

# ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СПЛАВОВ ЦИРКОНИЯ В УКРАИНЕ

С. В. Ладохин<sup>1</sup>, В. С. Вахрушева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физико-технологический институту металлов и сплавов НАН Украины.  
03142, г. Киев, бульв. Академика Вернадского, 34/1. E-mail: e\_luch@ptima.kiev.ua

<sup>2</sup>Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры.  
49005, г. Днепр, ул. Чернышевского, 24, а. E-mail: Vs062@ukr.net

Дано обоснование целесообразности использования в Украине технологий кальцийтермического восстановления циркония из тетрафторида циркония и последующего рафинирования этого металла способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью с дальнейшей выплавкой из него сплавов циркония электронно-лучевой гарнисажной плавкой с получением литых трубных заготовок для изготовления труб-оболочек тепловыделяющих элементов АЭС. Библиогр. 21, табл. 4.

**Ключевые слова:** цирконий; сплавы; электронно-лучевая плавка; вакуумно-дуговой переплав; литые заготовки; слиток; химический состав; механические свойства

Получение сплавов циркония в нашей стране необходимо, прежде всего, для создания отечественного ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), работа над которым проводится с середины 90-х годов прошлого столетия [1]. Неотъемлемой составной частью этой программы было получение циркония ядерной чистоты и организация производства из него сплавов с дальнейшим изготовлением из них защитных труб-оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), а также других деталей активной зоны атомных реакторов [2]. Эта работа выполнялась в течение 10 лет совместно в ННЦ «ХФТИ» НАН Украины (г. Харьков), ГНПП «Цирконий» (г. Каменское), ГП «НИТИ им. Я. Е. Осады» (г. Днепр) и ФТИМС НАН Украины (г. Киев) по заданиям Минтопэнерго Украины. Результаты проведенных в этих организациях в указанный период исследований и разработок представлены в отчетах о НИР [3–10] и отражены в публикациях в научно-технической литературе [11–20].

Принципиальной особенностью проведенных исследований явилось то, что в них были опробованы оригинальные отечественные технологические разработки по получению циркония способом кальцийтермического восстановления из тетрафторида циркония; рафинированию получаемого металлического циркония способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью; получению из рафинированного слитка циркония сплавов способом электронно-лучевой гарнисажной плавки с электромагнитным перемешиванием расплава; получению трубных заготовок способами литья в кокиль, центробежного

литья и литья с наложением электромагнитных полей на затвердевающий расплав в форме; изготовлению ТРЕХ-труб по схеме высокотемпературного прессования в  $\beta$ -области с использованием деформации больших степеней при прессовании и закалки с прокатного нагрева с дальнейшим изготовлением труб-оболочек способом холодной прокатки. Таким образом, при получении изделий из сплавов на основе циркония кальцийтермического восстановления для отечественного ЯТЦ в качестве металлургических переделов использовались способы электронно-лучевой плавки (ЭЛП) с промежуточной емкостью и электронно-лучевой гарнисажной плавки (ЭЛГП).

В статье [18] авторы работы показали целесообразность такого подхода с учетом реального состояния дел в стране с получением циркония способом кальцийтермического восстановления. В статье указывалось также на возможность использования ЭЛП для получения слитков циркониевых сплавов из циркония магнийтермического восстановления из тетрахлорида циркония, известного как способ Кролла. Этот способ в настоящее время наиболее широко применяется в мировой практике для получения циркония (как и титана) и предполагает проведение металлургических переделов с использованием исключительно вакуумно-дугового переплава (ВДП), причем, не менее, чем двукратного.

В Украине значительная часть специалистов придерживается той точки зрения, что способ Кролла с использованием ВДП является наиболее приемлемым вариантом решения проблемы циркония при создании отечественного ЯТЦ. Этот

подход оказался продуктивным в том смысле, что получил поддержку на государственном уровне. В последние годы в стране реализована программа использования 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 которой проблема циркония решается исключительно способом Кролла с использованием ВДП. В настоящее время смешанные активные зоны с топливом указанных поставщиков эксплуатируются уже на шести энергоблоках украинских АЭС [21]. Поскольку использование в одних и тех же блоках сборок разных производителей вызывает вполне естественную настороженность, а сами работы выполнены без проведения в стране сколько-нибудь серьезных исследований по выплавке сплавов циркония способом ВДП из циркония как магнийтермического, так и кальцийтермического восстановления, то авторы сочли необходимым вернуться к рассмотрению вопросов, которые были подняты в статье [18], и попытаться дать дополнительное обоснование перспективности использования предложенных в Украине технологий изготовления труб-оболочек ТВЭЛ из литых трубных заготовок, получаемых из сплава на основе циркония кальцийтермического восстановления с использованием ЭЛП и ЭЛПП.

