

**С. В. Ладохин, Т. В. Лапшук, Е. А. Дрозд**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ПОЛУЧЕНИЕ СПЛАВОВ ЦИРКОНИЯ ДЛЯ ЯДЕРНО-ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА УКРАИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*Даётся обоснование целесообразности использования при получении сплавов циркония для отечественного ядерно-топливного цикла электронно-лучевых металлургической и литейной технологий вместо вакуумно-дугового переплава. Приведены результаты получения литых трубных заготовок из сплава Zr1Nb на основе циркония кальцийтермического восстановления. Предложены схемы новых технологических решений и конструктивного исполнения электронно-лучевых установок для плавки и литья циркониевых сплавов.*

**Ключевые слова:** электронно-лучевая плавка, вакуумно-дуговой переплав, ядерно-топливный цикл, цирконий, сплавы.

*Дається обґрунтування доцільності використання при отриманні сплавів цирконію для вітчизняного ядерно-паливного циклу електронно-променевої металургійної і ливарної технологій замість вакуумно-дугового переплаву. Наведено результати отримання литих трубних заготовок із сплаву Zr1Nb на основі цирконію кальційтермічного відновлення. Запропоновано схеми нових технологічних рішень і конструктивного виконання електронно-променевої установок для плавки і лиття цирконієвих сплавів.*

**Ключові слова:** електронно-променева плавка, вакуумно-дуговий переплав, ядерно-паливний цикл, цирконій, сплави.

*The basis of advisability of metallurgical and foundry electron-beam technologies use instead of vacuum-arc remelting at zirconium alloys production for nuclear fuel manufacture purposes are given. The results of tube billets casting from Zr1Nb alloy are shown. The schemes of new technological decisions and electron-beam installations design for zirconium alloys melting and casting are proposed.*

**Keywords:** electron-beam melting, vacuum-arc remelting, nuclear fuel manufacture, zirconium, alloys.

**А**томные станции Украины обеспечивают получение около половины вырабатываемой в стране электроэнергии, причём ядерное топливо для реакторов до последнего времени приобретается преимущественно в России [1]. Поэтому создание отечественного ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) относится к числу проблем, определяющих энергетическую безопасность страны. Проблема создания ЯТЦ включает решение ряда задач, одной из которых является получение сплавов циркония и изготовление из них труб-оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), труб для каналов реакторов, прутков для изготовления пробок-заглушек ТВЭЛов и концевых деталей кассет, листов и лент для дистанционных решеток, а также других деталей, работающих в активных зонах ядерных реакторов [2].

В настоящее время в большинстве стран, вырабатывающих электроэнергию на атомных станциях, в качестве материалов для изготовления ТВЭЛов и других узлов и деталей активной зоны ядерных реакторов используют сложнелегированные сплавы на основе циркония магнийтермического восстановления из тетраоксида циркония [3]. В России для этой цели применяют преимущественно двойные цирконий-ниобиевые сплавы, хотя в последние годы начинают использовать также сложнелегированные сплавы системы Zr-Nb-Fe-Sn, относящиеся к перспективным разработкам в

области ядерного материаловедения [4]. Для получения этих сплавов используется цирконий электролитического восстановления из солей фторцирконата калия [3].

Получение слитков циркония и его сплавов во всём мире (в том числе в России) производится методом вакуумно-дугового переплава (ВДП) в глуходонный кристаллизатор, причём переплав проводится не менее двух раз.

В нашей стране сплавы циркония до последнего времени получали на основе циркония кальцийтермическое восстановление из тетрафторида циркония. При металлтермическом восстановлении первичный, то есть нерафинированный, металл выходит из восстановительного реактора в виде компактной литой заготовки диаметром около 650 мм и высотой до 200 мм, которую можно переплавить в слиток только методом электронно-лучевой плавки с промежуточной ёмкостью (ЭЛПЕ) [3, 5]. Благодаря этому в стране накоплен большой опыт электронно-лучевой плавки и рафинирования циркония и циркониевых сплавов, которого не имеют другие страны. Тем не менее, в последние годы при рассмотрении перспектив и возможных направлений развития циркониевого производства предпочтение отдаётся методу ВДП, как более экономичному и широко используемому в мировой практике [6]. При этом, к сожалению, не в полной мере учитываются те обстоятельства, что, во-первых, в Украине отсутствует промышленная технология ВДП циркония и для её создания требуется не только время, но и существенные материальные и финансовые вложения, а во-вторых, в стране имеется отмеченный выше во многом уникальный опыт электронно-лучевой плавки этого металла [5, 7], который целесообразно использовать.

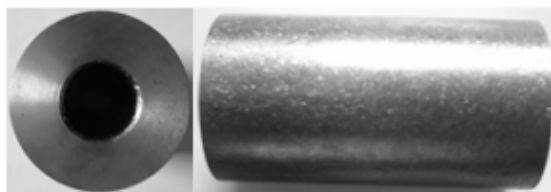
Возможность применения электронно-лучевой плавки вместо ВДП как более эффективного метода рафинирования была показана в работах [8-11] при получении литых трубных заготовок из сплава  $Zr_{1Nb}$  на основе циркония кальцийтермического восстановления. В этих работах трубные заготовки получали с использованием разных методов литья: литьё в стационарную форму, центробежное литьё и литьё с наложением электромагнитных воздействий на расплав в форме. Выплавку сплава проводили в тигле с электромагнитным перемешиванием и сливом расплава через отверстие в днище тигля. На рис. 1 приведены фотографии трубных заготовок, а в табл. 1 – механические свойства сплава в заготовках. Для сравнения в таблице приведены также свойства сплава, полученного на основе циркония электролитического восстановления, после двойного ВДП.

Основным преимуществом литейной технологии получения трубных заготовок является исключение из технологического процессаковки, которая сопровождается не только заметными потерями

металла, но и насыщением его кислородом. Технология изготовления из трубных заготовок TREX-труб (горячепрессованные полые заготовки с внешним диаметром 48 мм, толщиной стенки 8,5 мм и длиной 800 мм для последующего передела в твельные трубки) была разработана в ГП «НИТИ им. Я. Е. Осады» (г. Днепрпетровск) под руководством В. С. Вахрушевой и заключалась в реализации схемы высокотемпературного прессования в  $\beta$ -области с использованием больших степеней деформации при прессовании и закалки с прокатного нагрева [12]. В табл. 2 приведены механические свойства металла в TREX-трубах,



а



б

Рис. 1. Трубные заготовки из сплава  $Zr-1Nb$ , полученные методами литейной технологии: а – литьё в кокиль; б – центробежное литьё

**Таблица 1. Механические свойства заготовок из сплава Zr-1Nb в поперечном разрезе**

Способ получения	Температура испытаний 293 К			
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Литьё в стационарную форму	467,35	418,5	14,65	34,2
Центробежное литьё	528,80	502,25	15,15	15,65
Литьё 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			
Литьё в стационарную форму	180,97	163,99	19,47	65,30
Центробежное литьё	168,89	145,37	24,67	56,00
Литьё с ЭМП в форме	171,70	135,00	23,30	73,20
ВДП	162,50	127,50	16,00	74,75

а также свойства металла в аналогичных трубах, изготовленных из сплава ВДП. Видно, что заготовки, полученные с наложением электромагнитных воздействий на расплав в форме, можно прессовать при более низкой температуре нагрева (1320-1330 К) по сравнению с заготовками стационарного и центробежного способов литья (1370-1380 К), а также заготовками из металла ВДП, что повышает качество горячепрессованных труб и выход годных изделий. Отметим также, что механические свойства TREX-труб, которые изготовлены из заготовок, полученных литьём в стационарные формы и с наложением электромагнитных воздействий, отвечают техническим требованиям.

