

Для шихты (см. табл. 1) показатель k уравнения (14) равен 0,07167356808327 или 0,072; а уравнение (14) имеет вид

$$W = \frac{h\rho}{\tau} \cdot \left(\frac{V}{q} \right)^{0,072} \quad (15)$$

Вышеприведенным способом удаётся связать и другие основные параметры процесса спекания, кроме показателя степени увлажнения, который, наряду с физико-химическими свойствами руды, оказывает большое влияние на протекание процесса спекания и в значительной мере определяет все показатели агломерации. Влажность шихты на процесс спекания называется двойко: с одной стороны, от неё зависит окомкованность и соответственно газопроницаемость холодной шихты, а также влага является терморегулятором горения и оказывает влияние на газопроницаемость шихты в процессе спекания; с другой стороны, по мере увеличения влажности шихты до оптимальной качество агломерата улучшается, а затем выход мелочи резко увеличивается.

Оптимальная массовая доля в шихте, обеспечивающая наибольшую газопроницаемость в процессе спекания, зависит от крупности шихтовых материалов

и изменяется в пределах 6,5–8,0%. Подача воды осуществляется путем тонкого распыления в первой трети длины окомкователя. При уменьшении крупности, а также при повышении температуры шихты массовую долю влаги в ней необходимо увеличивать, а при увеличении крупности и снижении температуры шихты – уменьшать. Отклонение массовой доли влаги в шихте от оптимальной не должно превышать $\pm 0,3\%$. При отклонениях массовой доли влаги в шихте от оптимальной величины на $\pm 0,5\%$ снижается газопроницаемость, ухудшается качество агломерата, увеличивается выход возврата и снижается производительность агломашин.

Список литературы

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Изд. 6. М.: Госхимиздат, 1955.
2. Седов А.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1972.

Список литературы

1. Kasatkin A.G. Basic Processes and Chemical Engineering Means. Publ. 6. M.: Goschimizdat, 1955.
2. Sedov A.I. Methods of Similarity and Dimensionality in Mechanics. M.: Science, 1972.

УДК 621.365.2: 621.187.2.046

Ячиков И.М., Логунова О.С.

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕМНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ СИЛАМИ В ВАННЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА*

Перемешивание расплава в дуговой печи постоянного тока (ДППТ) применяют для выравнивания химического состава и температуры по объему ванны с целью облегчения скачивания шлака, для транспортировки шлакообразующих и легирующих добавок, для улучшения переработки шихты на откосах печи. При перемешивании улучшаются условия теплообмена в печи, в результате чего уменьшается перепад температуры металла по глубине ванны, а это является одним из важных условий для осуществления автоматического регулирования температурного режима плавки.

Современные ДППТ являются довольно сложными устройствами с точки зрения управления. Наиболее интенсивное перемешивание металла требуется в период плавления шихты и рафинирования расплава. При этом на границе металл-шлак, в области пятна дуги скорость расплава должна быть максимальной, а в области подовых электродов и футеровки – минимальной. В качестве показателей эффективности управления технологическим процессом выплавки металлов в дуговых печах можно указать однород-

ность химического состава расплава и отсутствие очагов его перегрева и охлаждения.

Одной из российских разработок является способ перемешивания расплава в ванне ДППТ путем установки одного осевого графитированного катода, а в подине – не менее двух подовых анодов, смещенных от ее оси симметрии [1]. Электропитание ДППТ осуществляется через два независимых источника постоянного тока, плюсовые провода которых подводятся к подовым электродам, а минусовые подключены к расходуемому графитированному электроду. Это приводит к сложному движению расплава в вертикальной и в горизонтальной плоскостях. Циркуляция расплава в ДППТ с несимметрично расположенными подовыми электродами осуществляется за счет возникновения электровихревых течений (ЭВТ), вызываемых объемными электромагнитными силами (ОЭМС), которые существенно зависят от силы токов, так как обусловлены взаимодействием электрических токов, подводимых к расплаву от сторонних источников ЭДС, с собственными магнитными полями [2].

