

В.С. Вахрушева¹, д-р техн. наук, проф. кафедры, e-mail: Vs062@ukr.net

В.Н. Воеводин², д-р физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН Украины, директор Института физики твердого тела, материаловедения и технологий, e-mail: voyev@kipt.kharkov.ua

С.В. Ладохин³, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., e-mail: e_luch@ptima.kiev.ua

А.П. Мухачев⁴, канд. физ.-мат. наук, директор центра, e-mail: map45@ukr.net

Н.Н. Пилипенко², д-р техн. наук, ст. науч. сотр., нач. лаб., e-mail: mpylypenko@kipt.kharkov.ua

¹Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепр, Украина

²Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, Украина

³Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев, Украина

⁴Центр химических технологий Академии инженерных наук Украины, Каменское, Украина

Получение труб-оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов из литых заготовок сплава Zr1Nb электронно-лучевой выплавки

Приведены результаты работы, которая выполнялась совместно ННЦ ХФТИ НАН Украины, ГНПП «Цирконий», ГП «НИТИ им. Я.Е. Осады» и ФТИМС НАН Украины по решению проблемы циркония в рамках программы по созданию ядерно-топливного цикла в Украине. Обосновывается целесообразность использования в нашей стране технологий кальцийтермического восстановления циркония из тетрафторида циркония и последующего рафинирования этого металла методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Отмечаются преимущества выплавки из него сплавов циркония методом электронно-лучевой гарнисажной плавки с получением литых трубных заготовок. Описываются разработанные технологии получения из этих заготовок трекс-труб и труб-оболочек тепловыделяющих элементов атомных электростанций (АЭС).

Ключевые слова: цирконий, сплавы, электронно-лучевая плавка, вакуумно-дуговой переплав, литые заготовки, трекс-трубы, твельные трубки, химический состав, механические свойства.

В настоящее время более половины электроэнергии страны вырабатывается атомными станциями, на которых эксплуатируется 15 энергоблоков, в том числе 13 блоков типа ВВЭР-1000. Ядерное топливо для этих блоков традиционно поставлялось из России, но в последние годы в стране реализуется программа диверсификации поставок топлива, предусматривающая 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 прошлом году смешанные активные зоны с топливом указанных поставщиков эксплуатировались уже на шести энергоблоках украинских АЭС [1, стр. 171], а в текущем году на работу только с топливом компании Westinghouse переведен один из блоков Южно-украинской АЭС [2]. Однако в любом случае абсолютная зависимость работоспособности отечественных энергоблоков от внешних поставок топлива угрожает энергетической безопасности государства. Поэтому проблема создания отечественного ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), решение о разработке и практической реализации которого первоначально было принято еще в 1995 году [3], относится к числу важнейших задач, определяющих энергетическую независимость страны.

Неотъемлемой составной частью ЯТЦ является получение циркония ядерной чистоты и организация производства из него сплавов с последующим изготовлением из них защитных труб-оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), канальных и направляющих труб, кассет, дистанционирующих решеток и других деталей активной зоны атомных реакторов [4]. Настоящий доклад преследует цель обратить внимание специалистов, связанных с производством и использованием циркония, на вопросы, которые, по мнению авторов, определяют дальнейшее развитие этой отрасли в нашей стране, с точки зрения ускорения создания отечественного ЯТЦ. К таким вопросам относятся: получение исходного циркония и выплавка из него требуемых сплавов, получение из этих сплавов трубных заготовок с дальнейшим изготовлением из них трекс-труб (горячекатаных заготовок под холодную прокатку) и труб-оболочек ТВЭЛ (холоднокатаных трубок для тепловыделяющих элементов ядерных реакторов), а также проведение испытаний полученных труб-оболочек в реальных условиях эксплуатации в атомных реакторах. Выполнение указанных работ является необходимым условием налаживания промышленного производства труб-оболочек ТВЭЛ, включающее, наряду с перечисленными выше технологическими разработками, также создание и приобретение необходимого оборудования.

Технологические разработки

В число рассмотренных ниже технологических разработок включены работы, которые выполнялись в течение приблизительно 10 лет в основном совместно 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. Особенностью работ является то, что с целью максимально возможного ускорения их проведения они выполнялись на уже имеющемся в указанных организациях оборудовании.

Получение циркония. 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 используется метод магнийтермического восстановления из тетрахлорида циркония (метод Кролла), который применяется практически всеми производителями циркония в дальнем зарубежье [5]. В России для этой цели применяется метод электролитического восстановления из солей K_2ZrF_6 , KCl и KF [4, 5], а в Украине на ГНПП «Цирконий» освоен метод кальцийтермического восстановления из тетрафторида циркония [5, 6]. 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. Из металла в виде губки и порошка изготавливают расходные заготовки для вакуумно-дугового переплава (ВДП), который является единственным практически используемым в настоящее время в мировой практике методом рафинирования и получения слитка циркония, причем переплав проводится не менее двух раз. Затем из этих слитков путемковки и последующей механической обработки получают трубные заготовки, из которых изготавливают трекс-трубы и трубы-оболочки ТВЭЛ.