**Таблица 2. Механические свойства горячепрессованных труб из сплава Zr-1Nb в поперечном разрезе**

Способ получения заготовок	Температура нагрева перед прессованием, К	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Литьё в стационарную форму	1370-1380	490,00	420,00	21,00	65,50
Центробежное литьё	1370-1380	599,00	562,00	18,30	66,50
Литьё с ЭМП в форме	1320-1330	568,00	505,00	23,00	–
ВДП	1370-1380	577,50	495,00	21,50	–
Технические требования		>480	>420	>20	>45

Полученные положительные результаты позволили по-новому подойти к вопросу об использовании электронно-лучевой плавки вместо ВДП, а именно предложить получать TREX-трубы не только из литых трубных заготовок, но также из слитков электронно-лучевой плавки. Возможные варианты технологических схем получения TREX-труб указанными способами были рассмотрены в работе [13] и в принципе могут быть реализованы при создании отечественного ЯТЦ.

В рассмотренных в работе [13] схемах в качестве шихты предполагается использовать губку. В практике циркониевого производства опыта электронно-лучевой плавки губки нет, но такой опыт в нашей стране накоплен при плавке титана [14] и полученные данные подтверждают перспективность такого подхода. Заслуживает внимания также возможность плавки не губки, а крицы, образующейся при магнийтермическом восстановлении, опыт плавки которой в нашей стране также имеется [15].

Поскольку плавка губки сопровождается интенсивным газовыделением, важным становится вопрос о выборе наиболее рациональных источников нагрева, то есть электронно-лучевых пушек. В практике электронно-лучевой плавки этому вопросу всегда уделялось много внимания, и ещё в 70-х годах прошлого столетия было предложено при плавке газонасыщенных материалов использовать электронные пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) [16]. В нашей стране работа в этом направлении первоначально проводилась по переплаву именно титановой губки [17]. В настоящее время пушки ВТР используются как на действующих плавильных агрегатах по получению слитков титана [18], так и на разрабатываемых новых электронно-лучевых установках [19].

В последние годы разработке пушек ВТР стало уделяться внимание в ФТИМС применительно к особенностям плавки в тиглях с электромагнитным перемешиванием расплава. Эти работы базируются на исследованиях, в течение многих лет проводящихся в НТУУ «КПИ» [20], и завершились разработкой средневакуумных пушек ВТР различной конструкции [21-27], в том числе созданием пушек с разными лучеводами, общий вид которых показан на рис. 2.

Принципиально новым моментом проводимых в этом направлении работ является разработка совместно с Национальной металлургической академией Украины так называемой низковакуумной пушки ВТР, которая может функционировать при давлении в плавильной камере до 1000 Па [28]. Экспериментальной проверки эта пушка пока не проходила.

Важным результатом работ по использованию пушек ВТР является проверка их работоспособности при выплавке отходов сплава  $Zr1Nb$  на основе циркония кальцийтермического восстановления [29]. Полученные при этом данные подтверждают целесообразность перехода на плавку губки с использованием указанных пушек, учитывая их устойчивую работу при обильном газовыделении из шихты и расплава в процессе плавки.

В последние годы в НТУУ «КПИ» начали проводиться исследования по разработке пушек ВТР, способных функционировать при импульсных режимах нагрева [30]. Создание таких пушек открывает возможность реализации в будущем новых технологических процессов выплавки сплавов, в том числе проведения плавки в импульсном режиме нагрева, теоретический анализ которой выполнен в [10], и плавки с модуляцией по частоте, амплитуде и фазе питающего напряжения плавильного тигля и кристаллизатора [31]. Отметим, что последнее открывает перспективу дополнительного воздействия на расплав с целью обеспечения управления процессами формирования жидкометаллической ванны и кристаллизации расплава.

Преимуществами пушек ВТР перед широко используемыми в практике ЭЛП аксиальными пушками с термокатодом является то, что они, во-первых, не нуж-

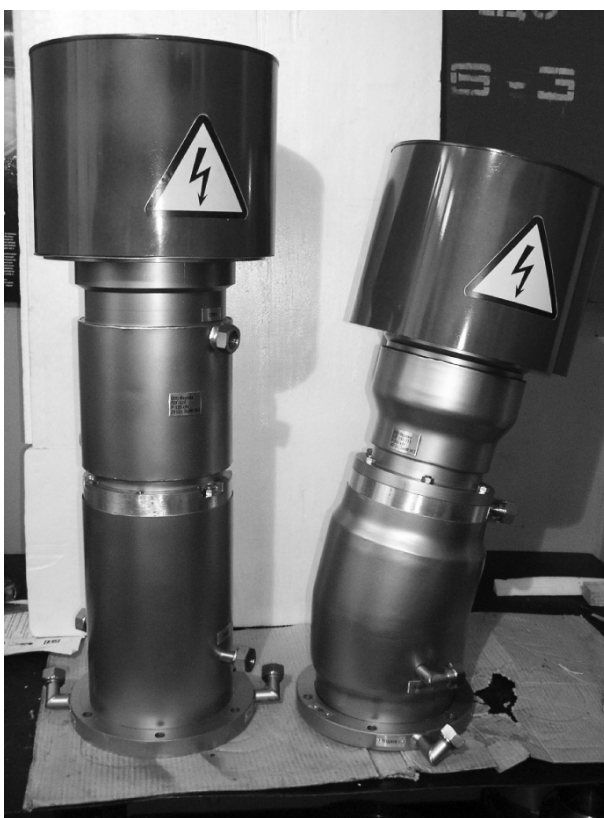


Рис. 2. Пушки ВТР с прямым и угловым лучеводом

даются в оснащении вакуумными насосами, а во-вторых, могут функционировать в условиях изменения давления остаточных газов в плавильной камере в весьма широком диапазоне. Это позволило предложить конструкцию литейной электронно-лучевой установки с перемещающимися источниками нагрева [32, 33], а также способы плавки и оборудование для их реализации, позволяющие проводить нагрев пушками, работающими в разном диапазоне изменения вакуума в плавильной камере [33-35]. К сожалению, указанные разработки, в принципе решающие вопросы плавки, рафинирования и литья, например, жаропрочных сплавов или кремния [36], оказываются малоприспособными для плавки и литья циркониевых сплавов, особенно в связи с намечаемым переходом на выплавку этих сплавов с использованием циркония магнийтермического восстановления [6].

