

УДК 621.745: 669.296

С. В. Ладохин, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,

e-mail: e_luch@ptima.kiev.ua

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ЦИРКОНИЯ В ПРОГРАММЕ СОЗДАНИЯ ЯДЕРНО-ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА В УКРАИНЕ

Проведен сравнительный анализ перспектив использования в ядерно-топливном цикле Украины циркония, получаемого методами кальцийтермического и магнийтермического восстановления. Дано обоснование преимуществ использования в условиях Украины циркония кальцийтермического восстановления. Показана необходимость проведения экспериментальных исследований по получению изделий из циркония магнийтермического восстановления в электронно-лучевых литейных установках.

Ключевые слова: цирконий, кальцийтермическое восстановление, магнийтермическое восстановление, электронно-лучевая плавка, вакуумно-дуговой переплав, тигель, гарнисажная плавка, электронно-лучевой нагрев.

В настоящее время на АЭС Украины эксплуатируется 15 энергоблоков, в том числе 13 блоков типа ВВЭР-1000, которые вырабатывают более половины электроэнергии страны. Ядерное топливо для этих блоков традиционно поставлялось из России, но в последние годы в стране реализуется программа диверсификации поставок топлива, которая включает использование переходного топливного цикла в виде одновременного применения в отечественных ядерных реакторах топливных сборок разных производителей – наряду с топливом российской корпорации «ТВЭЛ» используется топливо американской компании Westinghouse. В настоящее время смешанные активные зоны с топливом указанных поставщиков эксплуатируются уже на шести энергоблоках украинских АЭС [1, стр. 171]. Однако в любом случае абсолютная зависимость работоспособности энергоблоков от внешних поставок топлива угрожает энергетической безопасности государства.

Поэтому проблема создания отечественного ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) относится к числу важнейших, определяющих энергетическую независимость страны. Неотъемлемой составной частью этой проблемы является получение циркония ядерной чистоты и организация производства из него сплавов для изготовления защитных труб-оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), канальных и направляющих труб, кассет, дистанционирующих решеток и других деталей активной зоны атомных реакторов [2].

Цель настоящей статьи – обратить внимание специалистов, связанных с производством и использованием циркония, на вопросы, которые, по мнению автора,

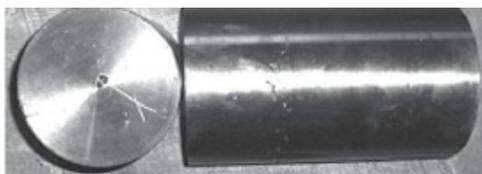
определяют дальнейшее развитие этой отрасли в стране, в первую очередь, с точки зрения создания отечественного ЯТЦ [3, 4]. В этом плане статья по существу является продолжением работы [5], в которой были рассмотрены вопросы получения и использования циркония и сплавов на его основе в Украине, как одного из основных элементов общей проблемы производства ядерного топлива по состоянию на начало столетия.

Украина относится к ограниченному числу стран, владеющих технологией производства циркония, причем отечественная технология отлична от применяемых другими производителями этого металла. В мировой практике для получения циркония наиболее широко используется метод магнийтермического восстановления из тетрахлорида циркония (метод Кролла), который применяется практически всеми производителями циркония в дальнем зарубежье [6]. В России для этой цели применяется метод электролитического восстановления из солей K_2ZrF_6 , KCl и KF [2, 6], а в Украине на ГНПП «Цирконий» освоен метод кальцийтермического восстановления из тетрафторида циркония [7, 8]. При использовании магнийтермического метода исходный металл получают в виде губки, при электролитическом восстановлении – в виде порошка, при кальцийтермическом – в виде цилиндрической заготовки с малым отношением высоты к диаметру.

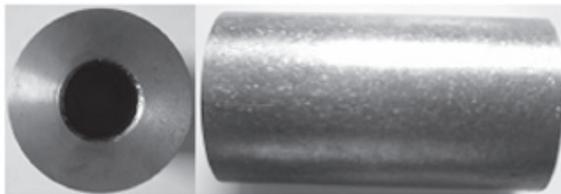
Принципиальной особенностью используемого в нашей стране метода кальцийтермического восстановления из тетрафторида циркония является то, что получаемый в результате восстановления металл представляет собой цилиндрическую заготовку небольшой высоты, рафинирование и формирование слитка из которого возможно практически только за счет электронно-лучевого переплава. Этот слиток затем подвергается известным операциям по дальнейшему переделу в требуемые изделия, в том числе в трубные заготовки. Эти операции представляют собой ковку слитка и его механическую обработку с получением трубных заготовок и последующим изготовлением из них так называемых трекс-труб (горячекатаных заготовок под холодную прокатку) и затем твельных трубок (холоднокатаных трубок для тепловыделяющих элементов ядерных реакторов) [6].