Сложность такого обоснования состоит в том, что в последние годы в стране практически приостановлено проведение работ по созданию ЯТЦ, во всяком случае, в той его интересующей нас части, которая касается циркониевой проблемы. Поэтому для анализа можно было использовать только ранее полученные результаты, которые не были в полной мере подвергнуты сравнительному исследованию. К таким результатам относятся химический состав выплавляемых по предлагаемым технологиям сплавов; механические свойства литых трубных заготовок, получаемых различными способами литья; механические свойства ТРЕХ-труб, получаемых из различных литых заготовок, и механические свойства изготавливаемых из них труб-оболочек ТВЭЛ. Отметим, что все приводимые далее данные взяты из упомянутых выше работ [3–20], т.е. получены в течение выполнения именно первой Комплексной программы по созданию ЯТЦ [1]. То обстоятельство, что эти данные не были в полной мере использованы ранее для решения поставленной задачи, создания отечественного ЯТЦ, указывает на сложность ее ре-

шения, связанную не только с техническими, но и другими вопросами.

Сущность исследования состояла в том, что сравнение всех перечисленных выше свойств проводили на сплаве одного состава ( $Zr1Nb$ ), получаемого на основе циркония кальцийтермического восстановления, но разными способами — электронно-лучевой гарнисажной плавкой (ЭЛПП) и вакуумно-дуговым переплавом (ВДП). В обоих случаях использовалась тройная шихта, состоящая из циркония кальцийтермического восстановления (69 %), йодидного циркония (30 %) и ниобия (1 %). Необходимость использования йодидного циркония обусловлена повышенным содержанием кислорода в кальцийтермическом цирконии. При ЭЛПП оба циркониевых компонента шихты заваливаются и плавятся в тигле, а ниобий вводится в расплав в конце плавки. Из полученного расплава способом литья в кокиль, центробежным и литья с наложением электромагнитных воздействий на расплав в форме получали заготовки для последующего передела в ТРЕХ-трубы и трубы-оболочки ТВЭЛ. Масса заготовок, получаемых литьем в кокиль, составляла 40 кг, а центробежным и литьем с наложением электромагнитных воздействий — 30 кг. Диаметр заготовок при всех вариантах заливки — 150 мм. Литьем в кокиль заготовки получали на ГНПП «Цирконий», а центробежным и литьем с наложением электромагнитных воздействий на расплав — во ФТИМС НАН Украины. При ВДП расходную заготовку изготавливали с использованием всех трех компонентов шихты, а переплав проводили дважды, как это принято в практике ВДП, с формированием на втором переплаве слитка сплава  $Zr1Nb$  диаметром 200 мм. Из этого слитка также изготавливали ТРЕХ-трубы и трубы-оболочки ТВЭЛ. Слитки ВДП получали в ННЦ «ХФТИ» НАН Украины.

Сравнительные анализы проводили по химическому составу сплава  $Zr1Nb$ , получаемого при ЭЛПП и ВДП (после двойного переплава), по механическим свойствам литых заготовок и слитка ВДП, горячепрессованных ТРЕХ-труб из литых заготовок и из слитка ВДП, труб-оболочек ТВЭЛ.

В табл. 1 приведены результаты химического анализа сплава  $Zr1Nb$ , полученного в пяти плавках способом ЭЛПП и слитка ВДП после двойного переплава.

Из таблицы видно, что сплавы отвечают требованиям технических условий Украины, хотя и не вполне соответствуют техническим условиям России, что объясняется отмеченным выше повышенным содержанием кислорода в цирконии кальцийтермического восстановления.