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. Это обстоятельство обусловило то, что в нашей стране имеется уникальный опыт электронно-лучевой плавки циркония, которого не имеют другие страны, что во многом определяло подходы к решению проблемы циркония [7, 8]. В принципе, получаемый слиток электронно-лучевой выплавки также может быть подвергнут указанным выше операциям по переделу в требуемые изделия, но более целесообразным представлялось использовать для получения трубных заготовок литейные технологии. К возможности реализации такого подхода подталкивал накопленный в стране опыт применения электронно-лучевой плавки для литья различных металлов и сплавов, в том числе тугоплавких [9].

Характеризуя технологию кальцийтермического восстановления в целом можно отметить, что полу-

чаемый металл представляется весьма перспективным для использования в ядерной энергетике, в том числе благодаря снижению содержания гафния по сравнению с другими технологиями получения циркония. При этом целесообразной представляется постановка вопроса об организации в Украине производства кальция с низким содержанием кислорода, необходимого для восстановления циркония из его тетрафторида, а также налаживания параллельно с производством циркония производства гафния, что позволит снизить стоимость обоих металлов, важных для промышленности страны.

Выплавка сплавов циркония в электронно-лучевых литейных установках. В процессе проведения исследований по получению сплавов на основе циркония кальцийтермического восстановления выплавлялись такие сплавы $Zr1Nb$, $Zr2.5Nb$ и $Zr1Nb1.2Sn0.4Fe$, из которых только сплав $Zr1Nb$ был использован для получения литых трубных заготовок и изделий из них, что и рассматривается ниже. Выплавка сплавов проводилась в литейных установках, смонтированных на базе электронно-лучевых плавильных печей ЕМО-250 (ГНПП «Цирконий») и ХЭЛП-1 (ФТИМС НАН Украины) [9]. Особенностью обеих установок является то, что в них плавку можно проводить только в гарнисажных тиглях с электромагнитным перемешиванием и донным сливом расплава, причем максимальный слив на установке ЕМО-250 составлял 40 кг, а на установке ХЭЛП-1 – 30 кг. Для сравнения: наряду с выплавкой сплава $Zr1Nb$ методом электронно-лучевой гарнисажной плавки (ЭЛГП) проводили формирование слитка 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 ЭЛГП оба циркониевых компонента шихты заваливаются и плавятся в тигле, а ниобий вводится в расплав в конце плавки. При ВДП расходная заготовка изготавливалась с использованием всех трех компонентов шихты, а переплав проводился дважды, как это принято в практике ВДП, с формированием на втором переплаве слитка сплава $Zr1Nb$ диаметром 200 мм. Слитки ВДП получали в ННЦ ХФТИ НАН Украины.

В табл. 1 приведены результаты химического анализа сплава $Zr1Nb$, полученного в пяти плавках методом ЭЛГП и в слитке ВДП после двойного переплава [10]. 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.

Получение трубных заготовок. Возможные варианты получения в электронно-лучевых литейных установках трубных заготовок проанализированы в работе [11], причем анализ выполнен для условий выплавки сплава с использованием как кальцийтермического, так и магнийтермического циркония. Основным преимуществом литейных технологий

Химический состав сплава Zr1Nb из тройной шихты

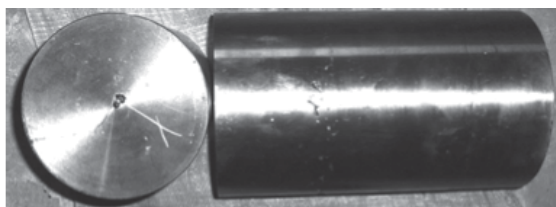
Номер плавки	Содержание элементов, %мас. ^{1,2}							
	Nb	Fe	Cu	Al	Si	N	C	O
1	1,1	0,007	0,0003	<0,001	0,011	0,006	0,010	0,10
2	0,9	0,008	0,0004	0,002	0,009	0,005	0,011	0,06
3	0,9	<0,001	0,0003	<0,001	0,003	0,0021	0,012	0,09
4	0,9	0,003	0,0002	<0,001	0,004	0,0025	0,016	0,11
5	0,9	0,004	0,0004	<0,001	0,004	0,003	0,013	0,11
ВДП	0,95	0,012	0,0004	<0,001	0,0044	0,005	0,005	0,095
³ ТУ 001.257-85	0,9–1,1	≤0,05	≤0,005	≤0,008	≤0,02	≤0,006	≤0,02	0,06–0,14
⁴ ТУ 95.166-98	0,9–1,1	≤0,05	≤0,005	≤0,008	≤0,02	≤0,006	≤0,02	≤0,10

Примечания: 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.

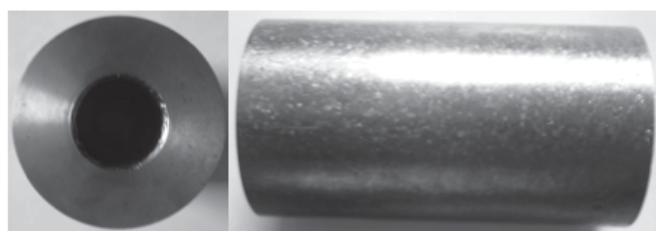
Таблица 2

Механические свойства сплава Zr1Nb в поперечном разрезе

Способ получения заготовок	Температура испытаний 293 К			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Литье в кокиль	467,35	418,5	14,65	34,2
Центробежное литье	528,80	502,25	15,15	65
Литье с ЭМП в форме	463,30	390,00	12,75	47,75
ВДП	445,00	390,00	14,50	49,75
	Температура испытаний 653 К			
Литье в кокиль	180,97	163,99	19,47	65,30
Центробежное литье	168,89	145,37	24,67	56,00
Литье с ЭМП в форме	171,70	135,00	23,30	73,20
ВДП	162,50	127,50	16,00	74,75



а



б

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

является исключением из технологической цепочки операцииковки слитка, что представляется перспективным для решения проблемы получения трубных заготовок из циркониевых сплавов в нашей стране.

