

Пути усовершенствования технологии электронно-лучевой гарнисажной плавки сложнолегированных сплавов

Рассмотрены особенности получения сложнолегированных сплавов титана и циркония методом электронно-лучевой гарнисажной плавки. Описаны оборудование и приёмы шихтовки и проведения плавки, которые обеспечивают более стабильное протекание технологического процесса.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка, гарнисажный тигель, титан, цирконий, сплав, шихта, расплав

Электронно-лучевая гарнисажная плавка (ЭЛГП) создавалась для получения литых изделий из тугоплавких металлов и сплавов на их основе, хотя на практике она используется также для плавки и литья металлов и сплавов, обычно выплавляемых в индукционных печах (жаропрочные сплавы, стали, медь) с целью обеспечения более эффективного рафинирования [1]. В нашей стране разработки и исследования по ЭЛГП проводятся в основном в ФТИМС НАН Украины, причём главное внимание в последние годы уделяется получению литья ответственного назначения из титановых сплавов и в меньшей степени из циркониевых сплавов (в рамках решения задачи создания ядерно-топливного цикла [2]). Особенностью проводимых в этих направлениях работ в последнее время является переход к выплавке многокомпонентных сплавов титана – 10 и более компонентов [3] и циркония – 6-7 компонентов [4].

Получение таких сплавов связано с необходимостью усовершенствования технологии проведения процесса по сравнению с применявшейся ранее при получении сплавов менее сложных композиций. В принципе усовершенствование предполагает корректировку отдельных технологических операций с учётом наличия в сплавах легирующих элементов с разными физико-химическими свойствами, в первую очередь, существенно отличающимися величинами упругости пара, плотности, температуры плавления. Однако большое значение имеет также выбор наиболее подходящего оборудования, которое должно обеспечивать стабильность проведения технологического процесса. Поэтому ниже с этих точек зрения анализируются все основные этапы проведения плавки – подготовка оборудования, подготовка шихты и завалка её в тигель, проведение плавки. При проведении анализа использованы материалы, которые были накоплены за последние годы в области как технологии ЭЛГП, так и применяемого оборудования, с учётом того, что по состоянию на начало текущего столетия материалы по этим вопросам достаточно полно рассмотрены и обобщены в [1].

Подготовка оборудования. Этот этап включает операции, обеспечивающие работоспособность установки. При выплавке сложнолегированных сплавов в случае нормально функционирующей установки

успешное проведение процесса зависит от устойчивой работы источника нагрева (электронно-лучевой пушки) и плавильно-заливочного тигля.

Выбор и подготовка к плавке пушек определяются главным образом требованиями к обеспечению необходимой (или желательной) степени разрежения в плавильной камере. Поскольку в настоящее время при выплавке титановых сплавов всё больше проявляется тенденция к использованию отходов и губки, а в случае выплавки циркониевых сплавов также ожидается переход к использованию губки [5], в ближайшем будущем предпочтения будут отдаваться применению пушек высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) как более устойчиво работающим в условиях обильного газовыделения, тем более, что в последние годы разработаны новые мощные пушки такого типа и специальное оборудование для их эксплуатации [6].

Относительно тиглей для гарнисажной плавки следует отметить, что имеющийся опыт плавки таких сплавов как титан и цирконий в подобных тиглях [1] свидетельствует об их вполне надёжной работоспособности. В то же время в связи с тенденцией к увеличению ёмкости плавильных тиглей для ЭЛГП, что обуславливает увеличение площади открытой поверхности ванны, достаточно актуальным становится вопрос об оснащении тиглей тепловыми экранами. Этому вопросу уделялось серьёзное внимание на заре создания гарнисажной плавки [7], но позднее работы в этом направлении перестали проводиться из-за усложнения конструкции тигля.