Т а б л и ц а 1. Химический состав сплава Zr1Nb из тройной шихты, мас. %<sup>1,2</sup>

Плавка	Nb	Fe	Cu	Al	Si	N	C	O
ЭЛП:								
1	1,1	0,007	0,0003	<0,001	0,011	0,006	0,010	0,10
2	0,9	0,008	0,0004	0,002	0,009	0,005	0,011	0,06
3	0,9	<0,001	0,0003	<0,001	0,003	0,0021	0,012	0,09
4	0,9	0,003	0,0002	<0,001	0,004	0,0025	0,016	0,11
5	0,9	0,004	0,0004	<0,001	0,004	0,003	0,013	0,11
ВДП								
ТУ 001.257-85 <sup>3</sup>	0,9...1,1	≤0,05	≤0,005	≤0,008	≤0,02	≤0,006	≤0,02	0,06...0,14
ТУ 95.166-98 <sup>4</sup>	0,9...1,1	≤0,05	≤0,005	≤0,008	≤0,02	≤0,006	≤0,02	≤0,10

Примечание. 1. Основа сплава — Zr. 2. Во всех плавках в металле присутствуют следы Mg, W, Ta, Cr, Ni, Cu, Ti, V, Co. 3. ТУ 001.257-85 на украинский сплав КТЦ110. 4. ТУ 95.166-98 на российский сплав Э110.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования отечественного циркония для решения задачи создания ЯТЦ за счет введения в шихту йодидного циркония, но указывают на необходимость дальнейшего совершенствования технологии получения циркония способом кальцийтермического восстановления, т.е. на необходимость продолжения работ в этом направлении.

Механические свойства литых заготовок и слитка ВДП сплава Zr1Nb приведены в табл. 2. Следует отметить, что поскольку в практике создания топлива для АЭС литые заготовки из циркониевых сплавов никогда не применялись, то данные для сравнительного анализа отсутствуют.

Из анализа данных табл. 2 можно заключить, что свойства металла литых заготовок не уступают свойствам деформированного металла ВДП и в этом смысле все предлагаемые технологии литья заготовок могут рассматриваться как перспективные для решения задачи создания отечественного ЯТЦ. Отметим, что факт возможности получения механических свойств литого сплава циркония, не уступающих свойствам деформированного металла, зафиксирован впервые в практике выплавки сплавов циркония.

При рассмотрении механических свойств сплава для TREX-труб и труб-оболочек ТВЭЛ

следует учитывать, что в условиях ГП «НИТИ им. Я. Е. Осады» TREX-трубы были изготовлены с внешним диаметром 48 мм, толщиной стенки 8,5 мм, длиной 800 мм, а трубы-оболочки ТВЭЛ — 9,13 мм, 0,7 мм, 4,5 мм соответственно.

Механические свойства металла горячепрессованных TREX-труб изучали на образцах, изготовленных из заготовок, полученных всеми указанными выше способами, т.е. литьем в кокиль, центробежным литьем и литьем с наложением ЭМП на расплав в форме. Результаты исследований свойств (в поперечном разрезе) приведены в табл. 3.

Особого рассмотрения требует установленная возможность проведения прессования заготовок, полученных с наложением электромагнитных полей на расплав в форме, при температуре на 50° ниже, чем заготовки из металла ВДП. Причина этого пока непонятна, но важность этого явления для практики состоит в том, что проведение прессования при более низкой температуре обеспечивает улучшение качества поверхности трубных заготовок при одновременном увеличении выхода годного.

Важно также отметить, что хотя металл литых заготовок не уступает металлу ВДП, пластические характеристики сплава в изделиях из центробежной заготовки уступают как сплаву ВДП, так и требованиям ТУ. Причина этого также пока непонятна, но может быть связана с некоторой не-

Т а б л и ц а 2. Механические свойства заготовок из сплава Zr1Nb в поперечном разрезе

Способ получения заготовок	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Литье в кокиль	<u>467,35</u>	<u>418,5</u>	<u>14,65</u>	<u>34,2</u>
	180,97	163,99	19,47	65,30
Центробежное литье	<u>528,80</u>	<u>502,25</u>	<u>15,15</u>	<u>65,00</u>
	168,89	145,37	24,67	56,00
Литье с ЭМП в форме	<u>463,30</u>	<u>390,00</u>	<u>12,75</u>	<u>47,75</u>
	171,70	135,00	23,30	73,20
ВДП	<u>445,00</u>	<u>390,00</u>	<u>14,50</u>	<u>49,75</u>
	162,50	127,50	16,00	74,75

Примечание. Над чертой приведены показатели при температуре испытаний 293 К, под чертой — 653 К.

