

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАПЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЭШП С НАЛОЖЕНИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

И. В. Протокивиллов, В. Б. Порохонько

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.
02680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Путем физического моделирования исследованы особенности процесса капельного переноса электродного металла при электрошлаковом переплаве с наложением на рабочую зону импульсного продольного магнитного поля. Исследования проводили на оптически прозрачной холодной модели, заполненной электролитом на основе $ZnCl_2$, имитирующим расплав шлака, в котором плавился расходный электрод из сплава Вуда. Установлено, что под действием импульсного продольного магнитного поля в ванне формируются горизонтальные вращения, скорость которых зависит от рода и величины тока в электролите, индукции магнитного поля и продолжительности импульсов его действия. Показано, что вращение ванны вокруг своей оси вызывает деформацию ее свободной поверхности. При использовании импульсного магнитного поля деформация поверхности ванны носит периодический характер, создавая тем самым вибрации в жидкой среде. Показано, что наложение импульсного продольного магнитного поля способствует уменьшению размеров капель электродного металла, увеличению пути и времени их нахождения в ванне и рассредоточению мест падения на зеркало жидкого металла. При этом модуляция тока плавки в момент действия импульсов магнитного поля усиливает электромагнитное воздействие на гидродинамику ванны и капельный перенос металла. Библиогр. 5, табл. 1, ил. 7.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав; физическое моделирование; магнитное поле; расходный электрод; капельный перенос; гидродинамика

В работах [1, 2] приведены результаты исследований в области разработки физической модели плавления расходного электрода при электрошлаковом переплаве (ЭШП) в условиях воздействия внешним магнитным полем. Изучено влияние продольного магнитного поля на плавление и каплеобразование электродного металла. Показано, что внешнее магнитное поле изменяет структуру гидродинамических течений модельной жидкости, что, в свою очередь, влияет на особенности плавления электрода, формирование и отрыв электродных капель и траектории их движения в шлаковой ванне. Установлено, что наложение продольного магнитного поля приводит к увеличению частоты отрыва капель электродного металла, уменьшению их массы при повышении скорости плавления электрода [1]. Также показано, что эффективность электромагнитного воздействия на гидродинамику ванны и капельный перенос металла значительно выше при использовании постоянного тока плавки [2].

Данная работа является продолжением исследований по физическому моделированию процесса ЭШП расходного электрода в условиях

внешних электромагнитных воздействий. Ее цель заключается в изучении влияния импульсного продольного магнитного поля на капельный перенос электродного металла.

Эксперименты проводили с использованием физической модели, описанной в работе [1]. Модель основана на плавлении расходного электрода из сплава Вуда, погруженного в оптически прозрачный раствор хлористого цинка ($ZnCl_2$). Нагрев и плавление электродного металла происходит за счет Джоулева тепла, выделяющегося в растворе $ZnCl_2$ при прохождении в нем электрического тока, то есть аналогично ЭШП.

Внешнее магнитное поле создавали с помощью усовершенствованной электромагнитной системы, состоящей из двух соленоидов и позволяющей генерировать в рабочей зоне продольное поле индукцией до 0,4 Тл. Для исследования особенностей плавления расходного электрода и капельного переноса металла использовали метод видеонаблюдения с частотой записи 240 кадров в секунду и метод осциллографирования.

Режимы проведения экспериментов приведены в табл. 1. Исследовали влияние на капельный перенос импульсного продольного магнитного поля индукцией 0,32...0,35 Тл с продолжительностью

Таблица 1. Режимы проведения экспериментов

Схема проведения эксперимента	Параметры магнитного поля			Напряжение на ванне, В	Скорость подачи электрода, мм/с	$I_{эл}$, А
	t_n , с	$t_{п}$, с	B , Тл			
Без магнитного поля	—	—	—	10	0,05	12
С импульсным магнитным полем	0,5...1,5	2	0,35	8...10	0,05...0,07	12
	2,0...2,5	4	0,32	10	0,05...0,07	12
	3	3	0,32	10	0,05...0,07	12
С импульсным магнитным полем и модуляцией тока	2	4...6	0,35	10/10	0,07...0,10	12 (12)*
	2	6...10	0,35	10/25	0,08...0,10	12 (25)*

*В скобках приведены величины постоянного тока во время импульса магнитного поля.