Всего были разработаны и опробованы три технологии литья трубных заготовок – в кокиль, в центробежную форму и в форму с наложением электромагнитных воздействий на расплав в процесс затверде-

вания, которые подробно рассмотрены в работе [12]. На практике получение заготовок литьем в кокиль проводилось на ГНПП «Цирконий», а литьем в центробежные формы и с наложением электромагнитных воздействий – во ФТИМС НАН Украины. Общий вид полученных заготовок показан на рис. 1. Механические свойства сплава Zr1Nb в литых заготовках и в слитке ВДП приведены в табл. 2 [10].

Из анализа данных табл. 2 можно заключить, что свойства металла в литых заготовках не уступают свойству металла ВДП, и в этом смысле все предлагаемые технологии литья заготовок могут рассматриваться как перспективные для решения задачи создания отечественного ЯТЦ. К сожалению, поскольку в практике создания топлива для АЭС литые заготовки из циркониевых сплавов никогда не применялись, то данные для сравнительного анализа отсутствуют.

Получение трекс-труб и труб-оболочек ТВЭЛ. Из полученных трубных заготовок на опытном заводе ГП «НИТИ» по разработанным технологиям [13, 14] были изготовлены трекс-трубы с внешним диаметром 48 мм и толщиной стенки 8,5 мм (длина 800 мм), а из них – трубы-оболочки ТВЭЛ с внешним диаметром 9,13 мм и толщиной стенки 0,7 мм (длина 4,5 м). Фрагменты обоих изделий приведены на рис. 2.

Изготовление труб проводили по новой технологической схеме с высокотемпературным (в β -области)



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

прессованием заготовок и закалкой с прокатного нагрева. Предложенный технологический процесс включает следующие этапы: получение литой трубной заготовки; горячее прессование на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 1600-2500МН; многоциклическая холодная деформация на станах валкового типа: ХПТ-90, ХПТ-55, ХПТ32 либо стане КРВ; операции химической обработки: нанесение подмазочных покрытий, технологических смазок, обезжиривание; термическая обработка промежуточных и готовых труб в вакууме; травление, отмывка от ионов фтора; правка; ремонт; контроль качества.

Механические свойства металла в горячепрессованных трекс-трубах изучали на образцах, изготовленных из заготовок, полученных всеми указанными выше способами, то есть литьем в кокиль, центробежным литьем и литьем с наложением ЭМП на расплав в форме. Результаты исследований свойств (в поперечном разрезе) приведены в табл. 3 [10].

Из данных табл. 3 видно, что прессование заготовок, полученных с наложением электромагнитных полей на расплав в форме, можно проводить при температуре на 50 градусов ниже, чем заготовок из

металла ВДП. Важность этого обстоятельства для практики состоит в том, что проведение прессования при более низкой температуре обеспечивает улучшение качества поверхности трубных заготовок при одновременном увеличении выхода годного.

Следует также отметить, что хотя металл в литых заготовках не уступает металлу ВДП, пластические характеристики сплава в изделиях из центробежнолитой заготовки уступают как сплаву ВДП, так и требованиям ТУ. Причина этого пока непонятна, но может быть связана с некоторой неоднородностью 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 механической обработки заготовок, поскольку центробежнолитые заготовки могут формироваться с отверстиями, то есть в технологической цепочке исключается сверление отверстий.

Что касается труб-оболочек ТВЭЛ, то механические свойства сплава Zr1Nb в них изучали только на образцах труб, изготовленных из заготовок, полученных литьем в кокиль, причем трубы-оболочки были получены не только в условиях опытного завода ГП «НИТИ», но также в условиях промышленного производства на Никопольском ЮТЗ [14]. Результаты исследований приведены в табл. 4 [10]. Данные табл. 4 свидетельствуют, что трубы при температурах 293 и 653 К обладают хорошей пластичностью при высоком уровне прочностных характеристик.

В целом результаты выполненных исследований дают основание заключить, что проблема получения изделий из сплавов на основе циркония кальцийтер-

Таблица 3

Механические свойства горячепрессованных трекс-труб

Способ получения заготовок	Температура прессования, К	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
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 Zr1N

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

Примечание: *Бывший цех по производству труб для атомной энергетики Никопольского ЮТЗ в настоящее время реформирован в завод ПО ОСКАР.