Таблица 3. Механические свойства горячепрессованных TREX-труб

Способ получения заготовок	Температура прессования, К	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Литье в кокиль	1370...1380	490,00	420,00	21,00	65,50
Центробежное литье	1370...1380	599,00	562,00	18,30	66,50
Литье с ЭМП в форме	1320...1330	568,00	505,00	23,00	—
ВДП	1370...1380	577,50	495,00	21,50	—

Таблица 4. Механические свойства труб-оболочек ТВЭЛ из сплава Zr1Nb

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

Примечание. Над чертой приведены показатели при температуре испытаний 293 К, под чертой — 653 К. \*Бывший цех по производству труб для атомной энергетики Никопольского ЮТЗ в настоящее время переформирован в завод ПО ОСКАР.

однородностью структуры металла центробежнолитой заготовки. Установление причины этой неоднородности и ее влияния на свойства важно потому, что получение центробежнолитых заготовок перспективно в связи с сокращением операций их механической обработки, поскольку центробежнолитые заготовки могут формироваться с отверстиями, т. е. в технологической цепочке исключается сверление отверстий.

Механические свойства сплава Zr1Nb для труб-оболочек ТВЭЛ изучали на образцах труб, изготовленных из заготовок, полученных литьем в кокиль, в продольном и поперечном разрезах. Трубы-оболочки были получены в условиях опытного завода ГП «НИТИ» и промышленного производства на Никопольском ЮТЗ. Результаты исследований приведены в табл. 4.

Исследования механических свойств труб при испытаниях на растяжение в продольном и поперечном направлениях показали, что при температурах 293 и 653 К металл труб обладает хорошей пластичностью при высоком уровне прочностных характеристик, значительно превышающих как требования ТУ России, так и стандартов ASTM.

В целом результаты выполненного анализа дают основание заключить, что проблема получения изделий из сплавов на основе циркония кальцийтермического восстановления в рамках создания отечественного ЯТЦ может быть успешно решена. Причем это относится как к производству

труб-оболочек ТВЭЛ, так и к комплектующим изделиям тепловыделяющих сборок (ТВС). Что же касается комплексной оценки качества получаемых твэльных труб, то необходимо проведение дальнейших исследований по их коррозионной стойкости, малоциклической усталости, ползучести и радиационной стойкости, причем эти исследования должны быть проведены в условиях эксплуатации труб-оболочек ТВЭЛ в действующих реакторах.

#### Список литературы

- Чернов А. П., Семенов Г. Р., Лапшин В. И. и др. (2000) Исследования и разработки по развитию производства циркониевых сплавов и изделий в Украине. *Тр. 14-й Международной конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, 12–17 июня 2000 г., Алушта, Крым. Харьков, НИЦ ХФТИ*, сс. 98–100.
- Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. (1994) *Циркониевые сплавы в ядерной энергетике*. Москва, Энергоиздат.
- (1997) *Отчет о НИР «Разработка технологии и изготовление опытно-промышленной партии труб из сплава КТЦ-110 для ТВЭЛ»*. Днепропетровск, ГП НИТИ, ГР № 01979002254.
- (2002) *Звіт про НДР «Розробка технології одержання зливків цирконію з застосуванням електромагнітного перемішування розплаву у кристалізаторі»*. Київ, ФТІМС НАН України, ДР № 01024005464.
- (2002) *Звіт про НДР «Розробка технології та устаткування для отримання складнолегованих сплавів на основі цирконію у гарнісажних печах з електромагнітним перемішуванням розплаву»*. Київ, ФТІМС НАН України, ДР № 01024005465.

