

Электронно-лучевые установки для плавки и литья циркониевых сплавов

Рассмотрены схемы электронно-лучевых установок, обеспечивающих выплавку циркониевых сплавов для ядерно-топливного цикла. Предложено проводить плавление и предварительное рафинирование сплавов в среднем вакууме при обогреве пушками высоковольтного тлеющего разряда, а окончательное рафинирование сплавов и формирование из них слитков и литых заготовок – в высоком вакууме при обогреве термокатодными пушками.

Ключевые слова: циркониевые сплавы, электронно-лучевая установка, пушка высоковольтного тлеющего разряда, термокатодная пушка, слиток, заготовка.

Намечаемый в нашей стране переход на получение циркония методом магнийтермического восстановления, известный на Западе как метод Кролла [1], предполагает, что производство слитков циркония и сплавов на его основе будет проводиться из получаемой указанным методом губки с использованием вакуумно-дуговой плавки (ВДП). Такая технология применяется в настоящее время всеми странами-производителями циркония и его сплавов в мире, за исключением России и Украины, в которых цирконий получают методами, соответственно, электролитического [2] и кальцийтермического восстановления [3]. При этом в России слитки циркония и циркониевых сплавов также производят с использованием ВДП, а в Украине для этой цели оказалось удобным применять электронно-лучевую плавку (ЭЛП), благодаря чему накоплен уникальный опыт ЭЛП циркония, которого не имеют другие страны.

Поскольку ЭЛП обеспечивает более эффективное рафинирование, чем ВДП, представляется целесообразным использовать эту технологию для получения слитков циркония и его сплавов также из губки. В пользу такого подхода говорит успешный опыт получения из губки титана слитков этого металла и сплавов на его основе, который накоплен в нашей стране [4]. Целесообразность использования электронно-лучевых технологий для получения слитков и литых заготовок циркония показана в работах [5, 6], но данная статья имеет целью обосновать выбор наиболее подходящего для этого оборудования, поскольку предлагаемые ранее решения представляются недостаточно обоснованными.

Основным недостатком предлагавшихся для плавки и литья циркония и циркониевых сплавов электронно-лучевых установок является то, что рафинирование металла и формирование слитка или литых заготовок осуществляется в среднем вакууме. Это обусловлено тем, что в разрабатываемых в последнее время электронно-лучевых установках откачку плавильных камер предпочитают осуществлять бустерными насосами [7], что позволяет существенно снизить стоимость плавильных агрегатов. Аналогичную цель преследует и переход на прове-

дение нагрева средневакуумными пушками высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) вместо более дорогих термокатодных пушек [8]. Однако проведение процесса в среднем вакууме ухудшает условия рафинирования металла, и это может стать серьезным ограничивающим фактором для получения сплавов циркония.

Сущность предлагаемого подхода к созданию установок для ЭЛП циркония и его сплавов, которые предполагается применять в ядерной энергетике, состоит в том, что бустерная откачка и пушки ВТР используются только на стадии плавления и предварительного рафинирования расплава. На стадии окончательного рафинирования, формирования сплава и получения слитка (заготовки) вакуум обеспечивается диффузионными насосами при осуществлении нагрева термокатодными пушками. Предложения об использовании вместо термокатодных пушек высоковакуумных пушек ВТР пока практического значения не имеют, поскольку такие пушки еще находятся в процессе разработки. Но в перспективе использование высоковакуумных пушек ВТР представляет безусловный интерес.

Изложенный подход предполагает, что плавильные камеры электронно-лучевых установок должны состоять, по меньшей мере, из двух зон – предварительного и окончательного рафинирования. Отметим, что разработка многокамерных установок ранее проводилась достаточно часто в основном с целью использования на стадии плавления и предварительного рафинирования более простых и дешевых способов нагрева, чем электронно-лучевой – индукционного, вакуумно-дугового, плазменного. Крайним случаем такого подхода было применение так называемой «жидкой завалки», когда плавление исходных материалов осуществлялось вообще вне электронно-лучевой установки, в которую на рафинирование подавался расплав. Установки с «жидкой завалкой» предполагалось использовать для рафинирования и получения слитков стали и жаропрочных сплавов. На практике установки такого рода были созданы в США – печь CRP-10T [9] и в СССР – холодногоподовая печь ХЭЛП-1 [10], но дальнейшего развития это

направление не получило, и первая из указанных установок была демонтирована, а вторая – перепроектирована в литейную установку.