Что касается схемы разлива расплава, то в случае выплавки сложнолегированных сплавов следует ориентироваться на тигли со сливным носком, поскольку при сливе расплава через отверстие в днище тигля пока невозможно фиксировать точное время расплавления гарнисажа в отверстии.

Подготовка шихты и порядок завалки шихтовых материалов в тигель. Подготовка шихты к плавке включает сортировку исходных материалов, их очистку от загрязнений, окислы, обезжиривание и т. д. Особыми случаями подготовки являются такие, когда в составе шихты имеются порошок и губка. В обоих случаях представляется целесообразным использовать эти материалы в виде брикетов,

которые удобно загружать в тигель с обеспечением возможно более компактного размещения. Брикетты из порошка получают прессованием (после смешения с требуемым соотношением отдельных компонентов), а из губки – путём её предварительного переплава с формированием заготовок нужных размеров.

Завалка шихты в тигель является технологической операцией, которая оказывает влияние на проведение последующего процесса плавки, хотя и менее заметное, чем, например, в случае индукционной плавки [8].

Принципиальной особенностью завалки шихты в тигель при ЭЛГП является использование специально выплавляемых гарнисажных ёмкостей (так называемых «съёмных гарнисажей»), применение которых обеспечило более стабильное получение сложнелегированных сплавов, в том числе из отходов производства [9]. Поэтому подготовка таких гарнисажей в настоящее время рассматривается как желательная технологическая операция. Общие виды некоторых съёмных гарнисажей приведены на рис. 1. Отметим, что съёмные гарнисажи желательнее иметь того же состава, что и выплавляемый сплав, хотя на практике часто используют съёмные гарнисажи из металла-основы.

Что касается непосредственно завалки шихтовых материалов в тигель, то в практике ЭЛГП применяются несколько её вариантов, что определяется видом исходных материалов. На рис. 2 представлены возможные схемы укладки материалов.

Наиболее простым вариантом является такой, при котором обеспечивается равномерное смешение отдельных составляющих шихты, прошедших предварительную очистку и дробление на фракции, удобные для смешения (рис. 2, а). Такой подход является общепризнанным также при получении слитков титановых сплавов в металлургических электронно-лучевых установках [10], а в последнее время – при выплавке высокопрочных титановых сплавов с дисперсионным упрочнением в глуходонных секционных кристаллизаторах с электромагнитным перемешиванием расплава [11].

Однако при ЭЛГП сложнелегированных титановых сплавов различного состава, содержащих несколько тугоплавких элементов

(например, цирконий, ванадий, ниобий, молибден) и более легкоплавких (кремний, олово, железо), оказалось целесообразным последние размещать в предварительно сформированном съёмном гарнисаже на его дне, а тугоплавкие – сверху основной титановой шихты (рис. 2, б). При таком размещении компонентов шихты тугоплавкие материалы сплавляются

