

REFERENCES

1. Kuklev A.V., Leites A.V. *Praktika nepreryvnoi razlivki stali* [The practice of continuous casting of steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2011. 432 p. (In Russ.).
2. Gorostkin S. V., Garten V. The introduction of a system of automatic filing of slag-forming mixture into the mold of continuous casting machine. *Novye ognepory*. 2013, no. 4, pp. 39–42. (In Russ.).
3. Eron'ko S.P. Designing experience for systems of dispensing of slag-forming mixtures in molds of continuous casting machines. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' OAO "Chermetinformatsiya"*. 2011, no. 11, pp. 35–40. (In Russ.).
4. *Spiral'no-vintovye transportery (gibkie shneki) i smesiteli* [Spiral screw conveyors (flexible augers) and mixers]. Preobrazhenskii P.A., Trufanov A.A. eds. Kazan: KKhTU, 1970. 176 p. (In Russ.).
5. Grigor'ev A.M. *Vintovye konveiry* [Screw conveyors]. Moscow: Mashnostroenie, 1972. 184 p. (In Russ.).
6. Herrmann H. *Schneckenmaschinen in der Verfahrenstechnik*. Berlin, Springer-Verlag, 1972, 179 p. (Russ.ed.: Herrmann H. *Shnekovye mashiny v tekhnologii*. Leningrad: Khimiya, 1975. 228 p.).
7. Eron'ko S.P., Yushchenko M.V., Mechik S.V. Next-generation dispensing slag-forming mixtures in molds of CCM. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' OAO "Chermetinformatsiya"*. 2014, no. 3, pp. 87–92. (In Russ.).

Received July 31, 2014

УДК 669.18:669.17.046:621.8.038.003.12

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ И ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ В ВАННЕ УСТАНОВКИ КОВШ–ПЕЧЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Пиптюк В.П.¹, к.т.н., старший научный сотрудник (office.isi@nas.gov.ua)

Крикент И.В.², преподаватель кафедры сварки

Самохвалов С.Е.², д.т.н., зав. кафедрой прикладной математики

Греков С.В.¹, научный сотрудник

Кабаков Д.Ю.², аспирант

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

(49050, Украина, г. Днепропетровск, пл. Ак. Стародубова, 1)

Днепродзержинский государственный технический университет

(51900, Украина, Днепропетровская обл., г. Днепродзержинск, Днепростроевская ул., 2)

Аннотация. Приведена методика расчета и оценены величины электромагнитных параметров, возникающих в ванне емкостью 60 т установки ковш–печь (УКП) постоянного и переменного тока при нагреве металлического расплава электрической дугой с одинаковой подводимой мощностью 7,7 МВт. Показаны особенности распределения плотности тока и электромагнитных сил (э.м.с.) в ковшовой ванне в зависимости от вида используемого тока на УКП. Численно в трехмерной постановке исследовано влияние э.м.с. на характер изменения условий перемешивания и скорости потоков расплава в зависимости от интенсивности подачи аргона через асимметрично расположенный донный продувочный узел ковша. Установлены рациональные, с точки зрения эффективного влияния э.м.с. на перемешивание расплава и энергосбережение процесса, режимы обработки расплава на УКП переменного тока в ковше исследуемой конструкции.

Ключевые слова: электромагнитные силы, перемешивание, нагрев расплава, ковшова ванна.

Рост производства стали с применением установок ковш–печь (УКП) на предприятиях Украины и государств постсоветского пространства и использование, главным образом, переменного тока для питания модуля нагрева такого оборудования с одной стороны, и отсутствие сведений о влиянии действующих в ванне электромагнитных сил (э.м.с.) на процессы обработки металла в таких условиях с другой стороны, обуславливают актуальность исследований оценки воздействия э.м.с. на расплав в ковше.

Ниже представлена расчетно-аналитическая методика оценки э.м.с., возникающих в металлической ванне УКП при электродуговом нагреве расплава от источника переменного тока.

