



УДК 669.187.56.001.3

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ПЛАВКИ*

А.Т. Назарчук¹, И.В. Протокивилов¹, В.Б. Порохонько¹,
Ю.П. Ивочкин², И.О. Тепляков²

¹Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
03680, г. Киев, ул. Боженко 11. E-mail: office@paton.kiev.ua.

²Объединенный институт высоких температур РАН.
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2. E-mail: vortex@iht.mpei.ac.ru.

Рассмотрены некоторые особенности создания импульсных магнитных полей для воздействия на кристаллизацию металла в процессе магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Предложены способы интенсификации электромагнитного воздействия на металлургическую ванну, основанные на использовании энергии электрических разрядов емкостных накопителей на внешний магнитный контур. Разработана экспериментальная аппаратура, включающая источник питания для генерирования электрических разрядов энергией до 1850 Дж, и магнитный контур в виде соленоида с дисковыми обмотками, охватывающими кристаллизатор. Изучены характеристики электрических разрядов при различном количестве витков магнитного контура. Показана целесообразность комплексного подхода к интенсификации электромагнитного воздействия посредством оптимизации параметров как источника разрядов, так и соответствующих магнитных контуров. Проведены экспериментальные исследования влияния импульсных магнитных полей на режимы плавки и кристаллизацию металла в процессе выплавки слитков титановых сплавов. Показана возможность при достаточной энергии разрядов и оптимальном количестве витков магнитного контура управлять порционными тепловложениями в процессе плавки, а также кристаллизацией металла слитков. При этом для улучшения качества поверхности слитков предложено воздействие осуществлять сериями импульсов, чередующихся с паузами. Библиогр. 6, табл. 1, ил. 8.

Ключевые слова: магнитоуправляемая электрошлаковая плавка; импульсное магнитное поле; емкостный накопитель энергии; электрический разряд; магнитный контур; соленоид; макроструктура

Перспективным направлением интенсификации электромагнитного воздействия на гидродинамику электрошлакового процесса является использование импульсных магнитных полей [1–3]. Возможность такой интенсификации при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке (МЭП) с помощью импульсного магнитного поля впервые была показана в работе [1]. Однако здесь для создания импульсных магнитных полей использовали традиционные источники питания магнитных контуров.

В данном случае обеспечение эффективных импульсных воздействий затруднено из-за необходимости создания высоких значений магнитной индукции в зоне плавки (0,2...0,5 Тл). Данная тенденция усугубляется с увеличением диаметра вы-

плавляемого слитка, что связано с необходимостью создания магнитных контуров с чрезмерными массогабаритными показателями, обеспечивающими требуемые значения магнитной индукции.

Для интенсификации импульсного влияния магнитных полей на гидродинамику процесса плавки изучали использование энергии электрических разрядов емкостных накопителей на внешний магнитный контур или непосредственно на зону плавки [2, 3]. Создано экспериментальное оборудование, необходимое для исследований с применением различных способов гидродинамического воздействия на металлургический расплав за счет использования энергии электрических разрядов. Установлена принципиальная возможность воздействия электрически-

* Работы выполнены при поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект № Ф53.7/027) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект Укр_ф_а № 13-08-90444).



Рис. 1. Кристаллизатор с водоохлаждаемым магнитным контуром

ми разрядами емкостных накопителей на кристаллизацию металла слитков [2].

В ходе исследований показана необходимость проведения комплексной разработки и совершенствования источника генерирования электрических разрядов и соответствующих магнитных контуров для создания мощных импульсных магнитных полей.

Цель настоящей работы заключалась в совершенствовании магнитогидродинамических (МГД) устройств для создания импульсных магнитных полей, в том числе соответствующих магнитных контуров и оптимизации режимов воздействия на процессы плавки и кристаллизации металла.