Особенностью рассматриваемых ниже установок для плавки и литья циркониевых сплавов является то, что, наряду с наличием двух рафинировочных зон, они отличаются невысокой производительностью, так как не предполагают обеспечивать получение многотоннажных слитков, что характерно, например, для установок плавки и литья титановых сплавов. Кроме того, учитывая их специфическое предназначение для целей ядерной энергетики, представляет интерес получение в них не только слитков, но и литых заготовок, прежде всего трубных. В связи с изложенным, для практической разработки предложены три варианта установок – для получения слитков, для получения литых заготовок и комбинированная – для получения как слитков, так и литых заготовок.

Плавильные камеры всех трех вариантов установок разделены на две указанные выше зоны предварительного и окончательного рафинирования, причем зоны предварительного рафинирования у всех трех вариантов по существу идентичны. Они включают устройства подачи шихтовых материалов на переплав, промежуточные емкости и устройства ввода в промежуточную емкость легирующих элементов. Разрежение в этой зоне обеспечивается бустерными насосами, плавление осуществляется пушками ВТР. Для работы могут использоваться как средневакуумные, так и низковакуумные пушки ВТР, которые могут устанавливаться на позиции нагрева в зависимости от разрежения в плавильной камере путем их перемещения, что является одним из существенных преимуществ этих пушек. Отметим, что в настоящее время уже имеются предложения по конструктивному исполнению как низковакуумных пушек ВТР [11, 12], так и установки с перемещающимися пушками ВТР [13], хотя в металле эти разработки пока не осуществлялись.

Зоны окончательного рафинирования у разных вариантов существенно различны, но общим для них является то, что нагрев осуществляется термокатодными пушками, разрежение создается диффузионными насосами, а рафинирование и выплавка сплавов проводится в гарнисажных тиглях с электромагнитным перемешиванием расплава (ЭМП). Для обеспечения выплавки сложнолегированных сплавов предусматривается оснащение этих зон устройствами для ввода в расплав легирующих элементов как в жидком виде за счет сплавления электронным лучом, так и в твердом, в том числе в металлических оболочках.

На рис. 1 приведена схема установки для получения слитков, в которой первоначально предусматривалось, что формирование слитков будет проводиться в зоне окончательного рафинирования в проходном кристаллизаторе, путем слива расплава непосредственно из промежуточной емкости по традиционной для ЭЛП технологии, то есть без использования гарнисажного тигля с ЭМП. Вытягивание формируемого слитка проводится в камеру слитка, которая размещается под кристаллизатором и оснащена механизмом вытягивания слитка. Сложность

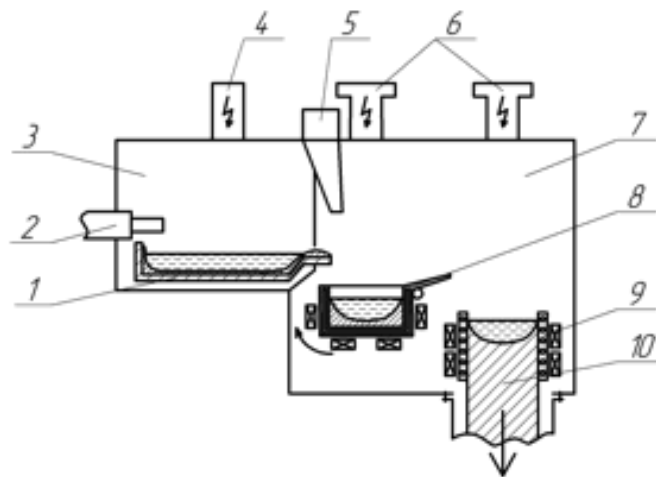


Рис. 1. Схема установки для получения слитков: 1 – промежуточная емкость; 2 – устройство завалки шихты; 3 – зона предварительного рафинирования; 4 – пушка ВТР; 5 – устройство ввода легирующих; 6 – термокатодная пушка; 7 – зона окончательного рафинирования; 8 – гарнисажный тигель с системой ЭМП; 9 – кристаллизатор с системой ЭМП; 10 – слиток