При разработке электронно-лучевых установок для выплавки сплавов на основе циркония необходимо учитывать и то обстоятельство, что в ближайшие годы твельные трубки будут преимущественно получать из сложнолегированных сплавов типа российского Э635 на основе системы Zr-Nb-Sn-Fe и Циркалой-2 или Циркалой-4 на основе системы Zr-Nb-Sn-Fe-Ni-Cr, широко применяемых в зарубежных ядерных реакторах [3, 4]. Следует ожидать также проявление интереса к отечественным сплавам системы Zr-Nb-Cr-Y [37]. В этом случае применение для плавки и литья сплавов циркония установок с донным сливом расплава из плавильных тиглей, в том числе предложенных в работах [32-35], оказывается невозможным из-за трудности выплавки в них сложнолегированных многокомпонентных сплавов [31].

Для получения таких сплавов были разработаны и продолжают разрабатываться новые способы их выплавки, а также конструкции установок, обеспечивающих получение как литых заготовок, так и слитков, то есть реализацию литейных и металлургических технологий. Ниже представлено описание некоторых из этих способов и установок, которые разрабатывались с учётом их применения для решения проблемы создания ЯТЦ, хотя они могут использоваться для более широкого круга решаемых задач.

На рис. 3 приведена схема выплавки сложнолегированного сплава в гарнисажном тигле с электромагнитным перемешиванием расплава, из которого слив расплава проводится за счёт наклона тигля, то есть через сливной носок. Особенность

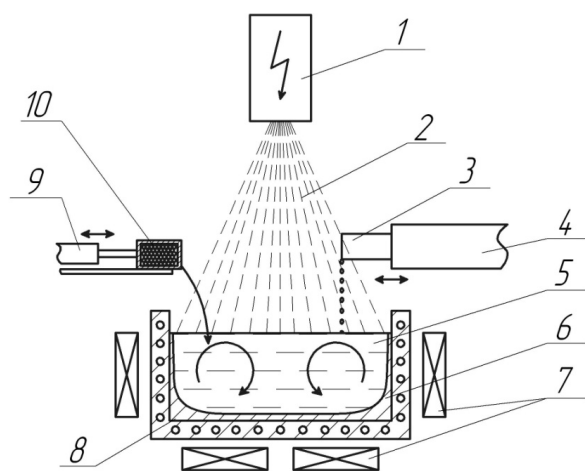


Рис. 3. Способ выплавки сложнолегированного сплава в гарнисажном тигле с электромагнитным перемешиванием расплава: 1 – электронно-лучевая пушка, 2 – электронный луч, 3 – легирующий элемент, 4 – устройство подачи легирующего элемента, 5 – расплав, 6 – гарнисаж, 7 – система ЭМП тигля, 8 – тигель, 9 – устройство подачи легирующего элемента, 10 – легирующий элемент в капсуле металла-основы

способа состоит в том, что легирующие элементы вводятся в шихту или в расплав в тигле в зависимости от соотношения парциального давления их паров с парциальным давлением пара металла-основы. Если эта характеристика легирующего элемента меньше или равна аналогичной характеристике металла-основы, то он вводится в шихту, но при условии обязательного обеспечения равномерного распределения в объёме расплава. В принципе это означает необходимость тщательной предварительной подготовки, как-то дробления или гранулирования (в зависимости от состояния материала), перемешивания, определённого порядка загрузки в тигель. Последнее согласно [38] означает, что если температура плавления и особенно плотность легирующего элемента заметно превышают аналогичные характери-

стики металла-основы, то его необходимо при завалке размещать сверху. Если же парциальное давление пара легирующего элемента выше аналогичной характеристики металла-основы, то его введение в сплав целесообразно осуществлять путём непосредственной подачи в расплав в тигле. На рис. 3 показаны два возможных варианта такой подачи – путём сплавления электронным лучом с поступлением в расплав в тигле в виде капель и путём погружения в расплав в виде кускового материала. Отметим, что если легирующий элемент склонен к взрывному испарению при попадании на него электронного луча (таким, например, является хром), то введение его в расплав следует проводить в оболочке из металла-основы либо из более тугоплавкого легирующего элемента.

В соответствии с изложенным выплавка указанных выше сплавов для получения твельных трубок должна проводиться следующим образом. Сначала в гарнисажном тигле выплавляется сплав системы Zr-Nb. Затем в наведённый в тигле расплав требуемой по условиям формируемого изделия (слиток или заготовка) массы электронным лучом сплавляют Sn, Fe и Ni, обеспечивая интенсивное перемешивание жидкометаллической ванны для усвоения вводимых присадок. В заключение в наведённый сплав системы Zr-Nb-Sn-Fe-Ni или Zr-Nb вводят по описанной выше схеме Cr, в данном случае желателен в оболочке из Zr. Мощностные и временные параметры проведения процесса определяются необходимой массой выплавляемого сплава, то есть тем, какие конкретно изделия предполагается получить.

Хотя рассмотренная технологическая схема выплавки сложнолегированного сплава первоначально была ориентирована на использование при получении литых изделий, результаты известных работ по формированию в электронно-лучевых установках слитков с порционной подачей металла в кристаллизатор из промежуточной ёмкости [39] позволили предположить возможность такой подачи также из тигля. На рис. 4 приведена предложенная в [40] схема процесса получения слитка сложнолегированного сплава с выплавкой его в гарнисажном тигле с электромагнитным перемешиванием расплава. Формирование слитка в кристаллизаторе при порционной подаче расплава из тигля в принципе протекает аналогично описанному в [39] процессу, но в организационном плане важно научиться обеспечивать выплавку очередной порции расплава в тигле к моменту затвердевания в кристаллизаторе предыдущей порции.

Возможность использования гарнисажного тигля с системой ЭМП для получения как литого изделия, так и слитка, позволяет предложить электронно-лучевую установку, схема которой приведена на рис. 5. Особенностью конструктивного исполнения установки является наличие отдельных камер литейных форм и слитка, а также её оснащение пушками для независимого обогрева тигля и кристаллизатора. Создание такой установки представляет для нашей страны интерес потому, что относительно невысокая потребность в изделиях из циркония для нужд ЯТЦ может быть удовлетворена наличием одного комбинирован-

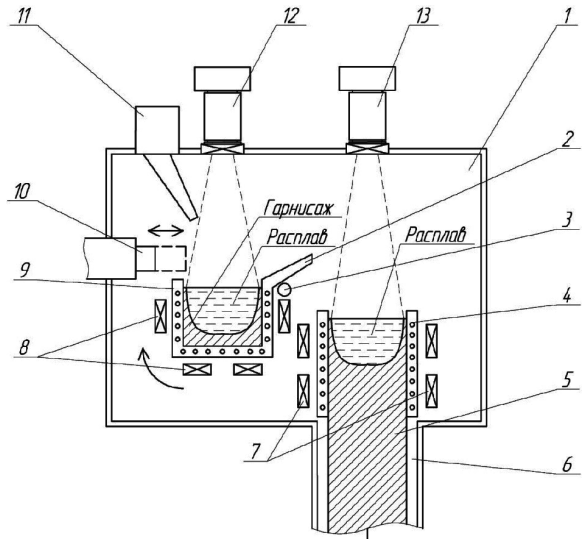


Рис. 4. Схема реализации процесса выплавки сложнолегированного сплава в электронно-лучевой установке: 1 – плавильная камера, 2 – сливной носок, 3 – ось поворота тигля, 4 – кристаллизатор, 5 – слиток, 6 – камера слитка, 7 – система ЭМП кристаллизатора, 8 – система ЭМП тигля, 9 – тигель, 10 – устройство подачи шихты, 11 – устройство ввода легирующих элементов, 12 – электронно-лучевая пушка тигля, 13 – электронно-лучевая пушка кристаллизатора