Остановимся на следующем. Первоначально для управления структурообразованием слитков при МЭП использовали поперечное магнитное поле [4, 5]. Для его создания применяли магнитные контуры с металлическими магнитопроводами, массогабаритные показатели которых повышались с увеличением магнитных зазоров, определяемых типоразмерами кристаллизаторов. Именно эти конструктивные особенности магнитных контуров не позволяли создавать поля с уровнем магнитной индукции, необходимым для управления кристаллизацией металла.

Переход на использование продольных магнитных полей с применением магнитных контуров в виде соленоидов, охватывающих кристаллизатор,

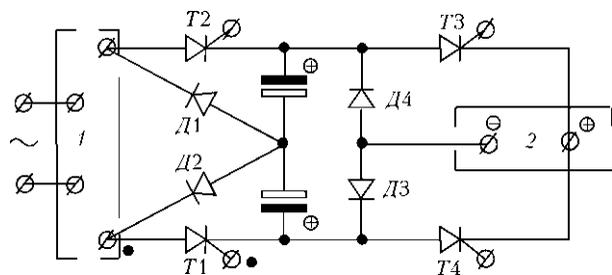


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема экспериментального источника генерирования электрических разрядов с использованием емкостных накопителей: 1, 2 — клеммы соответственно источника питания и нагрузки

позволил существенно уменьшить массогабаритные показатели контуров (по сравнению с контурами для поперечного магнитного поля) и повысить магнитную индукцию в зоне плавки до 0,35 Тл, особенно при использовании импульсных магнитных полей [1]. Однако для обеспечения таких значений магнитной индукции потребовалось создание многовитковых водоохлаждаемых магнитных контуров, что опять-таки привело к увеличению массогабаритных показателей последних (рис. 1).

Выход может быть найден, как отмечалось и в работах [2, 3], посредством использования импульсных электромагнитных полей. Основной акцент здесь сделан на получении больших значений пиковых токов, формирующих импульсные магнитные поля, с помощью неохлаждаемых низкоомных и, по возможности, маловитковых магнитных контуров в виде соленоидов, охватывающих кристаллизатор.

Методика работы предусматривала создание и совершенствование экспериментального источника питания для генерирования электрических разрядов и магнитного контура в виде соленоида с дисковыми обмотками.

В ходе испытаний нового экспериментального оборудования основное внимание уделяли оценке возможности повышения эффективности МГД воздействия за счет импульсных магнитных полей, обеспечивающих порционное тепловложение в процессе плавки.

Обсуждение результатов разработок, представленных на рис. 2–8, сводится к следующим положениям.

Принципиальная электрическая схема экспериментального источника питания для генерирования электрических разрядов (рис. 2) разработана на основе использования двухполупериодного накопления электрических зарядов двумя синхронно управляемыми цепями, разряды которых на магнитный контур могут осуществляться как последовательно, так и одновременно. Для увеличения энергии разрядов отдельных импульсов их необходимо производить одновременно.

Генерирование энергии осуществляется двумя блоками емкостных накопителей общей емкостью 0,07 Ф при рабочем напряжении до 350 В. Для управления продолжительностью заряда и разряда используют логический модуль SRB1218D. Заряды и разряды соответствующих контуров осуществляются тиристорными ключами. С целью управления разрядами тиристорные ключи выбраны с учетом таких характеристик в открытом состоянии, как ударный ток (примерно 21 кА), критическая скорость нарастания тока (320 А/мкс) при максимально допустимом действующем токе 1960 А. С учетом возможности одновременного разряда двухконтурного накопителя уровень максимального тока может достигать 3920 А. Такие характеристики обеспечивают тиристоры Т143-1250-12.



Результаты измерений характеристик разряда при разном количестве витков магнитного контура

Количество витков	Пиковый ток, А	Количество ампер-витков	Длительность разряда, с	Разряд, А·с
10	8150	81500	0,0155	42
20	5350	107000	0,030	50
30	4000	120000	0,040	57
43	2920	125560	0,066	62
53	2500	132500	0,078	64
63	2200	138600	0,091	64

Примечание. Во всех случаях энергия электрических зарядов составляла 1770...1850 Дж.