обеспечения требуемого состава сплава в этом случае состоит в том, что оно достигается за счет соответствующей шихтовки переплавляемой завалки в промежуточной емкости, в которую вводят легирующие элементы с учетом их испарения, как это отработано при получении титановых сплавов [4]. Принципиально важным моментом такой технологии является разработка адекватных математических моделей процесса для всех стадий его проведения. К сожалению, для сложнолегированных циркониевых сплавов, как российских типа Э635, так и западноевропейских типа циркалоев [1], такие модели пока не разработаны, поскольку отсутствует практика их электронно-лучевой выплавки. Поэтому использование гарнисажного тигля с ЭМП, в том числе так, как это показано на рис. 1, в настоящее время является наиболее надежным методом выплавки сложнолегированного сплава [14]. Преимуществом такого подхода является также возможность обеспечения более благоприятных условий формирования слитка, в том числе за счет порционного слива расплава из тигля.

Установка, схема которой приведена на рис. 2, представляет собой чисто литейный агрегат, первоначальная схема которого была предложена в работе [15]. В этом агрегате в зоне окончательного рафинирования установлен тигель с системой электромагнитного перемешивания, в который переливается расплав из промежуточной емкости и слив расплава из которого осуществляется через отверстие в днище или через сливной носок путем наклона тигля. Возможность проведения разливки расплава через отверстие в днище и через сливной носок позволяет осуществлять выплавку как простого по составу, так и сложнолегированного сплава. Особенностью установки является также наличие двух камер литейных форм, размещенных под тиглем и сбоку со стороны сливного носка тигля, что в сочетании с возможностью выплавки разных по составу сплавов открывает перспективы многоцелевого использования агрегата.

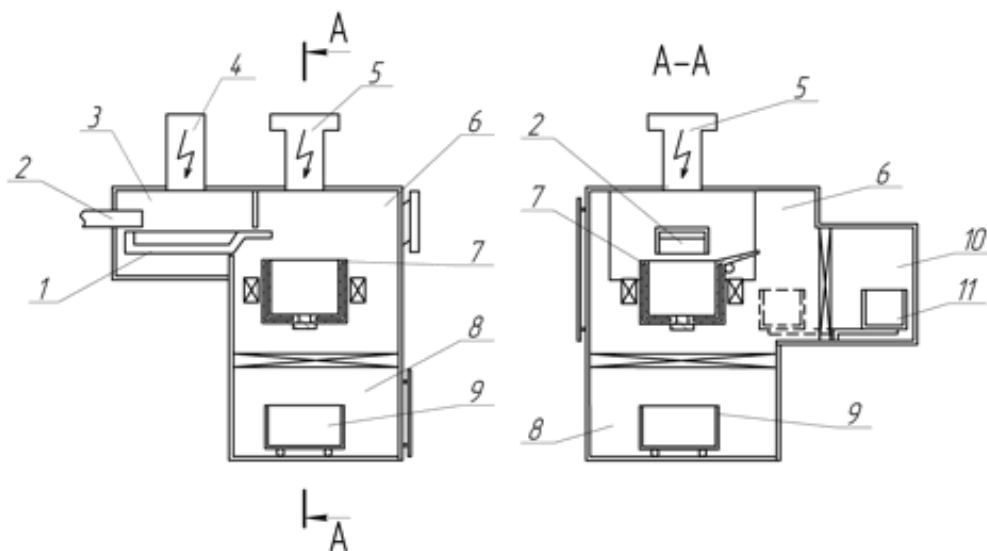


Рис. 2. Схема установки для получения литых заготовок: 1 – промежуточная емкость; 2 – устройство завалки шихты; 3 – зона предварительного рафинирования; 4 – пушка ВТР; 5 – термокатодная пушка; 6 – зона окончательного рафинирования; 7 – гарнисажный тигель с системой ЭМП; 8 – камера литейной формы; 9 – литейная форма; 10 – камера литейной формы; 11 – литейная форма

