

С. В. Ладохин, Т. В. Лапшук, Е. А. Дрозд, А. И. Глухенький*, Ю. М. Гориславец*,
А. И. Бондар*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Институт электродинамики НАН Украины, Киев

Тигли для электронно-лучевой гарнисажной плавки

Рассмотрены конструкции тиглей для электронно-лучевой гарнисажной плавки (ЭЛГП). Представлены принципиальные схемы тиглей большой емкости, в том числе полученные в результате мультифизического моделирования электронно-лучевой плавки титана и расчетного анализа выбора конструкции тиглей. Исследовано влияние направления движения расплава при электромагнитном перемешивании на эффективность ЭЛГП.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка, гарнисажный тигель, расплав титана, электромагнитное перемешивание, мультифизическое моделирование, направление движения.

Электронно-лучевая гарнисажная плавка (ЭЛГП) создавалась специально для решения проблемы получения литых изделий и заготовок из тугоплавких и химически активных металлов и сплавов [1]. В принципе аналогичную проблему решает и вакуумно-дуговая гарнисажная плавка (ВДГП) [2], однако особенности этой технологии не позволяют обеспечивать эффективное рафинирование некоторых тугоплавких металлов, что и обусловило развитие работ по ЭЛГП.

Возможность реализации технологического процесса ЭЛГП определяется используемым оборудованием, одним из основных элементов которого являются гарнисажные тигли. Разработке гарнисажных тиглей посвящены достаточно многочисленные исследования, в которых рассмотрены вопросы как их конструктивного исполнения, так и технологических особенностей проведения плавки различных металлов и сплавов. Обобщение результатов этих исследований по состоянию на начало текущего столетия выполнено в работе [3]. На рис. 1 приведены принципиальные схемы гарнисажных тиглей для ЭЛГП, которые рассмотрены в этой работе и нашли практическое применение, то есть были изготовлены и реально эксплуатировались.

Тигель, схема которого показана на рис. 1, а, был первым гарнисажным тиглем, использованным при ЭЛГП. Плавильная емкость тигля выполнена из профилированной медной трубки и футерована штабиками тугоплавкого металла (вольфрам или молибден). В таком тигле можно получать небольшое количество расплава для заливки в литейную форму. Однако выплавку достаточно

сложного по составу сплава этот тигель не обеспечивал. Кроме того, высокой была вероятность загрязнения расплава материалом штабиков, несмотря на то, что на них формировался толстый слой гарнисажа.

В практическом плане опыт эксплуатации рассматриваемых тиглей, подробно описанный в [4], интересен в том отношении, что позволил проверить работу тепловых экранов, без которых плавка в подобных тиглях сопровождается очень высокими расходами электроэнергии.