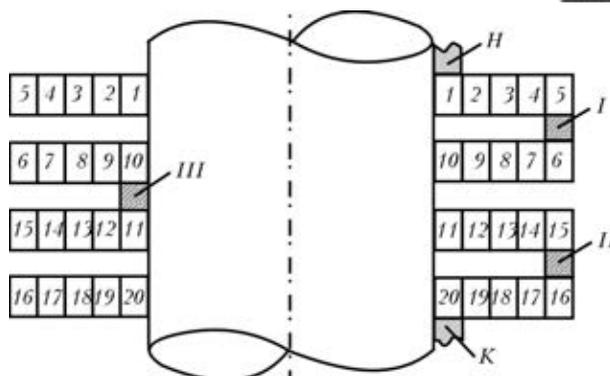


Рис. 3. Принципиальная схема соленоида с дисковыми обмотками: *H, K* — начало и конец обмотки; *I-III* — контактные переключки; *1-20* — витки соленоида

Магнитный контур выполнен в виде соленоида с дисковыми обмотками (рис. 3), охватывающего кристаллизатор с внутренним сечением 80×80 мм. Общее количество витков медной шины сечением 25×3 мм составляло 63. При этом конструкция соленоида предусматривала возможность изменения количества витков, включенных в цепь магнитного контура.

Указанные параметры источника питания и магнитного контура требуются для обеспечения максимально возможных пиковых токов разрядов. При этом количество витков магнитного контура необходимо выбирать исходя из условий обеспечения требуемой индукции магнитного поля в зоне плавки при минимально возможном полном сопротивлении (импедансе) обмоток контура. Без учета этих замечаний использовать энергию разряда на магнитный контур малоэффективно.

Результаты измерений характеристик разряда при различном количестве витков магнитного контура приведены в таблице и на рис. 4, 5. Указанные данные позволяют оптимизировать количество витков магнитного контура. Для используемого кри-

сталлизатора оно составляет 50...60 витков (5-6 дисковых обмоток). При меньшем количестве витков несмотря на существенное увеличение пиковых токов уровень разряда (определяемый площадью импульса тока на рис. 4) снижается. Возрастание количества витков свыше 53 не приводит к повышению уровня разряда отдельного импульса, в то же время габариты магнитного контура увеличиваются.

Следует отметить, что экспериментальные значения пиковых токов несколько отличаются от расчетных, что, вероятно, связано с погрешностями методики измерений либо недостаточно эффективным применением тиристорных ключей в разрядных цепях для получения требуемых пиковых токов.

Важное влияние на кристаллизацию металла слитков имеет уровень энергии разрядов отдельных импульсов, который зависит от емкости накопителя энергии и напряжения заряда [6]. В проведенных экспериментах значения напряжения заряда не превышали 225...230 В (до 1850 Дж). В настоящее время ведутся работы по использованию повышенных напряжений заряда (310 В).

Установлено, что положительных результатов по измельчению кристаллической структуры слит-

