18. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, С.Д. Лавриненко, В.И. Лапшин, Н.Н. Пилипенко. Электронно-лучевая плавка циркония // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2000, №5, с. 3-11.

19. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, С.Д. Лавриненко и др. Исследование процесса рафинирования кальциетермического гафния электронно-лучевой плавкой // *Труды конференции «Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике» (Алушта, 1999)*. Харьков, 1999, с. 36-37.

20. В.М. Ажажа, Ю.П. Бобров, В.Д. Вірич, П.М. В'югов, О.Е. Дмитренко, О.Е. Кожевников, С.Д. Лавриненко, М.М. Пилипенко, В.М. Пелих. Рафінування нікелю методом електронно-променевої плавки // *Вісник ХНУ ім. Каразіна. Серія фізична «Ядра, частинки, поля»*. 2003, в. 2/22, с. 118-122

21. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко. Рафинирование меди // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 1999, в. 1(9), с. 44-47.

22. В.П. Ажажа, Б.П. Черный. К вопросу получения ванадия высокой чистоты // *ВАНТ. Серия «Физика и техника высокого вакуума»*. 1973, в. 1(1), с. 67-71.

23. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко. Электронно-лучевая зонная плавка ванадия, ниобия и тантала // *Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра*. Киев: «Политехника», 2002, с. 220-225.

24. В.М. Ажажа, Г.П. Ковтун. *Получение и анализ веществ особой чистоты*. М.: «Наука», 1978, с. 126-130.
25. В.М. Ажажа, С.Д. Лавриненко, Б.П. Черный, М.П. Рывкин. Рафинирование ванадия методом вакуумной бестигельной дистилляции // *ВАНТ. Серия «Физика и техника высокого вакуума»*. 1975, в. 1(4), с. 80-81.
26. С.Д. Лавриненко. Получение скандия высокой степени чистоты // *Материалы VII Конференции стран СНГ по проблеме «Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов»*. Белгород, 1997, с. 148-151.
27. В.М. Ажажа, Г.И. Волокита, С.Д. Лавриненко, П.Н. Вьюгов, Т.Г. Емлянинова. Механические свойства скандия различной чистоты // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2002, №1, с. 44-46.
28. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, В.А. Еленский и др. Получение монокристаллов тантала зонной перекристаллизацией // *ВАНТ. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»* 1998, в. 1(2), с. 63-71.
29. V.M. Azhazha, A.S. Bakai, S.D. Lavrinenko, et al. Alloys for molten-salt reactors // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2005, №4, с. 40-47.
30. В.М. Ажажа, А.С. Бакай, Ю.П. Бобров 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 Prometeu, 2006, v. 2, p. 280-289.
31. В.М. Ажажа, А.С. Бакай, Ю.П. Бобров, С.Д. Лавриненко, И.А. Петельгузов, В.И. Савченко. Исследование коррозионной стойкости и механических свойств жаростойкого и жаропрочного никелевого сплава // *Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій* / Під. заг. ред. В.В. Панасюка. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004, с. 659-664.
32. В.М. Ажажа, Ю.П. Бобров, П.М. В'югов, С.Д. Лавриненко, М.М. Пилипенко та ін. Розробка сплаву для паливного контуру рідинно-сольових реакторів // *Вісник ХНУ ім. Каразіна. Серія фізична «Ядра, частинки, поля»*. 2004, №619, в. 1/23, с. 87-94.
33. В.М. Ажажа, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко. Высокочистые металлы в ядерной энергетике // *Развитие атомной энергетики России и Украины – фактор устойчивого межгосударственного сотрудничества*: Материалы Совместного совещания семинара Российской академии наук и Национальной академии наук Украины: 21–23 октября 2008 года, ЛОК «Колонтаево» (г. Электросталь). М.: «Наука», 2009, с. 285-301.
34. V.M. Azhazha, A.S. Bakai, A.N. Dovbnya, S.D. Lavrinenko, Yu.P. Bobrov, M.M. Pylypenko. Variation of compositional content in subsurface layers of Hastelloy type alloys as caused by melt of fluorides ZrF_4-NaF and electron irradiation // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»* (87). 2005, №4, с. 82- 89.

Статья поступила в редакцию 18.06.2014 г.

ЧИСТІ МЕТАЛИ ДЛЯ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

С.Д. Лавриненко, М.М. Пилипенко, П.М. В'югов

Представлено дані про рівень чистоти металів, отриманих різними фізичними методами в ННЦ ХФТІ, на основі проведених розробок і реалізації високоефективних методів рафінування. Приведено характеристики основних конструкційних матеріалів для деяких типів реакторів нового покоління і чистих металів, необхідних для їх використання. Показано, що розвиток ядерної енергетики в значній мірі залежить від розробок перспективних конструкційних матеріалів для реакторів нового покоління та удосконалення матеріалів ядерно-енергетичних установок, що нині експлуатуються.

PURE METALS FOR NUCLEAR POWER

S.D. Lavrinenko, M.M. Pylypenko, P.M. Vjugov

The data on the level of purity of the metals produced by different physical methods in NSC KIPT, using development and implementation of efficient methods for refining are presented. The characteristics of the main structural materials for some types of new generation reactors and pure metals with need to create them are presented. Shown that the development of nuclear power is largely dependent on the development of promising structural materials for new generation reactors and improving materials for operating nuclear power plants.