

С. В. Ладохин, Т. В. Лапшук

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ЛИТЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СОЗДАНИЕ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ*

Рассмотрены перспективные направления развития литейных электронно-лучевых технологий и создания оборудования для их реализации в Украине. Описаны технические решения по расширению области применения электромагнитного перемешивания расплава при электронно-лучевой плавке и разработке усовершенствованной конструкции гарнисажного тигля и импульсной пушки высоковольтного тлеющего разряда.

Ключевые слова: электронно-лучевые технологии, литейные установки, гарнисажный тигель, промежуточная емкость, пушка ВТР.

Розглянуто перспективні напрямки розвитку ливарних електронно-променевиx технологій і створення обладнання для їх реалізації в Україні. Описано технічні рішення по розширенню області використання електромагнітного перемішування розплаву при електронно-променевої плавці і розробці удосконаленої конструкції гарнісажного тигля та імпульсної гармати високовольтного тліючого розряду.

Ключові слова: електронно-променеві технології, ливарні установки, гарнісажний тигель, проміжна ємність, гармата ВТР.

The perspective directions of electron beam casting technologies development and equipment for their realization construction in Ukraine are considered. The technical decisions on electromagnetic stirring of melt using at electron beam melting and on development of improved skull crucible and impulse high voltage glow discharge gun are described.

Keywords: electron-beam technologies, casting installation, skull crucible, cold hearth, HVGD gun.

В течение нескольких последних лет в Украине в области электронно-лучевой плавки металлов и сплавов практически используются только металлургические технологии, преимущественно для получения крупнотоннажных слитков титана, и соответственно разрабатывается оборудование для этих целей [1-3]. Несмотря на это, вопрос о тенденциях развития электронно-лучевых литейных технологий является актуальным, поскольку связан с перспективами отечественного машиностроения.

В настоящее время к наиболее перспективным направлениям развития электронно-лучевых литейных технологий можно отнести следующие [4]:

- получение литых изделий различного назначения из разных металлов и сплавов, но в первую очередь из титана и сплавов на его основе;
- получение трубных заготовок из циркониевых и титановых сплавов, в том числе для изготовления тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) ядерных реакторов (в рамках создания отечественного ядерно-топливного цикла);
- рафинирование отходов жаропрочных никелевых сплавов и получение из них мерных шихтовых заготовок для литья лопаток ГТД, в перспективе – получение лопаток ГТД;

*По материалам X Международной специализированной выставки-конференции «Литье-2014» (27-29 мая, г. Запорожье)

– выплавка сложнелегированных сплавов на основе титана, циркония и никеля;
– получение кремния солнечной градации путем рафинирования металлургического кремния для изготовления фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии.

В принципе, первые три направления в технологическом плане в значительной мере уже реализованы, что нашло отражение в работах [5, 6], а также подтверждается приводимыми ниже фотографиями отливок, где представлены изделия, полученные в электронно-лучевых установках литьем в стационарные формы (рис. 1), центробежнолитые изделия (рис. 2). Проблема состоит в том, что все эти изделия получены в лабораторных условиях ФТИМС НАН Украины, то есть технологии их получения отработаны, но промышленное производство литья подобного рода в стране отсутствует.

Относительно выплавки сложнелегированных сплавов и получения кремния солнечной градации можно отметить, что эти направления требуют проведения специальных дополнительных исследований и разработки способов их реализации. В качестве примера на рис. 3 и 4 приведены схемы двух способов [7, 8], которые были предложены в последнее время и пока не прошли экспериментальной проверки.

Достоинством обоих способов является использование электромагнитного перемешивания расплава для решения новых технологических задач, а именно, получения слитка сложнелегированного сплава путем порционного слива в кристаллизатор скользящего расплава, выплавляемого в гарнисажном тигле с электромагнитным перемешиванием расплава (рис. 3), и рафинирования расплава, интенсивно перемешиваемого в тигле за счет наложения электромагнитных полей, путем создания над ванной двух зон с различной глубиной вакуума в плавильной камере и проведения обогрева зеркала ванны одновременно средне- и низковакуумными пушками ВТР (рис. 4).

Что касается оборудования для электронно-лучевой гарнисажной плавки, то согласно [9] наиболее перспективные направления разработки установок для электронно-лучевой плавки и отдельных их элементов представлены ниже.