импульсов (t_n) и пауз ($t_{п}$) его действия 0,5...3,0 и 2...4 с соответственно.

Также проводили эксперименты с импульсным воздействием магнитного поля и амплитудно-фазовой модуляцией тока, пропускаемого через электрод $I_{эл}$ (ток плавки). Схема проведения данных экспериментов заключалась в периодическом выпрямлении и увеличении тока плавки во время действия импульсов магнитного поля (рис. 1). Идея состояла в усилении электромагнитного воздействия на рабочую жидкость за счет выпрямления и повышения тока плавки и увеличения за счет этого действующей на жидкость электромагнитной силы \vec{f}_e , которая определяется векторным произведением плотности тока \vec{j} на индукцию внешнего магнитного поля \vec{B} : $\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B}$.

Проведенные эксперименты показали, что механизм воздействия импульсного магнитного поля на каплеобразование и перенос металла в целом аналогичен воздействию постоянного магнитного поля. Он заключается в создании под действием магнитного поля горизонтальных вращений электролита, которые, в свою очередь, влияют на особенности формирования капель на оплавленной поверхности электрода и траектории их движения в ванне. Кроме того, импульсный режим воздействия магнитным полем создает дополнительные вибрации ванны, возникающие в моменты включения и выключения магнитного поля, что также

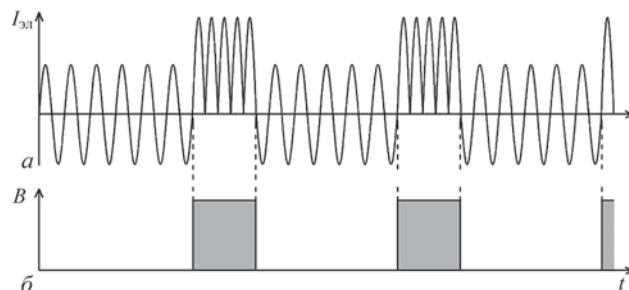


Рис. 1. Циклограммы изменения тока плавки (а) и индукции (б) внешнего магнитного поля

влияет на формирование и отрыв капель электродного металла.

На рис. 2 приведена зависимость скорости горизонтального вращения модельной жидкости от продолжительности импульса магнитного поля. Видно, что при увеличении длительности импульса до 1,5...2,5 с скорость вращения ванны линейно возрастает, а далее стабилизируется на уровне около 100 мм/с. Это говорит о том, что для эффективного воздействия на перемешивание ванны продолжительность импульса магнитного поля должна превышать определенное минимальное значение, при котором успеют сформироваться устойчивые потоки жидкости. В нашем случае это достигается при продолжительности импульса магнитного поля более 1,5 с.

Анализ структуры гидродинамических течений в ванне показал, что угловая скорость создаваемого под действием магнитного поля горизонтального вращения электролита неравномерна по радиусу ванны. Максимальная скорость наблюдается в областях, прилегающих к расходуемому электроду, где плотность электрического тока максимальна, а минимальная — у стенок емкости (рис. 3).

Необходимо отметить, что при выпрямлении и увеличении тока плавки во время импульсов магнитного поля интенсивность вращательного дви-

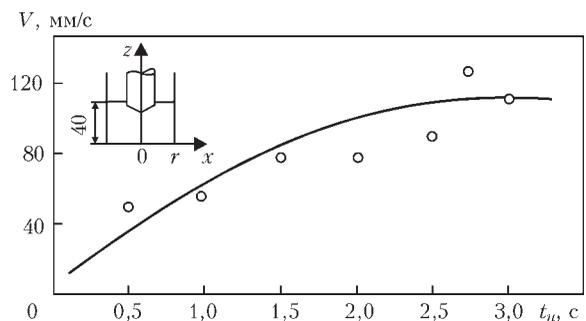


Рис. 2. Зависимость скорости вращения электролита от продолжительности импульса магнитного поля: $B = 0,32$ Тл, $I_{эл} = 12$ А, $x = 0,5r$, $z = 25$ мм