Возможные варианты получения трубных заготовок проанализированы в работе [5], причем этот анализ проведен для условий производства циркония, как кальцийтермическим, так и магнийтермическим методами. При магнийтермическом методе, который в настоящее время наиболее широко используется в мировой практике для получения циркония, в процессе восстановления из тетрахлорида циркония образуется блок губчатого металла – так называемая «крица», которая подвергается дроблению с изготовлением губки. Из губки затем формируют расходный электрод для вакуумно-дугового переплава (ВДП), который является единственным практически используемым методом рафинирования и получения слитка циркония, причем переплав проводится не менее двух раз. Этот слиток и подвергается указанным выше операциям обработки с изготовлением трекс-труб и твельных трубок.

В последние годы в практике производства сплавов циркония начинает находить применение электронно-лучевая плавка, причем наиболее интенсивно работы в этом направлении проводятся в Украине [8] и России [9]. В работе [5] основное внимание было уделено анализу перспектив получения трубных заготовок с использованием литейной электронно-лучевой технологии, в которой исключается операцияковки слитка и которую автор считает наиболее перспективной для решения проблемы трубных заготовок из циркониевых сплавов в нашей стране. Обоснованность такого подхода была подтверждена разработкой технологий получения литых трубных заготовок их сплава $Zr1Nb$ на основе циркония кальцийтермического восстановления [10] и изготовления из них трекс-труб [11] и твельных трубок [12]. На рис. 1 и 2 приведены фотографии полученных в указанных работах изделий. Качество полученных изделий и свойства сплава в них отвечают предъявляемым требованиям, но экспериментальной проверки в реальных условиях эксплуатации,



а



б

Рис. 1. Литые трубные заготовки из сплава Zr1Nb: а – литье в стационарную форму; б – центробежное литье



Рис. 2. Фрагменты твельной трубки (слева) и трекс-трубы

то есть непосредственно в ядерных реакторах, твельные трубки пока не проходили. Безусловным достоинством проведенных исследований является то, что трубы-оболочки были получены не только в условиях опытного завода ГП «НИТИ», но также в условиях промышленного производства на Никопольском ЮТЗ (см. таблицу) [12]. Отметим, что механические свойства сплава Zr1Nb в трубах-оболочках ТВЭЛ изучали только на образцах труб, изготовленных из заготовок, полученных литьем в кокиль.

Следует еще раз подчеркнуть, что все полученные к настоящему времени литые трубные заготовки отливались из сплава Zr1Nb, который выплавлялся в электронно-лучевых гарнисажных установках с использованием циркония кальцийтермического восстановления. Вместе с тем, в настоящее время среди значительной части специалистов и руководителей организаций, занимающихся проблемой ЯТЦ, сформировалось мнение о целесообразности использования метода магнийтермического восстановления циркония с последующим рафинированием и формированием слитка традиционным методом ВДП. Поэтому, хотя автор является сторонником использования в Украине метода кальцийтермического восстановления с последующей электронно-лучевой плавкой циркония и литьем трубных заготовок, представляет интерес проведение анализа перспективы использования электронно-лучевой технологии плавки и литья также для рафинирования циркония магнийтермического восстановления и получения из него трубных заготовок. Целесообразность использования электронно-лучевой технологии обусловлена возможностью в этом случае исключить из технологической цепочкиковки слитка и механической обработки, являющихся причиной не только потерь металла при переделах, но и удорожания продукции вследствие усложнения технологии и использования дорогостоящего оборудования.