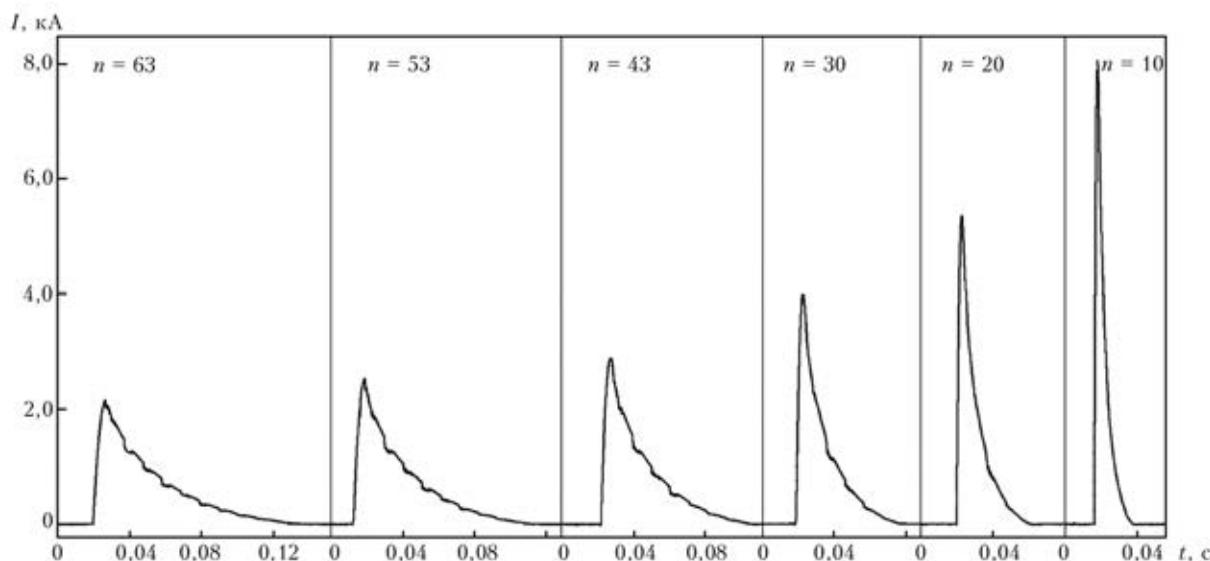


Рис. 4. Экспериментальные зависимости разрядных токов от времени разряда при различном количестве витков *n* магнитного контура (напряжение разрядного контура 225...230 В)

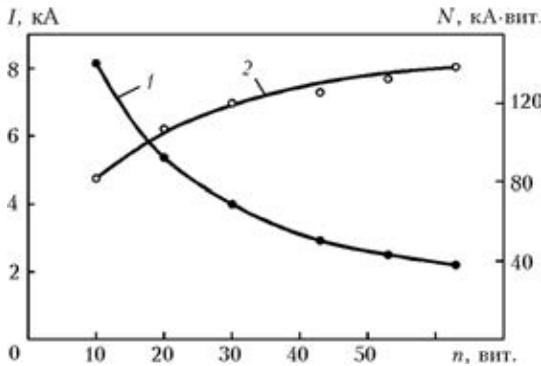


Рис. 5. Экспериментальные зависимости пиковых токов (1) и значений ампер-витков (2) от количества витков магнитного контура N

ков достигали только в том случае, когда импульсное воздействие внешнего магнитного поля вызывало циклические пульсации тока плавки, приводящие в свою очередь к порционным тепловложениям в процессе плавки [1, 2].

Экспериментально определено, что эффективное управление процессом кристаллизации слитков возможно лишь в том случае, если импульсное магнитное поле, достигая определенного уровня, обеспечивает ощутимое падение тока плавки (до 50 % его номинального значения и более). В условиях МЭП такое взаимодействие зависит от тока плавки (плотности тока в расплаве) и магнитной индукции поля, определяемой количеством ампер-витков магнитного контура.

При использовании в процессе плавки импульсных магнитных полей для оценки эффективности МГД воздействия применяли уровень энергии раз-

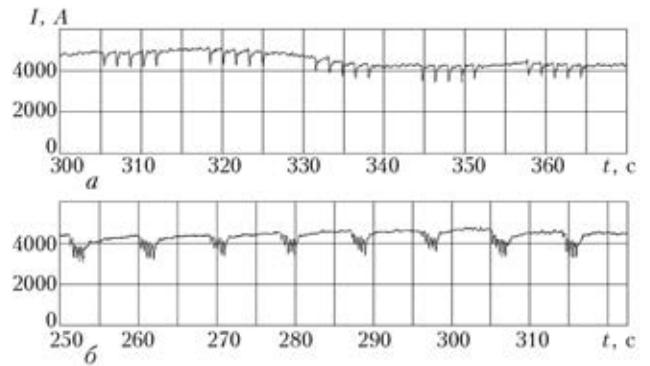


Рис. 7. Характер изменения тока плавки при воздействии сериями разрядов на внешний магнитный контур: a — продолжительность заряда и разряда соответственно 0,8 и 0,1 с; b — продолжительность заряда и разряда соответственно 0,2 и 0,1 с

рядов отдельных импульсов. При этом учитывали, что с увеличением поперечного сечения соленоида магнитного контура (при прочих неизменных параметрах) эффективность МГД воздействия уменьшается.