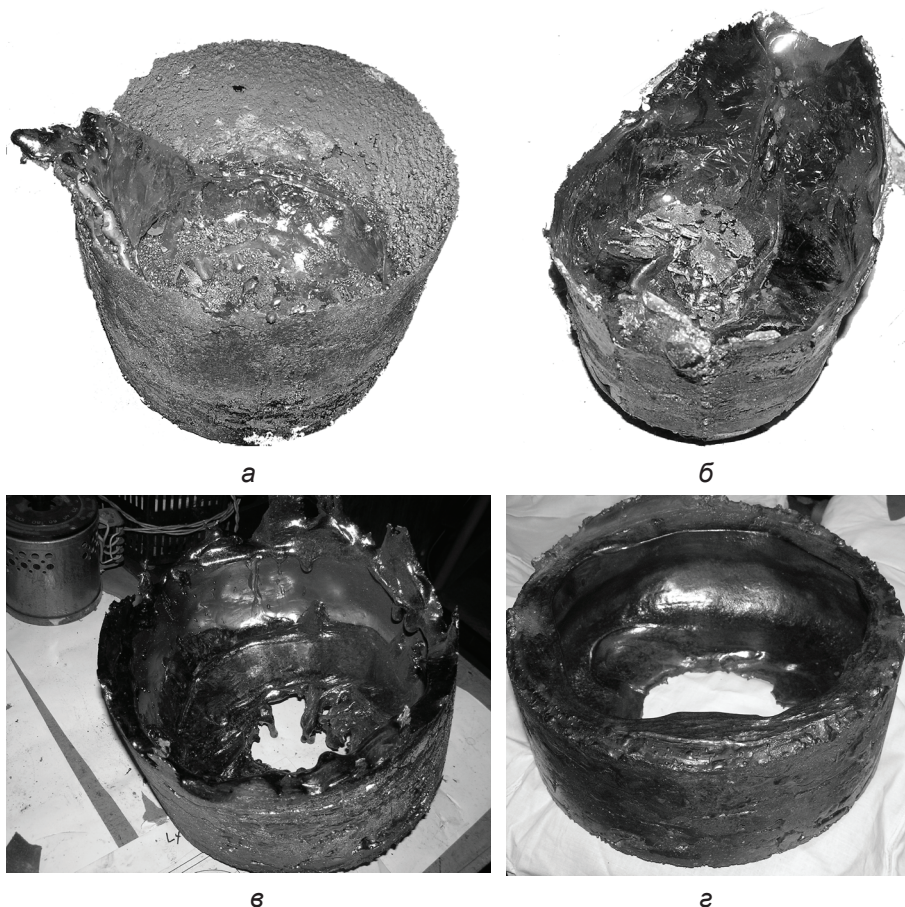


Рис. 1. Съёмные гарнисажи: а – сплав ВТ5, тигель Ø 260 мм со сливным носком; б – сплав ВТ20, тигель Ø 135 мм со сливным носком; в – сплав ВТ1-0, тигель Ø 285 мм с донным сливом; г – сплав Zr1Nb, тигель Ø 285 мм с донным сливом

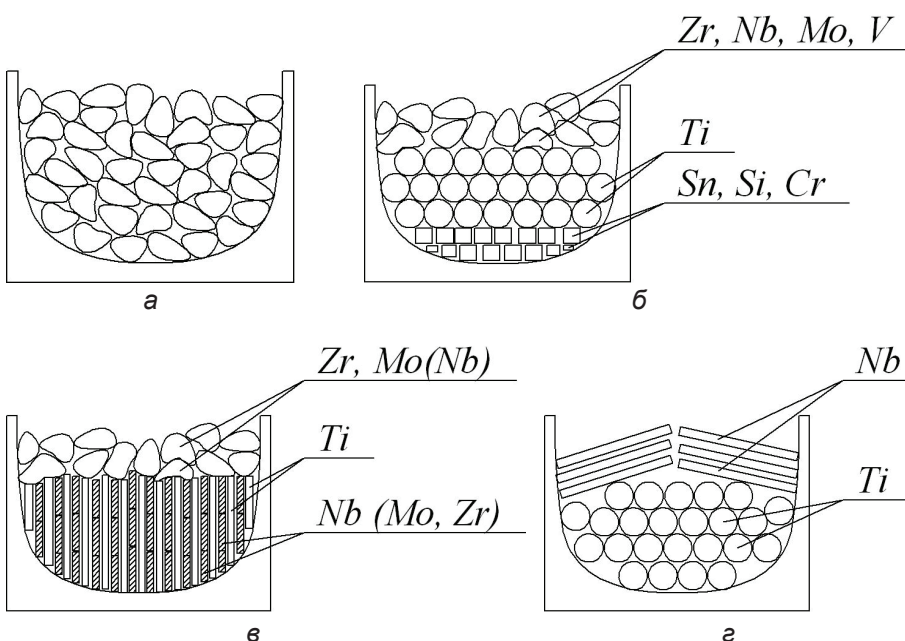


Рис. 2. Возможные схемы укладки шихтовых материалов (описание в тексте)