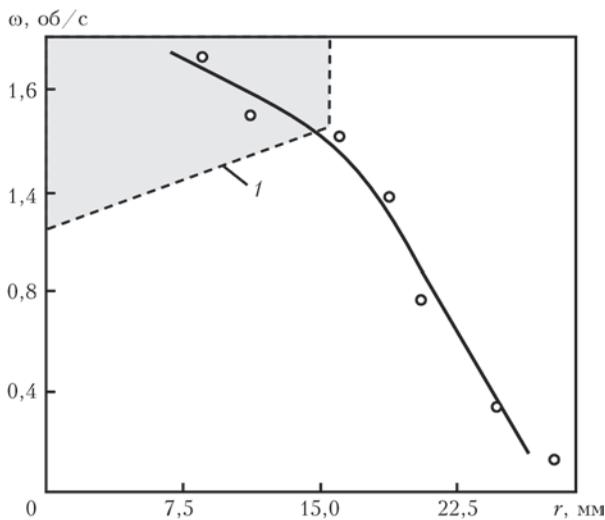


Рис. 3. Зависимость угловой скорости вращения электролита от расстояния до оси ванны для $B = 0,32$ Тл, $I_{эл} = 12$ А, $t_{и} = 3$ с: I — контур расходуемого электрода

жения в ванне значительно выше. В этом случае максимальная скорость потоков модельной жидкости достигала 420 мм/с, что примерно в 3,5 раза выше, чем при переменном токе плавки.

Также установлено, что вращение ванны вокруг своей оси за счет возникающих при этом центробежных сил, вызывает деформацию ее свободной поверхности (рис. 4). Уровень жидкости по оси ванны понижается, а у стенок емкости повышается. В экспериментах с модуляцией тока плавки максимальная величина деформации свободной поверхности достигала 11 мм. При этом импульсный режим действия магнитного поля приводил к периодическому характеру деформации поверхности ванны, что создавало дополнительные вибрации в жидкой среде.

Следует отметить, что деформация свободной поверхности ванны также приводила к снижению глубины погружения электрода в модельную жидкость, повышению электросопротивления участка цепи расходуемый электрод–металлическая ванна и, соответственно, снижению тока, пропускаемого через электрод. Таким образом, физическое

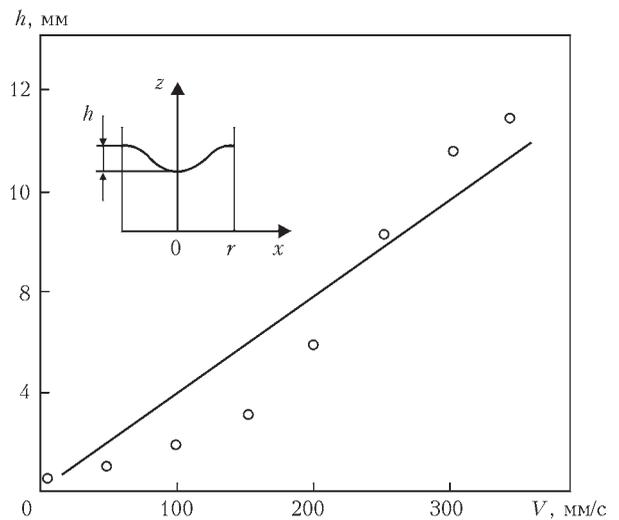


Рис. 4. Зависимость глубины деформации свободной поверхности электролита от максимальной скорости его вращения моделирование подтвердило гипотезу о том, что циклические колебания тока плавки под действием импульсного магнитного поля вызваны, прежде всего, деформацией свободной поверхности шлаковой ванны [3].

На рис. 5. приведены основные варианты капельного переноса металла при различных схемах проведения экспериментов.

При опытах без внешнего электромагнитного воздействия в большинстве случаев формирование и отрыв капель происходил у вершины конуса оплавления по оси электрода. В ванне основная капля и образовавшиеся при разрушении перемычки дополнительные малые капли двигались прямолинейно вниз по оси ванны (рис. 5, а). В 15 %-тах случаев капли формировались и отрывались на периферийных участках электрода (рис. 5, б), в 6 %-тах наблюдалось несколько очагов каплеобразования (рис. 5, в). Средняя частота отрыва капель составляла 0,6...0,64 Гц.