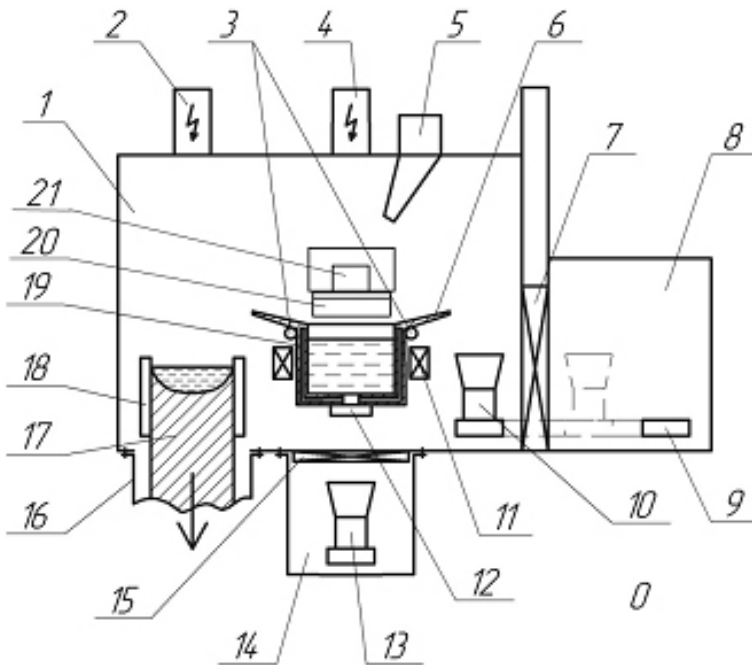


Рис. 5. Схема электронно-лучевой установки для получения слитков и литых изделий: 1 – плавильная камера, 2 – электронно-лучевая пушка, 3 – оси поворота тигля, 4 – электронно-лучевая пушка, 5 – устройство ввода легирующих элементов, 6 – сливной носок, 7, 15 – вакуумные затворы, 8 – камера литейных форм, 9 – механизм перемещения формы, 10 – литейная форма, 11 – система электромагнитного перемешивания, 12 – крышка сливного отверстия, 13 – литейная форма, 14 – камера литейных форм, 16 – камера слитка, 17 – слиток, 18 – проходной кристаллизатор, 19 – гарнисажный тигель, 20 – промежуточная ёмкость, 21 – устройство подачи шихты

ного плавильно-заливочного агрегата, то есть отпадает необходимость в создании отдельных установок для получения слитка и литых заготовок. Что касается организации работ на такой установке, то можно предположить целесообразность проведения плавки по циклам – получения слитков и заготовок, что позволит упростить как подготовительные работы, так и послеплавочную обработку.

В принципе установка аналогичного назначения, то есть для получения как слитков, так и литых заготовок, может быть выполнена и по другой технологической схеме – с традиционным переплавом шихты в промежуточную ёмкость со сливом расплава из неё в кристаллизатор. Схема такой установки приведена на рис. 6 [41]. Её особенностью является выполнение промежуточной ёмкости поворачивающейся, что позволяет обеспечивать подачу расплава как в тигель, так и в кристаллизатор. Как и в рассмотренном выше случае, в установке предусмотрены отдельные камеры для слитка и для литейных форм. Логичным является использование в установке перемещающейся пушки ВТР, так как одновременное формирование в ней слитка и трубной заготовки проводиться не будет.

На рис. 7 приведена схема электронно-лучевой литейной установки, особенностью которой является наличие двух камер литейных форм [42]. Разработка подобной установки целесообразна с точки зрения получения сложнелегированных и простых по составу сплавов в одном агрегате. Возможность решения этой задачи появилась благодаря созданию гарнисажного тигля с системой электромагнитного перемешивания, который позволяет проводить выпуск расплава как через сливное

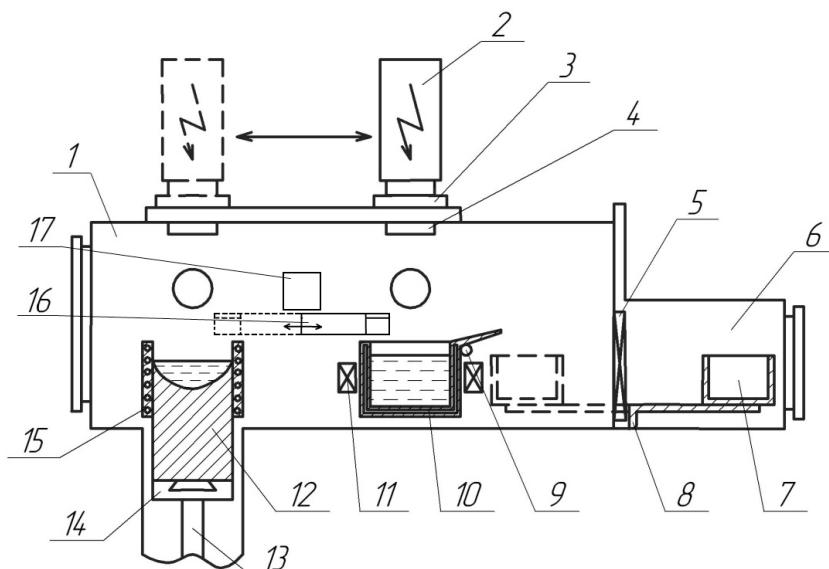


Рис. 6. Схема электронно-лучевой установки для получения слитка и литой заготовки: 1 – плавильная камера, 2 – пушка ВТР, обогревающая тигель и кристаллизатор, 3 – подвижная плита, 4, 5 – вакуумные затворы, 6 – камера литейных форм, 7 – блок литейных форм, 8 – устройство перемещения форм, 9 – ось поворота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

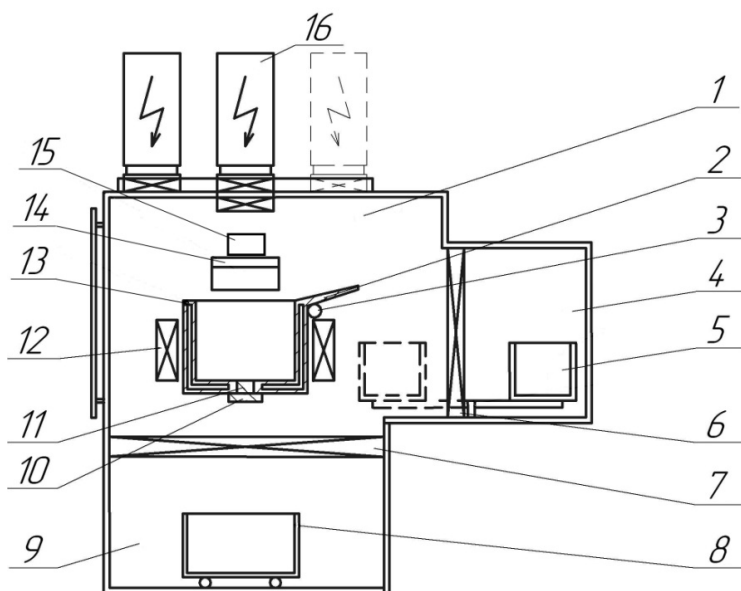


Рис. 7. Схема электронно-лучевой литейной установки с двумя камерами литейных форм: 1 – плавильная камера, 2 – сливной носок, 3 – ось поворота тигля, 4 – боковая камера литейных форм, 5 – литейная форма, 6, 7 – вакуумные затворы, 8 – литейная форма, 9 – нижняя камера литейных форм, 10 – крышка, 11 – сливное отверстие, 12 – система ЭМП тигля, 13 – тигель, 14 – промежуточная ёмкость, 15 – устройство подачи шихты, 16 – электронно-лучевая пушка