Поле э.м.с., действующих на расплав при нагреве на УКП переменного тока, можно приближенно рассчитать путем аналитического решения задачи распределения плотности тока и магнитного поля в объ-

еме металлической ванны. Реальные геометрические размеры области анодной привязки дуги при этом игнорируются. Как было показано в работе [1], такой подход к расчету э.м.с. в ванне УКП постоянного тока обеспечивает достаточно высокую точность моделирования силового поля.

При использовании трехфазной схемы питания УКП в ванне ковша практически одновременно действуют три дуговых разряда. Электрическая дуга горит между катодом (электродом), подключенным к одной из фаз питающего трансформатора, и поверхностью металлической ванны (анодом), подключенной к нулевой точке источника питания. Следовательно, на поверхности металла имеют место три зоны ввода переменного тока, которые принимаем в виде точек.

В таком представлении векторные поля плотности тока и магнитной индукции необходимо рассматривать

как результат суперпозиции (наложения) соответствующих физических полей, создаваемых тремя дугами, действующими на поверхности металлического расплава в разных точках [2]. Рассмотрим задачу растекания тока от одного точечного (I_1) источника, действующего в координатах: $x = x_1^0, y = y_1^0, z = 0$, на поверхности условно полубесконечной металлической ванны. В локальной сферической системе координат, центр которой совпадает с точкой ввода тока ($x_1^0, y_1^0, 0$), будем иметь:

$$\vec{J}_1 = \frac{I_1 \vec{e}_R}{2\pi R_1^2}, \quad (1)$$

где: \vec{J}_1 – вектор плотности тока; I_1 – сила тока; R_1 – радиальная координата; \vec{e}_R – единичный вектор, направленный вдоль радиальной координаты.

В данном случае величина R_1 определяется следующим образом:

$$R_1 = \sqrt{(x - x_1^0)^2 + (y - y_1^0)^2 + z^2}. \quad (2)$$

С учетом (2) выражение (1) для расчета плотности тока можно переписать для декартовой системы координат:

$$\vec{J}_1 = \frac{I_1 (\cos \alpha_x \vec{e}_x + \cos \alpha_y \vec{e}_y + \cos \alpha_z \vec{e}_z)}{2\pi R_1^2}, \quad (3)$$

где α_x, α_y и α_z – углы между осями x, y, z и радиус-вектором R_1 соответственно; \vec{e}_x, \vec{e}_y и \vec{e}_z – базисные векторы декартовой системы координат.

Выразив значения направляющих косинусов для произвольной точки (x, y, z) через декартовы координаты последней, можем преобразовать формулу для вычисления вектора \vec{J}_1 к следующему виду:

$$\vec{J}_1 = \frac{I_1 [(x - x_1^0) \vec{e}_x + (y - y_1^0) \vec{e}_y + z \vec{e}_z]}{2\pi R_1^3}. \quad (4)$$

Плотность тока \vec{J}_n , создаваемая в произвольной точке металлической ванны любой из трех дуг, по аналогии с выражением (4), может быть представлена в следующем виде:

$$\vec{J}_n = \frac{I_n (\tilde{x}_n \vec{e}_x + \tilde{y}_n \vec{e}_y + z \vec{e}_z)}{2\pi R_n^3}, \quad (5)$$

где $n = 1, 2, 3$ – номер дуги; $R_n = \sqrt{(\tilde{x}_n)^2 + (\tilde{y}_n)^2 + z^2}$, $\tilde{x}_n = x - x_n^0, \tilde{y}_n = y - y_n^0$; I_n – ток; x_n^0 и y_n^0 – декартовы координаты данной дуги.