непосредственно электронным лучом и расплавляют размещённый ниже титан, а образующийся расплав титана вместе с расплавом тугоплавких элементов затем расплавляют легкоплавкие материалы. Благодаря электромагнитному перемешиванию образующегося расплава обеспечиваются как интенсификация растворения в нём отдельных компонентов шихты, так и равномерное распределение элементов в объёме расплава [3]. Алюминий и марганец в выплавляемых сплавах титана, как правило, рекомендуется вводить путём расплавления электронным лучом в виде капель в конце плавки.

При выплавке сложнолегированного циркониевого сплава таким же образом рекомендуется вводить в расплав олово [12].

Размещаемые сверху титановой или циркониевой шихты тугоплавкие материалы желательно загружать в виде достаточно мелкой равнозернистой фракции для предупреждения их оседания на дно гарнисажа при расплавлении основной шихты. Задача, однако, усложняется, если содержание какого-либо тугоплавкого элемента существенно превышает обычное для многокомпонентных сплавов сравнительно небольшое значение, например, при получении ортосплавов с высоким содержанием ниобия [9]. В этом случае шихтовку целесообразно осуществлять таким образом, чтобы в съёмном гарнисаже основные компоненты, в данном случае ниобий и титан, размещались рядом друг с другом, а не послойно (рис. 2, в). В ходе плавки такой шихты следует обеспечивать расплавление в первую очередь более тугоплавкого компонента с дальнейшим обогащением расплава менее тугоплавким. При этом другие легирующие элементы следует размещать поверх основной шихты, а алюминий вводить в конце плавки в уже сформированный расплав, как это указано выше.

Отдельным вариантом шихтовки может быть случай, если в составе шихты содержится один тугоплавкий компонент в количестве, сравнимом с массой основной шихты. Хотя в P , кВт

практике выплавки сложнолегированных сплавов такого случая до настоящего времени не было, он имел место при получении двухкомпонентного сплава 60 Nb-40 Ti [1], и опыт выплавки этого сплава может быть полезным также для выплавки многокомпонентного сплава. Схема загрузки шихты при выплавке указанного сплава показана на рис. 2, г. Технология проведения плавки заключается в том, что электронным лучом через отверстие в экране из штабиков ниобия плавят титан, пары которого, конденсируясь на этих штабиках, в конечном счёте возвращаются в расплав. Тепловое излучение с поверхности ванны в сочетании с энергией, выделяющейся при конденсации паров титана на штабиках ниобия, приводят к интенсиф-

ному их нагреву и быстрому растворению в расплаве без существенных потерь титана и приемлемом удельном расходе электроэнергии.

Проведение плавки. При выплавке сложнолегированного сплава основными моментами, требующими внимания с точки зрения организации технологического процесса плавки, являются режим регулирования мощности электронно-лучевого нагрева, ввод легирующих элементов в жидкометаллическую ванну и проведение термовременной обработки расплава перед сливом его из тигля в литейную форму.

Обычно плавку сложнолегированного сплава проводят по режиму со ступенчатым повышением мощности с возможно быстрым выходом на максимальную мощность нагрева, который наиболее характерен для ЭЛГП [1]. Сложность в реализации такого режима может возникнуть при наличии в шихте заметного количества порошкообразных материалов. В качестве примера на рис. 3 приведены сравнительные режимы плавки отходов сплава Zr1Nb на основе циркония электролитического восстановления (РФ), в которых шихта представляла собой кусковые материалы и брикеты прессованного порошка. Видно, что в зависимости от вида шихты продолжительность нагрева изменяется весьма существенно, причём прогрев прессованных порошкообразных материалов требует не только длительной выдержки на низких ступенях мощности, но и увеличения числа таких ступеней. При плавке кусковой шихты прогрев протекает значительно быстрее, чем и объясняется меньшая продолжительность плавки. При выплавке сложнолегированных сплавов задержка с прогревом шихты на низких ступенях мощности может отрицательно сказаться не только на технико-экономических показателях плавки, но и на обеспечении требуемого состава сплава.