отверстие в днище, так и через сливной носок путём наклона тигля [43]. В первом случае обеспечивается выплавка и слив простых по составу сплавов, например, рассмотренных выше сплавов системы Zr-Nb, а во втором – сложнелегированных сплавов системы Zr-Nb-Sn-Fe-Ni-Cr. Следует также подчеркнуть, что это первая литейная электронно-лучевая установка, которая разрабатывалась с учётом использования промежуточной ёмкости, поскольку с самого начала предназначалась для проведения переплава губки.

Рассмотренные выше установки разрабатывались применительно к получению литых заготовок и слитков из сплавов циркония с учётом возможных требований при создании ЯТЦ. При этом не стояла задача обеспечения достаточно высокой производительности, поскольку реальная потребность в таких изделиях не превышает нескольких сот тонн в год. В то же время электронно-лучевые установки для плавки и литья других металлов, прежде всего титана и сплавов на его основе, обычно разрабатывают с учётом обеспечения как можно более высокой производительности [14]. Но поскольку эти установки в принципе также могут быть использованы для плавки и литья циркониевых сплавов, то представляет интерес рассмотрение тех из них, которые представляются наиболее подходящими для этой цели. Ниже приведено описание одной из таких установок, которая разрабатывалась для получения крупнотоннажных слитков сложнелегированных титановых сплавов с использованием для плавки гарнисажного тигля с электромагнитным перемешиванием расплава. Особенностью установки, схема которой приведена на рис. 8, является то, что она рассчитана на проведение многостадийного технологического процесса выплавки сплава, его рафинирования и формирования слитка. На первой стадии в гарнисажном тигле с электромагнитным перемешиванием расплава выплавляют сплав, легированный только элементами, испарение которых близко к испарению

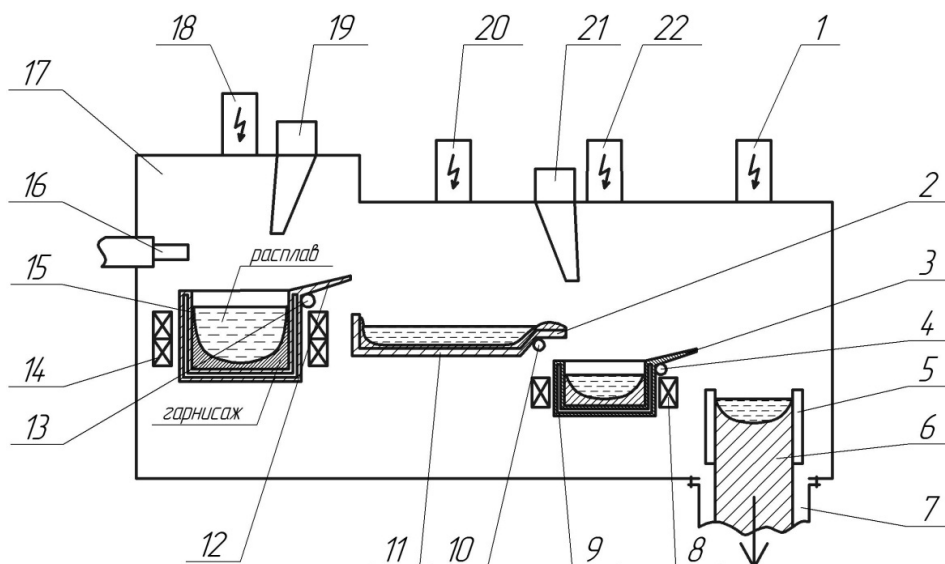


Рис. 8. Способ получения слитка сложнелегированного сплава и электронно-лучевая установка для его реализации: 1 – электронно-лучевая пушка, 2 – сливной носок, 3 – сливной носок, 4 – ось поворота тигля, 5 – проходной кристаллизатор, 6 – слиток, 7 – камера слитка, 8 – система электромагнитного перемешивания, 9 – мерная ёмкость, 10 – ось поворота промежуточной ёмкости, 11 – промежуточная ёмкость, 12 – сливной носок, 13 – ось поворота тигля, 14 – система электромагнитного перемешивания, 15 – гарнисажный тигель, 16 – устройство подачи шихты, 17 – плавильная камера, 18 – электронно-лучевая пушка, 19 – устройство ввода легирующих элементов, 20 – электронно-лучевая пушка, 21 – устройство ввода легирующих элементов, 22 – электронно-лучевая пушка

металла-основы. На второй стадии выплавленный сплав сливается в промежуточную ёмкость, где в процессе выдержки проходит очищение расплава от включений малой и высокой плотности, рафинирование от которых является одной из важнейших задач при получении титановых сплавов ответственного назначения [14]. На третьей стадии отрафинированный в промежуточной ёмкости расплав сливается в мерный тигель с электромагнитным перемешиванием, в котором в расплав вводят легкоиспаряемые легирующие элементы и после их усвоения расплав сливают в кристаллизатор. Таким образом, реализуется порционная заливка, которая наряду со специфической организацией рафинирования также является отличительной особенностью технологического процесса, важного для формирования крупнотоннажного титанового слитка. В случае получения слитка сложнолегированного сплава циркония, например Э635, на первом этапе будет выплавляться сплав системы Zr-Nb, а на третьем – в расплав этого сплава будут вводиться Fe и Sn.

В принципе все рассмотренные выше способы и установки решают задачи выплавки сплавов циркония и получения из них литых заготовок и слитков для создания отечественного ЯТЦ.