В принципе наиболее рациональным путем проверки приемлемости электронно-лучевой литейной технологии было бы проведение соответствующих плавки с использованием губки и получением трубных заготовок, аналогично тому, как это было сделано при получении трубных заготовок из циркония кальцийтермического восстановления [8, 10]. Однако провести такие плавки не удастся из-за отсутствия губки циркония, производство которой в нашей стране еще не налажено, а попытки ее приобретения за рубежом по понятным причинам пока оказываются безуспешными. Поэтому далее вопросы технологии вынужденно не рассматриваются, а проводимый анализ касается только разработки технологического оборудования, которое может быть использовано для выплавки сплавов и литья заготовок, в том числе из губки циркония. Это оборудование включает электронно-лучевые литейные установки, плавильно-заливочные тигли и электронные пушки, конструктивное исполнение которых должно учитывать предполагаемые особенности выплавки сплавов циркония с использованием губки. Такими особенностями, как это вытекает из

Механические свойства труб-оболочек ТВЭЛ из сплава Zr1Nb

Завод-изготовитель	Продольное направление			Поперечное направление		
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
	температура испытаний 293 К					
ОЗ ГП «НИТИ»	580–590	415–425	34–36	550–600	500–533	16,1–16,7
ОАО ЮТЗ*	615–650	480–495	30–33	605–650	560–595	13–13,3
ВДП	–	–	–	294	210	29
ТУ 95-105-89 не менее	410	240	20	–	–	12
	температура испытаний 653 К					
ОЗ ГП «НИТИ»	–	–	–	226–235	222–226	27–30
ОАО ЮТЗ*	235–265	135–153	–	225–240	190–200	27–36
ВДП	–	–	–	225	195	47
ТУ 95-105-89 не менее	–	80	–	148	130	33

опыта выплавки других сплавов с использованием губчатых материалов, в первую очередь титана [13], являются повышенная газотворность шихты, обусловленная в основном наличием в губке примесей хлора и хлористого магния. Однако следует учитывать также трудности с выплавкой и разливкой многокомпонентных сплавов вследствие избирательного испарения компонентов при электронно-лучевом нагреве из-за разной упругости пара компонентов сплавов.

Конструкции электронно-лучевых установок применительно к их использованию для целей плавки и литья циркониевых сплавов ранее уже рассматривались в работах [14–16]. При этом для случая выплавки циркониевых сплавов с использованием губки были сформулированы такие требования к проведению в них технологического процесса: возможность обеспечения проведения плавки в широком диапазоне изменения вакуума, предварительное (до поступления в тигель) плавление шихты с целью дегазации, достаточно интенсивное перемешивание расплава в тигле, устойчивый электронно-лучевой нагрев в течение всей плавки. Предлагаемые в работах [14–16] конструкции эти задачи решают за счет исполнения установок многокамерными, возможности поддержания в камерах разного вакуума, применения промежуточных емкостей и использования пушек высоковольтного тлеющего разряда (ВТР).

В дополнение к указанным конструктивным особенностям рациональным конструктивным решением установки для плавки и литья циркониевых сплавов с использованием губки может быть исполнение установки в варианте, обеспечивающем возможность получения как литых заготовок, так и слитка за счет применения поворачивающейся промежуточной емкости, как это показано на рис. 3 [17]. Создание такой установки представляет интерес именно для выплавки сплавов циркония, поскольку относительно невысокая потребность в изделиях из циркония для нужд отечественного ЯТЦ может быть удовлетворена одним плавно-заливочным агрегатом, то есть отпадает необходимость в создании отдельных установок для получения слитка и литых заготовок.

Что касается тиглей, то требования к усовершенствованию их конструкции сводятся в основном к разработке тиглей повышенной емкости, поскольку применяющиеся до настоящего времени тигли для электронно-лучевой гарнисажной плавки обеспечивают слив до 40 кг расплава, в то время как для промышленного производства потребуется слив до 150–200 кг расплава (по цирконию). Тигли такой емкости в настоящее время разрабатываются совместно Институтом электродинамики НАН Украины и ФТИМС НАН Украины [18]. Принципиальная схема варианта тигля со сливом расплава как через сливное отверстие в днище, так и через сливной носок путем наклона тигля приведена на рис. 4. В подобных тиглях предусматривается перемешивание расплава за счет СЭМП в направлении от центра ванны к стенке