6. (2004) *Звіт про НДР «Виробництво промислової партії зливків сплаву Zr1Nb з вітчизняної сировини для виготовлення твельних труб, стрічок та інших виробів для реакторів ВВЕР-1000»*. Харків, ННЦ ХФТИ НАН України, ДР № 0104U004885.
7. (2004) *Звіт про НДР «Виробництво партії зливків сплаву Zr1Nb на основі сплаву КТЦ110 та йодидного цирконію способом електронно-променевої плавки з електромагнітним перемішуванням»*. Київ, ФТІМС НАН України, ДР № 0104U004885.
8. (2005) *Звіт про НДР «Дослідження властивостей матеріалів і комплектуючих ТВЗ зі сплаву Zr1Nb українського виробництва на основі кальційтермічного цирконію»*. Харків, ННЦ ХФТИ НАН України, ДР № 01004U0006582.
9. (2007) *Звіт про НДР «Розробка технологічних процесів одержання в електронно-променевих установках литих виробів та зливків з використанням зовнішніх впливів на розплав, що кристалізується»*. Київ, ФТІМС НАН України, ДР № 0104 U007753.
10. (2008) *Звіт про НДР «Видача вихідних даних для одержання TREN-труби із сплаву Zr1Nb, виплавляемого в умовах ДНВП «Цирконій»*. Дніпропетровськ, ДП НДТІ, робота виконувалась за договором № 39-2008.
11. Коровин Ю. Ф., Чупринко В. К., Ліндт К. А. и др. (1994) Производство циркония и гафния на ПО ПХЗ для удовлетворения потребностей атомной энергетики Украины. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационного материаловедения*, **2**, 114–124.
12. Ажажа В. М., Вахрушева В. С., Дергач Т. А. и др. (1999) *Технология изготовления изделий из циркониевых сплавов для атомной энергетики и некоторые свойства сплавов циркония*. Харьков, ННЦ ХФТИ.
13. Ажажа В. М., Болков А. Ф., Борц Б. В. (2005) Вакуумно-дуговой способ получения трубной заготовки из сплава Zr1%Nb. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационного материаловедения*, **5**, 110–114.
14. Вахрушева В. С. (2003) *Формування структури та властивостей сталі і сплавів при виготовленні труб для ядерних енергетичних установок*: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Дніпропетровськ.
15. Буряк Т. М. (2005) *Структурування і формування властивостей трубної заготовки і труб для атомної енергетики з використанням нових способів виробництва*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Дніпропетровськ.
16. Ажажа В. М., Борц Б. В., Бутенко І. М. та ін. (2006) Виробництво партії трубних заготовок трекс-труб та виготовлення дослідно-промислової партії твельних труб зі сплаву Zr1Nb із вітчизняної сировини. *Наука та інновації*, **6**, 18–30.
17. (2007) *Електронно-лучевая плавка в литейном производстве*. Ладохин С. В. (ред.). Киев, Изд-во «Сталь».
18. Ладохин С. В., Вахрушева В. С. (2008) Перспективы применения электронно-лучевой плавки для получения сплавов циркония в Украине. *Современная электрометаллургия*, **4**, 22–26.
19. Гладков А. С. (2009) *Особенности электронно-промислової гарнісажної плавки сплаву Zr1Nb і розробка технології виготовлення трубних заготовок*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ.
20. Вахрушева В. С. (2014) Проблемы создания производства циркониевого проката в Украине. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационного материаловедения*, **2**, 62–68.
21. (2018) *Звіт про діяльність Національної академії наук України у 20017 р.* НАН України. Київ, Академперіодика.

References

1. Chernov, A.P., Semenov, G.R., Lapshin, V.I. et al. (2000) Investigations and developments on manufacture of zirconium alloys and products in Ukraine. In: *Proc. of 14th Int. Conf. on Physics Radiation Effects and Radiation Materials Science* (Alushta, Crimea, June 12–17, 2000). Kharkov, NSC KIPT, 98–100 [in Russian].
2. Zajmovsky, A.S., Nikulina, A.V., Reshetnikov, N.G. (1994) *Zirconium alloys in nuclear power engineering*. Moscow, Energoizdat [in Russian].
3. (1997) *Report on research: Development of technology and manufacture of pilot batch of tubes from KTTs110 alloy for fuel elements*. Dnepropetrovsk, SE NITI [in Russian].
4. (2002) *Report on research: Development of technology for zirconium ingots production with the use of electromagnetic stirring of melt in mould*. Kyiv, PTIMA [in Ukrainian].
5. (2002) *Report on research: Development of technology and equipment for complexly alloyed zirconium alloy production in skull furnaces with electromagnetic stirring of melt*. Kyiv, PTIMA [in Ukrainian].
6. (2004) *Report on research: Production of industrial lot of Zr1Nb alloy ingots with the use of domestic raw materials for manufacture of fuel element tubes, strips and other items for WWER-1000 reactor*. Kharkiv, NSC KIPT [in Ukrainian].
7. (2004) *Report on research: Production of lot of Zr1Nb alloy ingots based on KTTs110 alloy and iodine zirconium by electron beam melting with electromagnetic stirring*. Kyiv, PTIMA [in Ukrainian].
8. (2005) *Report on research: Investigation of materials properties and component parts for fuel elements from Zr1Nb alloy of Ukrainian production on the basis of calcium zirconium*. Kharkiv, NSC KIPT [in Ukrainian].
9. (2007) *Report on research: Development of technological processes for production in electron beam installations of cast items and ingots under the external effects on the melt being solidified*. Kyiv, PTIMA [in Ukrainian].
10. (2008) *Report on research: Initial data issued for TREN-tubes production from Zr1Nb alloy melted at SSPE Zirconium*. SE DTI [in Ukrainian].
11. Korovin, Yu.F., Chuprinco, V.K., Lindt, K.A. et al. (1994) Zirconium and hafnium production at PKhZ for satisfaction of Ukrainian nuclear power engineering demand. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science*, **2**, 114–124 [in Russian].
12. Azhazha, V.M., Vakhrusheva, V.S., Dergach, T.A. et al. (1999) *Technology of items production from zirconium alloys for nuclear power engineering and some zirconium alloy properties*. Kharkov, NSC KIPT [in Russian].
13. Azhazha, V. M., Bolkov, A.F., Borts, B.V. et al. (2005) Vacuum arc method of tubular billet production from Zr1Nb alloy. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science*, **5**, 110–114 [in Russian].
14. Vakhrusheva V.S. (2003) *Formation of structure and properties of steel and alloys in tubes production for nuclear power units*: Syn. of Thesis for Dr. of Techn. Sci. Degree. Dnipropetrovsk [in Ukrainian].
15. Buryak, T.M. (2005) *Structure and properties forming of tubular billet and tubes for nuclear power engineering using new methods of production*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Dnipropetrovsk [in Ukrainian].

