

УДК 621.745

С. В. Ладохин

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Приведены схемы новых электронно-лучевых литейных установок, в основу конструктивного исполнения которых положено использование пушек высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с холодным катодом и промежуточных емкостей, ранее не применявшихся в литейных установках.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка, литейная установка, низкий и средний вакуум, электромагнитное перемешивание, пушка высоковольтного тлеющего разряда, промежуточная емкость.

Наведено схеми нових електронно-променевих ливарних установок, в основу конструктивного виконання яких покладено використання гармат високовольтного тліючого розряду (ВТР) з холодним катодом і проміжних ємностей, які раніше в ливарних установках не застосовувались.

Ключові слова: електронно-променева плавка, ливарна установка, низький і середній вакуум, електромагнітне перемішування, гармата високовольтного тліючого розряду, проміжна ємність.

The schemes of new electron-beam casting installations based on the use of high voltage glow discharge guns and cold hearth that did not use in casting installations earlier.

Keywords: electron beam melting, casting installation, low and middle vacuum, electromagnetic stirring, high voltage glow discharge gun, cold hearth.

Развитие электронно-лучевой плавки (ЭЛП) в нашей стране тесно связано с работами, которые проводились и продолжают проводиться в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Эти работы широко освещались в научной периодической печати в нашей стране и за рубежом, в том числе в специализированных журналах «Специальная электрометаллургия», «Проблемы специальной электрометаллургии», «Современная электрометаллургия», «Advances in Special Electrometallurgy», а также в трудах многочисленных международных конференций и семинаров. Работы института в указанном направлении детально представлены в монографиях [1-5]*, в которых рассмотрены результаты исследований по технологии ЭЛП различных металлов и сплавов, выполнявшихся в этом институте на протяжении практически полувека. Особенность работ, проводившихся в ИЭС им. Е. О. Патона, состоит в том, что все они выполнялись в электронно-лучевых печах, разработанных в этом институте, с использованием плоско-лучевых и аксиальных термоэлектронных пушек, то есть пушек с термоэмиссионными катодами, которые также были разработаны в этом институте.

Отличительной чертой развития специальной металлургии в Украине в последние три десятилетия является появление специализированных предприятий по ЭЛП как государственных [6], так и частных [7-9]. Применение ЭЛП в нашей стране в этот период характеризуется использованием ее в основном для получения слитков титана и некоторых сплавов на его основе, причем общей тенденцией является стремление получать крупногабаритные слитки, что объясняется желанием снизить себестоимость передела [4]. Это обусловило развитие работ по усовершенствованию конструктивного исполнения электронно-лучевых печей, прежде всего, в направлении формирования в них многотоннажных слитков [10]. В этих печах стали применяться пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) с холодным катодом отечественной разработки [11], которые до этого разрабатывались и использовались преимущественно в России [12]. Важной особенностью пушек ВТР является их устойчивая работа при давлении остаточных газов в плавильной камере в диапазоне 0,13-1,3 Па, то есть в среднем вакууме, что открыло перспективу плавки в электронно-лучевых печах титановой губки [13], переработка которой в течение многих лет базировалась на использовании вакуумно-дуговой плавки.

Одновременно с работами по получению слитков, то есть по электронно-лучевой металлургической технологии, в Украине проводились работы по получению литых изделий в электронно-лучевых установках, то есть по электронно-лучевой литейной технологии. Эти работы в основном выполнялись в ФТИМС НАН Украины, их результаты обобщены в монографии [14]. Хотя работы в этом направлении по объему проводившихся исследований и разработок уступали работам по металлургической технологии, тем не менее, их выполнение позволило создать ряд оригинальных литейных технологий. Наиболее интересной из таких технологий является получение литых трубных заготовок из сплава **Zr-1%Nb на основе циркония** кальцийтермического восстановления отечественного производства [15, 16]. Важность полученных результатов определяется тем, что они дали возможность разработать в ГП «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я. Е. Осады» (г. Днепропетровск) оригинальную технологию получения труб-оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов с исключениемковки слитков и получением заготовок под холодный передел путем однократного высокотемпературного прессования с высокой степенью деформации [17-19]. В настоящее время работы в этом направлении приостановлены, однако на важности полученных для науки и производства результатов это не отразилось, поскольку экспериментально доказана возможность получения твельных труб не из слитка ВДП, а из литой заготовки без использованияковки, что ранее считалось невозможным.

В работе [14] наряду с технологическими вопросами достаточно подробно рассматриваются также вопросы конструирования электронно-лучевых установок, которые могут быть использованы для получения литых изделий. В работе описаны конструкции как специализированных установок, которые разрабатывались для решения конкретных задач с получением литых изделий целевого назначения, так и литейных электронно-лучевых установок, которые создавались на базе вакуумных печей других типов с целью снижения стоимости и сокращения сроков ввода их в эксплуатацию.

Что касается специализированных установок, то разработанные в ФТИМС НАН Украины конструкции представляют собой агрегаты, состоящие из двух модулей – плавильного и литейного. Наличие литейного модуля позволяет проводить несколько плавов без разгерметизации плавильной камеры. Модуль представляет собой

*Монография «Процессы вакуумного рафинирования металлов при электронно-лучевой плавке» (Курапов Ю. А. – Киев: Наук. думка, 1984. – 168 с.), несмотря на то, что написана во время работы автора в другой организации, также относится к работам, выполненным в ИЭС

либо многокамерное устройство карусельного типа, в котором каждая камера с формами стыкуется с плавильным модулем на позиции заливки, либо одну камеру, стыкующуюся с плавильным модулем и содержащую одну форму многоразового использования (кокиль или водоохлаждаемую металлическую форму) и накопитель отливок. Отметим, что разработанная в ФТИМС НАН Украины установка с литейным модулем карусельного типа [20] была запатентована в США (патент № US4055216), ФРГ (патент № 2508337), Франции (патент № 2300641), Италии (патент № 1029321), Японии (патент № 52-23888).

Относительно установок на базе вакуумных печей других типов можно отметить, что в работе [14] приведены конкретные примеры переоснащения в литейные электронно-лучевые установки вакуумно-индукционных печей типов УППФ-3М и ИСВ-004, вакуумно-дуговых печей типов ВДЛ-4М и 1ДВРГ, переплавных электронно-лучевых печей типов ЕМО-250 и ЕМО-1200. Во всех случаях переоснащение включало монтаж на печах пушек (обычно на месте загрузочных устройств), а в плавильных камерах – гарнисажных тиглей с системами электромагнитного перемешивания (на месте керамических индукционных тиглей и кристаллизаторов).