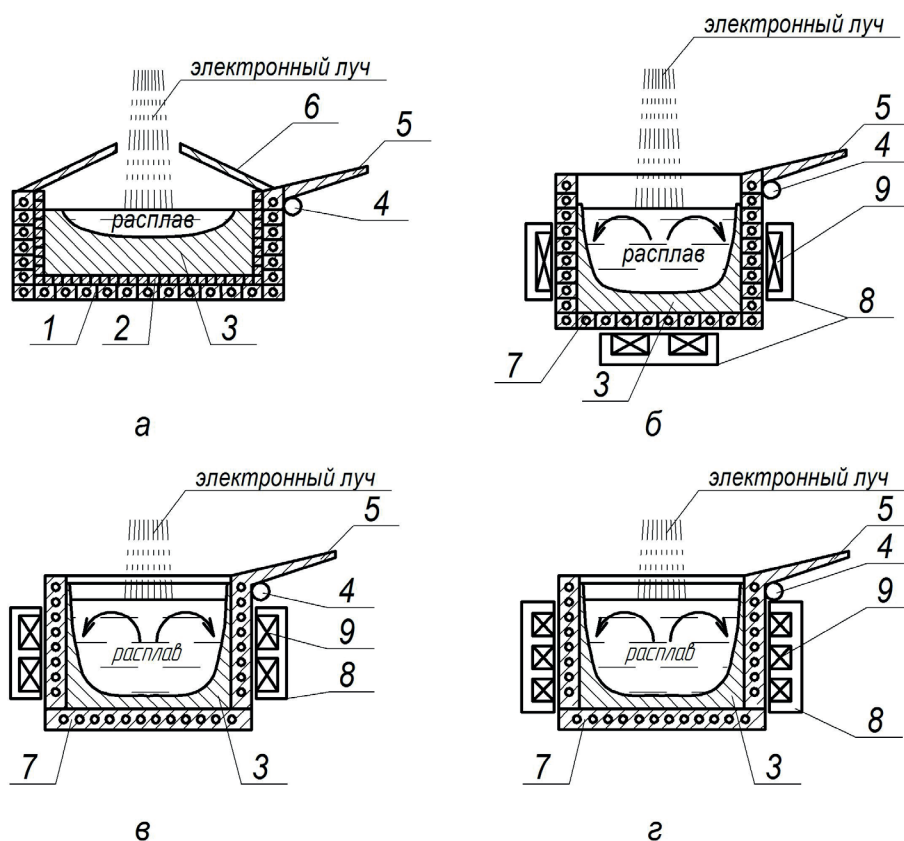


Рис. 1. Принципиальные схемы действующих гарнисажных тиглей для ЭЛГП: а – без принудительного перемешивания расплава; б – с донно-боковой СЭМП; в – с боковой двухкатушечной СЭМП; г – с боковой трехкатушечной СЭМП; 1 – тигель из медной трубки; 2 – штабики тугоплавкого металла; 3 – гарнисаж; 4 – ось поворота тигля; 5 – сливной носок; 6 – тепловой экран; 7 – медный тигель; 8 – магнитопровод; 9 – катушки СЭМП

На рис. 1, б приведена схема тигля, в котором для интенсификации перемешивания расплава применена донно-боковая система электромагнитного перемешивания (СЭМП) [5]. Эта система была первой разработкой подобного рода, использованной при ЭЛГП, причем первоначально в тиглях также применялись плавильные емкости, выполненные, как и в рассмотренном выше случае, из профилированной медной трубки. В дальнейшем, однако, более целесообразным оказалось использование плавильных емкостей в виде литых изделий из меди, в стенках которых выполнялись отверстия для охлаждающей воды и разрезы в местах размещения катушек СЭМП.

Что касается конструктивного исполнения СЭМП, то обычно эти системы представляют собой индукторы, состоящие из двух или трех коаксиальных катушек, размещенных в П-образных магнитопроводах, охватывающих плавильные емкости со стороны боковых стенок так, как это показано на рис. 1, в и г, соответственно, для двух- и трехкатушечных СЭМП. Преимуществом такого размещения катушек является возможность использования в тиглях донного слива расплава, что было реализовано на практике при литье сплавов циркония и титана [3]. Электропитание катушек, как правило, осуществляется токами промышленной частоты при пониженном напряжении (~ 20 В) и высокой силе тока (~ 1000 А). В двухкатушечных СЭМП сдвиг фаз между токами составляет 90 эл. град., в трехкатушечных – обычно 60 эл. град.

Перемешивание расплава наиболее целесообразным оказалось осуществлять в направлении от центра ванны к стенкам тигля, но при сливе расплава через отверстие в днище его приходится проводить в обратном направлении – от стенок тигля к центру ванны.

В дополнение к приведенным на рис. 1 схемам тиглей можно добавить тигель, у которого плавильная емкость выполнена из немагнитной нержавеющей стали X18H10T. Такой тигель оказался приемлемым для плавки жаропрочных никелевых сплавов при литье лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) [6]. Его преимуществами являются простота изготовления, удобство в эксплуатации и некоторое снижение расхода электроэнергии по сравнению с плавкой в тиглях с медными плавильными емкостями. К сожалению, для плавки и литья тугоплавких металлов и сплавов на их основе такой тигель оказался неприемлемым.

Наряду с рассмотренными конструкциями тиглей в ходе выполнения работ по ЭЛГП предлагались также другие конструктивные решения тиглей, которые, однако, в металле не изготавливались главным образом вследствие сложности их исполнения. На рис. 2, 3 и 4 приведены принципиальные схемы конструктивного исполнения трех таких тиглей, выбор которых для

рассмотрения обусловлен тем, что они обеспечивают получение большей массы расплава выплавляемых в них сплавов по сравнению с используемыми тиглями.

Первой такой разработкой является тигель, принципиальная схема которого приведена на рис. 2. Особенностью тигля является то, что его плавильная емкость выполнена в виде двух усеченных конусов, сопряженных большими основаниями на уровне середины ее высоты, причем угол сопряжения охватывает обе конусные поверхности емкости [7].