При наложении импульсного магнитного поля в 75 %-тах случаев формирование и отрыв капли также происходил по оси электрода (рис. 5, г). В остальных — капля в процессе формирования под

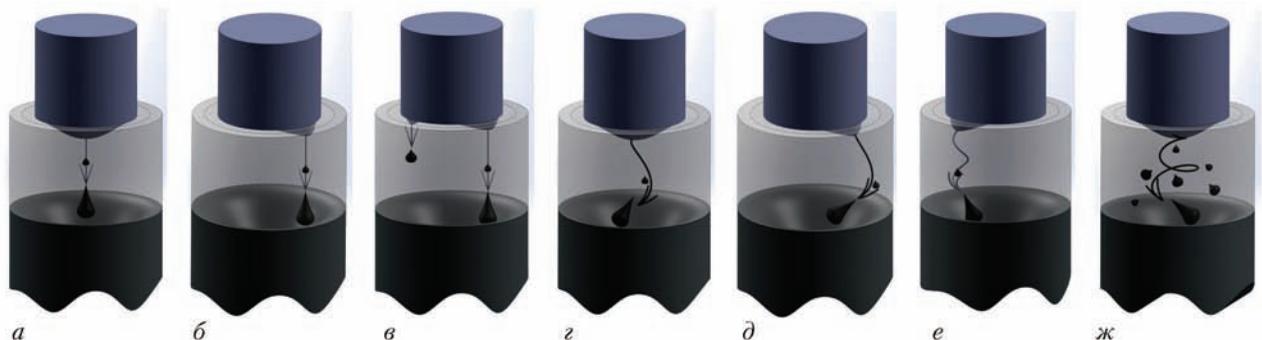


Рис. 5. Варианты капельного переноса металла при различных схемах электромагнитного воздействия (обозначения в тексте)

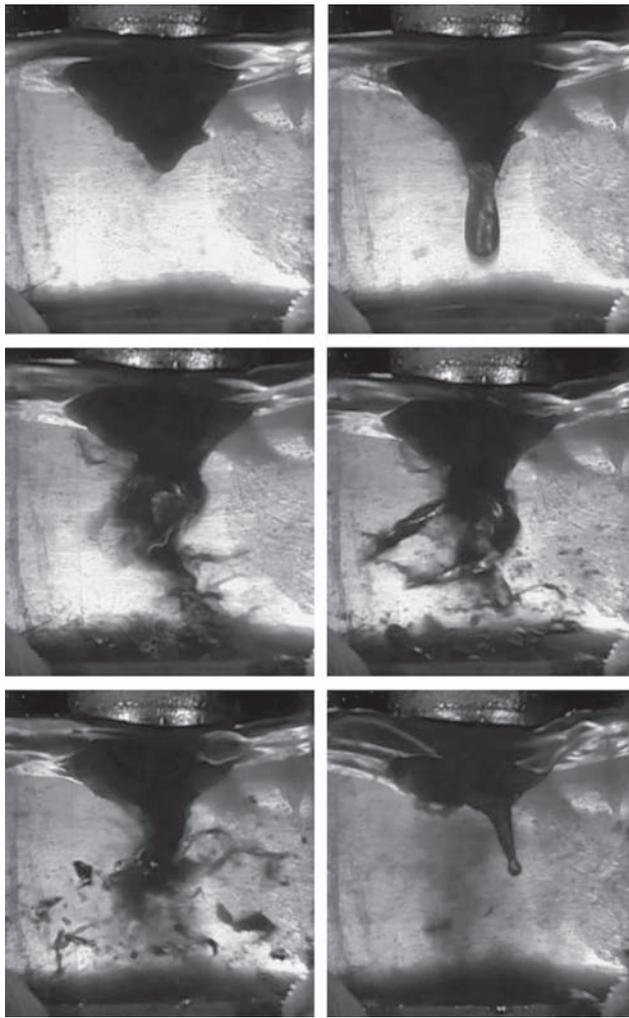


Рис. 6. Разрушение капли жидкого металла в эксперименте с импульсным магнитным полем и модуляцией тока плавки действием горизонтального вращения электролита смещалась от оси электрода или сразу формировалась на периферийных его участках (рис. 5, д, е). За счет этого отрыв капель происходил в различных местах на оплавляемом торце электрода.