Результирующая плотность тока в любой точке ванны определяется суперпозицией:

$$\vec{J} = \sum_{n=1}^3 \vec{J}_n. \quad (6)$$

При использовании трехфазной схемы питания УКП токи I_n смещены относительно друг друга по фазе на $2\pi/3$. Информацию о фазах токов [(как и других электрических параметров (характеристик)] в цепях переменного тока удобнее всего учитывать методом комплексных амплитуд [3]. Данный метод предполагает представление I_n в форме комплексных чисел. Если применяется симметричная схема питания с равномерной загрузкой трех фаз, то абсолютные значения амплитуд токов во всех трех дугах одинаковые и величины I_n можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} I_1 &= A(1 + 0i), I_2 = A\left(-\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i\right), \\ I_3 &= A\left(-\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}i\right), \end{aligned} \quad (7)$$

где A – модуль амплитудного значения тока в любой из трех дуг; i – мнимая единица ($i = \sqrt{-1}$).

Для вычисления э.м.с., действующих на жидкий металл, необходимо также определить распределение вектора магнитной индукции в ванне УКП. Как известно, для парамагнитных сред магнитная индукция \vec{B} однозначно определяется напряженностью магнитного поля \vec{H} :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – универсальная магнитная постоянная.

Согласно результатам, полученным авторами ранее [1], напряженность магнитного поля, создаваемая током I_1 , в локальной цилиндрической системе координат с центром в точке ($x_1^0, y_1^0, 0$) описывается следующей зависимостью:

$$H_{\phi 1} = \frac{I_1}{2\pi \tilde{r}_1} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{\tilde{r}_1^2 + z^2}} \right), \quad (8)$$

где $H_{\phi 1}$ – угловая составляющая вектора напряженности магнитного поля (остальные компоненты вектора \vec{H} в данном случае равны нулю); $\tilde{r}_1 = \sqrt{\tilde{x}_1^2 + \tilde{y}_1^2}$ – радиальная координата в локальной системе координат; $\tilde{x}_1 = x - x_1^0$ и $\tilde{y}_1 = y - y_1^0$ – локальные декартовы координаты точки ввода тока I_1 .

Спроектировав угловую составляющую вектора напряженности магнитного поля на оси x и y получим:

$$\vec{H}_1 = \frac{I_1}{2\pi \tilde{r}_1} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{\tilde{r}_1^2 + z^2}} \right) \left(-\frac{\tilde{y}_1}{\tilde{r}_1} \vec{e}_x + \frac{\tilde{x}_1}{\tilde{r}_1} \vec{e}_y \right). \quad (9)$$

Напряженность магнитного поля, создаваемая в ванне УКП переменного тока любой дугой с номером n , также может быть вычислена по формуле, аналогичной (9).

$$\vec{H}_n = \frac{\dot{I}_n}{2\pi\tilde{r}_n} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{\tilde{r}_n^2 + z^2}} \right) \left(-\frac{\tilde{y}_n}{\tilde{r}_n} \vec{e}_x + \frac{\tilde{x}_n}{\tilde{r}_n} \vec{e}_y \right), \quad (10)$$

где $\tilde{r}_n = \sqrt{\tilde{x}_n^2 + \tilde{y}_n^2}$, а \tilde{x} и \tilde{y} имеют тот же смысл, что и выше.

Результирующая напряженность магнитного поля, создаваемая в ванне У КП токами трех дуговых разрядов, легко вычисляется в виде следующей суммы:

$$\vec{H} = \sum_{n=1}^3 \vec{H}_n. \quad (11)$$

Поскольку токи \dot{I}_n являются комплексными величинами, под вектором напряженности магнитного поля \vec{H} в данном случае следует понимать его комплексную амплитуду.

Очевидно, что данная методика расчета плотности тока и напряженности магнитного поля в металлическом расплаве применима для любого числа электрических дуг, подключенных к многофазному источнику питания.

Взаимодействие тока, протекающего через обрабатываемый металл, с магнитным полем приводит к появлению э.м.с. При использовании трехфазной схемы питания У КП плотность тока, магнитная индукция и э.м.с., действующие на металл, циклически изменяются с частотой переменного тока. В тоже время относительно инертные процессы динамики жидкой фазы определяются усредненным по периоду переменного тока значением силового поля. В качестве такового выступает среднее интегральное значение вектора плотности электромагнитной силы \vec{f} :

$$\vec{f} = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{f}_t dt = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \vec{f}_t dt, \quad (12)$$

где $T = 2\pi/\omega$ – период переменного тока; ω – циклическая частота тока в питающей сети ($\omega = 2\pi \cdot 50$); \vec{f}_t – мгновенное значение плотности э.м.с.; t – временная координата.