- Собственно установки для получения слитков, литых заготовок и фасонных отливок. Желательно, чтобы установки обеспечивали возможность реализации процесса рафинирования и формирования литых изделий однократным электронно-лучевым переплавом.

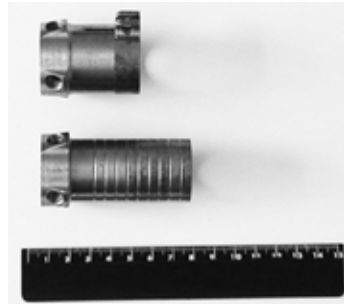
- Оснастка установок, то есть кристаллизаторы, тигли и промежуточные емкости. Наложение электромагнитных полей на расплав должно обеспечиваться как при плавке сплава в тигле, а по необходимости – и в промежуточной емкости, так и при формировании слитка в кристаллизаторе скользящего.

- Пушки, которые могут устойчиво работать в условиях плавки не только отходов производства, но и губчатых материалов, в том числе при наложении электромагнитных воздействий на расплав в кристаллизаторе или тигле. Наиболее перспективными для указанных целей в настоящее время представляются пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР). Эти пушки, в создание которых наиболее заметный вклад внесли российские и украинские специалисты [10, 11], широко используются при электронно-лучевой плавке с формированием слитков в среднем вакууме, а в последнее время начинают применяться также при гарнисажной плавке [12].

Оборудование, разработанное в соответствии с перечисленными направлениями, достаточно полно рассмотрено в работе [9] с описанием предложенных в то время технических решений. Позже оно было дополнено анализом конструкций электронно-лучевых литейных установок нового поколения, особенностью которых является использование наряду с тиглями с системами ЭМП таких элементов оснастки, как пушки ВТР, промежуточные емкости и тепловые экраны [13].



а



б



в



г



д



е



ж



з

Рис. 1. Изделия электронно-лучевой выплавки, полученные литьем в стационарные формы (кокили и углеродные формы): а – эндопротезы, сплав ВТ5; б – адаптеры, сплав ВТ1-0; в – накладка на поршень, сплав Ti-5Al-5Si-3Zr; г – импеллер насоса для перекачки агрессивных сред, сплавы ВТ1-0 и ВТ5; д – кожух регистратора звуковой информации, сплавы ВТ1-0 и ВТ5; е – заготовки для изготовления прутков и проволоки из сплавов титана; ж – патрубок специального назначения, сплавы ВТ5, ВТ6, ВТ20, ВТ3-1; з – корпус и рабочие колеса насоса из циркония для перекачки агрессивных сред