В ванне капли, увлекаемые горизонтальным вращением электролита, двигались преимущественно по спирали, радиус которой зависел от

ста отрыва капли и скорости вращения жидкости. Если момент отрыва капли совпадал с импульсом магнитного поля, то завихрения траектории движения капли были более сильными (рис. 5, е). При этом капли иногда выносились к стенке емкости. В среднем частота отрыва капель в экспериментах с наложением импульсного поля увеличилась на 3...5 % при соответствующем уменьшении их массы и размеров.

В экспериментах с амплитудно-фазовой модуляцией тока плавки эффект от воздействия импульсного магнитного поля на гидродинамические процессы в ванне и капельный перенос металла был значительно выше. При совпадении времени действия импульса магнитного поля с моментом формирования капли критического размера интенсивные течения жидкости приводили к разрушению капли с образованием большого количества капель меньшего размера. Под действием центробежных сил последние разбрасывались в объеме ванны и в ряде случаев выносились к ее стенкам (рис. 5, ж, з). В результате указанных эффектов капли металла имели меньший размер и проходили более длинный путь в ванне.

При ЭШП значительная часть тепла, поступающего в металлическую ванну, передается с каплями электродного металла. Поэтому от места их попадания на зеркало жидкого металла существенно зависит форма ванны и условия кристаллизации слитка [4].

На рис. 7 приведены графики распределения мест падения капель на зеркало жидкой металлической ванны при различных схемах проведения экспериментов. Видно, что в экспериментах без электромагнитного воздействия более 75 % капель поступает на зеркало ванны по оси электрода. При воздействии на ванну импульсным магнитным по-

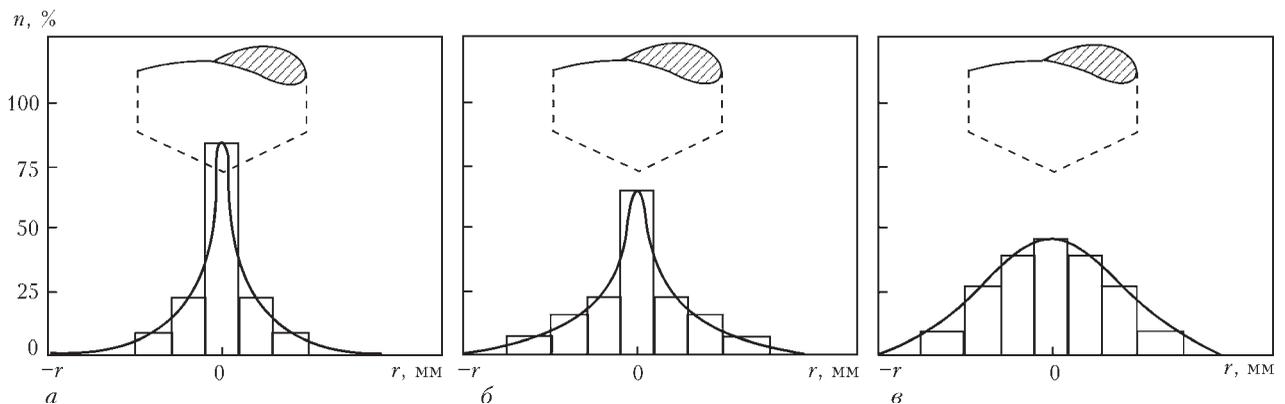


Рис. 7. Распределение мест падения капель на зеркало жидкой металлической ванны: а — без электромагнитного воздействия; б — с импульсным воздействием магнитным полем; в — с импульсным воздействием магнитным полем и модуляцией тока плавки

лем этот показатель снижается до 60 %, а при дополнительной модуляции тока плавки — до 45 % (рис. 7). То есть электромагнитное воздействие способствует рассредоточению мест падения капель на зеркало жидкого металла. Такой эффект в процессе ЭШП следует считать позитивным, так как по мере увеличения числа капель, попадающих в ванну ближе к стенкам кристаллизатора, фронт кристаллизации становится более плоским, что обеспечивает осевую направленность роста кристаллов [5].