На основе математических моделей, разработанных в работах [3–6], проведен анализ составляющих ОЭМС в области подового электрода. Имитационное моделирование ОЭМС при одном подовом электроде (рис. 1, а)

* Работа выполнена по федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». № гос. контракта П2402 от 18.11.2009 г.

показало, что в горизонтальной плоскости над его поверхностью образуются два противоположно вращающихся вихря (рис. 1, б), кроме того, в меридиональной плоскости вблизи подового электрода малого диаметра возникают интенсивные вихри (рис. 1, в-д).

Таким образом, в дуговой печи постоянного тока ЭВТ являются основным фактором, приводящим к «вымыванию» подового электрода и футеровки вокруг него. Они становятся причиной разрушения подины и приводят к частым ремонтам печи.

При наличии в печи только одного анода повлиять на электровихревые течения без отключения тока дуги не предоставляется возможным, однако при двух анодах появляется возможность «сброса» или «размытия» вихрей в районе подины посредством изменения токов, протекающих через подовые электроды.

Целью работы является выявление и обоснование основных принципов управления объемными электромагнитными силами в ванне ДППГ за счет изменения токов, проходящих через два подовых электрода.

В настоящее время на промышленных печах управление токами, протекающими через подовые электроды, реализуется с помощью тиристорных источников, регулируемых микроконтроллером. Для «размытия» вихрей в районе подовых электродов на большинстве

ДППГ используется периодическое уменьшение тока через каждую ветку до некоторого минимального значения I_{\min} с периодом T порядка 100 с (рис. 2, а).

В работе [4] установлено, что при размещении подового электрода со смещением относительно оси ванны наблюдается осевая симметрия электрических и магнитных полей относительно оси, проходящей через центры подового электрода и пятна дуги (ось тока). Осевая проекция плотности тока $J_z(r)$ и азимутальная напряженность магнитного поля $H_\varphi(r)$ в цилиндрической системе координат, связанной с осью тока (Oz), определяются по регрессионным зависимостям:

$$J_z(r) = i_1 (a|r|^3 + br^2 + c|r| + d);$$

$$H_\varphi(r) = 10i_1 \operatorname{sgn}(r) \left(\frac{a}{5}r^4 + \frac{b}{4}|r|^3 + \frac{c}{3}r^2 + \frac{d}{2}|r| \right),$$

где a, b, c, d – функции, зависящие от z .

При двух подовых электродах введем две оси тока, которые пересекаются в центре пятна дуги. Результирующие магнитные и электрические поля определяются по принципу суперпозиции, а ОЭМС как $\vec{f} = \frac{\mu_0}{\sigma} \vec{J} \times \vec{H}$, где μ_0 – магнитная постоянная; σ –