Как при разработке специализированных установок, так и при переоснащении в электронно-лучевые установки вакуумных печей других типов обязательным условием является размещение пушек и тиглей на одной оси с целью исключения отклонения электронного луча из зоны нагрева под действием электромагнитных полей, наводимых системами электромагнитного перемешивания. Слив расплава может проводиться как через сливной носок путем наклона тигля, так и через сливное отверстие в днище тигля, что определяется конструктивным исполнением узлов формирования отливок, зависящим от решаемых технологических задач.

Все создававшиеся до последнего времени литейные установки не имеют промежуточных емкостей и представляют собой однопушечные электронно-лучевые агрегаты, в которых используются только традиционные термоэлектронные пушки аксиального типа. Эти пушки оснащены высоковакуумными насосами, что усложняет вакуумные системы и обуславливает увеличение стоимости установок. Что касается требуемого разрежения в плавильных камерах, то во всех разрабатываемых в последние годы установках оно обеспечивается бустерными насосами, то есть плавки проводятся в среднем вакууме, причем в ряде случаев плавка в среднем вакууме создавала трудности в эксплуатации термоэлектронных пушек. Поэтому причинами ограниченного применения электронно-лучевой литейной технологии могут быть затруднения в обеспечении надежной работоспособности установок, а также их высокая стоимость.

Настоящая работа посвящена разработке принципиальных схем электронно-лучевых литейных установок нового поколения, которые отличаются от известных не только более простым конструктивным исполнением и меньшей стоимостью, но и большими технологическими возможностями. Создание таких установок базируется на использовании пушек ВТР и промежуточных емкостей. Относительно пушек ВТР следует подчеркнуть, что речь идет об использовании как средневакуумных пушек, которые уже достаточно широко и эффективно применяются в практике ЭЛП, так и низковакуумных, представляющих собой разработки самого последнего времени и позволяющих проводить обработку расплава в ходе плавки рафинирующими газами [21]. Промежуточные емкости, эффективность применения которых также подтверждается практикой их эксплуатации в металлургических электронно-лучевых печах, позволяют интенсифицировать процессы плавки шихты и рафинирования расплава. В конструктивном отношении использование пушек ВТР предполагает возможность исполнения их перемещающимися, а использование промежуточных емкостей требует оснащения установок дополнительными пушками для их обогрева. Применение многопушечных систем нагрева является характерной чертой электронно-лучевых печей, в которых используются пушки ВТР [10, 22].

Отметим, что на целесообразность использования в литейных установках пушек ВТР указывалось еще в работах конца 70-х – начала 80-х годов прошлого столетия [23, 24]. Однако практического применения в таких установках эти пушки не нашли, поскольку плавка в среднем вакууме рассматривалась в то время как дискуссионная проблема и предпочтение отдавалось проведению процессов плавки и литья в высоком вакууме, при котором нагрев более целесообразно проводить аксиальными термоэлектронными пушками.

В работе приведены принципиальные схемы восьми литейных установок. Две первые (рис. 1 и 2) представляют собой разработки, которые проводятся фирмой ООО «Конструкторское бюро Вакуумного металлургического оборудования» (ООО «КБ ВМО») [25]. Остальные шесть следует рассматривать как перспективные предложения на разработку в будущем.

Установка, схема которой показана на рис. 1, разрабатывается ООО «КБ ВМО» для фирмы «Yuanda Chengli» (КНР) по исходным данным, которые были сформулированы в результате обсуждения проблемы создания литейной установки для КНР специалистами ФТИМС НАН Украины и представителями Исследовательского института металлических материалов Внутренней Монголии (г. Нингбо). Установка предназначена для плавки и литья титановых сплавов, преимущественно сплава типа ВТ6, с применением в качестве шихтовых материалов как отходов промышленного производства, так и губки. Именно поэтому установку рекомендовано оснастить пушкой

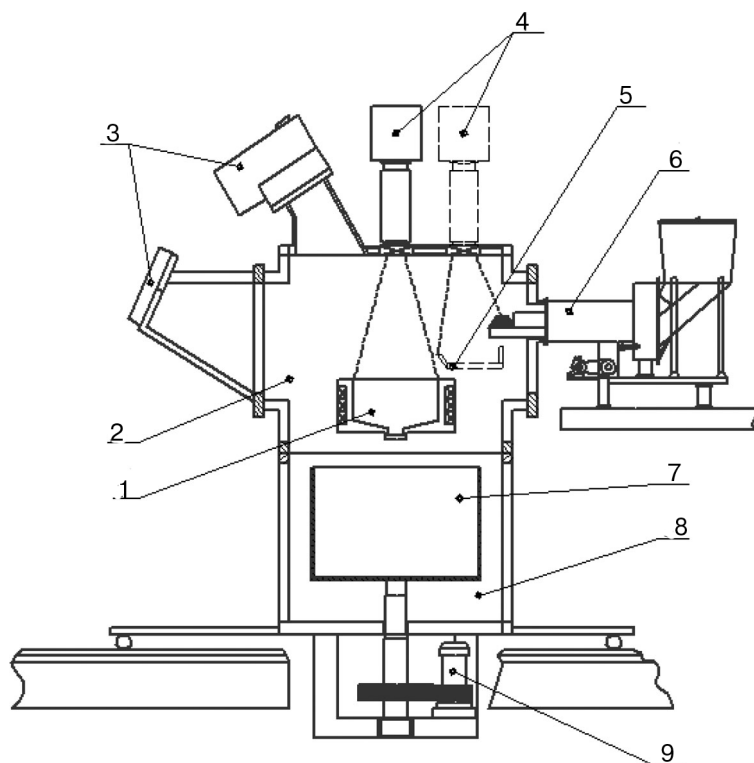


Рис. 1. Схема электронно-лучевой литейной установки, разработанной ООО «КБ ВМО» для фирмы «Yuanda Chengli» (КНР): 1 – тигель с системой ЭМП; 2 – плавильная камера; 3 – смотровые системы; 4 – пушки ВТР; 5 – промежуточная емкость; 6 – устройство подачи шихты на переплав; 7 – центробежный стол; 8 – камера литейных форм; 9 – центробежное устройство