Ввод легирующих элементов в жидкометаллическую ванну в конце плавки оказался тем технологическим приёмом, который позволил обеспечить требуемое содержание в сплавах элементов с

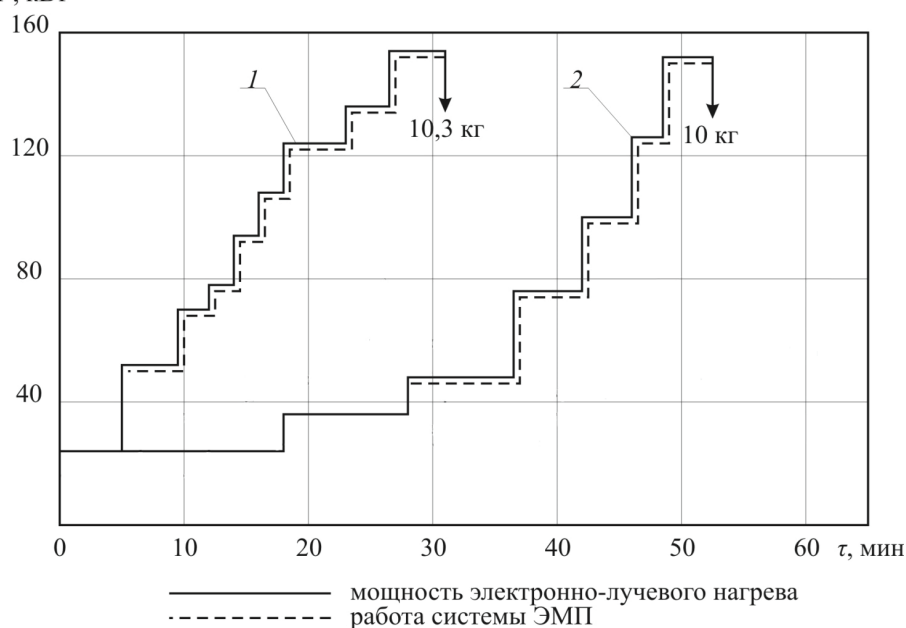
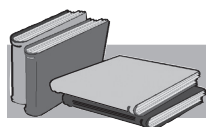


Рис. 3. Режимы плавки сплава Zr1Nb: 1 – шихта в виде кусковых материалов; 2 – брикеты прессованного порошка

высокой упругостью пара. Особенность реализации этого приёма состоит в том, что в зависимости от того, как легирующие элементы ведут себя в условиях воздействия на них электронного луча, их можно либо расплавлять лучом с введением в расплав в тигле в виде капель, либо в твёрдом виде вводить непосредственно в ванну, причём при необходимости в оболочке из металла-основы.

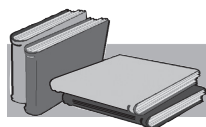
Термовременная обработка (ТВО) расплавов как самостоятельный технологический приём обычно проводится в конце плавки перед сливом расплава из тигля. В случае выплавки сложнолегированного сплава это может быть причиной отклонения состава

сплава от требуемого вследствие испарения легколетучих компонентов. Поэтому логичным представляется проведение в некоторых случаях ТВО перед вводом в расплав таких компонентов. При оценке возможности проведения такой операции следует учитывать, что после ввода легирующего элемента в расплав обычно для обеспечения его равномерного распределения по всему объёму ванны необходимо осуществлять выдержку в условиях достаточно интенсивного перемешивания расплава в течение одной-двух минут.