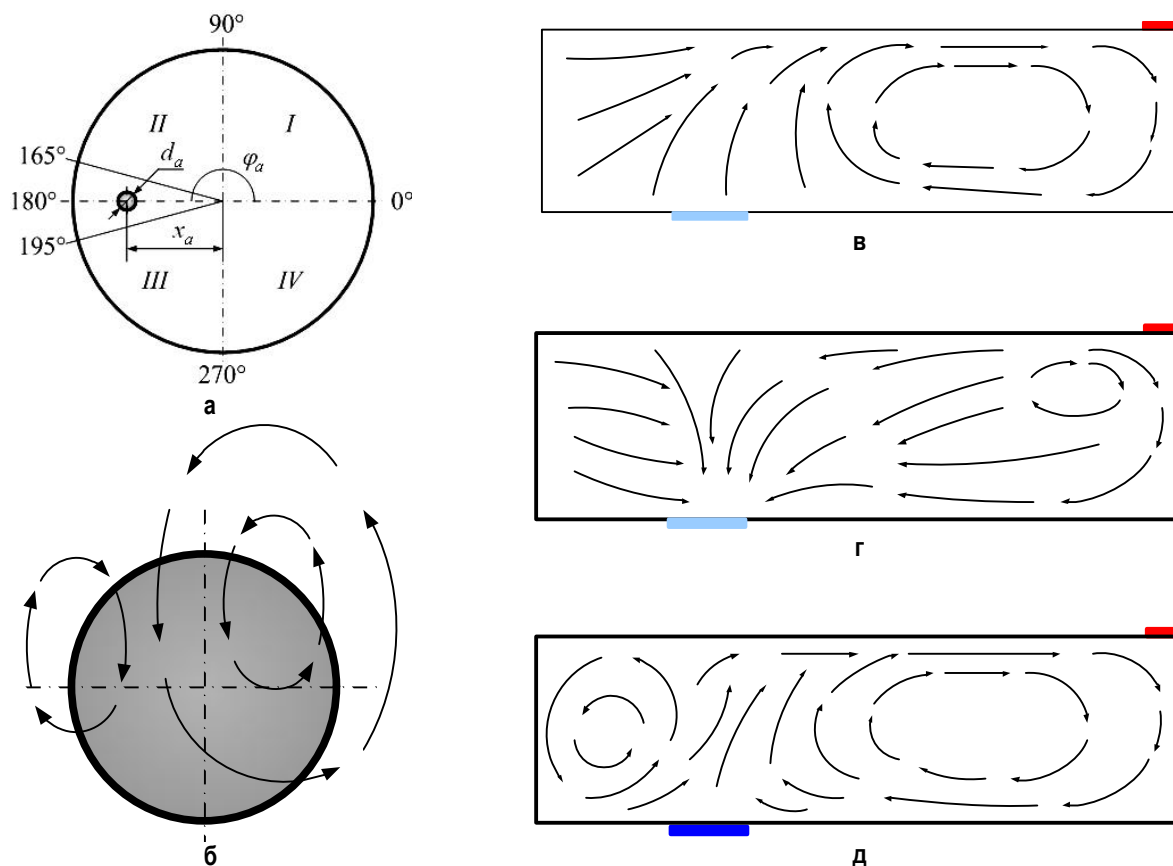


Рис. 1. Характер течения расплава в вертикальных плоскостях при одном подовом электроде, ось которого не совпадает с осью ванны:

а – схема секущих вертикальных плоскостей; б – характер течения над поверхностью подового электрода в горизонтальной плоскости; в – $\varphi=165^\circ$; г – $\varphi=180^\circ$ (координата оси подового электрода); д – $\varphi=195^\circ$

проводимость расплава.

На рис. 3 приведена зависимость ОЭМС в секторе между осями тока от соотношения токов при условии, что их сумма остается постоянной ($i_1+i_2=\text{const}$). Расчеты проводились для трехтонной сталеплавильной печи, коэффициенты аппроксимации плотности тока при расстоянии между электродами $R=300$ мм при $z=200$ мм выбирались равными $a=5,68 \cdot 10^{-9}$; $b=9,98 \cdot 10^{-6}$; $c=-0,00568$; $d=1,05$.

На рис. 3, а показан случай, когда ток i_1 уменьшается от 1 кА до 0, при этом i_2 увеличивается соответственно от 1 до 2 кА, а на рис. 3, б, наоборот, i_2 уменьшается при увеличении i_1 . При этом видно, что между токовыми осями (при $r/R=0-1$) при изменении соотношения токов i_1/i_2 ОЭМС меняют знак.

Таким образом, меняя соотношение токов, проходящих через подовые электроды, можно управлять интенсивностью и направлением ОЭМС, а значит, и ЭВТ расплава.

На основе компьютерных исследований ОЭМС было установлено, что можно существенно усилить подавление вихрей в районе подового электрода, меняя токи по схеме, показанной на рис. 2, б. Дополнительным преимуществом данного управления является то, что сумма токов, проходящих через подовые электроды, а значит, и тепловая мощность дуги остается постоянной.