мического восстановления в рамках создания отечественного ЯТЦ может быть успешно решена. В принципе, об этом свидетельствуют также результаты работы [15], посвященной инновационным перспективам производства твельных труб из сплава Zr1Nb на основе кальцийтермического циркония. Полученные трубы из отечественного сырья и по разработанной технологии прошли приемо-сдаточные испытания на соответствие нормам технических условий Украины, России, стандартов ASTM, а также дополнительные расширенные испытания, отражающие эксплуатационную надежность (малоцикловую усталость, сопротивление ползучести, коррозионную стойкость и др.). В настоящее время стоит задача комплексной оценки качества твельных труб, получаемых по предложенной технологии, при их эксплуатации на действующих реакторах, что требует организации соответствующего промышленного производства.

Предложения по созданию оборудования

Приведенные выше результаты технологических исследований получены на имеющемся к моменту их проведения оборудовании, которое не всегда было приспособлено к проводимым работам, поскольку зачастую предназначалось для других целей. Ниже приводятся предложения по разработке плавильно-заливочного оборудования, которое предназначено специально для реализации предложенных технологических решений.

Эти предложения включают вопросы, касающиеся разработки электронно-лучевых литейных установок, плавильно-заливочных тиглей и электронных пушек, причем они учитывают вероятность выплавки сплавов циркония также с использованием губки, то есть циркония магнийтермического восстановления, на целесообразность чего уже указывалось выше. Из опыта получения других сплавов с использованием губчатых материалов, в первую очередь титана [16], особенность их выплавки определяется повышенной газотворностью 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.

Возможное конструктивное исполнение электронно-лучевых установок применительно к их использованию для целей плавки и литья циркониевых сплавов достаточно подробно рассмотрено в работах [17–21]. 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 указанных работах конструкции эти задачи решают за счет исполнения многокамерных установок, возможности поддержания в камерах разного вакуума, применения про-

мисленных емкостей и использования пушек высоковольтного тлеющего разряда (ВТР).

На рис. 3 и 4 приведены принципиальные схемы установок, предназначенных, соответственно, для получения слитков сплавов циркония и центробежнолитых трубных заготовок, а в табл. 5 и 6 представлены их технические характеристики и результаты экспертной оценки сроков разработки и ожидаемой стоимости выполнения работы [17, 18]. В принципе, возможно также исполнение установок в вариантах, обеспечивающих возможность получения в одном агрегате как литых заготовок, так и слитка [20], или получения заготовок литьем в формы, которые размещены в разных камерах, что позволяет проводить слив рас-

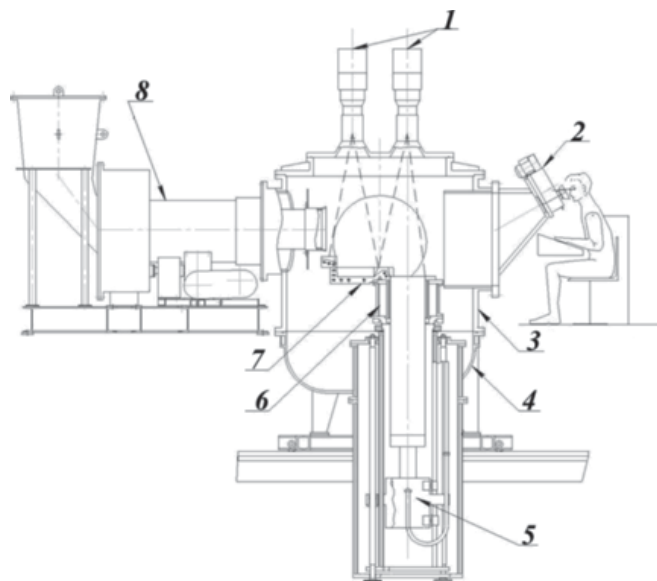


Рис. 3. Схема электронно-лучевой установки для получения слитка: 1 – пушки ВТР; 2 – смотровая система; 3 – плавильная камера; 4 – камера слитка; 5 – механизм вытягивания слитка; 6 – кристаллизатор; 7 – промежуточная емкость; 8 – устройство подачи шихты на переплав

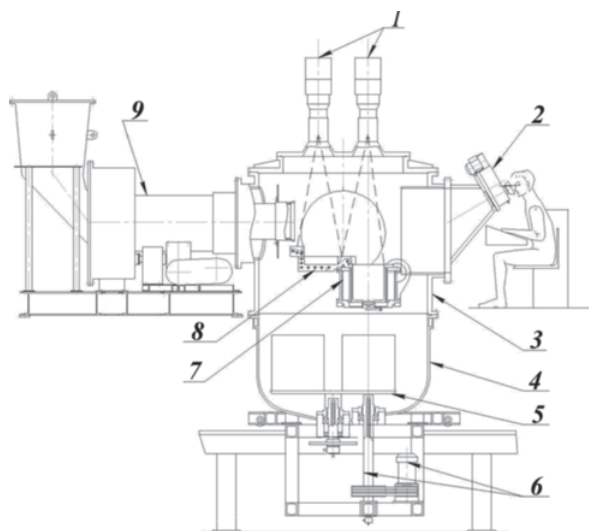


Рис. 4. Схема электронно-лучевой установки для центробежного литья: 1 – пушки ВТР; 2 – смотровая система; 3 – плавильная камера; 4 – камера литейных форм; 5 – форма для центробежного литья; 6 – механизм вращения форм; 7 – гарнисажный тигель с СЭМП и донным сливом расплава; 8 – промежуточная емкость; 9 – устройство подачи шихты на переплав

Технические характеристики электронно-лучевых установок [17]