СЭМП тигля выполнена из катушек с магнитопроводами П-образной или С-образной формы, охватывающими плавильную емкость. При этом, если СЭМП выполнена в виде двух коаксиальных катушек с П-образными магнитопроводами, то каждая из катушек охватывает одну из конусных поверхностей (рис. 2, а). Если же СЭМП выполняется в виде трех симметрично расположенных катушек с С-образными магнитопроводами, то они охватывают обе конусные поверхности (рис. 2, б).

Обе формирующие емкость конусные поверхности выполнены из материала с высокой теплопроводностью, например, из меди, водоохлаждаемыми. Верхнее основание усеченного конуса, размещенного сверху, открыто, что обеспечивает прохождение электронного луча для обогрева металла в емкости и возможность слива расплава. Нижнее основание усеченного конуса, размещенного снизу, закрыто медным днищем, также водоохлаждаемым. Высота конусов выбирается такой, чтобы плоскость их пересечения была на уровне половины от высоты верхнего конуса с тем, чтобы верхняя часть его над уровнем металла служила тепловым экраном.

Угол пересечения образующих конусов выбирают в пределах 60-120° в зависимости от свойств переплавляемого металла. Для легкоплавких металлов, у которых гарнисаж не имеет высоких экранирующих свойств, этот угол целесообразно выбирать близким к 120°. Для тугоплавких металлов, с высокими экранирующими свойствами гарнисажа,

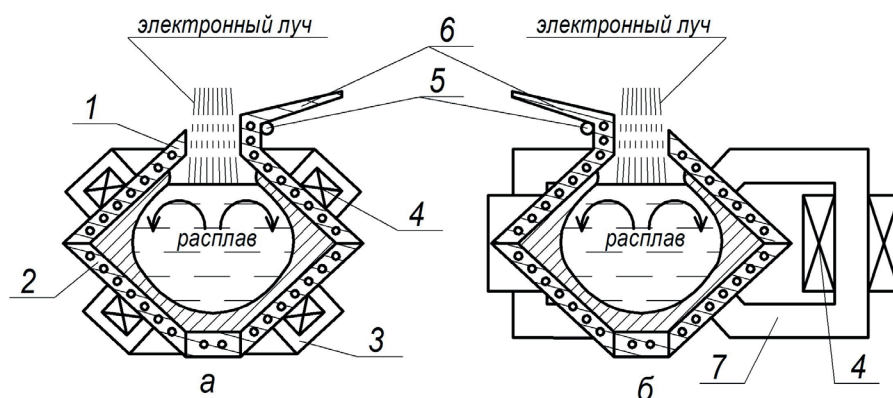


Рис. 2. Принципиальные схемы гарнисажного тигля, плавильная емкость которого образована конусными поверхностями: а – СЭМП тигля выполнена с коаксиальными катушками, установленными в П-образных магнитопроводах; б – СЭМП тигля выполнена с катушками, установленными на С-образных магнитопроводах; 1 – верхний конус тигля; 2 – нижний конус тигля; 3 – П-образный магнитопровод; 4 – катушки СЭМП; 5 – ось поворота тигля; 6 – сливной носок; 7 – С-образный магнитопровод

следует этот угол выбирать близким к 60° . Однако в любом случае не следует угол пересечения образующих конусов иметь более 120° , так как при этом будет возрастать рассеивание электромагнитных полей и снизится эффективность воздействия электромагнитной системы. Кроме того, ухудшится экранирующее воздействие верхней части верхнего конуса над уровнем металла. Если же угол пересечения образующих конусов будет меньше 60° , то уменьшится полезный объем и производительность тигля.

Естественно, что с целью уменьшения степени экранирования магнитных полей и повышения КПД СЭМП в местах установки магнитопроводов, конусы выполняются со сквозными разрезами.

Тигель, принципиальная схема которого приведена на рис. 3, не является в полном смысле гарнисажным, поскольку представляет собой плавильное устройство, обеспечивающее совмещение индукционной и электронно-лучевой плавки в одной плавильной емкости [8]. Необходимость в разработке такого комбинированного тигля возникла в связи с поисками путей переработки литейных отходов жаропрочных коррозионноустойчивых сплавов для получения лопаток газотурбинных двигателей [9].

Решение задачи было найдено в сочетании двух указанных выше методов плавки в одном тигле, причем гарнисажную часть тигля для совмещенной плавки оказалось целесообразным размещать сверху над индукционной его частью и оснащать двухкатушечной СЭМП. В принципе гарнисажная часть тигля с электронно-лучевым нагревом нужна не только для интенсификации процесса рафинирования, но и для предупреждения разъедания расплавом керамики, то есть загрязнения расплава оксидными включениями.