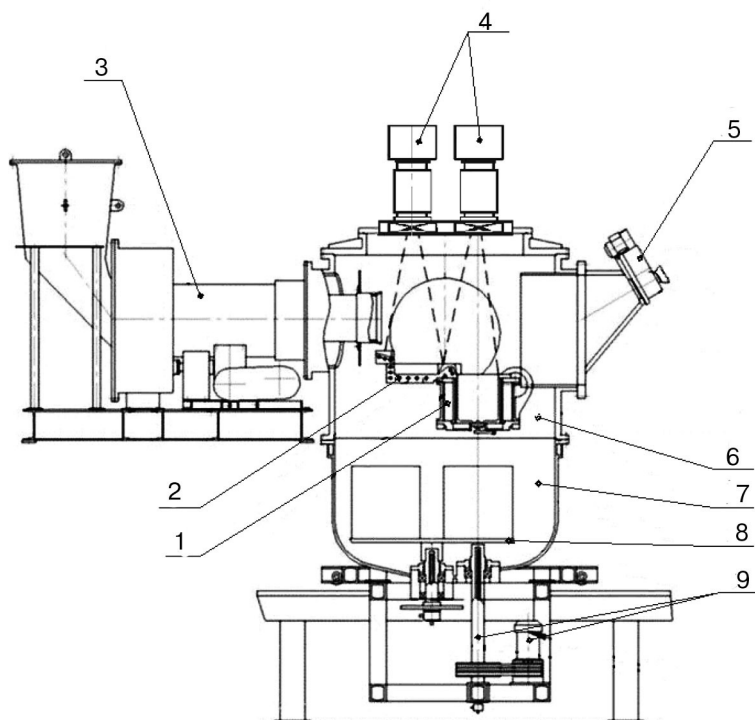


Рис. 2. Схема электронно-лучевой установки для центробежного литья трубных заготовок: 1 – тигель с системой ЭМП; 2 – промежуточная емкость; 3 – устройство подачи шихты на переплав; 4 – пушки ВТР; 5 – смотровая система; 6 – плавильная камера; 7 – камера литейных форм; 8 – центробежный стол; 9 – центробежное устройство

ВТР, таким образом она является первой специализированной литейной установкой, в которой использование газоразрядной пушки предусмотрено в проекте. Литые заготовки предполагают получать методом центробежного литья. Тигель оснащен системой электромагнитного перемешивания, применение которого специально оговорено китайской стороной, так же как и слив расплава через отверстие в днище тигля. Масса сливаемого расплава – до 50 кг, мощность электронно-лучевого нагрева – до 300 кВт. Хотя по желанию китайских коллег в установке предполагается проведение плавки без использования промежуточной емкости, то есть с завалкой шихты непосредственно в тигель, специалисты ФТИМС НАН Украины, учитывая перспективность плавки с промежуточной емкостью, предложили разработчикам предусмотреть возможность монтажа в будущем как промежуточной емкости, так и второй пушки для ее обогрева, которые на схеме показаны пунктирными линиями. Допускают, что установка будет изготовлена китайской стороной, но тигель с системой ЭМП и блок электронно-лучевого нагрева (пушка, источник высоковольтного питания, генератор рабочего газа и другие) будут поставлены украинской стороной.

Установка, схема которой показана на рис. 2, предназначена для получения литых трубных заготовок из сплавов циркония методом центробежного литья по технологии, описанной в [14-16]. Отметим, что это первая литейная установка, в которой предложили одновременно использовать промежуточную емкость и пушки ВТР. Из рассмотренных в работе [26] методов получения трубных заготовок центробежный выбран как обеспечивающий снижение потерь металла на механическую

обработку по сравнению с другими методами. Устройства для центробежного литья смонтированы в литейном модуле, который примыкает к плавильному модулю снизу и содержит несколько форм для центробежного литья. Использование как пушек ВТР, так и промежуточной емкости объясняется тем, что в качестве шихты предполагают применять губку, рафинирование которой при обогреве аксиальной термоэлектронной пушкой представляется проблематичным вследствие интенсивного газовыделения в ходе плавки. Допустимая масса литой заготовки составляет около 40 кг, что обуславливает выбор для проведения плавки пушки мощностью до 300 кВт. Суммарная установленная мощность электронно-лучевого нагрева плавильно-заливочного агрегата составляет 600 кВт. Конкретное предложение на разработку этой установки было сформулировано и ФТИМС НАН Украины передано в Минтопэнерго Украины в 2010 г., а приведенная на рисунке схема установки впервые была опубликована двумя годами позже [27]. В таблице представлены расчет сроков проведения конструкторских работ и оценка стоимости одной установки выполненные ООО «КБ ВМО». Для обеспечения потребности страны в трубных заготовках с целью реализации программы создания отечественного ядерно-топливного цикла достаточно иметь две подобные установки.

Поскольку далее приводятся принципиальные схемы установок, которые, как отмечалось выше, следует рассматривать в качестве перспективных предложений на разработку в будущем, то мощность электронно-лучевого нагрева и масса сливаемого расплава не указываются, так как не определены переплавляемые металлы, получаемые изделия, производительность установок и т. д.

Из шести рассмотренных далее принципиальных схем установок четыре (рис. 3-6) относятся к установкам, в которых используются одновременно средне- и низковакуумные пушки ВТР. Это позволяет проводить плавку при различном давлении остаточных газов в плавильной камере, в том числе при его изменении в ходе проведения технологического процесса, и также может рассматриваться как отличительная черта литейных установок нового поколения. Две последние схемы (рис. 7 и 8) касаются установок, которые оснащены пушками ВТР с угловыми

Сроки и стоимость разработки проекта электронно-лучевой литейной установки для получения трубных заготовок из сплава циркония

Наименование этапа	Срок выполнения, месяцы от начала инвестирования	Стоимость этапа, тыс. USD	Примечание
Разработка проектной документации электронно-лучевой печи	6	480	–
Изготовление и поставка одной электронно-лучевой печи	22	4 000	используются комплектующие украинского и российского производств
Монтаж, наладка, пуск печи в эксплуатацию	25	450	–
Технологическая документация	–	70	–
Отработка технологии плавки и литья заготовок и слитков	30	250	–

Примечание: стоимость указана в ценах 2009 г.

лучеводами [28]. Предполагают, что использование такого лучевода позволяет улучшить работоспособность установки (благодаря исключению катодно-анодного узла пушки из зоны воздействия излучения с обогреваемой поверхностью) и повысить КПД электронно-лучевого нагрева.