ЛИТЕРАТУРА

1. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С. В. Ладохина. – Киев: Сталь, 2007. – 626 с.
2. Исследования и разработки по производству циркониевых сплавов и изделий из них в Украине / А. П. Чернов, Г. П. Семенов, В. С. Красноруцкий и др. // ВАНТ. Тр. XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (Алушта, июнь 2000 г.) – Харьков, 2000. – С. 98-100.
3. Получение сложнолегированных титановых сплавов методом электронно-лучевой гарнисажной плавки / Н. И. Левицкий, Е. А. Матвиец, Т. В. Лапшук и др. // Металл и литье Украины. – 2012. – № 4. – С. 6-9.
4. Цирконий и его сплавы: технологии производства, области применения / В. М. Ажажа, П. Н. Вьюгов, С. Д. Лавриненко и др. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998. – 89 с.
5. Ладохин С. В. Перспективы применения электронно-лучевой плавки для получения сплавов циркония в Украине / С. В. Ладохин, В. С. Вахрушева // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 4. – С. 22-27.
6. Чернов В. Л. Мощные электронно-лучевые пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТП) и оборудование на их основе / В. Л. Чернов // Труды 9-го Международного симпозиума «Электротехника 2030» (29-31 мая 2007). – Москва, 2007.
7. Довбня В. Д. Исследования физико-химических процессов электронно-лучевой гарнисажной плавки тугоплавких металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1970. – 21 с.
8. Линчевский Б. В. Вакуумная индукционная плавка / Б. В. Линчевский. – М.: Metallurgy, 1975. – 240 с.
9. Особенности получения титановых сплавов из отходов производства в электронно-лучевой литейной установке / Н. И. Левицкий, Е. А. Матвиец, Т. В. Лапшук и др. // Процессы литья. – 2013. – № 5. – С. 55-59.
10. Патон Б. Е. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. – Киев: Наукова думка, 2006. – 246 с.
11. Задорожнюк О. М. Структура, фазовий склад та здатність до зварювання титанових сплавів з дисперсійним зміцненням: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / О. М. Задорожнюк. – Киев, 2015. – 22 с.
12. Особенности выплавки сложнолегированных сплавов на основе титана и циркония в электронно-лучевых гарнисажных установках / А. С. Гладков, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский и др. // Ti-2008 в СНГ (18-21 мая, 2008 г., Россия): материалы Междунар. конф. – Санкт-Петербург, 2008. – С. 50-53.



REFERENCES

1. Ladokhin S. V. (2007). Elektronno-luchevaya plavka v liteynom proizvodstve [Electron-beam melting in foundry]. Pod red. S. V. Ladokhina – Kiev: Stal', 2007, pp. 626. [in Russian].
2. Chernov A. P., Semenov G. P., Krasnoruckij V. S. i dr. (2000). Issledovaniya i razrabotki po proizvodstvu cirkonievyyh splavov i izdelij iz nih v Ukraine [Research and development for the production of zirconium alloys and their products in Ukraine] Proceedings of the VANT. Tr. XIV Mezhdunarodnoj konferencii po fizike radiacionnyh yavlenij i radiacionnomu materialovedeniyu (Ukraine, Alushta, iyun' 2000 g.), Har'kov, 2000, pp. 98-100. [in Russian].
3. Levickij N. I., Matviec E. A., Lapshuk T. V. i dr. (2012). Poluchenie slozhnolegirovannyh titanovyh splavov metodom ehlektronno-luchевой garnisazhnoj plavki [Multicomponent titanium alloys production by electron-beam skull melting]. Metall i lit'e Ukrainy, no 4, pp. 6-9. [in Russian].
4. Azhazha V. M., V'yugov P. N., Lavrinenko S. D. i dr. (1998). Cirkonij i ego splavy: tekhnologii proizvodstva, oblasti primeneniya. [Zirconium and alloys: production processes at stages of hydrometallurgy, metallurgy and rolled stock (tube, rod, sheet, tape); fields of application]. Har'kov: NNC HFTI, 89. [in Russian].
5. Ladohin S. V., Vahrusheva V. S. Perspektivy primeneniya ehlektronno-luchевой plavki dlya polucheniya splavov cirkoniya v Ukraine. [Prospects of application of electron beam melting to obtain a zirconium alloys in Ukraine]. Sovremennaya ehlektrometallurgiya, no 4, pp. 22-27. [in Russian].