На рис. 3 приведена схема установки, которая может обеспечить получение как литой заготовки, так и слитка [16]. В зоне окончательного рафинирования смонтирован тигель с системой электромагнитного перемешивания, который имеет два сливных носка, через которые расплав может сливаться либо в литейную форму, либо в кристаллизатор. Со стороны сливного носка, по которому расплав сливается в литейную форму, размещена камера литейных форм, а под кристаллизатором – камера слитка с механизмом вытягивания слитка из кристаллизатора. В принципе возможно по образцу рассмотренной выше установки предусмотреть размещение под тиглем еще одной камеры литейных форм, но в этом случае в тигле должно быть выполнено сливное отверстие в днище. Хотя в настоящее время уже имеются разработки тиглей с возможностью разливки расплава как

через сливной носок, так и через сливное отверстие в днище, конструктивное исполнение и эксплуатация установки с такой комбинированной разливкой заметно усложняются и ее практическое применение представляется целесообразным в основном для исследовательских целей.

Выплавка сложнoleгированных сплавов в рассмотренных установках обеспечивается за счет расплавления губки и легирования образующегося расплава циркония в промежуточной емкости элементами с низкой упругостью пара, перелива полученного сплава в тигель в зоне окончательного рафинирования и проведения легирования расплава в тигле элементами с высокой упругостью пара. Формирование литого изделия или слитка определяется заливкой выплавленного в тигле сплава в форму или кристаллизатор в соответствии с поставленной задачей.

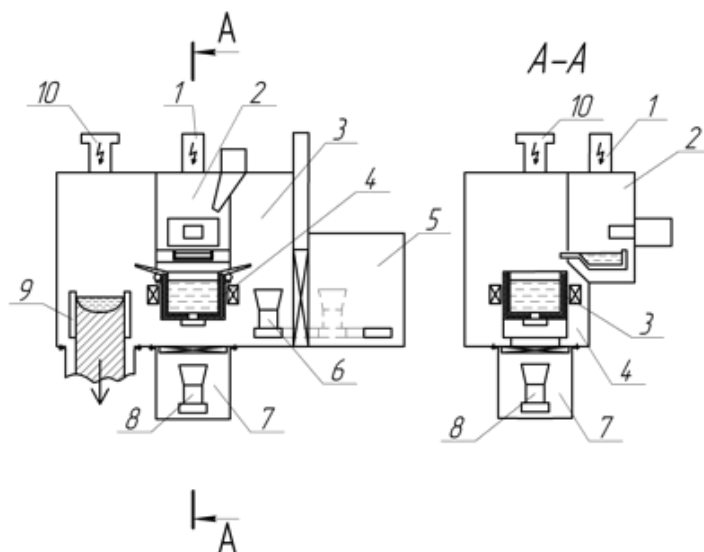


Рис. 3. Схема установки для получения литых заготовок и слитка: 1 – пушка ВТР; 2 – зона предварительного рафинирования; 3 – зона окончательного рафинирования; 4 – гарнисажный тигель с системой ЭМП, двумя сливными носками и сливным отверстием в днище; 5 – камера литейной формы; 6 – литейная форма; 7 – камера литейной формы; 8 – литейная форма; 9 – кристаллизатор; 10 – термокатодная пушка

Выше обращалось внимание на то, что для разрабатываемых новых установок для выплавки сплавов циркония представляет интерес разработка пушек ВТР, которые могли бы устойчиво работать при высоком вакууме в плавильной камере. Применение высоковакуумных пушек ВТР позволило бы не только обеспечить более надежное проведение технологического процесса, но и упростить конструктивное исполнение установки. В частности, появилась бы возможность выполнять пушки перемещающимися благодаря отсутствию диффузионных насосов, что имеет смысл для установок типа показанной на рис. 3. В настоящее время уже имеются предложения по разработке таких пушек, основанные на их оснащении промежуточными камерами для подачи рабочего или инертного газа [17].