В установках, схемы которых показаны на рис. 3 и 4, для реализации возможности обогрева разными нагревателями в ходе плавки пушки выполнены перемещающимися за счет их монтажа на специальных передвижных плитах. Путем

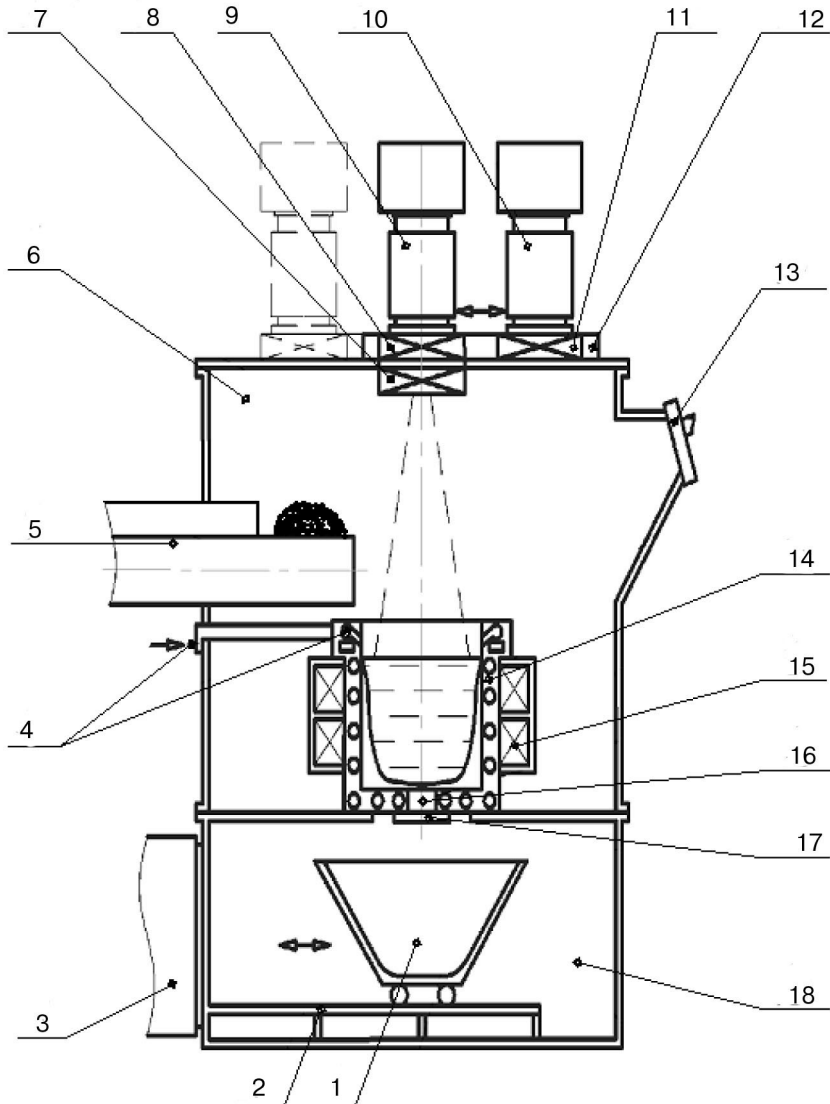


Рис. 3. Схема электронно-лучевой литейной установки со сменными нагревателями: 1 – литейная форма; 2 – эстакада; 3 – шлюзовая камера; 4 – устройство подачи рафинирующего газа; 5 – устройство подачи шихты на переплав; 6 – плавильная камера; 7 – пушечный затвор плавильной камеры; 8 – затвор средневacuумной пушки; 9 – средневacuумная пушка ВТР; 10 – низковacuумная пушка ВТР; 11 – затвор низковacuумной пушки; 12 – передвижная плита пушек; 13 – смотровая система; 14 – тигель; 15 – система ЭМП тигля; 16 – сливное отверстие; 17 – крышка сливного отверстия; 18 – камера литейных форм

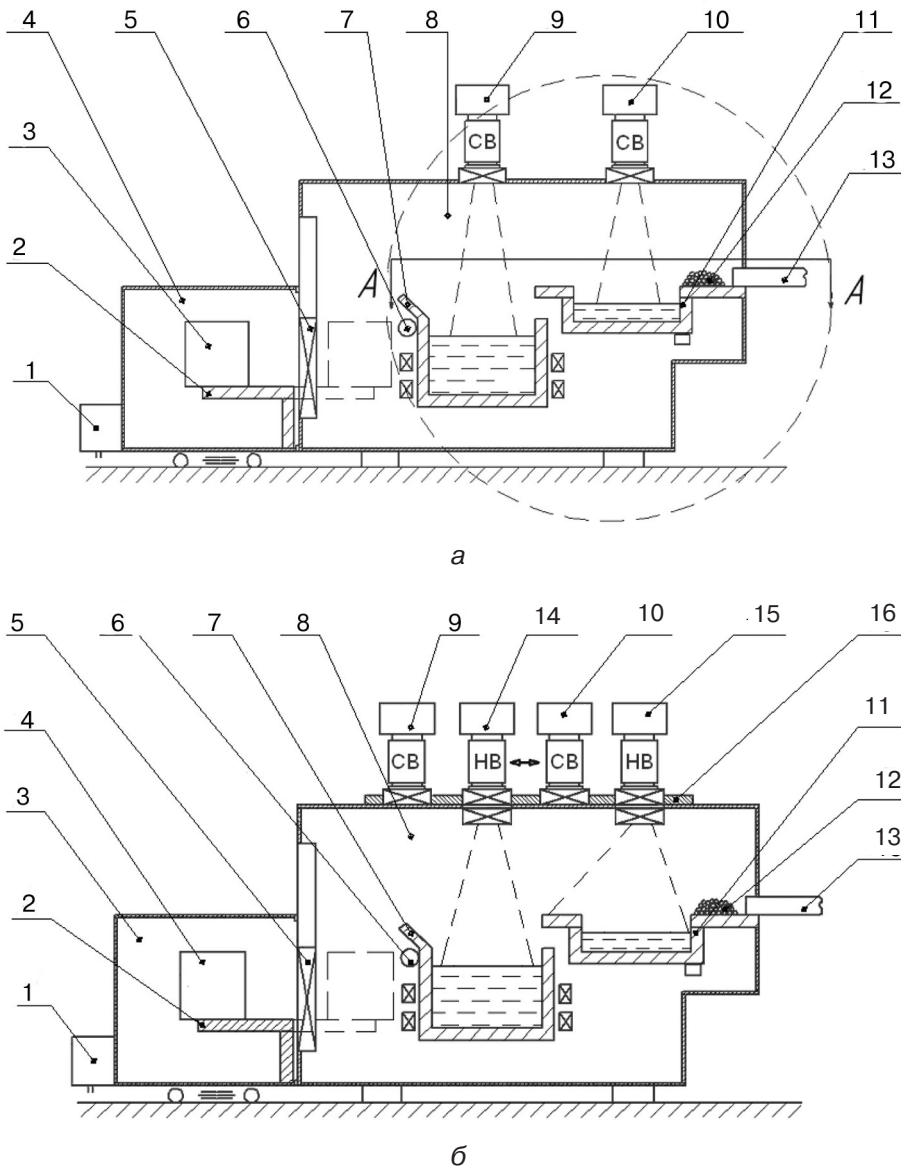


Рис. 4. Схема электронно-лучевой литейной установки с промежуточной емкостью: а – вариант установки без смены нагревателей; б – вариант установки со сменой нагревателей; 1 – механизм перемещения камеры литейных форм; 2 – устройство перемещения блока литейных форм; 3 – камера литейных форм; 4 – блок литейных форм; 5 – вакуумный затвор; 6 – ось поворота плавильного тигля; 7 – плавильный тигель; 8 – плавильная камера; 9, 10 – средневакуумные пушки ВТР; 11 – промежуточная емкость; 12 – шихта; 13 – устройство подачи шихты на переплав; 14, 15 – низковакуумные пушки ВТР; 16 – передвижная плита пушек

перемещения этих плит пушки могут по очереди устанавливаться на позициях обогрева. Для предупреждения нарушения вакуума при смене пушек они оснащены индивидуальными плоскими затворами, которые на позициях обогрева стыкуются с аналогичными затворами, установленными на плавильной камере. Возможность перемещения пушек обусловлена особенностями их конструктивного исполнения, в том числе отсутствием вакуумных насосов.