Параметры	Значения	
	Печь получения слитка (расходуемой заготовки)	Печь центробежного литья
Объем камеры плавки, м ³	6,0	6,0
Максимальная мощность нагрева, кВт	600 или 900	600
Количество пушек, шт	2 или 3	2
Тип пушки	Высоковольтного тлеющего разряда	
Исходные материалы	Губка, обороты, скрап, стружка	
Максимальная масса слитка, кг	400	–
Максимальная масса центробежной заготовки, кг	–	60
Производительность, т/г	140	120
Габариты агрегата, м: длина x ширина x высота	6,5 x 6,0 x 7,5	6,5 x 6,0 x 6,0

Таблица 6

Этапы разработки установки и стоимость их выполнения [18]

Наименование этапа	Срок выполнения, месяцев с начала инвестирования	Стоимость этапа, тыс. USD
Разработка проектной документации электронно-лучевой печи и оборудования	6	480
Изготовление и поставка одной печи с необходимым оборудованием	22	4000
Монтаж, наладка и запуск печи в эксплуатацию	25	450
Изготовление технологической документации	–	70
Отработка технологии переплава и формирования слитков	30	250

Примечание: суммарная стоимость двух печей будет составлять 9450 тыс. USD (в ценах 2009 г.)

плава как через отверстие в днище тигля, так и через сливной носок за счет его наклона [19]. Создание таких установок представляет интерес именно для выплавки сплавов циркония, поскольку относительно невысокая потребность в изделиях из циркония для нужд отечественного ЯТЦ может быть удовлетворена одним плавильно-заливочным агрегатом.

Что касается тиглей, то требования к усовершенствованию их конструкции сводятся в основном к разработке тиглей повышенной емкости, поскольку применяющиеся до последнего 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 [22].

На рис. 5 приведена принципиальная схема варианта тигля повышенной емкости со сливом расплава как через сливное отверстие в днище, так и через сливной носок путем наклона тигля. В подобных тиглях предусматривается перемешивание расплава за счет СЭМП в направлении от центра ванны к стенке тигля, определяемое как прямое перемешивание, и в обратном направлении. В зависимости от схемы разлива 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

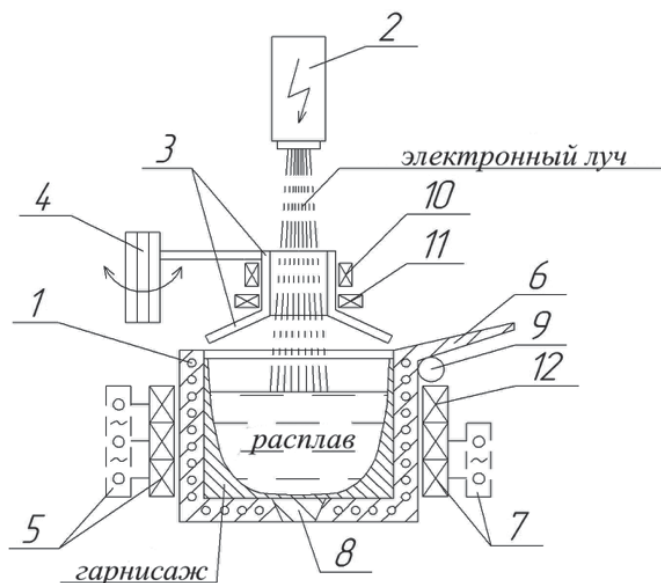


Рис. 5. Схема гарнисажного тигля со сливом расплава через сливной носок и через отверстие в днище:

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

для предупреждения размыва гарнисажа на боковой стенке тигля.