Очевидным преимуществом рассматриваемого тигля, по сравнению с гарнисажным, является практически неограниченная масса выплавляемого в нем сплава, что характерно для тиглей индукционной плавки. Следует также отметить, что в перспективе комбинированный тигель позволит не только решить задачу возвращения литейных отходов жаропрочных сплавов в производство, но и получать из них лопатки ГТД.

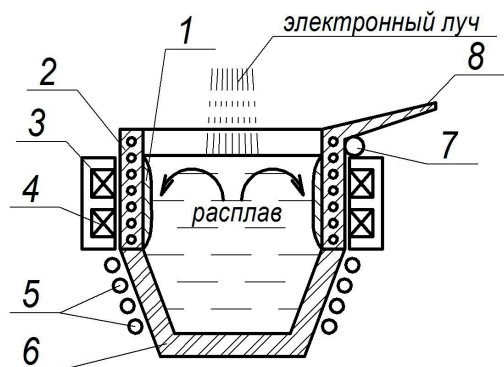


Рис. 3. Принципиальная схема тигля для совмещенной индукционно-лучевой плавки: 1 – гарнисаж; 2 – гарнисажная часть тигля; 3 – магнитопровод; 4 – катушки СЭМП; 5 – индуктор; 6 – керамическая часть тигля; 7 – ось поворота тигля; 8 – сливной носок

К сожалению, как и указанный выше тигель с плавильной емкостью из нержавеющей стали, рассматриваемый тигель для совмещенной плавки непригоден для плавки тугоплавких металлов.

На рис. 4 приведена принципиальная схема гарнисажного тигля, идея которого возникла как результат мультифизического моделирования процесса электронно-лучевой гарнисажной плавки [10] и расчетного обоснования выбора конструкции тигля повышенной емкости для плавки титана [11]. В указанных работах решалась задача разработки тигля с донным сливом для получения до 150 кг расплава титана. Было установлено, что для обеспечения такого слива расплава отношение высоты слоя расплава в тигле к его диаметру не должно превышать значений 0,5-0,6, а движение расплава на поверхности при этом должно быть направлено от стенок к центру. Сочетание обоих факторов при плавке позволяет достичь размыва донного сливного отверстия, избежав промыва бокового гарнисажа, который неизбежно приводит к повышенной теплоотдаче к воде в стенках тигля и, соответственно, к нерациональному расходованию энергии при ЭЛГП. При сливе расплава через носок соотношение размеров тигля может быть и выше. Преимуществом при большей высоте расплава является возможность использования более эффективного трехкатушечного перемешивателя.

Предложенная конструкция тигля позволяет решить обе эти задачи за счет того, что СЭМП выполняется в виде трехкатушечного индуктора, который может подключаться как к трехфазной, так и двухфазной системам электропитания, причем в последнем случае к источнику электропитания подключаются только две катушки. При этом при плавке с использованием трехкатушечного индуктора расплав в тигле формируется по всей высоте тигля с последующим сливом через носок, а при плавке с использованием двухкатушечного индуктора расплав формируется на половине высоты тигля со сливом через отверстие в днище.

Целесообразность использования того или иного варианта плавки определяется выплавляемым сплавом, а именно, при сливе через отверстие в днище можно выплавлять простые по составу сплавы и

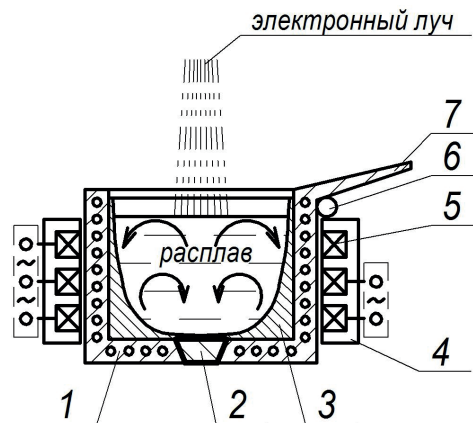


Рис. 4. Принципиальная схема гарнисажного тигля повышенной емкости: 1 – медный тигель; 2 – сливное отверстие; 3 – гарнисаж; 4 – магнитопровод; 5 – катушки СЭМП; 6 – ось поворота тигля; 7 – сливной носок

чистые металлы, а при сливе через носок – сложнолегированные многокомпонентные сплавы. Это объясняется тем, что при сливе расплава через отверстие в днище невозможно с достаточной точностью устанавливать время размыва гарнисажа в сливном отверстии, и это не позволяет правильно определять момент ввода легирующих элементов при выплавке сложнолегированных сплавов.