Поскольку мгновенное значение плотности ponderomotive силы представляет собой векторное произведение мгновенных значений векторов плотности тока и магнитной индукции, можем записать:

$$\vec{f}_t = \mu_0 \vec{J}_t \vec{H}_t. \quad (13)$$

В соответствии с применяемым авторами методом комплексных амплитуд, мгновенное значение плотности тока определяется как действительная часть комплексной функции:

$$\vec{J}_t = R_e(\vec{J} e^{i\omega t}) = \vec{J}_a \cos \omega t - \vec{J}_b \sin \omega t, \quad (14)$$

где $\vec{J}_a = R_e(\vec{J})$ и $\vec{J}_b = I_m(\vec{J})$ – действительная и мнимая части комплексной амплитуды вектора \vec{J} , вычисленной по формулам (5) и (6) соответственно.

Для функции \vec{H}_t по аналогии с (14) можем записать:

$$\vec{H}_t = \vec{H}_a \cos \omega t - \vec{H}_b \sin \omega t, \quad (15)$$

где $\vec{H}_a = R_e(\vec{H})$, $\vec{H}_b = I_m(\vec{H})$, $R_e(\vec{H})$, и $I_m(\vec{H})$ – действительная и мнимая части комплексной амплитуды напряженности магнитного поля, вычисляемой по формулам (10) и (11).

Определив, таким образом, величины, входящие в формулу для расчета мгновенного значения плотности э.м.с. (13), можем вычислить интеграл (12). После несложных преобразований получим следующее выражение для расчета усредненной по периоду переменного тока плотности электромагнитной силы, действующей на жидкий металл:

$$\vec{f} = \mu_0 \left(\frac{\vec{J}_a}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{\vec{H}_a}{\sqrt{2}} \right) + \mu_0 \left(\frac{\vec{J}_b}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{\vec{H}_b}{\sqrt{2}} \right), \quad (16)$$

где $\frac{\vec{J}_a}{\sqrt{2}} = \frac{R_e(\vec{J})}{\sqrt{2}}$ и $\frac{\vec{J}_b}{\sqrt{2}} = \frac{I_m(\vec{J})}{\sqrt{2}}$ – действительная и мнимая части действующего значения комплексной плотности тока соответственно, а $\frac{\vec{H}_a}{\sqrt{2}} = \frac{R_e(\vec{H})}{\sqrt{2}}$ и $\frac{\vec{H}_b}{\sqrt{2}} = \frac{I_m(\vec{H})}{\sqrt{2}}$ – действительная и мнимая части действующего значения комплексной напряженности магнитного поля соответственно.

Вычислив векторные произведения, получим следующее выражение для определения вектора \vec{f} в декартовой системе координат:

$$\begin{aligned} \vec{f} &= f_x \vec{e}_x + f_y \vec{e}_y + f_z \vec{e}_z, \\ f_x &= -\frac{\mu_0}{2} (J_{az} H_{ay} + J_{bz} H_{by}), \\ f_y &= \frac{\mu_0}{2} (J_{az} H_{ax} + J_{bz} H_{bx}), \end{aligned} \quad (17)$$

$$f_z = \frac{\mu_0}{2} (J_{ax} H_{ay} + J_{bx} H_{by} - J_{ay} H_{ax} - J_{by} H_{bx}).$$

Если задача динамики жидкого металла при нагреве на У КП решается с использованием цилиндрической системы координат, последнюю рационально вводить таким образом, чтобы начало отсчета и направление оси z в принятой авторами ранее декартовой и предложенной в данной работе цилиндрической системах координат совпадали. Пересчет вектора объемной плотности э.м.с. в цилиндрические координаты стандартным методом [4] не вызывает затруднений.