### Список литературы

1. Исследования и разработки по производству циркониевых сплавов и изделий из них в Украине / А. П. Чернов, Г. П. Семенов, В. С. Красноруцкий и др. // Вопросы атомной науки и техники. Тр. XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (Алушта, июнь 2000 г.) – Харьков, 2000. – С. 98-100.
2. Займовский А. С. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике / А. С. Займовский, А. А. Никулина, Н. Г. Решетников. – М.: Энергоиздат, 194. – 256 с.
3. Цирконий и его сплавы: технология производства, области применения / В. М. Ажажа, П. Н. Вьюгов, С. Д. Лавриненко и др. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998. – 89 с.
4. Эксплуатационные свойства оболочек из сплавов Э110 и Э635 и их зависимость от химического состава и структуры / Вопросы атомной науки и техники // Сер. Физика радиационных явлений и радиационного материаловедения. – 1998. – № 1-2. – С. 119-126.
5. Производство циркония и гафния на ПО ПХЗ для удовлетворения потребностей атомной энергетики Украины / Ю. Ф. Коровин, В. К. Чупринко, К. А. Линдт и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных явлений и радиационного материаловедения. – 1994. – № 2 (62). – С. 114-124.
6. Пилипенко Н. Н. Фізико-технологічні основи створення цирконієвих матеріалів та гафнію для активних зон ядерно-енергетичних установок: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Харків, 2012. – 32 с.
7. Патон Б. Е. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорреакционных металлов / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин. – Киев: Наук. думка, 2008. – 312 с.
8. Получение литых трубных заготовок из сплавов циркония в электронно-лучевых установках / С. В. Ладохин, В. Г. Шмигидин, В. Б. Чернявский, Н. И. Матюшенко // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных явлений и радиационного материаловедения. – 1999. – № 2 (77). – С. 21-27.
9. Виробництво партії трубних заготовок трекс-труб та виготовлення дослідно-промислової партії твельних труб зі сплавом Zr1Nb із вітчизняної сировини / В. М. Ажажа, Б. В. Борц, Г. М. Бутенко та ін. // Наука та інновації – 2006. – Т. 2, № 6. – С. 18-30.
10. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / под ред. С. В. Ладохина. – Киев: Изд-во «Сталь», 2007. – 626 с.
11. 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.
12. Вахрушева В. С. Формування структури та властивостей сталі і сплавів при виготовленні

- труб для ядерных энергетических установок: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Днепропетровськ, 2003. – 36 с.
13. *Ладохин С. В.* Перспективы применения электронно-лучевой плавки при получении сплавов циркония в Украине / С. В. Ладохин, В. С. Вахрушева // Современная электрометаллургия. – 2008 – № 4. – С. 22-27.
  14. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. – Киев: Наук. думка, 2006. – 248 с.
  15. Электронно-лучевая плавка недробленых блоков губчатого титана / Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук и др. // Современная электрометаллургия. – 2006. – № 4. – С. 6-9.
  16. *Удрис Я. Я.* Электронная пушка высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) как стабильный источник нагрева при повышенном газовыделении / Я. Я. Удрис, В. А. Чернов // Спец. электрометаллургия. – 1981. – Вып. 46. – С. 73-79.
  17. Электронно-лучевая переплав титановой губки – новый способ получения титановых слитков и слябов / А. Л. Тихоновский, А. А. Тур, С. В. Ахонин и др. – Проблемы специальной электрометаллургии. – 1993. – № 1. – С. 66-70.
  18. *Ковальчук Д. В.* Электронно-лучевой переплав титана – пути развития / Д. В. Ковальчук, Н. П. Кондратий. – Литьё и Metallургия. – 2008 – № 3(48). – С. 275-282.
  19. Новая печь ВТ-02 для электронно-лучевой плавки титановых сплавов, разработанная в МК «Антарес» / О. Е. Собко-Несторук, Н. Г. Третьяк, Н. В. Чайка и др. – Современная электрометаллургия. – 2012. – № 3. – С. 20-25.
  20. *Мельник І. В.* Теоретичні та експериментальні основи проектування технологічних газорозрядних джерел електронів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2008. – 39 с.
  21. Патент України на винахід № 82101264 «Газорозрядна електронна гармата», МПК H01J 37/06 / В. Б. Чернявський, А. А. Тур, С. В. Ладохін та ін. – Опубл. 11.03.2008. Бюл. № 5.
  22. Патент України на винахід № 90536 «Газорозрядна електронна гармата», МПК H01J 37/06. /С. В. Ладохін, А. С. Гладков, В. Б. Чернявський, Т. В. Лапшук. – Опубл. 11.05.2010. Бюл. № 9.
  23. Патент України на винахід № 93625 «Газорозрядна електронна гармата», МПК H01J 37/06. /В. Б. Чернявський, С. В. Ладохін, В. А. Семенець та ін. – Опубл. 25.02.2011. Бюл. № 4.
  24. Патент України на корисну модель № 74113 «Газорозрядна електронна гармата», МПК H01J 37/06. / В. Б. Чернявський, С. В. Ладохін, В. А. Семенець. та ін. – Опубл. 25.10.2012. Бюл. № 20.
  25. Патент України на корисну модель № 83313 «Газорозрядна електронна гармата», МПК H01J 37/06. /С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук, А. С. Гладков, М. Ю. Смірнов. – Опубл. 10.09.2013. Бюл. № 17.
  26. Патент України на винахід № 105264 «Газорозрядна електронна гармата», МПК H01J 37/06. /С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук. – Опубл. 25.04.2014. Бюл. № 8.
  27. Патент України на корисну модель № 93183 «Газорозрядна електронна гармата», МПК H01J 37/06 / С. В. Ладохін – Опубл. 25.09.2014. Бюл. № 18.
  28. Патент України на винахід № 102765 «Газорозрядна електронна гармата», МПК H01J 37/06. / В. А. Тутик, С. В. Ладохін, М. І. Гасик, А. Г. Малявін. – Опубл. 12.08.2013. Бюл. № 15.
  29. Выплавка сплава КТЦ110 в электронно-лучевой гарнисажной установке с использованием пушки высоковольтного тлеющего разряда / С. Д. Лавриненко, С. В. Ладохин, Н. Н. Пилипенко и др. // ВАИТ. Серия «Вакуум, чистые металлы, сверхпроводники». – 2014. – № 1 (89). – С. 151-158.
  30. *Тугай С. Б.* Імпульсні режими роботи технологічних електронно-променевиx гармат високовольтного тліючого розряду: Автореф. дис. ... канд. техн. наук – Київ, 2013. – 20 с.
  31. Ладохин С. В., Тенденции развития электронно-лучевой литейной технологии и создание нового оборудования для плавки и литья металлов и сплавов / С. В. Ладохин, Т. В. Лапшук // Процессы литья. – 2014. – № 6. – С. 68-74.
  32. Патент України на винахід № 98904 «Електронно-променева ливарна установка». МПК С22С 9/22, С21С5Е56 / С. В. Ладохин, Т. В. Лапшук, А. С. Гладков, М. Ю. Смірнов – Опубл. 25.06.2012., Бюл. № 12.
  33. *Ладохин С. В.* Электронно-лучевые литейные установки нового поколения: конструктивные особенности и области применения / С. В. Ладохин // Процессы литья. – 2013. – № 4. – С. 56-70.
  34. Патент України на винахід № 105577 «Спосіб рафінування металів і сплавів при електронно-променевої гарнисажній плавці і установка для його здійснення», МПК С21С 5/56. /С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук – Опубл. 26.05.2014. Бюл. № 10.
  35. Патент України на винахід № 106655 «Спосіб суміщеної вакуумно-індукційної і електронно-променевої плавки і лиття сплавів і установка для його здійснення», МПК С21С 5/56. /С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук – Опубл. 25.09.2014. Бюл. № 18.