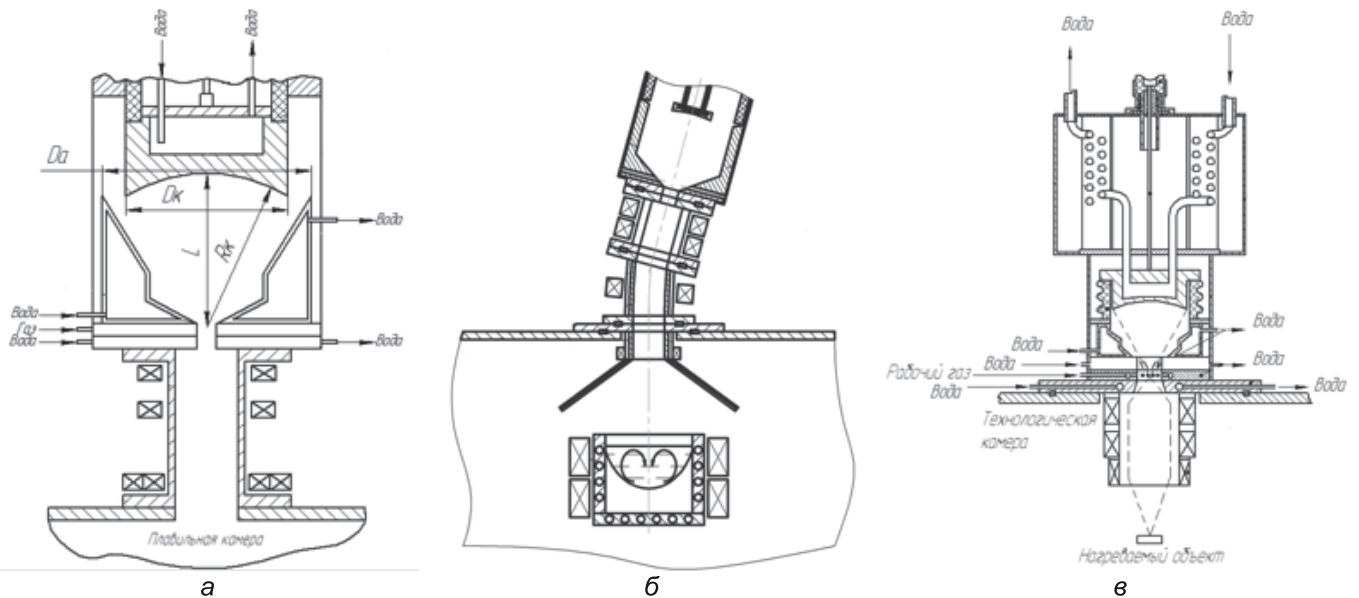


Рис. 6. Схемы пушек ВТР усовершенствованных конструкций: а – пушка ВТР с уменьшенным рассеиванием электронов; б – пушка ВТР с лучеводом, состоящим из двух частей; в – пушка ВТР без лучевода

Относительно пушек стоит отметить, что речь идет о пушках ВТР, особенностью которых должна быть устойчивая работа при колебании вакуума в плавильной камере в широком диапазоне, что характерно для плавки губки. 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 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 работах [17, 21] представлены пути устранения указанных недостатков в пушках ВТР, а на рис. 6 приведены схемы пушек ВТР, разработанных с учетом исключения перечисленных недостатков.

На рис. 6, а приведена схема газоразрядной пушки, 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. 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, как это показано на рис. 6, б.

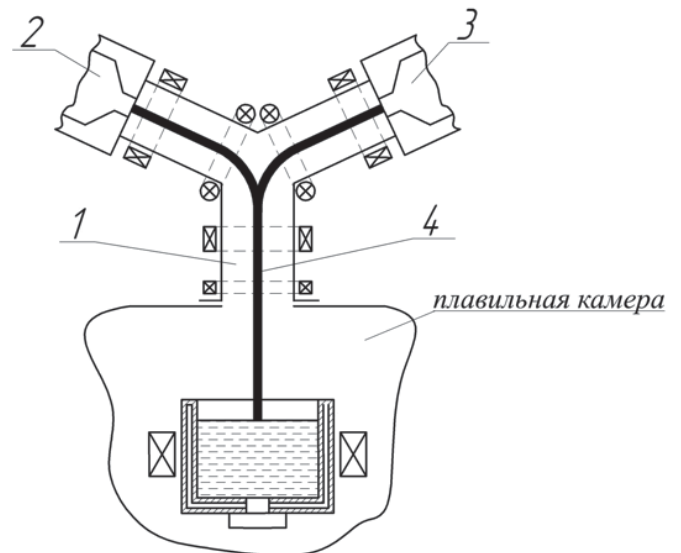


Рис. 7. Принципиальная схема комбинированного электронно-лучевого нагревателя: 1 – лучевод; 2 – низковакуумная пушка ВТР; 3 – средневвакуумная пушка ВТР; 4 – электронный луч

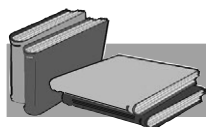
На части лучевода, расположенной в плавильной камере, может быть смонтирован тепловой экран.

Анализ рассмотренного выше варианта пушки ВТР логически приводит к заключению о возможности разработки устройства, в котором лучевод как составная часть пушки вообще отсутствует. На рис. 6, в приведена схема такой пушки, в которой катушки систем фокусирования и отклонения луча полностью размещены в плавильной камере на специальном фланце и могут быть выполнены с возможностью перемещения в вертикальной плоскости. Предлагаемое конструктивное исполнение должно облегчить настройку пушки и существенно снизить стоимость ее изготовления.

Новым подходом к созданию и использованию пушек ВТР является стремление найти пути к сочетанию возможностей пушек, работающих при суще-

ственно различающемся давлении остаточных газов в плавильных камерах. На рис. 7 приведена принципиальная схема пушки, которая представляет собой комбинированный электронно-лучевой нагреватель, состоящий из низко- и средневакуумной пушек ВТР. Это открывает перспективу проведения плавки в весьма широком диапазоне изменения вакуума без

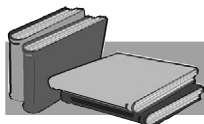
опасения перерыва в проведении нагрева. Комбинированный нагреватель позволяет начинать электронно-лучевой нагрев при повышенном давлении в плавильной камере, при котором до последнего времени в технологических процессах плавки и рафинирования такой нагрев не использовался.