Установка (см. рис. 3) предназначена для гарнисажной плавки с донным сливом расплава из тигля и загрузкой шихты непосредственно в тигель [29]. Она может использоваться, например, для рафинирования расплава кремния от бора за счет подачи в плавильную камеру паров воды, вследствие чего давление в камере резко возрастет, что и обуславливает необходимость смены нагревателя. Подача рафинирующего газа может проводиться с использованием любого известного устройства, используемого для этой цели, однако в приведенной на рисунке конструкции подача паров воды осуществляется через специальное устройство, которое смонтировано непосредственно на плавильном тигле и обеспечивает обдув поверхности расплава. Устройство разрабатывалось для повышения эффективности рафинирующей обработки расплава.

Установка (см. рис. 4) пригодна для тигельной плавки с предварительным расплавлением шихты и рафинированием расплава в промежуточной емкости, сливом расплава из тигля через сливной носок и получением изделий в подогреваемых керамических формах. По существу такая установка может рассматриваться как агрегат для реализации процесса гарнисажной плавки с рафинированием отходов жаропрочных сплавов [30]. Наличие промежуточной емкости в этом случае обеспечивает более благоприятные условия для рафинирования, что важно при переплаве отходов. Введение в плавильную камеру газа может оказаться целесообразным с целью, например, повышения плотности металла при заливке изделий за счет создания в камере повышенного давления инертного газа. Однако по сравнению с рассмотренным выше случаем в данной установке смена нагревателей представляется более сложной, поскольку необходимо осуществлять смену двух пушек. С точки зрения повышения эффективности рафинирования целесообразно проводить также обдув расплава рафинирующим газом в промежуточной емкости.

Выполнение пушек перемещающимися позволяет разрабатывать установки, в которых одна пушка может обслуживать несколько плавильных камер. При этом возможны два варианта конструктивного исполнения агрегата. По одному из них перемещение пушки от одной плавильной камеры к другой может осуществляться по схемам, приведенным на рис. 3 и 4, то есть за счет оснащения установки передвижной плитой. По другому варианту перемещение пушки может проводиться за счет оснащения установки поворотным устройством аналогично тому, как это было предложено ранее для перемещения пушки в установке для центробежного литья [31] или применяется на практике в настоящее время для перемещения блока пушек ВТР в электронно-лучевых печах серий ВТ [22] или ВМО [32].

На рис. 5 приведена схема установки, которая обеспечивает проведение совмещенной вакуумно-индукционной и электронно-лучевой плавки при регулируемом давлении остаточных газов в плавильной камере и получении литых изделий например, лопаток ГТД в керамических подогреваемых формах. Целесообразность использования совмещенной плавки показана в [33]. Особенность конструктивного исполнения предлагаемой установки в том, что на плавильной камере монтируются одновременно загрузочное устройство в виде традиционного механизма с вертикальной подачей заготовки в тигель и две пушки ВТР – средне- и низковакуумная. Эти пушки устанавливаются как можно ближе к загрузочному устройству с тем, чтобы угол между осью загрузочного устройства и траекторией электронных лучей от пушек до центра расплава в тигле не превышал 10° . Такое значение угла выбрано как максимально допустимая величина для исключения отклонения лучей из зоны нагрева под влиянием электромагнитных полей, наводимых индуктором тигля. Для уменьшения подобного влияния над тиглем может быть смонтировано специальное металлическое кольцо. Особенность работы установки заключается в том, что сразу после загрузки заготовки в тигель и герметизации плавильной камеры можно начать процесс плавки одновременно за счет индукционного нагрева и нагрева низковакуумной пушкой, а по достижении более

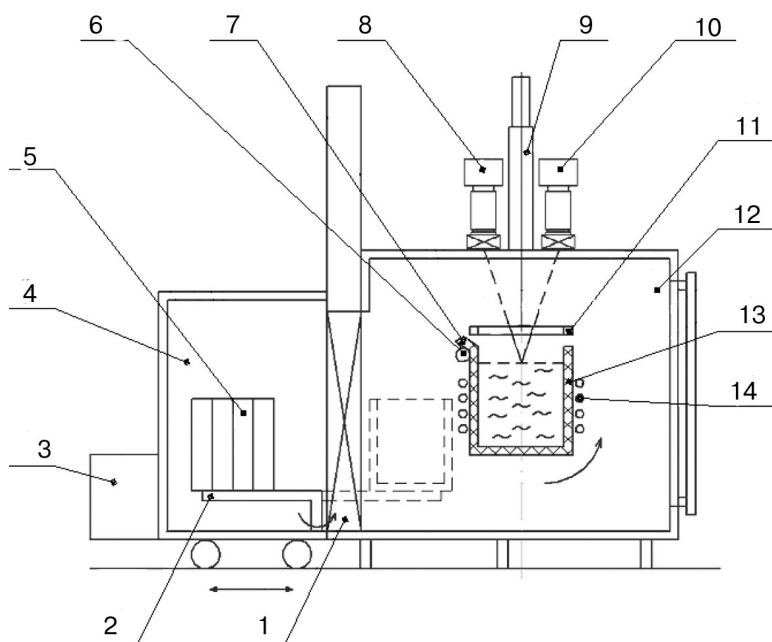


Рис. 5. Схема литейной установки для совмещенной вакуумно-индукционной и электронно-лучевой плавки: 1 – вакуумный затвор; 2 – устройство перемещения блока литейных форм; 3 – механизм перемещения камеры литейных форм; 4 – камера литейных форм; 5 – блок литейных форм; 6 – ось поворота тигля; 7 – сливной носок тигля; 8 – средневакуумная пушка ВТР; 9 – устройство загрузки шихты в тигель; 10 – низковакуумная пушка ВТР; 11 – металлическое кольцо; 12 – плавильная камера; 13 – тигель; 14 – индуктор

высокого вакуума, например, давления в плавильной камере в 1,3 Па – перейти на проведение нагрева средневакуумной пушкой. Если давление остаточных газов по каким-то причинам возрастет, можно вернуться к проведению нагрева низковакуумной пушкой. Достоинством предлагаемой установки является повышение производительности по сравнению с вариантом, когда в агрегате используется только средневакуумная пушка.