Для подавления вихрей в районе подового электрода предлагается использование токов, меняющихся по заданному периодическому закону со сдвигом фаз Ψ . При прохождении через ванну пульсирующих токов $i_1 = f(\tau)$, $i_2 = f(\tau - \Psi)$ ($i_1 i_2 > 0$), подчиняющихся периодическому закону $f(\tau)$ со сдвигом фаз Ψ и периодом T в каждой ее точке, будет наблюдаться периодическое изменение электрического и магнитного поля. Посредством компьютерного моделирования было установлено, что если $i_2 = 0$, то напряженности электрического и магнитных полей меняются во времени пропорционально току i_1 , причем это изменение происходит одновременно (синфазно) во всех точках жидкого расплава [3–5]. Значение отдельных проекций электрического и магнитного поля в каждой точке ванны: $E_{II} \sim i_1$, $H_{II} \sim i_1$.

Выполним оценку мгновенного значения электромагнитной силы в данной точке ванны в зависимости от времени. Считая по принципу суперпозиции, что при изменении обоих токов результирующая напряженность электрического и магнитного полей:

$$E_{II} = k_1 f(\tau) + k_2 f(\tau - \Psi),$$

$$H_{II} = k_3 f(\tau) + k_4 f(\tau - \Psi),$$

получим характер зависимости проекции ОЭМС:

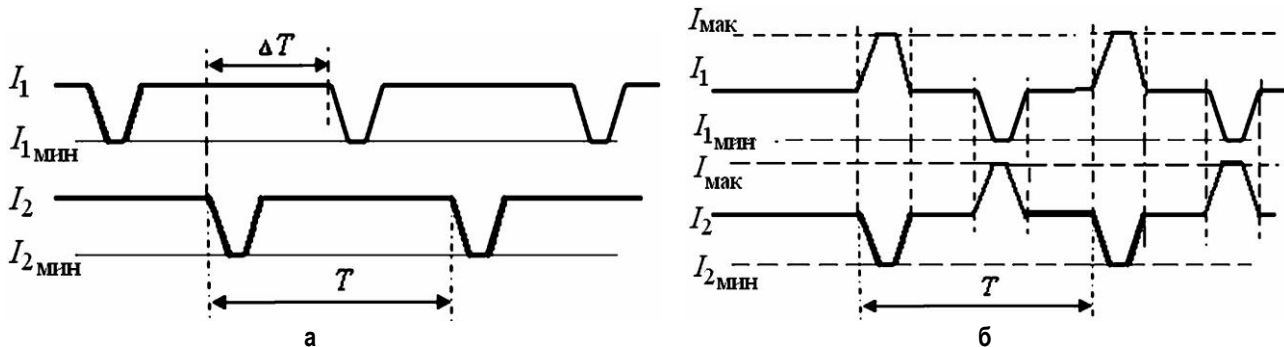


Рис. 2. Характер изменения токов через два подовых электрода:

а – существующий режим управления; б – предлагаемый режим управления ($I_{1\text{ мин}}=I_{2\text{ мин}}$; $T=2\Delta T$)