ЛИТЕРАТУРА

1. Звіт про діяльність Національної академії наук України у 2017 році / НАН України. – Київ: Академперіодика, 2018. – 552 с.
2. «Энергоатом» впервые осуществил полную загрузку блока ЮУАЭС... URL: <https://interfax.com.ua/news/economic/519427.html>.
3. Комплексна програма створення ядерно-паливного циклу в Україні. Постанова Кабінету Міністрів України № 267 від 12.04.1995 р.
4. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1994. – 256 с.
5. 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.
6. 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. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. – 1994. – № 2 (62). – С. 114–124.
7. 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.
8. 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.
9. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С.В. Ладохина. – Киев: Сталь, 2007. – 626 с.
10. Ладохин С.В., Вахрушева В.С. К вопросу о применении электронно-лучевой плавки для получения сплавов циркония в Украине // *Современная электрометаллургия*. – 2018. – № 4 (в печати).
11. Ладохин С.В., Вахрушева В.С. Перспективы применения электронно-лучевой плавки для получения сплавов циркония в Украине // *Современная электрометаллургия*. – 2008. – № 4. – С. 22–26.
12. 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.
13. 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.
14. Вахрушева В.С. Проблемы создания производства циркониевого проката в Украине // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. – 2014. – № 2. – С. 62–68.
15. Ажажа В.М., Борц Б.В., Бутенко І.М. та ін. Виробництво партії трубних заготовок трекс-труб та виготовлення дослідно-промислової партії твельних труб зі сплаву Zr1Nb із вітчизняної сировини // *Наука та інновації*. – 2000. – Т. 2. – № 6. – С. 18–30.
16. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорреакционных металлов. – Киев: Наукова думка, 2008. – 312 с.
17. Ладохин С.В. Новое оборудование для электронно-лучевой плавки и литья металлов и сплавов // *Металл и литье Украины*. – 2012. – № 7. – С. 3–11.
18. Ладохин С.В. Электронно-лучевые литейные установки нового поколения: конструктивные особенности и области применения // *Процессы литья*. – 2013. – № 4. – С. 56–70.
19. Ладохин С.В. Электронно-лучевая литейная установка многоцелевого назначения // *Металл и литье Украины*. – 2014. – № 10. – С. 3–7.
20. Ладохин С.В. Электронно-лучевые установки для плавки и литья циркониевых сплавов // *Металл и литье Украины*. – 2017. – № 6-7. – С. 34–39.
21. Ладохин С.В. Пути решения проблемы циркония в программе создания ядерно-топливного цикла в Украине // *Процессы литья*. – 2018. – № 5 (в печати). – С. 62–71.
22. 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.

Поступила 04.10.2018



REFERENCES

1. Report on the activities of the National Academy of Sciences of Ukraine in 2017. NAS of Ukraine. Kyiv: Akadempriodyka, 2018, 552 p. [in Ukrainian].
2. "Energoatom" for the first time carried out a full load of the SUNFES block... URL: <https://interfax.com.ua/news/economic/519427.html> [in Russian].
3. Complex program of nuclear fuel cycle creation in Ukraine. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 267 dated April 12, 1995 [in Ukrainian].
4. *Zaimovsky, A.S., Nikulina, A.V., Reshetnikov, N.G.* (1994). Zirconium alloys in nuclear energetic. Moscow: Energoizdat, 256 p. [in Russian].
5. *Azhazha, V.M., Viugov, P.N., Lavrinenko, S.D.* et al. (1998). Zirconium and its alloys (technology of production, area of utilization). Kharkov: NSC KIPT, 89 p. [in Russian].
6. *Korovin, Yu.F., Chuprinko, V.K., Lindt, K.A.* et al. (1994). Zirconium and hafnium production on PA DChP for satisfaction of Ukrainian nuclear energetic necessities. *Problems of atomic energy science and technology. Series: Physics of radiation effects and radiation materials technology*, no. 2 (62), pp. 114–124 [in Russian].
7. *Chernov, A.P., Semenov, G.R., Lapshin, V.I.* et al. (2000). Research and development on zirconium alloys and items production in Ukraine. Proc. of the 14-th Intern. Conf. on physics of radiation effects and radiation materials technology (Alushta, The Crimea, June 12–17, 2000). Kharkov: NSC KIPT, pp. 98–100 [in Russian].
8. *Nekliudov, I.M.* (2007). State and problems of nuclear energy in Ukraine. *Problems of atomic energy science and technology. Series: Physics of radiation effects and radiation materials technology*, no. 2, pp. 3–9 [in Russian].
9. *Ladokhin, S.V.* (Ed.) (2007). Electron beam melting in foundry. Kiev: Stal', 626 p. [in Russian].
10. *Ladokhin, S.V., Vakhrusheva, V.S.* (2018). About perspectives of electron beam melting use for zirconium alloys production in Ukraine. *Modern Electrometallurgy*, no. 4 (in the press) [in Russian].
11. *Ladokhin, S.V., Vakhrusheva, V.S.* (2008). Perspectives of electron beam melting use for zirconium alloys production in Ukraine. *Modern Electrometallurgy*, no. 4, pp. 22–26 [in Russian].
12. *Gladkov, A.S.* (2009). Peculiarities of electron beam scull melting of Zr1Nb alloy and development the technology of tube billets production: extended abstract of candidate's thesis. Kyiv, 20 p. [in Ukrainian].
13. *Vakhrusheva, V.S.* (2003). Forming of structure and properties of steel and alloys at tubes production for nuclear power installations: extended abstract of Doctor's thesis. Dnipropetrovsk, 36 p. [in Ukrainian].
14. *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].
15. *Azhazha, V.M., Borts, B.V., Butenko, I.M.* et al. (2000). Production of TREX-tube billets party and manufacture of experimental industrial party of fuel tubes from Zr1Nb alloy produced from domestic resources. *Science and innovation*, Vol. 2, no. 6, pp. 18–30 [in Ukrainian].
16. *Paton, B.E., Trygub, N.P., Akhonin, S.V.* (2008). Electron beam melting of refractory and high reactionary metals. Kiev: Naukova dumka, 312 p. [in Russian].
17. *Ladokhin, S.V.* (2012). New equipment for electron beam melting and casting of metals and alloys. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7, pp. 3–11 [in Russian].
18. *Ladokhin, S.V.* (2013). Electron beam casting installations of a new generation: design phisosophy and field of use. *Casting processes*, no. 4, pp. 56–70 [in Russian].
19. *Ladokhin, S.V.* (2014). Electron beam installation for multipurpose supply. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 10, pp. 3–7 [in Russian].
20. *Ladokhin, S.V.* (2017). Electron beam installations for melting and casting of zirconium alloys. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 6–7, pp. 34–39 [in Russian].
21. *Ladokhin, S.V.* (2018). The Ways to solve the problem of zirconium in the program of creating the nuclear fuel cycle in Ukraine. *Casting processes*, no. 5 (in the press), pp. 62–71 [in Russian].
22. *Glukhen'kiy, A.I., Goreslavets, Yu.M., Bondar, Yu.M.* et al. (2017). Skull crucible design choice with increased capacity for electron beam melting of titanium. *Casting processes*, no. 4, pp. 58–65 [in Russian].