16. Azhazha, V.M., Borts, B.V., Butenko, I.M. et al. (2006) Production of TREX-tubular billets lot for manufacture of pilot batch of fuel tubes from Zr1Nb alloy of domestic raw materials. *Nauka ta Innovatsii*, **6**, 18–30 [in Ukrainian].
17. (2007) *Electron beam melting in foundry*. Ed. by S.V. Ladokhin. Kiev, Stal [in Russian].
18. Ladokhin, S.V., Vakhrusheva, V.S. (2008) Perspectives of electron beam melting using in zirconium alloy production in Ukraine. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 22–26 [in Russian].
19. Gladkov, A.S. (2009) *Peculiarities of electron beam skull melting of Zr1Nb alloy and development of the technology of tubular billet production*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kyiv [in Ukrainian].
20. Vakhrusheva, V.S. (2014) Problems of creation of zirconium rolled production in Ukraine. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. Series: Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science*, **2**, 62–68 [in Russian].
21. (2018) *Report on activities of National Academy of Sciences of Ukraine in 2017*. Kyiv, Academperiodika [in Ukrainian].

**ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ  
ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ СПЛАВІВ ЦИРКОНІУ В УКРАЇНІ**

**С. В. Ладокін<sup>1</sup>, В. С. Вахрушева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України.  
03142, м. Київ, бульв. Академіка Вернадського, 34/1. E-mail: e\_luch@ptima.kiev.ua

<sup>2</sup>Придніпрівська державна академія будівництва і архітектури.  
49005, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24, а. E-mail: Vs062@ukr.net

Наведено обґрунтування доцільності використання в Україні технологій кальційтермічного відновлення цирконію із тетрафториду цирконію і послідуного рафінування цього металу способом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю з подальшою виплавою з нього сплавів цирконію електронно-променевою гарнісажною плавою з одержанням вилитих трубних заготовок для виготовлення труб-оболонки тепловиділяючих елементів АЕС. Бібліогр. 21, табл. 4.

**Ключові слова:** цирконій; сплави; електронно-променева плавка; вакуумно-дуговий переплав; литі заготовки; виліток; хімічний склад; механічні властивості

**APPLICATION OF ELECTRON BEAM MELTING FOR PRODUCING ZIRCONIUM ALLOYS IN UKRAINE**

**S. V. LADOKHIN<sup>1</sup>, V. S. VAKHRUSHEVA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Physical-and-Technological Institute of Metals and Alloys.  
34/1 Academician Vernadsky Blvd, 03142, Kyiv. E-mail: e\_luch@ptima.kiev.ua

<sup>2</sup>Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture.  
24 a Chernyshevsky Str., 49005, Dnipro. E-mail: Vs062@ukr.net

The expediency of application of technologies of calcium thermal recovery of zirconium from zirconium tetrafluoride and next refining of this metal by the method of electron beam cold hearth melting with a further melting of zirconium alloys from it by the electron beam skull melting with producing cast tubular billets for manufacture of tubes-shells of heat-generating elements of NPP in Ukraine was grounded. Ref. 21, Tabl. 4.

**Key words:** zirconium; alloys; electron beam melting; vacuum-arc remelting; cast billets; ingot; chemical composition; mechanical properties

Поступила 03.07.2018