Другим представляющим интерес вопросом, касающимся пушек ВТР, является установление возможности проведения нагрева в среднем и низком вакууме одним нагревателем вместо предлагаемого использования перемещающихся и взаимно заменяющих друг друга средне- и низковакуумных пушек. На рис. 4 приведена принципиальная схема такого нагревателя, особенность которого состоит в том, что он включает средне- и низковакуумные пушки ВТР, имеющие общий лучевод. Этот лучевод выполнен в виде тройника, два патрубка которого стыкуются с пушками, а третий – с технологической камерой. На тройнике размещены катушки поворота луча, на всех патрубках – катушки фокусировки луча, а на патрубке, стыкующемся с технологической камерой, – катушки развертки луча. Преимуществом комбинированного газоразрядного нагревателя является то,

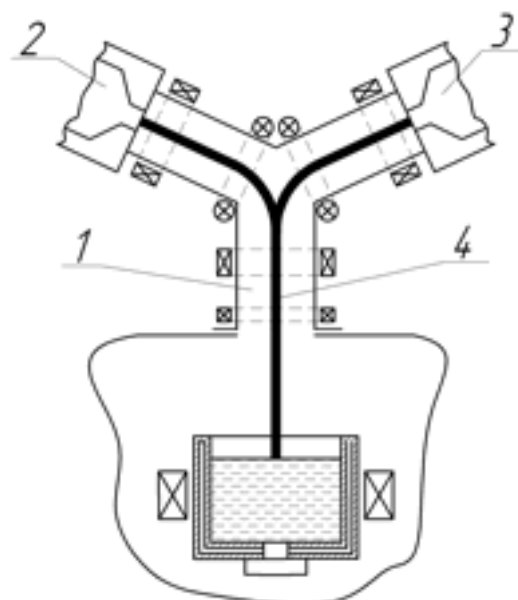
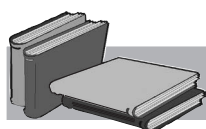


Рис. 4. Принципиальная схема электронно-лучевого нагревателя: 1 – лучевод; 2 – низковакуумная пушка ВТР; 3 – средневакуумная пушка ВТР; 4 – электронный луч

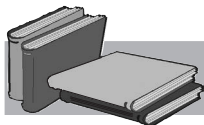
что он может функционировать в условиях изменения давления в плавильной камере от ~ 1000 Па до 10^{-3} Па. Использование такого нагревателя должно не только обеспечить производительность установки, но и упростить ее конструктивное исполнение благодаря исключению необходимости перемещения пушек.



ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 254 с.
3. 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 повреждений и радиационное материаловедение. – 1994. – № 2 (62). – С. 114–124.
4. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В., Жук Г. В. Электронно-лучевая плавка титана. – К.: Наукова думка, 2006. – 246 с.
5. Ладохин С. В., Вахрушева В. С. Перспективы применения электронно-лучевой плавки при получении сплавов циркония в Украине // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 4. – С. 22–27.
6. Ладохин С. В., Лапшук Т. В., Дрозд Е. А. Получение сплавов циркония для ядерно-топливного цикла Украины с использованием электронно-лучевых технологий // Процессы литья. – 2016. – № 1. – С. 54–67.
7. Электронно-лучевая плавка / Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Козлитин Д. А. и др. – К.: Наукова думка, 1997. – 265 с.
8. Чернов В. Л. Мощные электронно-лучевые пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) и оборудование на их основе // Тр. 9-го Междунар. симпозиума «Электротехника 2030», Москва, 29-31 мая 2007, доклад 7.10.
9. Хант С. А., Смит Г. Р., Коад Б. К. Комбинированная вакуумно-индукционная и электронно-лучевая печь для рафинирования и разлива стали // Сб. «Вакуумная металлургия». – М.: Металлургия, 1973. – С. 143–148.
10. Ладохин С. В., Шишкарёв Э. Е. Опытная холодноподовая электронно-лучевая печь ХЭЛП-1 / Специальная электрометаллургия. – 1980. – № 43. – С. 63–69.
11. Тутик А. В. Низьковакуумні газорозрядні електронні гармати і їх використання в електронно-променевих технологіях: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Харків, 2009. – 40 с.
12. Патент України на винахід № 102765 «Газорозрядна електронна гармата», МПК H01J 37/06, H01J 37/065 / В. А. Тутик, С. В. Ладохін, М. І. Гасик, А. Г. Малявін. – Опубл. 12.08.2013. Бюл. № 15.
13. Патент України на винахід № 98904 «Електронно-променева ливарна установка», МПК C22B9/22, C21C5/56 / С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук, А. С. Гладков, М. Ю. Смірнов. – Опубл. 25.06.2012. Бюл. № 12.