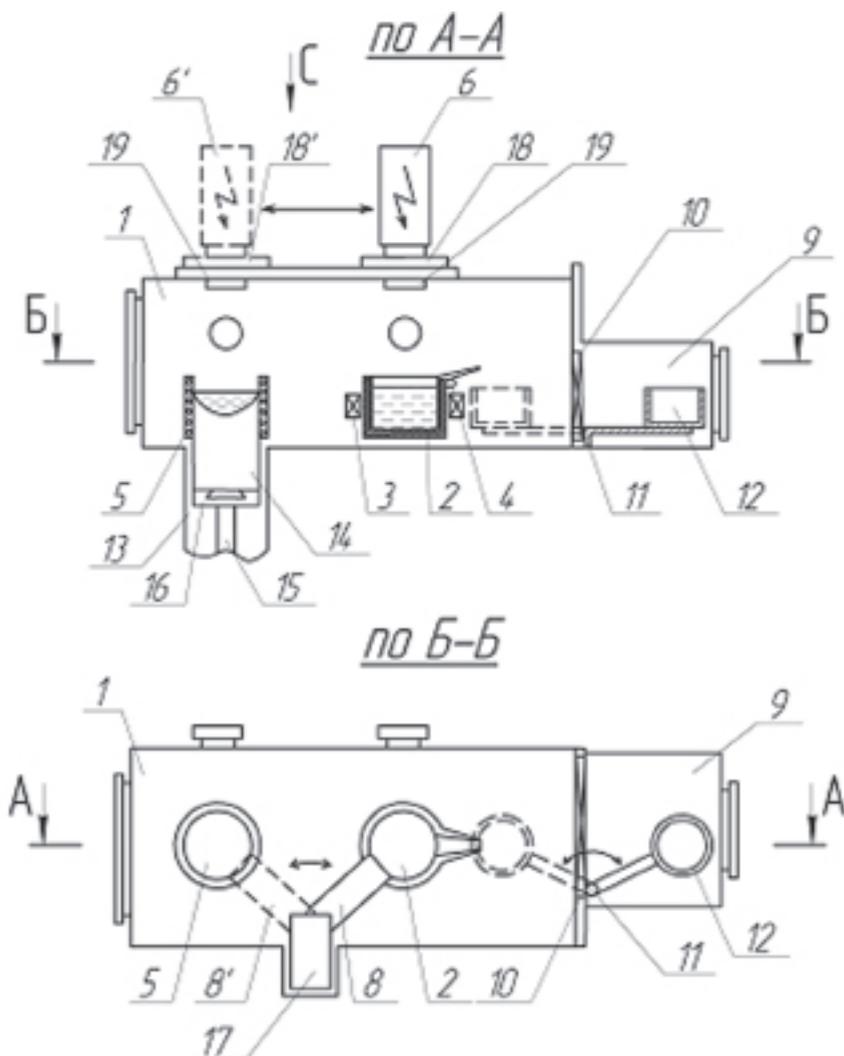


Рис. 3. Схема электронно-лучевой установки для получения слитка и литой заготовки: 1 – плавильная камера; 2 – тигель; 3 – система ЭМП тигля; 4 – ось поворота тигля; 5 – кристаллизатор; 6 – пушка ВТР, обогревающая тигель и кристаллизатор; 7 – пушка ВТР, обогревающая промежуточную емкость; 8 – промежуточная емкость; 9 – камера литейных форм; 10 – вакуумный затвор; 11 – устройство перемещения форм; 12 – блок литейных форм; 13 – камера слитка; 14 – слиток; 15 – механизм вытягивания слитка; 16 – поддон; 17 – устройство подачи шихты на переплав; 18 – подвижная плита; 19 – вакуумный затвор

тигля, определяемое как прямое перемешивание, и в обратном направлении. В зависимости от схемы разливки в тиглях желательнее иметь разную геометрию ванны, а именно при донном сливе отношение высоты ванны к ее диаметру должно быть несколько меньше, чем при сливе через носок, что необходимо для предупреждения размыва гарнисажа на боковой стенке тигля.

Относительно пушек еще раз отметим, что применительно к их использованию для плавки губки речь идет о пушках ВТР, особенностью которых является устойчивая работа при колебании вакуума в плавильной камере в широком диапазоне. Вместе с тем, в ходе эксплуатации этих пушек в условиях плавки с электромагнитным перемешиванием расплава были выявлены недостатки, которые сводились, в основном, к следующим моментам: 1) поверхность катода, с которой осуществляется эмиссия электронов, используется не полностью, так как в известных пушках