6. Chernov V. L. (2007). Moshchnye ehlektronno-lucheveye pushki vysokovol'nogo tleyushchego razryada (VTR) i oborudovanie na ih osnove [Powerful electron beam guns of high voltage glow discharge and equipment on their basis]. Proceedings of the 9-go Mezhdunar. simpoziuma «Elektrotehnika 2030» (Moskva, 29-31 maya 2007), no 7.10. [in Russian].
7. Dovbnya V. D. Issledovaniya fiziko-himicheskikh processov ehlektronno-luchevoj garnisazhnoj plavki tugoplavkih metallov [Investigation of physical and chemical processes of electron beam skull melting of refractory metals] Extended abstract of Candidate's thesis. Kiev, 21. [in Russian].
8. Linchevskij B. V. (1975). Vakuumnaya indukcionnaya plavka. [Vacuum-induction melting]. Moskow: Metallurgiya, pp. 240. [in Russian].
9. N.I. Levickij, E.A. Matviec, T.V. Lapshuk et al. (2013). Osobennosti polucheniya titanovykh splavov iz othodov proizvodstva v ehlektronno-luchevoj litejnoj ustanovke [Obtaining of titanium alloys from waste products in the electron beam casting installation]. Kiev: Processy lit'ya, no 5, pp. 55-59. [in Russian].
10. Paton B. E., Trigub N. P., Ahonin S. V., Zhuk G. V. (2006). Elektronno-luchevaya plavka titana [Electron beam melting of titanium]. Kyev: Naukova dumka, pp. 246. [in Russian].
11. Zadorozhniuk O. M. (2015). Struktura, fazovyj sklad ta zdatnist' do zvariuvannia tytanovykh splaviv z dyspersijnym zmitsnenniam [Structure, phase composition and weldability of titanium alloys with dispersion strengthening]. Extended abstract of Candidate's thesis. Kyev, pp. 22. [in Ukrainian].
12. Gladkov A. S., Levickij N. I., Chernyavskij V. B. i dr. (2008). Osobennosti vyplavki slozhnolegirovannykh splavov na osnove titana i cirkoniya v ehlektronno-luchevykh garnisazhnykh ustanovkakh. [Especially melting of complex alloys based on titanium and zirconium in the electron beam skull installations]. Proceedings of the Mezhdunar. konf. «Ti-2008 v SNG», Rossiya, Sankt-Peterburg, 18-21 maya 2008. – Mezhdunar. asociaciya «Titan», NAN Ukrainy, Kiev, pp. 50-53. [in Russian].

Анотація

Ладохін С. В., Лапшук Т. В., Левицький М. І., Дрозд Е. А.

Шляхи удосконалення технології електронно-променевої гарнісажної плавки складнолегованих сплавів

Rozglyanuto osoblivosti odержання складнолегованих сплавів титану та цирконію методом електронно-променевої гарнісажної плавки. Описано обладнання та прийоми шихтування і проведення плавки, які забезпечують більш стабільне протікання технологічного процесу.

Ключові слова

електронно-променева плавка, гарнісажний тигель, титан, цирконій, сплав, шихта, розплав

Summary

Ladokhin S., Lapshuk T., Levitsky N., Drozd E.

The ways of electron-beam skull melting technology of multicomponent alloys improvement

The peculiarities of multicomponent titanium and zirconium alloys production by electron-beam skull melting are considered. The equipment, technique of initial materials charging in crucible and melting process realation, which ensure stable technology passing, are described.

Keywords

electron-beam melting, skull crucible, titanium, zirconium, alloy, charge, melt

Поступила 05.04.2016