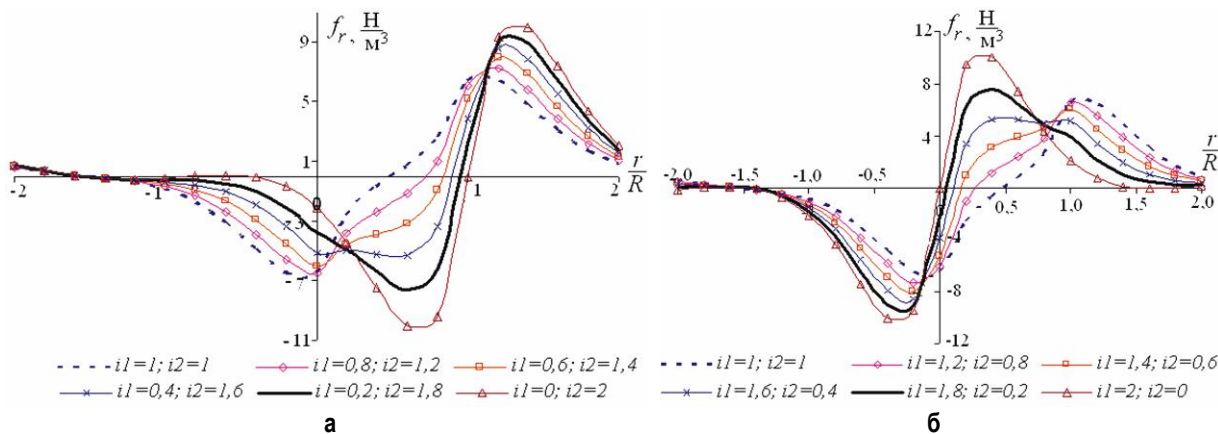


Рис. 3. Зависимость ОЭМС от безразмерного расстояния между электродами при разном соотношении токов ($i_1+i_2=2$ кА= const): а – при уменьшении i_1 ; б – при уменьшении i_2 ($R=300$ мм)

$$f_{II}(\psi) = c_0 f^2(\tau) + b_0 f^2(\tau - \psi) + a_0 f(\tau) f(\tau - \psi), \quad (1)$$

где $k_1, k_2, k_3, k_4, a_0, b_0, c_0$ – функции, зависящие от рассматриваемой проекции и координаты точки.

Используя эту оценку мгновенного значения объемной электромагнитной силы в зависимости от протекающих токов через подовые электроды, для произвольной точки ванны определяем проекцию среднеинтегральной ОЭМС как

$$\bar{f}(\psi) = \frac{c}{T} \int_0^T i^2(\tau) d\tau + \frac{b}{T} \int_0^T i^2(\tau - \psi) d\tau + \frac{a}{T} \int_0^T i(\tau) i(\tau - \psi) d\tau, \quad (2)$$

где a, b, c – функции, зависящие от рассматриваемой проекции и координаты точки.

Первое и второе слагаемые этого выражения – величины постоянные, поэтому зависимость $\bar{f}(\psi)$ обуславливается только третьим членом. Таким образом, в зависимости среднеинтегральной ОЭМС от сдвига фаз между токами основную роль играет функция

$$\bar{F}(\psi) = \int_0^{2\pi} i(\tau - \psi) i(\tau) d\tau \quad (3)$$

В качестве примера рассмотрим T -периодическую функцию изменения токов

$$i(\tau, \psi) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\left((2n-2)\left(\frac{2\pi\tau}{T} - \psi\right)\right)}{(2n-1)^2}, \quad (4)$$

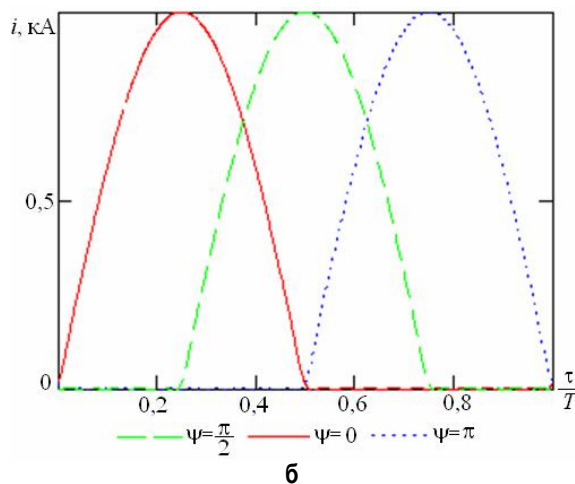
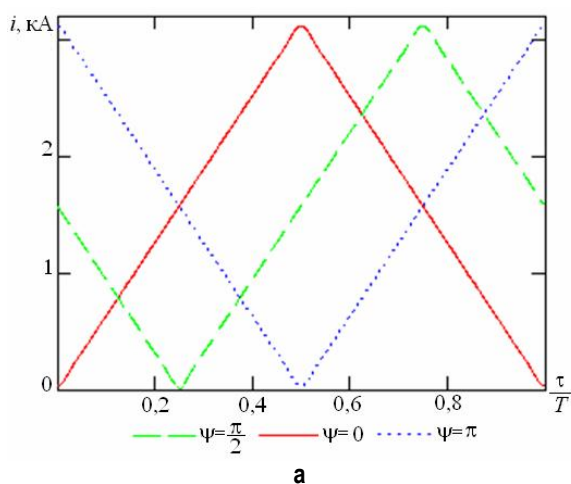