Что касается перемешивания, то помимо начального периода работы перемешивателя и вне зависимости от способа слива расплава, его необходимо проводить в направлении от стенок тигля к центру ванны (обратное движение), так как при этом минимизируется вероятность промыва бокового гарнисажа.

На начальном этапе работы перемешивателя, пока объем жидкой фазы остается незначительным, вне зависимости от прямого либо обратного чередования фаз электропитания катушек индуктора, движение расплава по поверхности происходит в направлении от центра тигля к его стенкам (прямое движение). Однако интенсивность движения будет существенно выше при прямом чередовании фаз индуктора и поэтому именно ему следует отдать предпочтение. Дополнительно при прямом электромагнитном перемешивании его интенсификации на начальном этапе будут ощутимо способствовать совпадающие по направлению тангенциальные силы поверхностного натяжения, возникающие при ЭЛГП за счет разной температуры поверхности расплава (эффект Марангони).

В качестве иллюстрации влияния направления движения расплава на эффективность ЭЛГП, рассмотрим зависимость так называемого коэффициента слива (k_p), представляющего собой отношение массы расплава к общей массе завалки шихты в тигле, от мощности электронно-лучевого нагрева ($P_{элн}$).

На рис. 5 приведены кривые, отражающие результаты расчетной оценки зависимости k_p от $P_{элн}$ при прямом (кривая 1) и обратном (кривая 2) направлениях движения расплава, полученные по методике, предложенной в [10, 11] для тигля, который предназначен для донного слива порядка 150 кг титана. Тигель имеет внутренний диаметр 485 мм с высотой загрузки титана в расплавленном виде 239 мм. Общая масса загрузки титана при этом составляет 187 кг. Расчетные данные получены для тигля с количеством секций $n = 45$ и при суммарных ампер-витках двухкатушечной СЭМП $Iw = 30$ кА, эффект Марангони не учитывался. В отличие от [11] в данных расчетах использовалось уточненное значение удельной электропроводности жидкого титана $6 \cdot 10^5$ См/м (ранее оно принималась равным $3 \cdot 10^5$ См/м).

Как видно из рис. 5 прямое направление движения расплава при незначительной мощности электронно-лучевого нагрева (80 кВт) позволяет в установившемся тепловом режиме получать значительно больший объем жидкого металла ($k_p = 0,124$), чем при обратном движении ($k_p = 0,051$). Однако с ростом мощности нагрева после достижения доли объема жидкой фазы загрузки порядка 20 % ($k_p = 0,2$) обратное движение по отношению к прямому начинает обеспечивать более высокие значения коэффициента слива при одинаковых мощностях электронно-лучевого нагрева.

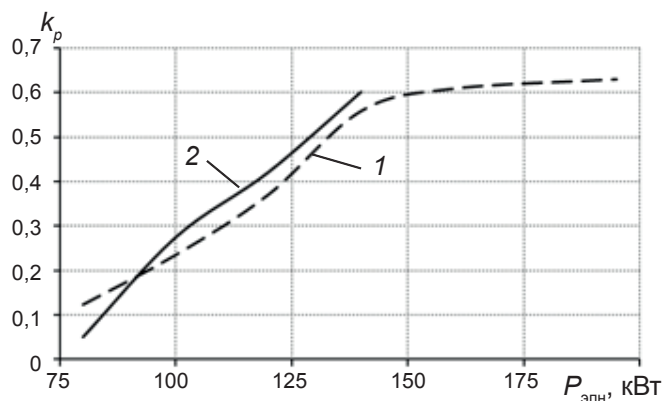


Рис. 5. Зависимость коэффициента слива от мощности электронно-лучевого нагрева при прямом (кривая 1) и обратном (кривая 2) направлениях движения расплава

Как показали результаты расчетов, начальный провал значений коэффициента слива при обратном движении расплава обусловлен относительно малой интенсивностью прямого движения в малом объеме расплава при обратном чередовании фаз электропитания катушек индуктора. По мере накопления жидкой фазы происходит постепенная перестройка структуры течения с прямой на обратную, а интенсивность движения вне зависимости от направления становится приблизительно одинаковой. В дальнейшем начинают сказываться преимущества обратного движения, которые заключаются в переносе тепла с поверхности вглубь загрузки и преимущественном размыве донного гарнисажа. Соответственно, недостатками прямого движения будут повышенные потери с перегретой поверхности расплава и преимущественный размыв бокового гарнисажа.