36. *Ладохин С. В.* Перспективные технологии электронно-лучевой плавки и литья металлов и сплавов в Украине / С. В. Ладохин // *Металл и литье Украины*. – 2012 – № 5. – С. 3-9.
37. Патент України на корисну модель № 93968 «Сплав на основі цирконію підвищеної міцності та жаростійкості Zr-1Nb-1Cr-(0,05-0,1)Y», МПК С22С16/00, С22И9/22. /С. О. Фірстов, Т. Л. Кузнецова, М. П. Бродніковський та ін. – Опубл. 10.11.2015. Бюл. № 21.
38. Особенности выплавки сложнелегированных сплавов на основе титана и циркония в электронно-лучевых гарнисажных установках / А. С. Гладков, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский и др. // *Тр. Международной конференции «Ti-2008 в СНГ»*. РФ, Санкт-Петербург, 18-21 мая 2008 г. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 266-274.
39. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. – Киев: Наук. думка, 1997. – 266 с.
40. Патент України на корисну модель № 88492 Спосіб одержання в електронно-променевої печі зливка складнолегованого сплаву. МПК С22В 9/22 / С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук, М. І. Левицький. – Опубл. 25.03.2014. Бюл. № 6.
41. Патент України на корисну модель № 102535 Електронно-променева установка. МПКС22В9/22, С21С5/56 / С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук, Є. О. Дрозд. – Опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21.
42. Патент України на корисну модель № 92801. Електронно-променева установка для одержання литих заготовок, МПК С21С 5/56 / М. І. Левицький, С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук та ін. – Опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17.
43. *Ладохин С. В.* Электронно-лучевая литейная установка многоцелевого назначения / В. С. Ладохин // *Металл и литье Украины*. – 2014. – № 10. – С. 3-7.



## References

1. *Chernov A. P., Semenov G. P., Krasnoruckij V. S.* et al. Issledovaniya i razrabotki po proizvodstvu circonievyyh splavov i izdelij ih nih v Ukraine. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*. Tr. XIV Mezhdunarodnoy konferencii po fizike radiacionnyh javlenij i radiacionnomu materialovedeniju (Alushta, ijun' 2000 g.). Har'kov, 2000, pp. 98-100 [in Russian].
2. *Zajmovskij A. S., Nikulina A. A., Reshetnikov N. G.* Circonievye splavy v jadernoj jenergetike. Moscow: Jenergoizdat, 194, 256 p. [in Russian].
3. *Azhazha V. M., V'jugov P. N., Lavrinenko S. D.* et al. Circonij i ego splavy: tehnologija proizvodstva, oblasti primenenija. Har'kov: NNC HFTI, 1998, 89 p. [in Russian].
4. Jekspluacionnye svojstva obolochek iz splavov Je110 i Je635 i ih zavisimost' ot himicheskogo sostava i struktury. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*. Ser. Fizika radiacionnyh javlenij i radiacionnogo materialovedenija, 1998, № 1-2, pp. 119-126 [in Russian].
5. *Korovin Ju. F., Chuprinko V. K., Lindt K. A.* et al. Proizvodstvo circonija i gafnija na PO PHZ dlja udovletvorenija potrebnostej atomnoj jenergetiki Ukrainy. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*. Ser.: Fizika radiacionnyh javlenij i radiacionnogo materialovedenija. 1994, № 2 (62), pp. 114-124 [in Russian].
6. *Pylypenko N. N.* Fyzyko-tekhnologichni osnovy stvorennia tsyrkoniiievyykh materialiv ta hafniiu dlia aktyvnykh zon iaderno-enerhetychnykh ustanovok: Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk. Kharkiv, 2012, 32 p. [in Ukrainian].
7. *Paton B. E., Trigub N. P., Ahonin S. V.* Jelektronno-luchevaja plavka tugoplavkih i vysokoreakcionnyh metallov. Kiev: Nauk. dumka, 2008, 312 p. [in Russian].
8. *Ladohin S. V., Shmigidin V. G., Chernjavskij V. B., Matjushenko N. I.* Poluchenie lityh trubnyh zagotovok iz splavov circonija v jelektronno-luchevykh ustanovkakh. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki*. Ser.: Fizika radiacionnyh javlenij i radiacionnogo materialovedenija. 1999, № 2 (77), pp. 21-27 [in Russian].
9. *Azhazha V. M., Borts B. V., Butenko H. M.* et al. Vyrobnnytstvo partii trubnykh zahotovok treks-trub ta vyhotovnennia doslidno-promyslovoi partii tvel'nykh trub zi splavu Zr1Nb iz vitchyznianoj syrovyny. *Nauka ta inovatsii*, 2006, vol. 2, № 6, pp. 18-30 [in Ukrainian].
10. *Ladohin S. V.* Jelektronno-luchevaja plavka v litejnom proizvodstve. Kiev: Izd-vo Stal', 2007, 626 p. [in Russian].
11. *Hladkov A. S.* Osoblyvosti elektronno-promenevoi harnisazhnoi plavky splavu Zr-1Nb i rozrobka tekhnologii vyhotovlennia trubnykh zahotovok: Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Kyiv, 2009, 20 p. [in Ukrainian].