Установка, схема которой показана на рис. 6, позволяет проводить рафинирование путем одновременной обработки расплава двумя рафинирующими средами, в данном случае низким и средним вакуумом. В конструктивном плане особенность установки состоит в том, что плавильная камера разделяется на две зоны перегородкой, которая над гарнисажным тиглем проходит по его оси на высоте уровня жидкометаллической ванны. Каждая из зон имеет самостоятельную систему обеспечения вакуума, и над гарнисажным тиглем в одной из зон смонтирована низковакуумная пушка ВТР, а в другой – средневакуумная пушка ВТР, причем зона, в которой установлена низковакуумная пушка, оснащена приспособлением для подачи рафинирующего газа. После загрузки шихты в тигель в плавильной камере создают разрежение и по достижении в зоне, в которой расположена низковакуумная пушка, давления остаточных газов около 13 Па проводят расплавление шихты, а по достижении в другой зоне вакуума около 1,3 Па включают также средневакуумную пушку. В дальнейшем плавка проводится двумя пушками одновременно. При необходимости обработки расплава рафинирующим газом в зону, в которой

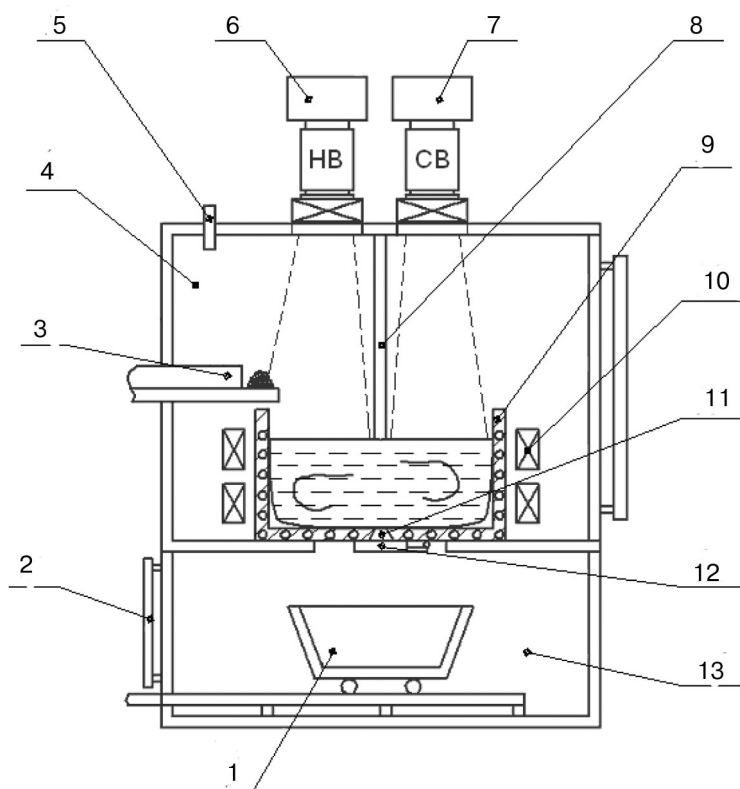


Рис. 6. Схема установки для комбинированной обработки расплава в низком и среднем вакууме: 1 – литейная форма; 2 – крышка камеры литейных форм; 3 – устройство загрузки шихты; 4 – плавильная камера; 5 – устройство подачи рафинирующего газа в камеру; 6 – низковакуумная пушка ВТР; 7 – средневакуумная пушка ВТР; 8 – перегородка; 9 – гарнисажный тигель; 10 – катушка системы ЭМП тигля; 11 – сливное отверстие тигля; 12 – крышка сливного отверстия; 13 – камера литейных форм

расположена низковакуумная пушка, вводят газ, и таким образом плавка проводится при различном давлении в разных зонах. Представляется, что применение установки может быть особенно эффективным для рафинирования металлургического кремния с целью получения кремния для солнечных батарей. Получение кремния солнечной чистоты рассматривается как задача, имеющая большое значение для решения энергетических проблем страны уже в недалеком будущем [34].

Выше указывалось, что пушки и плавильно-заливочные тигли при разработке электронно-лучевых литейных установок размещают на одной вертикальной оси. Это условие соблюдается во всех установках, рассматриваемых в настоящей работе, хотя такое размещение обуславливает известные трудности в эксплуатации пушек, которые связаны с нахождением их катодно-анодных узлов в зоне прямой видимости с обогреваемых поверхностями. Эти трудности удастся нивелировать за счет выполнения пушек ВТР с угловыми лучеводами. Преимущества пушек с угловыми лучеводами рассмотрены в работе [27], здесь же важно подчеркнуть возможность разработки установки, у которой лучеводы пушек могут быть установлены на плавильной камере таким образом, чтобы присоединенные к камере части лучеводов были расположены перпендикулярно к поверхностям, которые обогреваются пушками, и на одной оси с системами электромагнитного перемешивания тигля или

промежуточной емкости. Возможная схема такой установки показана на рис. 7, одной из ее особенностей является использование промежуточной емкости. Нагрев в емкости и тигле обеспечивается с максимально возможным КПД, поскольку лучи попадают на обогреваемые поверхности под прямым углом.

На рис. 8 приведена схема установки, у которой пушка ВТР с угловым лучеводом смонтирована таким образом, что прямолинейная часть лучевода размещается непосредственно в плавильной камере, к которой она герметично присоединяется с помощью фланца. На этом же фланце также герметично установлено колено, которое соединяет обе части лучевода, находящиеся в камере и вне камеры, угол которого равняется углу поворота луча. На этом колене размещены катушки системы поворота луча на указанный угол, а само колено выполнено с возможностью замены. Таким образом, пушка легко перестраивается на другой угол поворота луча.