Положительным следствием воздействия магнитного поля также является уменьшение размеров капель и увеличение пути и времени их нахождения в ванне, что в условиях ЭШП способствует более полному протеканию процессов химического взаимодействия шлак–металл и удалению из металла примесей и включений.

Следует отметить, что для более эффективного воздействия на капельный перенос металла целесообразно синхронизировать импульсы магнитного поля с моментами формирования капель критического размера. Этого можно достичь при помощи соответствующей аппаратуры, контролирующей изменение тока плавки и формирующей сигналы, управляющие работой электромагнитной системы, или выбирая частоту импульсов магнитного поля равную или кратную частоте отрыва капель электродного металла. В этом случае импульсы магнитного поля будут стимулировать отрыв капель и обеспечивать достижение описанных выше эффектов.

Выводы

1. Методом физического моделирования установлено, что под действием импульсного продольного магнитного поля в шлаковой ванне формируются горизонтальные вращения расплава, скорость которых зависит от рода и величины тока в электролите, индукции магнитного поля и продолжительности импульсов его действия. При этом максимальная угловая скорость вращения наблюдается в областях, прилегающих к расходному электроду, а минимальная — у стенок емкости.

2. Показано, что вращение ванны вокруг своей оси вызывает деформацию ее свободной поверхности. С увеличением скорости вращения глубина деформации растёт и при скорости 300 мм/с достигает 11 мм. При использовании импульсного магнитного поля деформация поверхности ванны носит периодический характер, создавая дополнительные вибрации в жидкой среде.

3. Установлено, что наложение импульсного продольного магнитного поля способствует уменьшению размеров капель электродного металла, увеличению пути и времени их нахождения в ванне и рассредоточению мест падения на зеркало жидкого металла.

4. При модуляции тока плавки во время действия импульсов магнитного поля скорость вращательного движения модельной жидкости существенно увеличивается и может достигать 420 мм/с. Такие интенсивные потоки приводят к разрушению капель электродного металла с образованием большого количества капель меньшего размера, которые под действием центробежных сил разносятся в объеме ванны.

Список литературы

1. Протокивиллов И. В., Порохонько В. Б. (2015) Физическое моделирование процесса плавания расходного электрода при ЭШП в условиях внешнего электромагнитного воздействия. *Современная электрометаллургия*, **1**, 8–12.
2. Протокивиллов И. В., Порохонько В. Б. (2015) Фізичне моделювання процесу ЕШП в умовах дії зовнішніх електромагнітних полів. *Матеріали VIII міжнар. конф. молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології», 20–22 травня 2015 р., м. Київ*, 152.
3. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протокивиллов И. В. (2007) К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов. *Современная электрометаллургия*, **4**, 3–7.
4. Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Шевцов В. Л. и др. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Патон Б. Е. (ред.), Киев, Наукова думка.
5. Пятыгин Д. А. (2006) *Особенности плавания и кристаллизации металла при ЭШП на постоянном токе с вращением расходного электрода*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, ЮУрГУ, 21.

References

1. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B. (2015) Physical modeling of process of consumable electrode melting in ESR under conditions of external electromagnetic effect. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **1**, 8–12 [in Russian].
2. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B. (2015) Physical modeling of ESR process under conditions of action of external electromagnetic fields. In: *Proc. of 8th Int. Conf. of Junior Scientists and Specialists on Welding and Related Technologies (20–22 May 2015, Kiev, Ukraine)*, 152 [in Russian].
3. Kompan, Ya.Yu., Nazarchuk, A.T., Protokovilov, I.V. (2007) Towards the problem of intensification of electromagnetic action in magnetically-controlled electroslag melting of titanium alloys. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, **4**, 3–7 [in Russian].
4. Medovar, B.I., Tsykulenko, A.K., Shevtsov, V.L. et al. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Ed. by B.E. Paton. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
5. Pyatygin, D.A. (2006) *Peculiarities of melting and solidification of metal in ESR at direct current with rotation of consumable electrode*: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Chelyabinsk: YuUrGU, 51 [in Russian].