Как следует из рис. 5, переход с прямого на обратное течение расплава, который выполняется сменой чередования фаз катушек электромагнитного перемешивателя, целесообразно осуществлять после накопления порядка 20 % жидкой фазы. Данное значение соответствует величине коэффициента слива k_p в точке пересечения зависимостей при прямом и обратном течениях.

На рис. 5 кривая 2 заканчивается значениями $P_{элн} = 140$ кВт и $k_p = 0,6$, после которых уже происходит промыв донного гарнисажа и слив расплава. Резкий перегиб кривой 1 после значений $P_{элн} = 140$ кВт и $k_p = 0,56$ свидетельствует о промыве бокового гарнисажа при прямом перемешивании расплава. Последняя точка этой кривой со значениями $P_{элн} = 195$ кВт и $k_p = 0,63$ указывает на энергетическую нерациональность ведения ЭЛГП после промыва бокового гарнисажа.

Формы гарнисажа, соответствующие упомянутым выше расчетным точкам, последовательно представлены на рис. 6. Отношение максимальных значений высоты и диаметра слоя расплава в тигле непосредственно перед промывом сливного отверстия при обратном движении (рис. 6, а) составляет $l/d = 239/440 = 0,54$. Минимальная толщина бокового гарнисажа равна 22 мм, а масса слитого расплава — $0,6 \cdot 187 = 112$ кг.

При прямом движении перед промывом бокового гарнисажа (рис. 6, б) отношение размеров слоя расплава составит $l/d = 189/466 = 0,41$. Размыв бокового

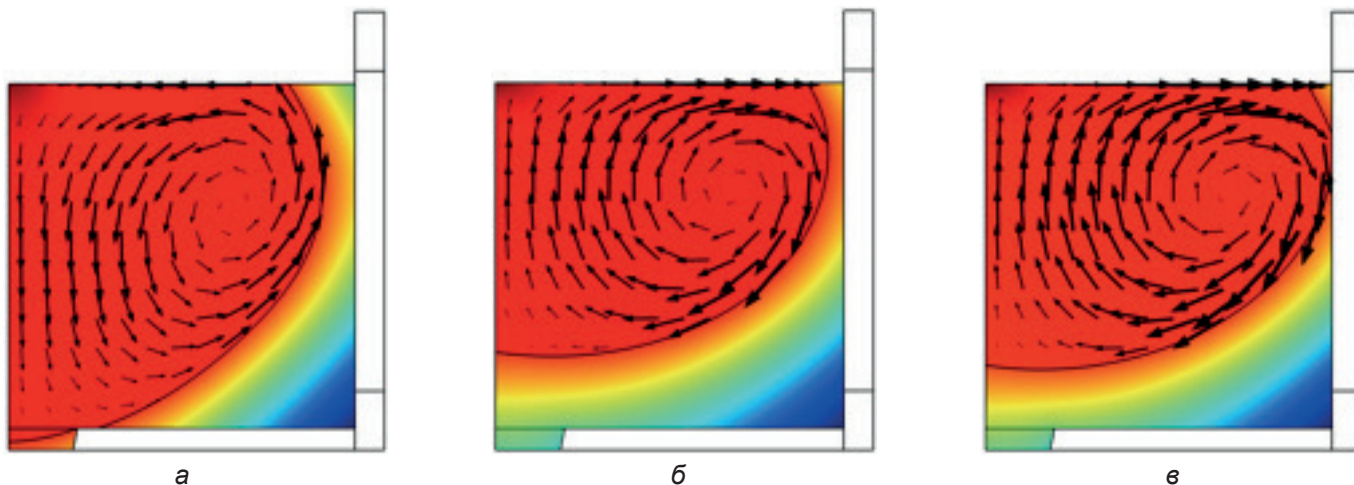


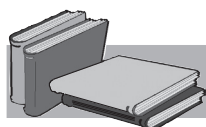
Рис. 6. Формы гарнисажа: а – при обратном направлении движения до промыва донного отверстия; б – при прямом направлении движения до промыва бокового гарнисажа; в – при прямом направлении движения после промыва бокового гарнисажа

гарнисажа наступает при минимальной толщине донного гарнисажа в 50 мм.

Дальнейшее повышение коэффициента слива при прямом движении расплава (рис. б, в) будет сопровождаться все большим промывом бокового гарнисажа и потребует непропорционально высокого повышения мощности электронно-лучевого нагрева.