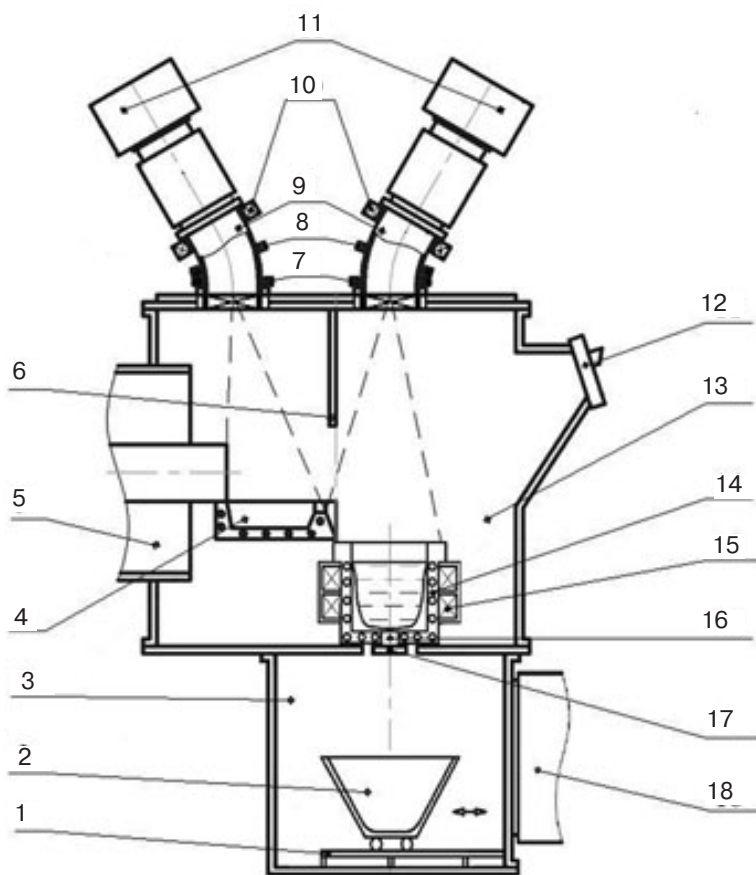


Рис. 7. Схема электронно-лучевой литейной установки с пушками ВТР, угловые лучеводы которых размещены перпендикулярно обогреваемым поверхностям: 1 – эстакада литейных форм; 2 – литейная форма; 3 – камера литейных форм; 4 – промежуточная емкость; 5 – устройство подачи шихты на переплав; 6 – перегородка; 7 – катушки системы развертки луча; 8 – катушки системы поворота луча; 9 – колено; 10 – катушки системы фокусировки; 11 – пушки ВТР; 12 – смотровая система; 13 – плавильная камера; 14 – тигель; 15 – индуктор; 16 – сливное отверстие; 17 – крышка отверстия; 18 – шлюзовая камера

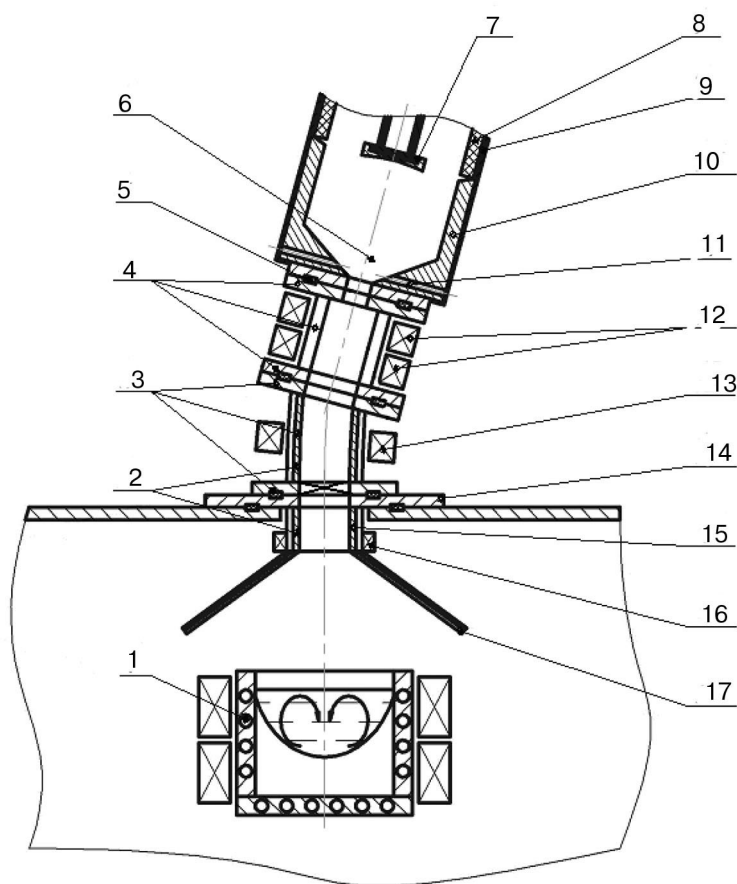


Рис. 8. Схема электронно-лучевой литейной установки с тепловым экраном на лучевом в плавильной камере: 1 – тигель с системой ЭМП; 2 – колено; 3 – соединительные фланцы; 4 – лучевод; 5 – плита с каналами для охлаждающей воды; 6 – отверстие анода; 7 – катод; 8 – изолятор; 9 – корпус пушки; 10 – анод; 11 – система подачи рабочего газа; 12 – катушки системы фокусировки луча; 13 – катушка системы поворота луча; 14 – соединительный фланец; 15 – часть лучевода, размещенная в плавильной камере; 16 – катушка системы развертки луча; 17 – тепловой экран

На части лучевода, размещенной в плавильной камере, может быть установлен тепловой экран, наличие которого будет способствовать снижению тепловых потерь. Отметим, что использование при электронно-лучевой гарнисажной плавке тепловых экранов в свое время рассматривалось как перспективное средство повышения эффективности электронно-лучевого нагрева [14], в частности, были предложены различные варианты конструкций тепловых экранов [35, 36]. Поэтому обоснованно возвращение к этой проблеме на новом уровне, когда имеется возможность более надежного конструктивного решения как установки, так и тигля. Заслуживает внимания и выполненное ранее теоретическое обоснование применения тепловых экранов [37], которое желательно развивать с учетом накопленных новых знаний.

Завершая рассмотрение предложенных схем электронно-лучевых литейных установок нового поколения, отличительной чертой которых является использование средне- и низковакуумных пушек ВТР и промежуточных емкостей, целесообразно проанализировать возможность разработки установки, в которой плавка могла бы

проводиться в высоком вакууме, но также с использованием пушек ВТР. Для реализации такого варианта плавильного агрегата необходимо обеспечить достаточную работоспособность пушек ВТР в условиях наличия высокого вакуума в плавильной камере. В принципе, первые разработки в этом направлении уже имеются [38], однако очевидно, что для надежного решения этой задачи необходимо провести дальнейшие исследования электронно-оптических свойств разрядных промежутков с целью создания эффективной электронно-оптической системы пушки ВТР для работы в указанных условиях.