На рис. 6 представлены регистрограммы процессов плавки в кристаллизаторах диаметрами 60 и 120 мм, характеризующие возможность управлять значениями рабочих токов плавки в зависимости от энергии разрядов и поперечного сечения соленоида магнитного контура, определяемого сечением кристаллизатора. Приведенные данные показывают, что с помощью изменения уровня энергии разрядов представляется возможным управлять порционными тепловложениями в процессе МЭП и кристаллизацией металла. О недостаточном влиянии энер-

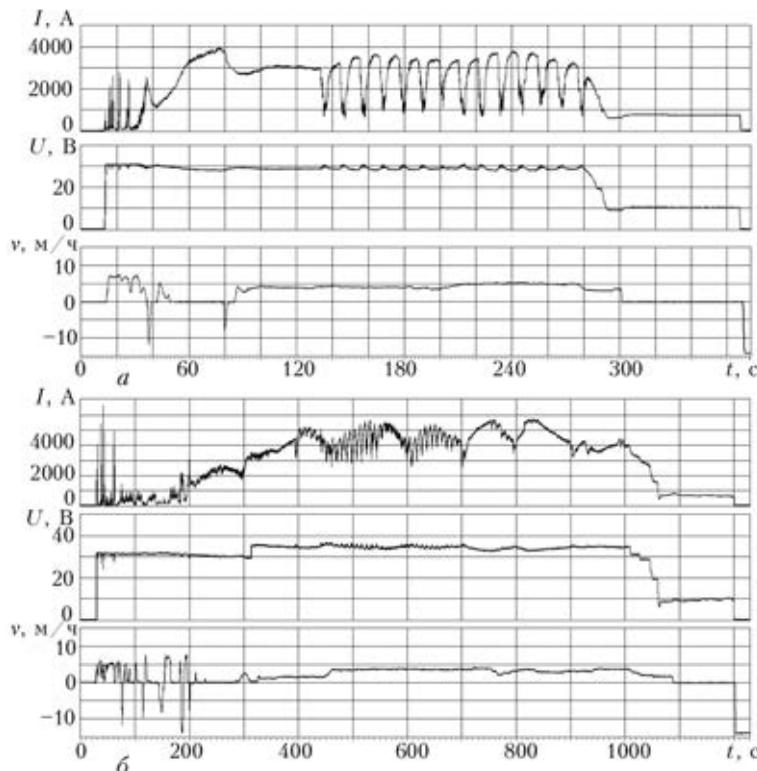


Рис. 6. Регистрограммы процессов плавки в кристаллизаторах диаметром 60 (a) и 120 мм (b) с использованием электрических разрядов на магнитные контуры (плавки № 749 и 775)