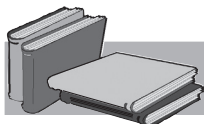
Заметим, что представленные расчетные результаты в некоторой степени носят качественный характер, поскольку используемые в расчетах параметры теплообмена взяты из результатов исследований в технологии индукционной плавки титана в холодном тигле и не подтверждены экспериментально в технологии ЭЛГП. Используемая в расчетах при определении коэффициента турбулентной теплопроводности расплава модель Кэйса-Кроуфорда получена при течении жидкости в трубах и требует уточнения для вихревых течений.

В заключение следует отметить, что дальнейшее усовершенствование конструктивного исполнения тиглей для ЭЛГП наиболее целесообразно проводить по следующим двум направлениям. Первое – это организация регулируемого слива расплава из тиглей со сливным отверстием в днище, что необходимо для решения задачи выплавки в таких тиглях сложнoleгированных сплавов. Второе – это оснащение тиглей тепловыми экранами, которое также желательно использовать, в первую очередь, в тиглях с донным сливом расплава, поскольку именно для этих тиглей характерно невысокое значение отношения высоты слоя расплава в тигле к его диаметру, обуславливающее повышенные тепловые потери за счет излучения с поверхности ванны.



ЛИТЕРАТУРА

1. Ульянов В. Л. Электронно-лучевая гарнисажная плавка при получении фасонных отливок // Литейное производство. – 1972. – № 10. – С. 13–15.
2. Волохонский Л. А. Вакуумные дуговые печи. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
3. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С. В. Ладохина. – К.: Изд-во «Сталь», 2007. – 626 с.
4. Довбня В. Д. Исследование физико-химических процессов электронно-лучевой гарнисажной плавки тугоплавких металлов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1970. – 21 с.
5. Панасюк Л. С., Ульянов В. Л., Явич В. Е. Электромагнитное перемешивание металла в гарнисаже при электронно-лучевой плавке // Сб. «Литье тугоплавких металлов». – Киев: ИПЛ АН УССР, 1970. – С. 76–87.
6. Анікін Ю. П. Удосконалення технології та устаткування для електронно-променевої плавки та лиття жароміцних нікелевих сплавів: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 1998. – 19 с.
7. А. с. СССР № 1144392, МПК С22В 9/22, F27В 14/10. Гарнисажный тигель / Ю. Ф. Аникин, В. И. Мирошниченко, С. В. Ладохин. – Опубл. 08.11.1984.
8. Декларацийний патент на винахід № 65860 А, МПК С21С 5/56, F27В 14/10. Тигель для сумісної індукційної і електронно-променевої плавки металів у вакуумі / С. В. Ладохін, Ю. Г. Добкіна, Ю. П. Анікін, М. І. Левицький – Опубл. 15.04.2004, бюл. № 4.
9. Квасницька Ю. Г. Технологія одержання шихтової заготовки з ливарних відходів жароміцних корозійностійких сплавів для виробництва лопаток ГТД: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ, 2004. – 20 с.
10. Глухенький А. И., Гориславец Ю. М., Бондар А. И., Ладохин С. В., Лапшук Т. В., Дрозд Е. А. Моделирование электронно-лучевой плавки титана в гарнисажных тиглях // Процессы литья. – 2017. – № 2. – С. 30–38.
11. Глухенький А. И., Гориславец Ю. М., Бондар А. И., Ладохин С. В., Лапшук Т. В., Дрозд Е. А. Выбор конструкции гарнисажных тиглей повышенной емкости для электронно-лучевой плавки титана // Процессы литья. – 2017. – № 4 (в печати).