Рис. 4. Зависимость токов от времени при разной начальной фазе Ψ : а – для функции (4); б – для функции (5)

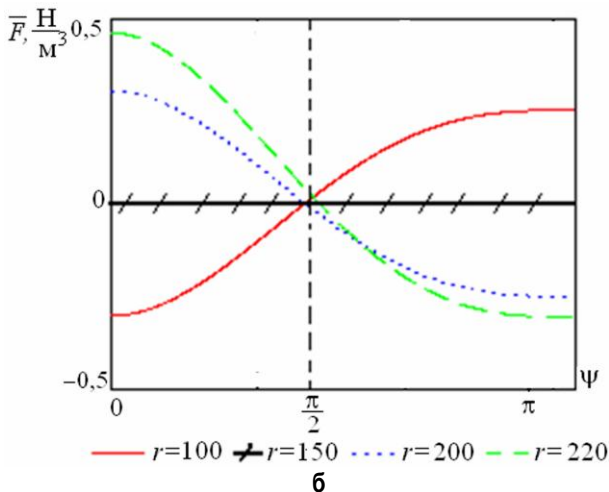
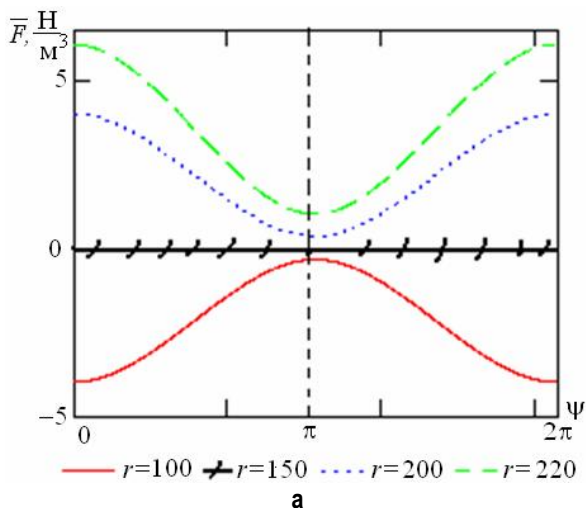


Рис. 5. Поведение средней радиальной ОЭМС от сдвига фаз в разных точках между подовыми электродами при пульсирующих токах: а – по функции (4); б – по функции (5) ($R=300$ мм)

ее график показан на рис. 4, а, причем среднее и действующее значения тока $\bar{i}=1,57$ кА и $I_d=1,81$ кА соответственно.

На рис. 5, а приведена зависимость среднеинтегрального значения радиальной проекции ОЭМС в зависимости от сдвига фаз. Видно, что на половинном расстоянии между осями тока ($r=R/2=150$ мм) сила равна нулю. При изменении сдвига фаз сила изменяется в 2–3 раза, а ее направление в данной точке ванны остается одним и тем же. Минимум среднеинтегральной силы наблюдается при $\psi = \pi$. Незменность направления силы f_r в данной точке между подовыми электродами можно объяснить тем, что токи пульсирующие, а не знакопеременные.

Однако существуют и такие функции изменения тока (не знакопеременные), при использовании которых $\bar{F}(\psi)$ меняет знак, например

$$i(\tau, \psi) = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin(\omega\tau - \psi) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos\left((2n)\left(\frac{2\pi\tau}{T} - \psi\right)\right)}{(2n-1)(2n+1)}, \quad (5)$$

ее график приведен на рис. 4, б, причем среднее и действующее значения тока $\bar{i}=0,25$ кА и $I_d=0,5$ кА соответственно. Особенностью этой функции является то, что часть периода она имеет нулевое значение. На рис. 5, б для функции изменения токов (5) приведена зависимость среднеинтегрального значения радиальной проекции ОЭМС в зависимости от сдвига фаз. Видно, что в данной точке между подовыми электродами направления силы f_r меняется на противоположное. Использование на практике аналогичных функций и наложение на них дополнительного условия $i_1+i_2=\text{const}$ позволяет управлять не только интенсивностью течения расплава, но и его направлением при неизменной полезной электрической мощности печи.