14. Патент України на корисну модель № 88492 «Спосіб одержання в електронно-променевої печі зливка складнолегового сплаву», МПК С22В 9/22 / С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук, М. І. Левицький. – Оpubл. 25.03.2014. Бюл. № 6.
15. 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. – Оpubл. 10.09.2014. Бюл. № 17.
16. Патент України на корисну модель № 108478 «Електронно-променева установка для отримання зливок і литих виробів», МПК С21С 5/56, С22В 9/22. / С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук, Є. О. Дрозд. – Оpubл. 25.07.2016. Бюл. № 14.
17. Патент України на винахід № 90536 «Газорозрядна електронна гармата», МПК Н01J 37/06 / С. В. Ладохін, А. С. Гладков, В. Б. Чернявський та ін. – Оpubл. 11.05.2010. Бюл. № 9.



REFERENCES

1. *Azhazha V. M., V'iugov P. N., Lavrinenko S. D. et al. (1998). Cirkonii i ego splavy: tekhnologiiia proizvodstva, oblasti primeneniia [Zirconium and its alloys: production technology, applications]. Khar'kov: NNTC KhFTI [in Russian].*
2. *Zaimovskii A. S., Nikulina A. V., Reshetnikov N. G. (1994). Cirkonievye splavy v yadernoi energetike [Zirconium alloys in nuclear power]. Moscow: Energoatomizdat, 254 p. [in Russian].*
3. *Korovin Yu. F., Chuprinko V. K., Lindt K. A. et al. (1994). Proizvodstvo cirkonii i gafniia na PO PHZ dlia udovletvoreniia potrebnosti atomnoi energetiki Ukrainy [The production of zirconium and hafnium at PO PHZ to meet the needs of nuclear energy in Ukraine]. Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie, no. 2 (62), pp. 114–124 [in Russian].*
4. *Paton B. E., Trigub N. P., Akhonin S. V., Zhuk G. V. (2006). Elektronno-luchevaia plavka titana [Electron beam melting of titanium]. Kyiv: Naukova dumka, 246 p. [in Russian].*
5. *Ladokhin S. V., Vakhrusheva V. S. (2008). Perspektivy primeneniia elektronno-luchevoi plavki pri poluchenii splavov tsirkonii v Ukraine [Perspectives of application of electron beam melting in the production of zirconium alloys in Ukraine]. Sovremennaia elektrometallurgiiia, no. 4, pp. 22–27 [in Russian].*
6. *Ladokhin S. V., Lapshuk T. V., Drozd E. A. (2016). Poluchenie splavov tsirkonii dlia yaderno-toplivnogo tsikla Ukrainy s ispol'zovaniem elektronno-luchevykh tekhnologii [Receiving of zirconium alloys for the nuclear fuel cycle of Ukraine with using electron-beam technologies]. Protsessy lit'ia, no. 1, pp. 54–67 [in Russian].*
7. *Paton B. E., Trigub N. P., Kozlitiin D. A. et al. (1997). Elektronno-luchevaia plavka [Electron beam melting]. Kyiv: Naukova dumka, 265 p. [in Russian].*
8. *Chernov V. L. (2007). Moshchnye elektronno-luchevye pushki vysokovol'tnogo tleiushchego razriada (VTR) i oborudovanie na ikh osnove [Powerful electron beam guns of high-voltage glow discharge and equipment based on them]. Tr. 9-go Mezhdunar. simpoziuma «Elektrotekhnika 2030», Moskva, 29-31 maja 2007, doklad 7.10 [in Russian].*
9. *Khant S. A., Smit G. R., Koad B. K. (1973). Kombinirovannaia vakuumno-induktsionnaia i elektronno-luchevaia pech' dlia rafinirovaniia i razlivki stali [Combined vacuum-induction and electron-beam furnace for refining and pouring steel]. Sb. «Vakuumnaia metallurgiiia». Moscow: Metallurgiiia, pp. 143–148 [in Russian].*