REFERENCES

1. Ul'ianov V. L. (1972). Elektronno-luchevaia garnisazhnaia plavka pri poluchenii fasonnykh otlivok [Electron-beam skull melting upon receipt of shaped castings]. Liteinoe proizvodstvo, no.10, pp.13–15 [in Russian].
2. Volokhonskii L. A. (1985). Vakuumnye dugovye pechi [Vacuum arc furnaces]. Moscow: Energoatomizdat. – 232 p. [in Russian].
3. Elektronno-luchevaia plavka v liteinomu proizvodstve (2007). [Electron-beam melting in foundry]. Ed. by S. V. Ladokhin, Kyiv.: Izd-vo «Stal'», 626 p. [in Russian].
4. Dovbnia V. D. (1970). Issledovanie fiziko-khimicheskikh protsessov elektronno-luchevoi garnisazhnoi plavki tugoplavkikh metallov [The study of physical and chemical processes of electron beam skull melting of refractory metals]. Extended abstract of candidate's thesis, Kyiv, 21 p. [in Russian].
5. Panasiuk L. S., Ul'ianov V. L., Yavich V. E. (1970). Elektromagnitnoe peremeshivanie metalla v garnisazhe pri elektronno-luchevoi plavke [Electromagnetic stirring of metal in the skull during electron beam melting]. Sb. «Lit'e tugoplavkikh metallov», Kyiv: IPL AN USSR, pp. 76–87 [in Russian].
6. Anikin Yu. P. (1998). Udoskonalennia tekhnolohii ta ustatkuvannia dlia elektronno-promenevoi plavky ta lyttia zharomitsnykh nikelevykh splaviv [An improvement of technology and equipment for the electron-beam melting and casting of heat-resistant nickel alloys]. Extended abstract of candidate's thesis, Kyiv, 19 p. [in Ukrainian].
7. A. s. SSSR no. 1144392, MPK S22V 9/22, F27V 14/10. Garnisazhnyi tigel' [Skull crucible] / Yu. F. Anikin, V. I. Miroshnichenko, S. V. Ladokhin. Publ. 08.11.1984 [in Russian].
8. Deklaratsiinyi patent na vynakhid no. 65860 A, MPK S21S 5/56, F27V 14/10. Tygel' dlia sumisnoi induktsiinoi i elektronno-promenevoi plavky metaliv u vakuumi [The crucible for the compatible induction and electron-beam melting of metals in a vacuum]. S. V. Ladokhin, Yu. H. Dobkina, Yu. P. Anikin, M. I. Levyts'kyi. Publ. 15.04.2004, bul. no. 4 [in Ukrainian].
9. Kvasnyts'ka Yu. H. (2004). Tekhnologiya oderzhannia shykhtovoi zahotovky z lyvarnykh vidkhodiv zharomitsnykh koroziiinstiikykh splaviv dlia vyrobnytstva lopatok HTD [Technology of receiving a charge billet from casting waste heat- and corrosion-resistant alloys for the production of gas turbine engine blades]. Extended abstract of candidate's thesis, Kyiv, 20 p. [in Ukrainian].
10. Glukhenkii A. I., Gorislavets Yu. M., Bondar A. I., Ladokhin S. V., Lapshuk T. V., Drozd E. A. (2017). Modelirovanie elektronno-luchevoi plavki titana v garnisazhnykh tiglyakh [Modeling of electron-beam melting of titanium in skull crucible]. Protsessy lit'ia, no. 2, pp. 30–38 [in Russian].
11. Glukhenkii A. I., Gorislavets Yu. M., Bondar A. I., Ladokhin S. V., Lapshuk T. V., Drozd E. A. (2017). Vyor konstruktсии garnisazhnykh tiglei povyshennoi emkosti dlia elektronno-luchevoi plavki titana [Design skull crucibles of high-capacity for electron-beam melting of titanium]. Protsessy lit'ia, no. 4 (v pechati) [in Russian].

Анотація

Ладохін С. В., Лашук Т. В., Дрозд Є. О., Глухенький О. І., Гориславець Ю. М., Бондар О. І.

Тиглі для електронно-променевої гарнісажної плавки

Розглянуто конструкції тиглів для електронно-променевої гарнісажної плавки. Представлено принципові схеми тиглів великої ємності, у тому числі отримані за результатами мультифізичного моделювання електронно-променевої плавки титану та розрахункового аналізу вибору конструкції тиглів. Досліджено вплив напрямку руху розплаву при електромагнітному перемішуванні на ефективність ЕППГ.

Ключові слова

Електронно-променева плавка, гарнісажний тигель, розплав титану, електромагнітне перемішування, мультифізичне моделювання, напрям руху.

Summary

Ladokhin S., Lapshuk T., Drozd E., Glukhen'kii A., Gorislavets Yu., Bondar A.

Crucibles for electron-beam skull melting

The constructions of crucibles for electron-beam skull melting are considered. The fundamental charts of large capacity crucibles are presented, including the results of multiphysical design of the electron-beam melting of titanium and analytical analysis of crucibles construction choice. The influence of driving direction at electromagnetic stirring of melt on efficiency of EBSM is investigated.

Keywords

Electron-beam melting, skull crucible, titanium melt, electromagnetic stirring, multiphysical modeling, driving direction.

Поступила 24.04.17