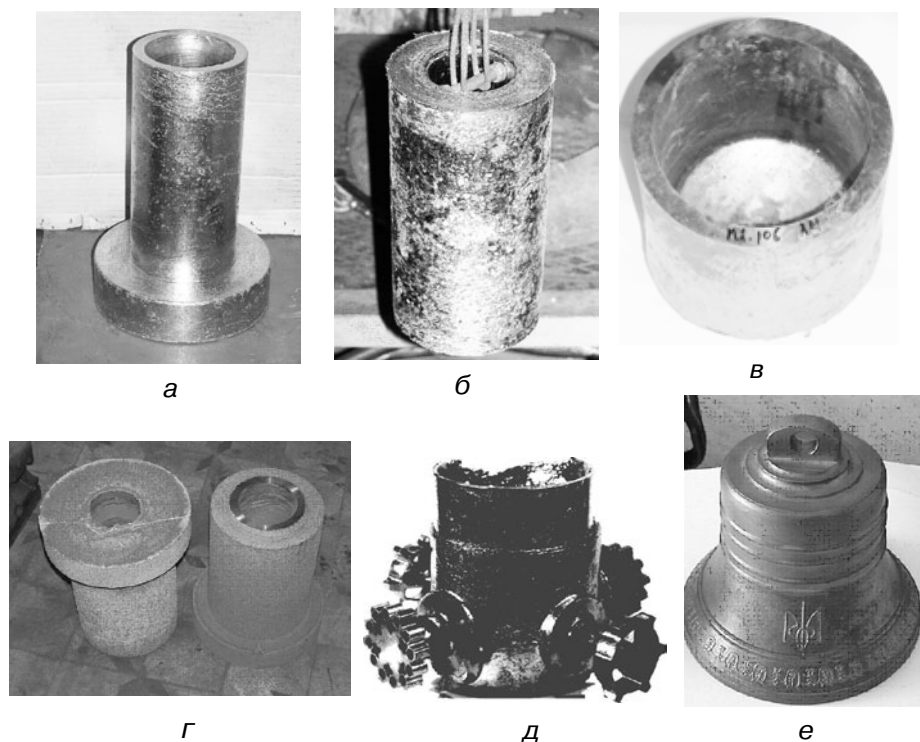


Рис. 2. Центробежнолитые изделия электронно-лучевой выплавки: а – медная форма для литья трубной заготовки; б – трубная заготовка из стали; в – корпус контейнера для захоронения радиоактивных отходов, сплав ВТ1-0; г – трубные заготовки из сплава ВТ1-0; д – детали несущих конструкций ТВЭЛов; е – колокол из циркония

В настоящее время к приведенным в работах [9, 12] вариантам оборудования можно добавить две принципиально новые разработки (рис. 5 и 6), представляющие собой соответственно гарнисажный тигель с системой ЭМП, сливным отверстием в днище и носком для слива расплава путем наклона тигля и импульсную пушку ВТР. Это оборудование открывает перспективу выплавки в одной и той же плавильной емкости как простых по составу сплавов, так и многокомпонентных сложнелегированных сплавов, что существенно упрощает организацию технологического процесса и повышает производительность агрегата. Отметим, что до последнего времени сложнелегированные сплавы не удавалось выплавлять в тигле с донным сливом расплава из-за неопределенной задержки с проплавлением сливного отверстия, вследствие чего было невозможно

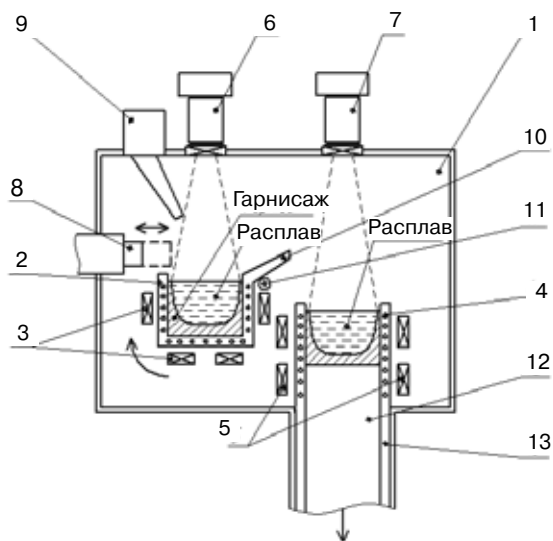


Рис. 3. Способ формирования слитка сложнелегированного сплава порционным сливом расплава: 1 – плавильная камера; 2 – тигель; 3 – система ЭМП тигля; 4 – кристаллизатор; 5 – система ЭМП кристаллизатора; 6 и 7 – пушки ВТР; 8 – устройство подачи заготовки на переплав; 9 – устройство ввода легирующих элементов в расплав; 10 – сливной носок тигля; 11 – ось поворота тигля; 12 – слиток; 13 – камера слитка

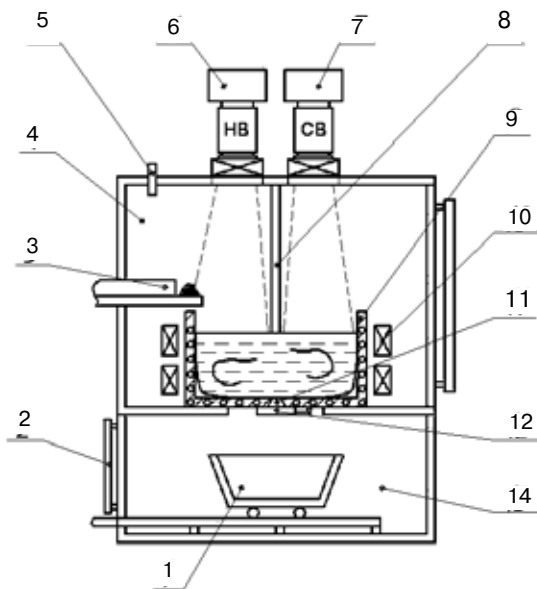
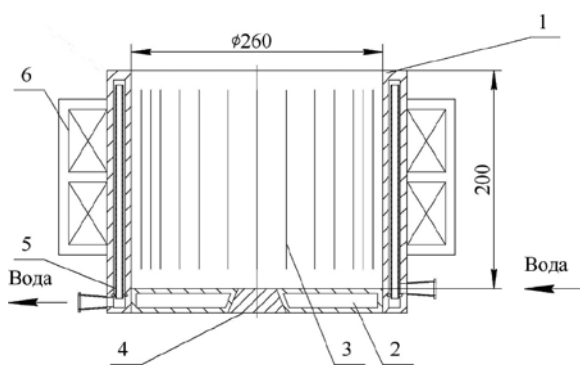