12. *Vakhrusheva V. S.* Formuvannia struktury ta vlastyvostry stal' i splaviv pry vyhotovlenni trub dlia iadernykh enerhetychnykh ustanovok: Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk. Dnipropetrovs'k, 2003, 36 p. [in Ukrainian].
13. *Ladohin S. V., Vahrusheva V. S.* Perspektivy primenenija jelektronno-luchevoj plavki pri poluchenii splavov cirkonija v Ukraine. *Sovremennaja jelektrometallurgija*. 2008, № 4, pp. 22-27 [in Russian].
14. *Paton B. E., Trigub N. P., Ahonin S. V., Zhuk G. V.* Jelektronno-luchevaja plavka titana. Kiev: Nauk. dumka, 2006, 248 p. [in Russian].
15. *Trigub N. P., Ahonin S. V., Zhuk G. V.* et al. Jelektronno-luchevaja plavka nedroblenykh blokov gubchatogo titana. *Sovremennaja jelektrometallurgija*. 2006, № 4, pp. 6-9 [in Russian].
16. *Udris Ja. Ja., Chernov V. A.* Jelektronnaja pushka vysokovol'tnogo tlejushhego razrjada (VTR) kak stabil'nyj istochnik nagreva pri povyshennom gazovydelenii. *Spec. jelektrometallurgija*. 1981, Vyp. 46, p. 73-79 [in Russian].
17. *Tihonovskij A. L., Tur A. A., Ahonin S. V.* et al. Jelektronno-luchevoj pereplav titanovoj gubki – novyj sposob poluchenija titanovykh slitkov i sljablov. *Problemy special'noj jelektrometallurgii*. 1993, № 1, pp. 66-70 [in Russian].
18. *Koval'chuk D. V., Kondratij N. P.* Jelektronno-luchevoj pereplav titana – puti razvitija. *Lit'e i Metallurgija*. 2008, № 3 (48), pp. 275-282 [in Russian].
19. *Sobko-Nestoruk O. E., Tretjak N. G., Chajka N. V.* et al. Novaja pech' VT-02 dlja jelektronno-luchevoj plavki titanovykh splavov, razrabotannaja v MK Antares. *Sovremennaja jelektrometallurgija*. 2012, № 3, pp. 20-25 [in Russian].
20. *Mel'nyk I. V.* Teoretychni ta eksperymental'ni osnovy proektuvannia tekhnolohichnykh hazorozriadnykh dzherel elektroniv: Avtoref. dys. ...d-ra tekhn. nauk. Kyiv, 2008, 39 p. [in Ukrainian].
21. Patent Ukrainy na vynakhid № 82101264. Hazorozriadna elektronna harmata. MPK N01J 37/06. Cherniavskij V. B., Tur A. A., Ladokhin S. V. et al. Publ. 11.03.2008, Bull. № 5 [in Ukrainian].
22. Patent Ukrainy na vynakhid № 90536. Hazorozriadna elektronna harmata. MPK N01J 37/06. Ladokhin S. V., Hladkov A. S., Cherniavskij V. B., Lapshuk T. V. Publ. 11.05.2010, Bull. № 9 [in Ukrainian].
23. Patent Ukrainy na vynakhid № 93625. Hazorozriadna elektronna harmata. MPK N01J 37/06. Cherniavskij V. B., Ladokhin S. V., Semenets' V. A. et al. Publ. 25.02.2011, Bull. № 4 [in Ukrainian].
24. Patent Ukrainy na korynsnu model' № 74113. Hazorozriadna elektronna harmata. MPK N01J 37/06. Cherniavskij V. B., Ladokhin S. V., Semenets' V. A. et al. Publ. 25.10.2012, Bull. № 20 [in Ukrainian].
25. Patent Ukrainy na korynsnu model' № 83313. Hazorozriadna elektronna harmata. MPK N01J 37/06. Ladokhin S. V., Lapshuk T. V., Hladkov A. S., Smirnov M. Yu. Publ. 10.09.2013, Bull. № 17 [in Ukrainian].
26. Patent Ukrainy na vynakhid № 105264. Hazorozriadna elektronna harmata. MPK N01J 37/06. Ladokhin S. V., Lapshuk T. V. Publ. 25.04.2014, Bull. № 8 [in Ukrainian].
27. Patent Ukrainy na korynsnu model' № 93183. Hazorozriadna elektronna harmata. MPK N01J 37/06. S. V. Ladokhin. Publ. 25.09.2014, Bull. № 18 [in Ukrainian].
28. Patent Ukrainy na vynakhid № 102765. Hazorozriadna elektronna harmata. MPK N01J 37/06. Tutyk V. A., Ladokhin S. V., Hasyk M. I., Maliavin A. H. Publ. 12.08.2013, Bull. № 15 [in Ukrainian].
29. *Lavrynenko S. D., Ladokhin S. V., Pylypenko N. N.* et al. Vyplavka splava KTTs110 v jelektronno-luchevoj harnysazhnoj ustanovce s yspol'zovanyem pushky vysokovol'tnogo tleiusheho razriada. *VANT. Seriya: Vakuum, chystye metally, sverkhprovodnyky*. 2014, № 1 (89), pp. 151-158 [in Russian].
30. *Tuhaj S. B.* Impul'sni rezhymy roboty tekhnolohichnykh jelektronno-promeneynykh harmat vysokovol'tnogo tliiuchoho rozriadu: Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk. Kyiv, 2013, p. 20 [in Ukrainian].
31. *Ladohin S. V., Lapshuk T. V.* Tendencii razvitija jelektronno-luchevoj litejnoj tehnologii i sozdanie novogo oborudovannija dlja plavki i lit'ja metallov i splavov. *Processy lit'ja*. 2014, № 6, pp. 68-74 [in Russian].
32. Patent Ukrainy na vynakhid № 98904. Elektronno-promeneva lyvarna ustanovka. MPK S22S 9/22, S21S5Ye56. Ladokhin S. V., Lapshuk T. V., Hladkov A. S., Smirnov M. Yu. Publ. 25.06.2012, Bull. № 12 [in Ukrainian].
33. *Ladohin S. V.* Jelektronno-luchevye litejnye ustanovki novogo pokolenija: konstruktivne osobennosti i oblasti primenenija. *Processy lit'ja*. 2013, № 4, pp. 56-70 [in Russian].
34. Patent Ukrainy na vynakhid № 105577. Sposib rafinuvannia metaliv i splaviv pry jelektronno-promeneyij harnisazhnykh plavtsi i ustanovka dlja joho zdijsnennia. MPK S21S 5/56. Ladokhin S. V., Lapshuk T. V. Publ. 26.05.2014, Bull. № 10 [in Ukrainian].
35. Patent Ukrainy na vynakhid № 106655. Sposib sumischenoi vakuumno-induktsijnoi i jelektronno-promeneyvoj plavky i lyttia splaviv i ustanovka dlja joho zdijsnennia. MPK S21S 5/56. Ladokhin S. V., Lapshuk T. V. Publ. 25.09.2014, Bull. № 18 [in Ukrainian].
36. *Ladohin S. V.* Perspektivnye tehnologii jelektronno-luchevoj plavki i lit'ja metallov i splavov v Ukraine. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2012, № 5, pp. 3-9 [in Russian].

37. Patent Ukrainy na korysnu model' № 93968. Splav na osnovi tsyrkoniiu pidvyschenoi mitsnosti ta zharostijkosti Zr-1Nb-1Cr-(0,05-0,1)Y. MPK S22S16/00, S22Y9/22. Firstov S. O., Kuznietsova T. L., Brodnikovs'kyj M. P. et al. Publ. 10.11.2015, Bull. № 21 [in Ukrainian].
38. Gladkov A. S., Levickij N. I., Chernjavskij V. B. et al. Osobennosti vyplavki slozhnolegirovannyh splavov na osnove titana i cirkonija v jelektronno-luchevyh garnisazhnyh ustanovkah. Tr. Mezhdunarodnoj konferencii: Ti-2008 v SNG. RF, Sankt-Peterburg, 18-21 may 2008. Sankt-Peterburg, 2008, pp. 266-274 [in Russian].
39. Paton B. E., Trigub N. P., Kozlitin D. A. et al. Jelektronno-luchevaja plavk. Kiev: Nauk. dumka, 1997, 266 p. [in Russian].
40. Patent Ukrainy na korysnu model' № 88492. Sposib oderzhannia v elektronno-promenevij pechi zlyvka skladnolehovanoho splavu. MPK S22V9/22. Ladokhin S. V., Lapshuk T. V., Levyts'kyj M. I. Publ. 25.03.2014, Bull. № 6 [in Ukrainian].
41. Patent Ukrainy na korysnu model' № 102535. Elektronno-promeneva ustanovka. MPKS22V9/22, S212S5/56. Ladokhin S. V., Lapshuk T. V., Drozd Y. O. Opubl. 10.11.2015, Biul. № 21 [in Ukrainian].
42. Patent Ukrainy na korysnu model' № 92801. Elektronno-promeneva ustanovka dlia oderzhannia lytykh zahotovok. MPK S21S5/56. Levyts'kyj M. I., Ladokhin S. V., Lapshuk T. V. et al. Publ. 10.09.2014, Bull. № 17 [in Ukrainian].
43. Ladokhin S. V. Jelektronno-luchevaja litejnaja ustanovka mnogocelevogo naznachenija. Metall i lit'e Ukrainy. 2014, № 10, pp. 3-7 [in Russian].

Поступила 26.01.2016

***К сведению читателей***

***и подписчиков!***

***Телефон редакции***

***журнала «Процессы литья»:***

***(044) 424-04-10***