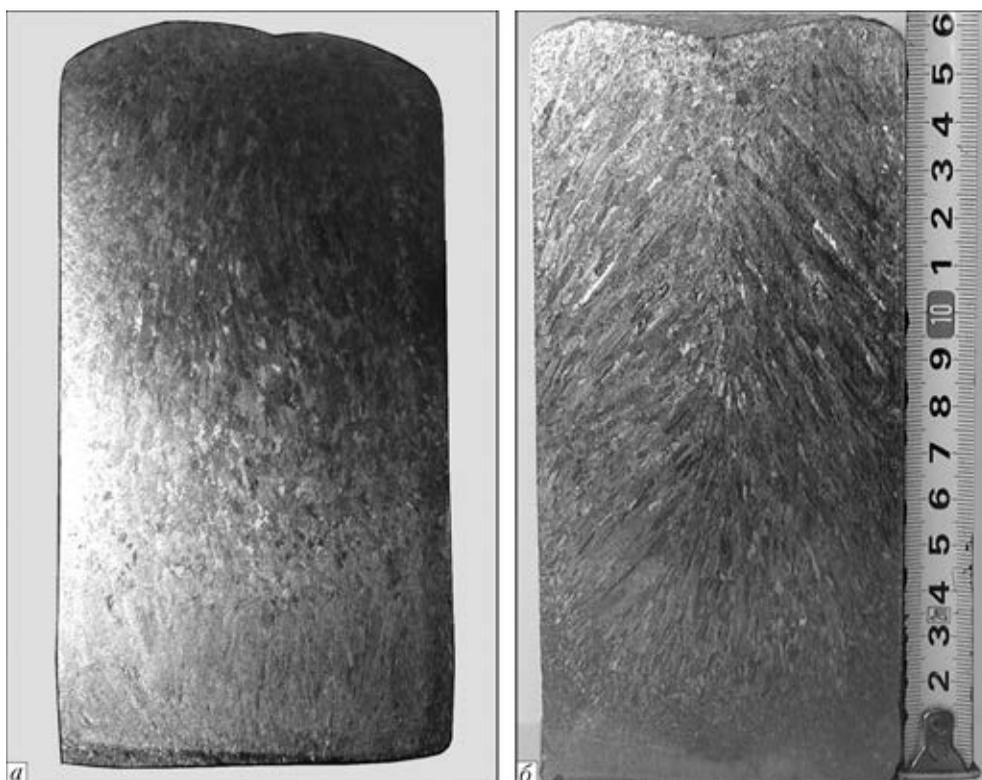


Рис. 8. Макроструктура титановых слитков, выплавленных с использованием электрических разрядов на внешний магнитный контур: *a* — слиток диаметром 60 мм, энергия разряда 1134 Дж (плавка № 749); *б* — слиток сечением 80x80 мм, энергия разряда 1746 Дж (плавка № 805)

гии разрядов на процесс плавки свидетельствуют регистрограммы тока, представленные на рис. 7.

Соответствующие макрошлифы слитков как в первом, так и во втором случаях показаны на рис. 8. Очевидно, что уровень энергии разряда, необходимый для управления кристаллизацией металла, существенно зависит не только от количества витков и поперечного сечения соленоида, но и от поперечного сечения выплавляемого слитка (на рис. 8, *a* количество витков соленоида равняется 40, поперечное сечение слитка — 2826 мм²; на рис. 8, *б* количество витков соленоида составляет 60, поперечное сечение слитка — 6400 мм²). Представленные на рис. 8, *б* результаты свидетельствуют о недостаточном МГД воздействии на кристаллизацию слитка, что, по-видимому, следует связывать с недостаточной энергией разрядов. С целью повышения эффективности МГД процессов для различных кристаллизаторов, соответствующих им магнитных контуров и используемых энергий разрядов требуются дополнительные исследования.

Для повышения эффективности МГД воздействия разрядные импульсы целесообразно осуществлять отдельными сериями (3...7 импульсов на протяжении 1,0...3,5 с, чередующиеся с паузами 5...15 с, когда упомянутые разряды не действуют — рис. 7). При оптимально выбранной продолжительности периодов зарядов и разрядов эффективность воздействий будет выше при большей частоте их следования в отдельных сериях (рис. 7, *б*). Оптимизацию упомянутых параметров следует использовать преимущественно для улучшения поверхно-

сти слитков в условиях интенсивного порционного тепловложения. Такое тепловложение может быть обусловлено применением требуемых значений энергии разрядов и соответствующим количеством витков магнитных контуров в зависимости от типоразмеров кристаллизаторов.

В целом анализ накопленных результатов и их использование позволяют упростить выбор и оптимизацию основных параметров источника электрических разрядов и магнитных контуров, создающих импульсные магнитные поля при МЭП, с учетом рационального сочетания их взаимного влияния.