10. *Ladokhin S. V., Shishkarev Ye. E. (1980). Opytnaia kholodnopolodovaia elektronno-luchevaia pech' Help-1 [Experienced cold-bearer electron-beam furnace HELP-1]. Special'naia elektrometallurgiiia, no. 43, pp. 63–69 [in Russian].*
11. *Tutik A. V. (2009). Nyz'kovakuumni hazorozriadni elektronni harmaty i ikh vykorystannia v elektronno-promenevykh tekhnolohiiakh [Low vacuum discharge electron guns and their use in electron beam technology] Extended abstract of Doctor's thesis, Kharkiv, 40 p. [in Ukrainian].*
12. *Patent Ukrainy na vynakhid № 102765 «Hazorozriadna elektronna harmata» [Discharge electron gun]. MPK N01J 37/06, N01J 37/065. V. A. Tutik, S. V. Ladokhin, M. I. Gasyk, A. G. Maliavin. Opubl. 12.08.2013. Biul.no. 15 [in Ukrainian].*
13. *Patent Ukrainy na vynakhid № 98904 «Elektronno-promeneva lyvarna ustanovka» [Electron beam casting plant]. MPK S22V9/22, S21S5/56. S. V. Ladokhin, T. V. Lapshuk, A. S. Hladkov, M. Yu. Smirnov. Opubl. 25.06.2012. Biul. no. 12 [in Ukrainian].*
14. *Patent Ukrainy na korysnu model' № 88492 «Sposib oderzhannia v elektronno-promenevii pechi zlyvka skladnolekhevanoho splavu» [Method of production in electron-beam furnace the ingot of complex alloys]. MPK S22V 9/22. S. V. Ladokhin, T. V. Lapshuk, M. I. Levyts'kyi. Opubl. 25.03.2014. Biul. no. 6 [in Ukrainian].*
15. *Patent Ukrainy na korysnu model' № 92801 «Elektronno-promeneva ustanovka dlia oderzhannia lytykh zagotovok» [Electron beam installation for receiving the cast billets]. MPK S21S 5/56. M. I. Levyts'kyi, S. V. Ladokhin, T. V. Lapshuk et al. Opubl. 10.09.2014. Biul. no. 17 [in Ukrainian].*
16. *Patent Ukrainy na korysnu model' № 108478 «Elektronno-promeneva ustanovka dlia otrymannia zlyvkiv i lytykh vyrobiv» [Electron beam installation for obtaining the ingots and cast products]. MPK S21S 5/56, S22V 9/22. S. V. Ladokhin, T. V. Lapshuk, Ye. O. Drozd. Opubl. 25.07.2016. Biul. no. 14 [in Ukrainian].*
17. *Patent Ukrainy na vynakhid № 90536 «Hazorozriadna elektronna harmata» [Discharge electron gun]. MPK N01J 37/06. S. V. Ladokhin, A. S. Hladkov, V. B. Cherniavs'kyi et al. Opubl. 11.05.2010. Biul. no. 9 [in Ukrainian].*

Анотація

Ладохін С. В.

Електронно-променевої установки для плавки і лиття цирконієвих сплавів

Розглянуто схеми електронно-променевих установок, які забезпечують виплавку цирконієвих сплавів для ядерно-паливного циклу. Запропоновано проводити плавлення і попереднє рафінування сплавів у середньому вакуумі при обігріві гарматами високовольтного тліючого розряду, а остаточне рафінування сплавів і формування з них зливків і литих виробів – у високому вакуумі при обігріві термокатодними гарматами.

Ключові слова

Цирконієві сплави, електронно-променева установка, гармата високовольтного тліючого розряду, термокатодна гармата, зливки, заготовка.

Summary

Ladokhin S.

Electron-beam installations for melting and casting of zirconium alloys

The schemes (diagrams) of electron-beam installations for zirconium alloys melting for nuclear fuel purposes are considered. It is proposed to conduct melting and preliminary refining of alloys in medium vacuum at heating by high-voltage glow discharge guns and final refining and the forming of ingots and billets is proposed to conduct in high vacuum at heating by thermocathode guns.

Keywords

Zirconium alloys, electron-beam installation, high-voltage glow discharge gun, thermocathode gun, ingot, billet.

Поступила 03.05.17