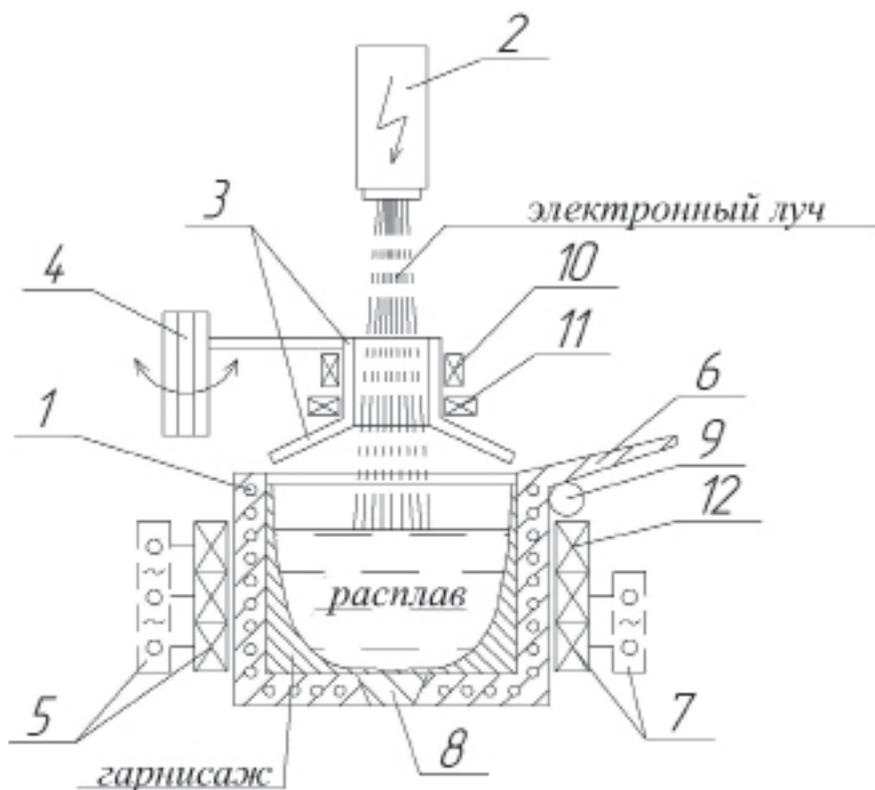


Рис. 4. Схема гарнисажного тигля со сливом расплава через сливной носок и через отверстие в днище: 1 – тигель; 2 – электронно-лучевая пушка; 3 – тепловой экран; 4 – ось поворота экрана; 5 – трехкатушечная система электромагнитного перемешивания расплава; 6 – сливной носок; 7 – двухкатушечная система электромагнитного перемешивания расплава; 8 – сливное отверстие в днище тигля; 9 – ось поворота тигля; 10 – катушка фокусировки луча; 11 – катушка развертки луча; 12 – катушка стабилизации положения луча

диаметр апертуры анода меньше, чем диаметр катода; 2) в эксплуатируемых пушках из-за большого расстояния от лучевода до обогреваемой поверхности имеют место повышенные потери энергии электронов, а также наблюдается перегрев элементов пушки вследствие воздействия излучения с поверхности ванны; 3) наличие в пушках лучеводов усложняет их конструкцию и повышает стоимость.

В предложенных новых конструктивных решениях пушек первый из указанных недостатков устранен за счет того, что в пушке, в которой водоохлаждаемый вогнутый катод и соосный с ним водоохлаждаемый анод, диаметр апертуры которого больше диаметра катода, выполнены таким образом, что диаметр апертуры анода больше радиуса кривизны рабочей поверхности катода, который равняется расстоянию от рабочей поверхности катода до отверстия в донной части анода [19]. Благодаря этому увеличивается эффективная площадь поверхности катода, с которой реализуется эмиссия электронов, что будет приводить к повышению КПД пушки.

Второй из указанных негативных моментов удастся в определенной степени нивелировать за счет исполнения лучевода из двух частей, одна из которых размещается непосредственно в плавильной камере, а вторая стыкуется собственно с пушкой в атмосфере под углом [20]. Отметим, что выполнение лучевода в виде угловой конструкции является оригинальной разработкой, позволяющей использовать такие пушки в усложненных условиях эксплуатации [21]. Отметим также, что на части лучевода, расположенной в плавильной камере, может быть смонтирован тепловой экран.

Анализ рассмотренного выше варианта пушки ВТР логически приводит к заключению о возможности разработки устройства, в котором лучевод, как составная часть пушки, вообще отсутствует. В этом случае катушки систем фокусирования и отклонения луча полностью размещаются в плавильной камере на специальном фланце и могут быть выполнены с возможностью перемещения в вертикальной плоскости [22]. Предлагаемое конструктивное исполнение должно облегчать настройку пушки и существенно снизить стоимость ее изготовления.