Выводы

1. Разработаны МГД устройства для создания импульсных магнитных полей при МЭП, включающие источник генерирования электрических разрядов и магнитный контур в виде соленоида с дисковыми обмотками.

2. Определяющими параметрами МГД воздействия являются уровень энергии разрядов отдельных импульсов для источника электрических разрядов и количество витков соленоида (для магнитного контура), его конструктивные особенности при условии обеспечения минимально возможного общего электрического сопротивления соленоида.

3. Показана возможность эффективного управления кристаллизацией металла посредством воздействия импульсным магнитным полем при достаточной энергии разрядов и оптимальном количестве витков магнитного контура.



4. Для улучшения поверхности слитков в условиях порционного тепловложения, вызванного внешним импульсным магнитным полем, воздействие целесообразно осуществлять сериями импульсов, чередующихся с паузами.

1. *Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Протокилов И.В.* К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современ. электрометаллургия. — 2007. — № 4. — С. 3–7.
2. *Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах* /

- Я.Ю. Компан, А.Т. Назарчук, И.В. Протокилов, Д.А.Петров // Там же. — 2012. — № 2. — С. 8–13.
3. *Пат. 9777* Україна, МПК Н 05 В 3/60; С 22 В 34/12. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки титанових сплавів / Я.Ю. Компан, А.Т. Назарчук, И.В. Протокилов. — Оубл. 12.03.2012, Бюл. № 5.
 4. *Компан Я.Ю., Щербинин Э.В.* Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. — М.: Машиностроение, 1989. — 272 с.
 5. *Протокилов И.В., Компан Я.Ю.* Вибрация расплава при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке (МЭП) в поперечном магнитном поле // Сварка и смежные технологии: Мат. II всеукр. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов. — Киев, 2003. — С. 58.
 6. *Электротехника* / Под ред. В.С. Пантюшина. — М.; Л.: Гос. энергетич. изд-во, 1960. — 632 с.

Some features of inducing pulsed magnetic fields for acting on metal solidification during magnetically-controlled electroslag melting are considered. Methods of intensification of electromagnetic impact on metallurgical bath are proposed, which are based on application of energy of capacitive storage electric discharges to external magnetic circuit. Experimental system has been developed, including a power source for generation of electric discharges with up to 1850 J energy, and a magnetic circuit in the form of a solenoid with disc windings enclosing the mould. Characteristics of electric discharges at different number of magnetic circuit turns have been studied. The paper shows the rationality of an integrated approach to electromagnetic impact intensification through optimization of parameters of both the discharge source and the respective magnetic circuits. Experimental investigations of the influence of pulsed magnetic fields on metal melting and solidification modes during melting of titanium alloy ingots have been performed. Ability to control discrete heat input during melting, as well as ingot metal solidification at sufficient discharge energy and optimum number of magnetic circuit turns, is demonstrated. To improve ingot surface quality, it is proposed to apply the impact in the form of series of pulses alternating with pauses. Ref. 6, Table 1, Figures 8.

Keywords: magnetically controlled electroslag melting; pulsed magnetic field; capacitive storage; electric discharge; magnetic circuit; solenoid; macrostructure

Поступила 19.06.2013

«ЭНЕРГОМАШСПЕЦСТАЛЬ» ВВОДИТ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ НОВЫЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС



На ПАО «Энергомашспецсталь» (ЭМСС, Краматорск Донецкой обл.) на 15 ноября текущего года запланирован пуск нового сталеплавильного комплекса. Это должно стать финальным этапом модернизации ЭМСС. Новая печь с современной мощной газоочисткой сможет производить до 76 т стали в час, а время плавки снизится с трех с половиной до менее одного часа. Комплекс оборудован установкой внепечной обработки стали и позволит предприятию производить крупнотоннажные слитки массой до 500 т. В 2013 году предприятие планирует освоить заготовки для корпуса реактора ВВЭР-ТОИ.

<http://sdelanounas.in.ua>