Список литературы

1. Мовчан Б. А., Тихоновский А. Л., Курапов Ю. А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов. – Киев: Наук. думка, 1973. – 239 с.
2. Тихоновский А. Л., Тур А. А. Рафинирование металлов и сплавов методом электронно-лучевой плавки. – Киев: Наук. думка, 1984. – 272 с.
3. Электронно-лучевая плавка / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, Д. А. Козлитин и др. – Киев: Наук. думка, 1997. – 266 с.
4. Электронно-лучевая плавка титана / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин, Г. В. Жук. – Киев: Наук. думка, 2006. – 248 с.
5. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорреакционных металлов / Б. Е. Патон, Н. П. Тригуб, С. В. Ахонин. – Киев: Наук. думка, 1998. – 312 с.
6. НПЦ «Титан», ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – <http://www.yadres.com/pages/1/171/19353>
7. МК ООО «Антарес». – <http://www.antares.com.ua/ru/Facilities.html>
8. ООО «Стратегия БМ». – <http://www.kv-titan.com/strategy>
9. НПП ООО «Геконт». – <http://www.ua-relations.com/show.php.user=133376>
10. Ковальчук Д. В., Кондратий Н. П. Электронно-лучевой переплав титана – пути развития // Литье и металлургия. – 2008. – № 3 (48). – С. 275-282.
11. Мельник І. В. Теоретичні та експериментальні основи проектування технологічних газорозрядних джерел електронів: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2008. – 39 с.
12. Чернов В. А. Мощные электронные пушки высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) и оборудование на их основе // Сб. трудов 9-го Симпозиума «Электротехника 2030», Москва, 29-31 мая 2007 г.
13. Electron Beam Melting Titanium Sponge Using High Voltage Glow Discharge Guns / A. L. Tichonovsky et. al. // Advances in Special Electrometallurgy. – 1993. – № 3. – P. 70-73.
14. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С. В. Ладохина. – Киев: Изд-во «Сталь», 2007. – 626 с.
15. Виробництво партії трубних заготовок трекс-труб та виготовлення дослідно-промислової партії твельних труб зі сплаву Zr1Nb із вітчизняної сировини / В. М. Ажажа, Б. В. Борц, І. Н. Бутенко та ін. // Наука та інновації. – 2006. – Т. 2, № 6. – С. 18-30.
16. Гладков А. С. Особливості електронно-променевої гарнісажної плавки сплаву Zr-1 Nb і розробка технології виготовлення трубних заготовок: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2009. – 20 с.
17. Вахрушева В. С. Формування структури та властивостей сталі і сплавів при виготовленні труб для ядерних енергетичних установок: Автореферат. дис. ... д-ра техн. наук. – Дніпропетровськ, 2003. – 36 с.
18. Буряк Т. М. Структурутворення і формування властивостей трубної заготовки і труб для атомної енергетики з використанням нових способів виробництва: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Дніпропетровськ, 2005. – 20 с.
19. Коленкова О. А. Особливості структурутворення та оцінка технологічної пластичності з використанням акустичної емісії при виготовленні труб-оболонк твел зі сплаву Zr1Nb: Автореферат. дис. ... канд. техн. наук. – Дніпропетровськ, 2009. – 20 с.
20. А.с. 399702 СССР, МКИ В22D 13/00. Вакуумная литейная установка / В. Л. Ульянов, Э. Е. Шишкарев, В. Е. Явич, В. В. Назаренко. – Оpubл. 30.03.1986.

21. Тутик В. А. Низьковакуумні газорозрядні електронні гармати і їх використання в електронно-променевих технологіях: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Харків, 2009. – 40 с.
22. Новая печь ВТ02 для электронно-лучевой плавки титановых сплавов, разработанная МК «Антарес» / О. К. Собко-Нестерук, Н. Г. Третьак, Н. В. Чайка и др. // Современная электрометаллургия. – 2012. – № 3. – С. 20-25.
23. Метод плавания в гарнисажных печах с применением электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда с холодным катодом / В. В. Гусев, Я. Я. Удрис, В.А. Чернов и др. // Прогрессивные способы плавки для фасонного литья. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1978. – С. 64-72.
24. Ладохин С. В. Некоторые особенности создания электронно-лучевых литейных установок //Прогрессивные технологии литья и кристаллизации сплавов. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1983. – С. 127-134.
25. ООО «КБ ВМО» – <http://www.kv-titan.com>
26. Ладохин С. В., Вахрушева В. С. Перспективы применения электронно-лучевой плавки для получения сплавов циркония в Украине // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 4. – С. 22-27.
27. Ладохин С. В. Новое оборудование для электронно-лучевой плавки и литья металлов и сплавов // Металл и литье Украины – 2012. – № 7. – С. 3-10.
28. Пат. № 93625, України МПК H01J 37/06. Газорозрядна електронна гармата./ В. Б. Чернявський, С. В. Ладохін, В. А. Семенець та ін. – Опубл. 25.02.2011, Бюл. № 4.
29. Пат. № 98904, України МПК C22B 9/22. Електронно-променева ливарна установка /С. В. Ладохін, Т. В. Лапшук, А. С. Гладков, М. Ю. Смірнов. – Опубл. 12.06.2012, Бюл. № 5.
30. Анікін Ю. П. Удосконалення технології та устаткування для електронно-променевої плавки та лиття жароміцних нікелевих сплавів: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 1998. – 19 с.
31. А.с. 784455 СССР, МКИ F27B 14/04. Электронно-лучевая установка для центробежного литья / Э. Е. Шишкарев, С. В. Ладохин. – Опубл. 01.08.1980.
32. ООО «ВМО-Сервис» /Бюллетень. – Киев, 2009. – 12 с.
33. Квасницька Ю. Г. Технологія одержання шихтової заготовки з ливарних відходів жароміцних корозійностійких сплавів для виробництва лопаток ГТД: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2004. – 20 с.
34. Гасик М. И., Гасик М. М. Электротермия кремния. – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия, 2011. – 426 с.
35. А.с. 641746 СССР, МКИ C21C 5/56. Гарнисажный плавильный тигель / В. Д. Довбня, Р. В. Погосбемян, В. В. Орлов и др. – Опубл. 14.09.1978.
36. А.с. 1118068 СССР, МКИ C21B 9/22. Электронно-лучевая литейная установка /С. В. Ладохин, В. И. Мирошниченко, Ю. Ф. Аникин. – Опубл. 08.06.1984.
37. Гранкин Э. П., Ладохин С. В. Сравнительная оценка эффективности тепловых экранов при электронно-лучевой гарнисажной плавке // Прогрессивные способы плавки литейных сплавов. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1987. – С. 73-78.
38. Пат. № 90536 України, МПК H01J 37/06. Газорозрядна електронна гармата./ С. В. Ладохін, А. С. Гладков, В. Б. Чернявський та ін. – Опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.

Поступила 27.05.2013