Принципиально новым подходом к использованию пушек ВТР является разработка комбинированного электронно-лучевого нагревателя, в котором совмещены низко- и средневacuумная пушки ВТР, что открывает перспективу проведения плавки в широком диапазоне изменения вакуума без опасения перерыва в проведении нагрева. На рис. 5 приведена схема такого нагревателя, разработка которого оказалась возможной благодаря предложенной специфической конструкции низкова-

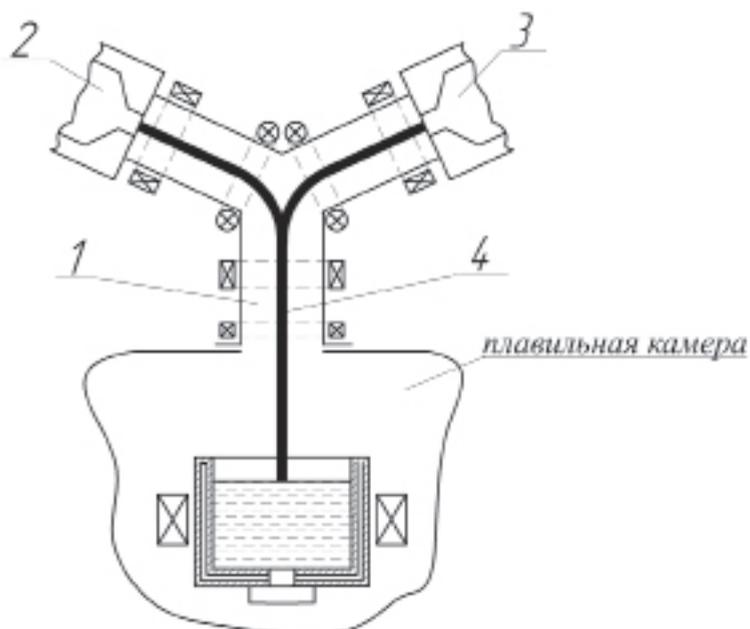


Рис. 5. Принципиальная схема комбинированного электронно-лучевого нагревателя: 1 – лучевод; 2 – низковакуумная пушка ВТР; 3 – средневacuумная пушка ВТР; 4 – электронный луч

куумной пушки ВТР [23] Это позволит применить электронно-лучевой нагрев при повышенном давлении в плавильной камере, при котором до последнего времени в технологических процессах плавки и рафинирования такой нагрев не использовался.

Список литературы

1. Звіт про діяльність Національної академії наук України у 2017 році / НАН України. – Київ: Академперіодика, 2018. – 552 с.
2. Займовский А.С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1994. – 256 с.
3. Чернов А.П., Семенов Г.Р., Лапшин В.И. и др. Исследования и разработки по развитию производства циркониевых сплавов и изделий в Украине // Труды 14-й Междунар. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (Алушта, Крым, 12-17 июня 2000 г.). – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2000. – С. 98–100.
4. Неклюдов И. М. Состояние и проблемы атомной энергетики в Украине // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 2007. - № 2. – С. 3–9.
5. Ладохин С. В., Вахрушева В. С. Перспективы применения электронно-лучевой плавки