Таким образом, обоснована теоретическая возможность управления течением расплава в ванне ДППТ с двумя подовыми электродами. Установлен качественный характер зависимости объемной электромагнитной силы в произвольной точке ванны

ДППТ от значения токов, протекающих через подовые электроды. Показана возможность управления интенсивностью и направлением течения расплава между подовыми электродами, а значит, и во всей ванне ДППТ за счет изменения соотношения постоянных токов и сдвига фаз между пульсирующими токами, проходящими через подовые электроды. Даны рекомендации к выбору пульсирующих токов.

Список литературы

1. Результаты первого этапа освоения дугового плавильного агрегата постоянного тока нового поколения в ОАО «Курганмашзавод» / А.В. Афонаскин, И.Д. Андреев, Н.С. Власов и др. // *Электрометаллургия*. 2002. № 4. С. 16–19.
2. Электровихревые течения / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
3. Ячиков И. М., Портнова И. В. Электромагнитные процессы в ванне ДППТ при произвольном расположении подового электрода // *Электрометаллургия*. 2006. № 11. С. 35–39.
4. Моделирование электровихревых течений в ванне дуговой печи постоянного тока / И.М. Ячиков, О.И. Карандаева, Т.П. Ларина. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. 231 с.
5. Ячиков И.М., Мангаров В.Н. Моделирование объемных электромагнитных сил в ванне расплава ДППТ // *Вестник Самар. гос. ун-та*. 2008. № 6 (65). С. 330–340.
6. Ячиков И.М., Портнова И.В. Характер течения металла в ванне ДППТ с двумя подовыми электродами // *Вестник МГТУ*. 2008. № 3(23). С. 67–69.

Список литературы

1. The first stage results of the development of a new generation DC arc melting unit at JSC «Kurganmashzavod» / A.V. Afonaskin, I.D. Andreev, N.S. Vlasov and others // *Electrometallurgy*. 2002. № 4. P. 16–19.
2. Electrovortical flows / V.V. Boyarevich, I.J. Freyberg, E.I. Shilova, E.V. Scherbinin. Riga: Zinatne, 1985. 315 p.
3. Yachikov I.M., Portneva I.V. Electromagnetic process in DC arc furnace bath with an arbitrary location of bottom electrode // *Electrometallurgy*. 2006. № 11. P. 35–39.
4. Electrovortical flows simulating in DC arc furnace bath / I.M. Yachikov, O.I. Karandaeva, T.P. Larina. Magnitogorsk: State Educational Institution of Higher Professional Education «MSTU», 2008. 231 p.
5. Yachikov I.M., Managarov V.N. Volumetric electromagnetic forces simulation in DC arc furnace bath // *Bulletin of Samara State University*. 2008. № 6 (65). P. 330–340.
6. Jachicov I.M., Portnova I.V. Steel flow pattern of liquid melt at DC arc furnace with two bottom electrodes // *Vestnik of MSTU*. № 3(23). P. 67–69.

УДК 621.746.6

Дюльдина Э.В., Селиванов В.Н., Лозовский Е.П.

ФОРМИРОВАНИЕ ШЛАКА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ МНЛЗ

При непрерывной разливке стали в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» в промежуточный ковш МНЛЗ вводят шлакообразующую смесь (ШОС), при расплавлении которой получается жидкий шлак, изолирующий металл от контакта с атмосферой. В процессе разливки химический состав шлака меняется, что оказывает

влияние на его защитные функции. Для изучения изменения состава шлака в процессе разливки стали было проведено специальное исследование, в котором результаты экспериментов анализировались на основе математической модели процесса шлакообразования.

Экспериментальная часть исследования состояла из разливки двух серий опытных плавок. Первая серия