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КРАПЕЛЬНОГО ПЕРЕНОСУ ЕЛЕКТРОДНОГО МЕТАЛУ ПРИБЕШП З НАКЛАДЕННЯМ ІМПУЛЬСНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

І. В. Протоковілов, В. Б. Порохонько

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Шляхом фізичного моделювання досліджено особливості процесу крапельного переносу електродного металу при електрошлаковому переплаві з накладенням на робочу зону імпульсного поздовжнього магнітного поля. Дослідження проводили на оптично прозорій холодній моделі, заповненій електролітом на основі $ZnCl_2$, що імітує розплав шлаку, в якому плавився витратний електрод зі сплаву Вуда. Встановлено, що під дією імпульсного поздовжнього магнітного поля у ванні формуються горизонтальні обертання, швидкість яких залежить від показників струму в електроліті, індукції магнітного поля і тривалості імпульсів його дії. Показано, що обертання ванни навколо своєї осі викликає деформацію її вільної поверхні. При використанні імпульсного магнітного поля деформація поверхні ванни носить періодичний характер, створюючи тим самим вібрації в рідкому середовищі. Показано, що накладення імпульсного поздовжнього магнітного поля сприяє зменшенню розмірів крапель електродного металу, збільшенню шляху і часу їх знаходження у ванні і розосередженню місць падіння на дзеркало рідкого металу. При цьому модуляція струму плавки в момент дії імпульсів магнітного поля посилює електромагнітний вплив на гідродинаміку ванни і крапельне перенесення металу. Бібліогр. 5, табл. 1, іл. 7.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; фізичне моделювання; магнітне поле; витратний електрод; крапельний перенос; гідродинаміка

PHYSICAL MODELING OF ELECTRODE METAL DROP TRANSFER IN ESM WITH SUPERPOSITION OF PULSED MAGNETIC FIELDS

I.V. Protokovilov, V.B. Porokhonko

E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.
11 Kazimir Malevich Str., 03680, Kiev, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Using the physical modeling the peculiarities of process of electrode metal drop transfer were investigated in electroslag remelting with a superposition of a pulsed longitudinal magnetic field on the working zone. The investigations were carried out on optically transparent cold model, filled with an electrolyte on $ZnCl_2$ base, simulating the slag melting, in which the consumable electrode of Wood alloy was melted. It was found, that under the action of a pulsed longitudinal magnetic field the horizontal rotations are formed in a pool, the speed of which depends on the kind and value of current in electrolyte, magnetic field induction and duration of pulses of its action. It is shown that the pool rotation around its axis causes the deformation of its free surface. By using the pulsed magnetic field the pool surface deformation has a periodic nature, thus creating the vibration in a liquid medium. It is shown that the superposition of a pulsed longitudinal magnetic field promotes the decrease in electrode metal drop sizes, increase in path and time of their stay in a pool and distribution of dropping places on the molten metal mirror. Moreover, the modulation of melting current at the moment of action of the magnetic field pulses intensifies the magnetic effect on hydrodynamics of the pool and metal drop transfer. Ref. 5, Table 1, Figures 7.

Key words: electroslag remelting; physical modeling; magnetic field; consumable electrode; drop transfer; hydrodynamics

Поступила 18.07.2017

XVI МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ – 2017
21-24 НОЯБРЯ



МЕТАЛЛО-ОБРАБОТКА



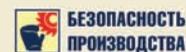
УКРСВАРКА



УКРЕПТОР ТЕХ



УКРПРОМ АВТОМАТИЗАЦІЯ



БЕЗОПАСНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА



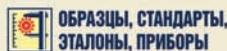
ГИДРАВЛИКА ПНЕВМАТИКА



ПОДШИПНИКИ



УКРЛИФТЬ



ОБРАЗЦЫ, СТАНДАРТЫ, ЭТАЛОНЫ, ПРИБОРЫ



ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ СКЛАДСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
Украина, Киев, Броварской пр-т, 15
[www://tech-expo.com.ua](http://www.tech-expo.com.ua)