Рис. 4. Способ комбинированной обработки расплава вакуумом: 1 – литейная форма; 2 – шибера камеры форм; 3 – устройство подачи шихты на перелав; 4 – плавильная камера; 5 – устройство подачи рафинирующего газа; 6 – низковакуумная пушка ВТР; 7 – средневакуумная пушка ВТР; 8 – перегородка; 9 – тигель; 10 – система ЭМП тигля; 11 – сливное отверстие тигля; 12 – затвор; 13 – камера форм

рассчитать потери легирующих элементов испарением [14].

Использование импульсной пушки, которая разработана кафедрой электронных приборов и приспособлений НТУУ «КПИ» [15] и принципиальная схема которой приведена на рис. 6, представляется наиболее целесообразным в случаях проведения плавки с модуляцией по амплитуде, частоте и фазе питающего напряжения плавильного тигля или кристаллизатора. Такая модуляция привлекает внимание специалистов, поскольку открывает возможности дополнительного воздействия на расплав в тигле и кристаллизаторе с целью интенсификации его перемешивания, то есть, в конечном счете, с целью обеспечения управления процессами формирования ванны или кристаллизации расплава [16]. Другим направлением в использовании импульсной пушки ВТР может быть проведение плавки с периодическим попеременным включением перемешивания и электронно-лучевого нагрева с целью исключения влияния электромагнитного поля на луч.



а



б

Рис. 5. Схема (а) и общий вид (б) гарнисажного тигля с боковой системой ЭМП и сливом расплава через отверстие в днище и через носок: 1 – медный корпус; 2 – днище; 3 – сквозные прорезы; 4 – пробка; 5 – каналы охлаждения; 6 – система ЭМП