Received 04.10.2018

В.С. Вахрушева¹, д-р техн. наук, проф. кафедри, e-mail: Vs062@ukr.net
В.М. Воєводін², д-р фіз.-мат. наук, проф., чл.-кор. НАН України, директор Інституту фізики твердого тіла матеріалознавства та технологій, e-mail: voyev@kipt.kharkov.ua; **С.В. Ладохін**³, д-р техн. наук, проф., гол. наук. співр., e-mail: e_luch@ptima.kiev.ua;
А.П. Мухачев⁴, канд. фіз.-мат. наук, директор центру, e-mail: mar45@ukr.net; **М.М. Пилипенко**², д-р техн. наук, ст. наук. співр., нач. лаб., e-mail: mpylypenko@kipt.kharkov.ua

¹Придніпровська державна академія будівництва і архітектури, Дніпро, Україна

²Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, Україна

³Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, Україна

⁴Центр хімічних технологій Академії інженерних наук України, Кам'янське, Україна

Одержання труб-оболонок тепловідляючих елементів атомних реакторів із литих заготовок сплаву Zr1Nb електронно-променевої виплавки

Наведено результати роботи, яка проводилась ННЦ ХФТІ НАН України, ДНПП «Цирконій», ДП НДТІ ім. Я.Є. Осади та ФТІМС НАН України по вирішенню проблеми цирконію у рамках програми по створенню ядерно-паливного циклу в Україні. Обґрунтовується доцільність використання в нашій країні технологій кальційтермічного відновлення цирконію з тетрафториду цирконію і наступного рафінування цього металу методом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю. Відзначаються переваги виплавки з нього сплавів цирконію методом електронно-променевої гарнісажної плавки з одержанням литих трубних заготовок. Розглядаються розроблені технології одержання з цих заготовок трекс-труб і труб-оболонок тепловідляючих елементів атомних електростанцій (АЕС).

Цирконій, сплави, електронно-променева плавка, вакуумно-дуговий переплав, литі заготовки, трекс-труби, твельні трубки, хімічний склад, механічні властивості.

Summary

V.S. Vakhrusheva¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Department, e-mail: Vs062@ukr.net; **V.N. Voevodin**², Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Prof., Corresponding member of NAS of Ukraine, Director of Institute of Solid State Physics, Materials Science and Technologies, e-mail: voyev@kipt.kharkov.ua; **S.V. Ladokhin**³, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Chief Scientist, e-mail: e_luch@ptima.kiev.ua; **A.P. Mukhachev**⁴, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director of the Center, e-mail: map45@ukr.net; **N.N. Pylypenko**², Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of Laboratory, e-mail: mpylypenko@kipt.kharkov.ua

¹*Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnipro, Ukraine*

²*National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology" of NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine*

³*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

⁴*Chemical Technology Center of AISU, Kamyanskoye, Ukraine*

Production of nuclear reactors fuel tubes from Zr1Nb alloy cast billets of electron-beam melting

The results of work fulfilled by NSC KIPT NAN of Ukraine, State Enterprise "Zirconium", State Osada Tube Institute and PTIMA NAS of Ukraine to solve the problem of zirconium in the program of Ukraine fuel producing are presented. Advisability of use in our country technologies of calcium thermal reduction of zirconium from tetrafluoride of zirconium and following refining of this metal by electron-beam cold hearth method is based. Advantage of melting from this metal zirconium alloys by electron-beam scull melting technology with tube billets casting is noted. Developed technologies of production from these billets hot-rolled tubes and fuel tubes are described.

Keywords

Zirconium, alloys, electron-beam melting, vacuum-arc remelting, cast billets, hot-rolled tubes, fuel tubes, chemical composition, mechanical properties.