- для получения сплавов циркония в Украине // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 4. – С. 22–27.
6. Ажажа В. М., Вьюгов П. Н., Лавриненко С. Д. и др. Цирконий и его сплавы: технология производства, области применения. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998. – 89 с.
 7. Коровин Ю. Ф., Чупринко В. К., Линдт К. А. и др. Производство циркония и гафния на ПО ПХЗ для удовлетворения потребностей атомной энергетики Украины // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 1994. – № 2 (62). – С. 114–124.
 8. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С. В. Ладохина. – Киев: «Сталь», 2007. – 626 с.
 9. Шиков А. К., Кабанов А. А., Аржакова В. М. и др. Применение электронно-лучевых установок в производстве циркониевых сплавов // Тр. Междунар. конф. «Ti-2007 в СНГ», (Ялта, Крым, 15-18 апреля 2007 г.). – С. 164–169.
 10. Гладков А. С. Особливості електронно-променевої гарнісажної плавки сплаву Zr–1Nb і розробка технології виготовлення трубних заготовок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2009. – 20 с.
 11. Вахрушева В. С. Формування структури та властивостей сталі і сплавів при виготовленні труб для ядерних енергетичних установок: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Дніпропетровськ, 2003. – 36 с.
 12. Вахрушева В. С. Проблемы создания производства циркониевого проката в Украине // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационного материаловедения. – 2014. – № 2. – С. 62–68.
 13. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высоко-реакционных металлов. – Киев: Наук. думка, 2008. – 312 с.
 14. Ладохин С. В. Новое оборудование для электронно-лучевой плавки и литья металлов и сплавов // Металл и литье Украины. – 2012. – № 7. – С. 3–11.
 15. Ладохин С. В. Электронно-лучевая литейная установка многоцелевого назначения // Металл и литье Украины. – 2014. – № 10. – С. 3–7.
 16. Ладохин С. В. Электронно-лучевые установки для плавки и литья циркониевых сплавов // Металл и литье Украины. – 2017. – № 6–7. – С. 34–39.
 17. Электронно-променева ливарна установка. ПУ № 98904. С22В9/22, С21С5/56. Опубл. 25.08.2012. Бюл. № 12
 18. Глухенький А. И., Гореславец Ю. М., Бондар Ю. М. и др. Выбор конструкции гарнисажных тиглей повышенной емкости для электронно-лучевой плавки титана // Процессы литья. – 2017. – № 4. – С. 58–65.
 19. Газорозрядна електронна гармата», ПУ № 93183, H01J37/06. Опубл. 25.09.2014. Бюл. № 18.
 20. Газорозрядна електронна гармата. ПУ № 83313, H01J37/06. Опубл. 10.09.2013. Бюл. № 17.
 21. Газорозрядна електронна гармата. ПУ № 93625, H01J37/06. Опубл. 25.02.2011. Бюл. № 4.
 22. Газорозрядна електронна гармата. ПУ № 105264, H01J37/06. Опубл. .04.2014. Бюл. № 8.
 23. Газорозрядна електронна гармата. ПУ № 102765, H01J37/06. Опубл. 12.08.2013. Бюл. № 15.

Поступила 27.06.2018

References

1. Report on National Academy of Sciences of Ukraine activities in 2017. NAS of Ukraine-Kyiv: Academperiodyka, 2018, 552 p. [in Ukrainian].
2. Zaymoskiy, A.S., Nikulina, A.V., Reshetnikov, N.G. (1994) Zirconium alloys in nuclear power engineering. Moskov: Energoizdat, 256 p. [in Russian].
3. Chernov, A.P., Semenov, G.R., Lapshin, V.I. et al. (2000) Investigations and developments on evolution of zirconium alloys and parts production in Ukraine. Proc. 14th Intern. Conf. on physics of radiation effects and radiation materials technology (Alushta, Crimea, June 12-17, 2000). Charkov: NSC KIPT of NAS of Ukraine, pp. 98–100 [in Russian].
4. Nekludov, I.M. (2007) State and problems of atomic power industry in Ukraine. Problems of atomic energy science and technology. Series: Physics of radiation effects and radiation materials technology, № 2, pp.3–9 [in Russian].
5. Ladokhin, S.V., Vakhrusheva, V.S. (2008) Perspectives of electron beam melting use for zirconium alloys production in Ukraine. Sovremennaya elektrometallurgiya, no. 4, pp. 22–27 [in Russian].
6. Ajaja, V.M., Vjugov, P.N., Lavrinenko, C.D. et al. (1998) Zirconium and its alloys: technology of production, fields of use. Charkov: NSC KIPT of NAS of Ukraine, 89 p. [in Russian].
7. Korovin, Yu.F., Chuprinco, V.K., Lindt, K.A. et al. (1994) Zirconium and hafnium production on PU PChP for satisfaction of Ukrainian atomic power engineering demand. Problems of atomic