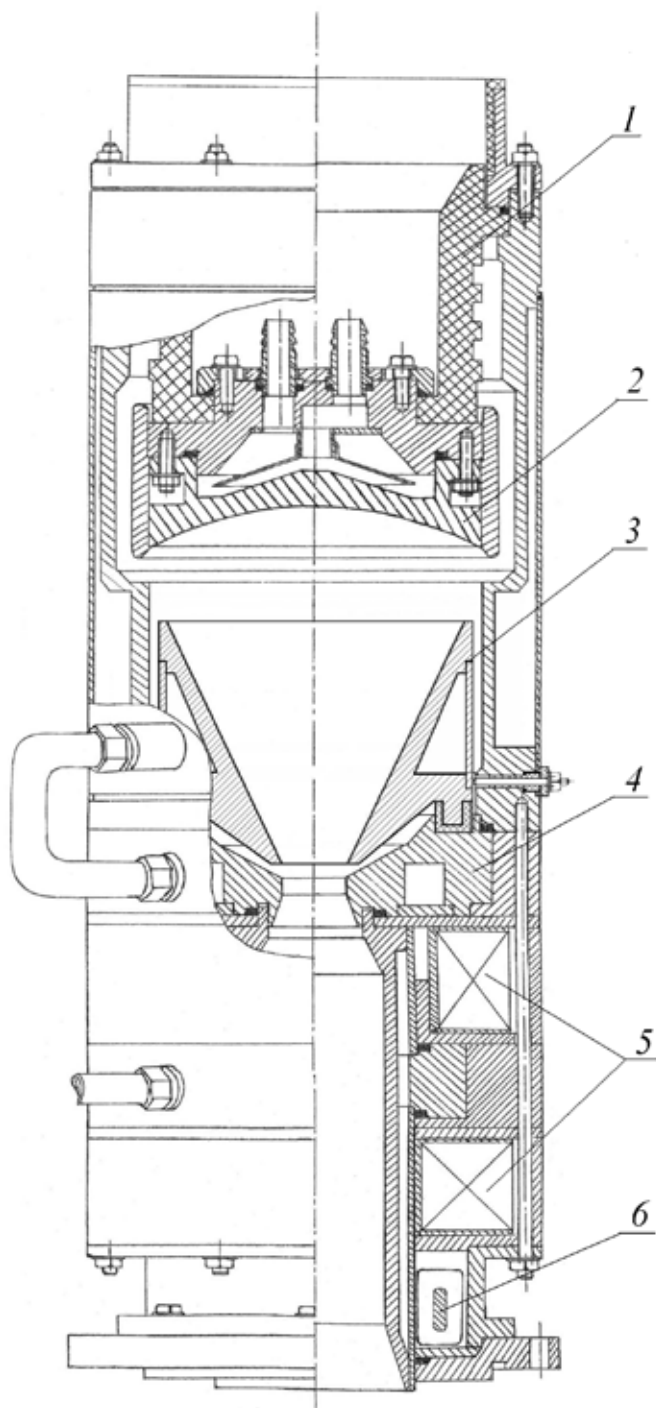


Рис. 6. Принципиальная схема импульсной пушки ВТР: 1 – изолятор; 2 – водоохлаждаемый катод; 3 – водоохлаждаемый электрод управляющего разряда; 4 – водоохлаждаемый анодный узел; 5 – магнитные линзы; 6 – система отклонения луча



Список литературы

1. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. – Киев: Наук. думка, 2006. – 248 с.
2. Ковальчук Д. В., Кондратий Н. П. Электронно-лучевой переплав титана – пути развития. // Литье и металлургия. – 2008. – № 3 (48). – С. 275-282.
3. Новая печь ВТ02 для электронно-лучевой плавки титановых сплавов, разработанная в МК «Антарес»/ О. Е. Нестерук, Н. Г. Третьяк, Н. В. Чайка и др. // Современная электрометаллургия. – 2012. – № 3. – С. 20-25.
4. Ладохин С. В. Перспективные технологии электронно-лучевой плавки и литья металлов и сплавов в Украине // Металл и литье Украины. – 2012. – № 5. – С. 3-10.
5. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под. ред. С. В. Ладохина. – Киев: Изд-во «Сталь», 2007. – 626 с.
6. Гладков А. С. Особливості електронно-променевої гарнісажної плавки сплаву Zr-1 Nb і розробка технології виготовлення трубних заготовок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2009. – 20 с.
7. Пат. 88492 України на корисну модель «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.
8. Пат 105557 «Спосіб рафінування металів і сплавів при електронно-променевої гарнісажній плавці і установка для його здійснення». МПК С21С 5/56. С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук. – Опубл. 26.05.2014. Бюл. № 10.
9. Ладохин С. В. Новое оборудование для электронно-лучевой плавки и литья металлов и сплавов // Металл и литье Украины. – 2012. – № 7. – С. 3-11.
10. Чернов В. А. Мощные электронно-лучевые пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) и оборудование на их основе // Труды 9-го Международного симпозиума «Электро техника 2030». Москва, 29-31 мая 2007, доклад 7.10.
11. Мельник І. В. Теоретичні та експериментальні основи проектування технологічних газорозрядних джерел електронів: Автореф. дис. ... д-ра. техн. наук / НТУУ «КПІ» – Київ, 2008. – 39 с.
12. Выплавка сплавов КТЦ110 в електронно-лучевой гарнісажній установці з використанням пушки високовольтного тлеющего разряда / С. Д. Лавриненко, С. В. Ладохин, Н. Н. Пилипенко и др. // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). – 2014. – № 1 (89). – С. 151-158.
13. Ладохин С. В. Электронно-лучевые литейные установки нового поколения: конструктивные особенности и области применения // Процессы литья. – 2013. – № 4. – С. 56-70.
14. Розробка технологічних процесів електронно-променевої плавки складнолегованих сплавів цирконію та титану, в тому числі на основі губчастих матеріалів, із застосуванням електромагнітного перемішування розплаву: Звіт про НДР / Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України. – № 104U007753. – Київ, 2010. – 112 с.
15. Тугай С. Б. Імпульсні режими роботи технологічних електронно-променевих гармат високовольтного тліючого розряду: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2013. – 20 с.
16. Дубоделов В. И., Фиксен В. Н., Слажнев Н. А. Интенсификация процесса массопереноса при получении алюминиевых сплавов с использованием модуляции электромагнитной силы в магнитодинамической установке // Металл и литье Украины. – 2003. – № 6. – С. 53-58.

Поступила 25.06.2014