- energy science and technology. Series: Physics of radiation effects and radiation materials technology, no. 2, pp.114–124 [in Russian].
8. *Ladokhin, S.V.* (ed.) (2007) Electron beam melting in foundry. Kiev: «Stal», 626 p. [in Russian].
 9. *Shikov, A.K., Kabanov, A.A., Arjakova, V.M.* et al. (2007) Electron beam installations Use for zirconium alloys production. Proc. Intern. Conf. «Ti-2007 in UNS» (Alushta, Crimea, April 15-18, 2007) pp. 98–100 [in Russian].
 10. *Gladkov, A. S.* (2009) Peculiarities of electron beam scull melting of Zr₁Nb alloy and develop ment the technology of tube billets production. Abstract of Thesis for Cand. of Techn. Sci. De gree, Kyiv, 20 p. [in Ukrainian].
 11. *Vakhrusheva, V. S.* (2003) Forming of structure and properties of steel and alloys at tubes pro duction for nuclear power installations. Abstract of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree . Dnipro petrovsk, 36 p. [in Ukrainian].
 12. *Vakhrusheva, V. S.* (2014) Problems of zirconium rolled production creation in Ukraine. Problems of atomic energy science and technology. Series: Physics of radiation effects and radiation materials technology, no. 2, pp.62–68 [in Russian].
 13. *Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V.* (2008) Electron beam melting of high temperature and high reactionary metals. Kiev: Nauk. Dumka, 312 p. [in Russian].
 14. *Ladokhin S.V.* (2012) New equipment for electron beam melting and cashing of metals and alloys. Metal I lit'e Ukrainy, no. 7, pp. 3–11 [in Russian].
 15. *Ladokhin, S.V.* (2014) Electron beam casting installation for multi-purposes function. Metal I lityo Ukrainy, no. 10, pp. 3-17 [in Russian].
 16. *Ladokhin, S.V.* (2017) Electron beam installation for melting and casting of zirconium alloys. Metal I lit'e Ukrainy, no. 6–7, pp. 34–39 [in Russian].
 17. Electron beam casting installation. PU № 98904. C22B9/22, C21C5/56. Opubl. 25.08.2012. Byul. № 12 . [in Ukrainian].
 18. *Glukhenkiy, A.I., Goreslavac, Yu.M., Bondar, Yu. V.* et al (2017) Choice of scull crucible construction of increased volume for electron beam melting of titanium. Protsessy litya, no. 4, pp. 58–65.[in Russian].
 19. High voltage glow discharge gun. PU № 93183, H01J37/06. Opubl.25.09.2014. Byul. № 18. [in Ukrainian].
 20. High voltage glow discharge gun. PU № 83113, H01J37/06. Opubl. 10.09.2013. Byul. № 17. [in Ukrainian].
 21. High voltage glow discharge gun. PU № 93625, H01J37/06. Opubl. 25.02.2011. Byul. № 4. [in Ukrainian].
 22. High voltage glow discharge gun. PU № 105264, H01J37/06. Opubl. 25.04.014. Byul. № 8. [in Ukrainian].
 23. High voltage glow discharge gun. PU № 102765, H01J37/06. Opubl. 12.08.2013. Byul. № 15. [in Ukrainian].

Received 27.06.2018

С. В. Ладохін, д-р техн. наук, проф., гол. наук. співр., e-mail: e-luch@optima.kiev.ua

Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ

ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЦИРКОНІЮ В ПРОГРАМІ СТВОРЕННЯ ЯДЕРНО-ПАЛИВНОГО ЦИКЛУ В УКРАЇНІ

Проведено порівняльний аналіз перспектив використання у ядерно-паливному циклі України цирконію, який отримано методами кальційтермічного і магнійтермічного відновлення. Дано обґрунтування переваг використання в умовах України цирконію кальційтермічного відновлення. Показано необхідність проведення експериментальних досліджень по одержанню виробів із цирконію магнійтермічного відновлення в електронно-променевих ливарних установках.

Ключові слова: цирконій, кальційтермічне відновлення, магнійтермічне відновлення, електронно-променева плавка, вауумно-дуговий переплав, тигель, гарнісажна плавка, електронно-променевий нагрів.

S. V. Ladokhin, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Senior Researcher,
e-mail: e-luch@ptima.kiev.ua

Physico-technological institute of metals and alloys NAS of Ukraine, Kyiv

THE WAYS TO SOLVE THE PROBLEM OF ZIRCONIUM IN THE PROGRAM OF CREATING A NUCLEAR FUEL CYCLE IN UKRAINE

The comparative analysis of perspective of use in Ukraine nuclear fuel zirconium that produced by magnesium thermal reduction and calcium thermal reduction are fulfilled. The advantages of calcium thermal reduction method use in Ukraine are founded. The necessity of experimental investigation of cast parts production in electron beam installation from zirconium of magnesium thermo reduction is shown.

Keywords: zirconium, calcium thermal reduction, magnesium thermal reduction, electron beam melting, vacuum arc remelting, crucible, scull melting, electron beam heating.

Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь название статьи, ФИО авторов, аннотации, ключевые слова на русском, украинском и английском языках, а также список литературы на английском языке, согласно международным требованиям. Объем статьи – не более **10 стр.**, рисунков – не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть **черно-белыми**, четкими и контрастными.

Статьи в редакции проходят научное рецензирование.