Ниже представлены результаты расчетно-аналитической оценки плотности тока и э.м.с. для разных вариантов электродугового нагрева расплава на У КП (рис. 1 и 2).

Как видно на рис. 1 и 2, при использовании трехфазной схемы питания на У КП переменного тока, зоны отно-

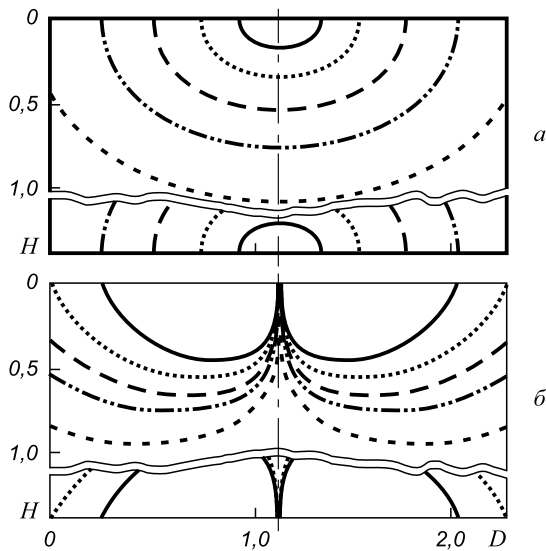


Рис. 1. Распределение абсолютных величин плотности тока (а) и э.м.с. (б) в ванне УКП постоянного тока. Мощность нагрева 7,7 МВт. Емкость ковша 60 т. Диаметр катода (электрода) 30 см, глубина ванны 221 см. D – диаметр ванны, H – глубина ванны.

Плотность тока, А/см²:

— — 20, — 5, - - - - 2, — · — · — 1, - · - · - 0,5;
э.м.с., В/м²: — — 100, — 50, - - - - 30, — · — · — 20, - · - · - 10

сительно больших плотностей тока имеют меньшую протяженность, чем при варианте электродугового нагрева расплава на УКП постоянного тока аналогичной мощности. По этой причине сравнительно большие э.м.с. в металлической ванне, нагреваемой электродуговым модулем УКП переменного тока, наблюдаются, в основном, в верхней части ванны (см. рис. 2). В такой ситуации часть расплава, подверженная существенным электромагнитным воздействиям, занимает меньший объем, по сравнению с вариантом нагрева на УКП постоянного тока [1].

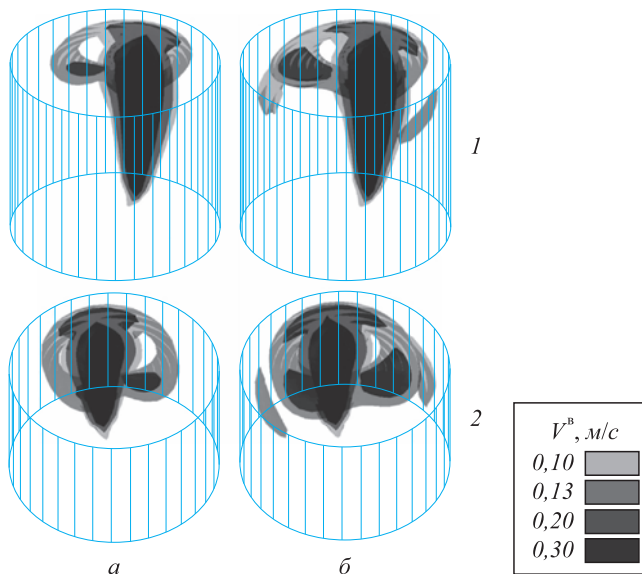


Рис. 3. Объемное представление вертикальной составляющей скорости потоков расплава при продувке аргоном с интенсивностью 0,04 М на УКП переменного тока в ковше емкостью 60 т без э.м.с. (а) и при воздействии э.м.с. (б). Вид сбоку (1) и сверху (2)

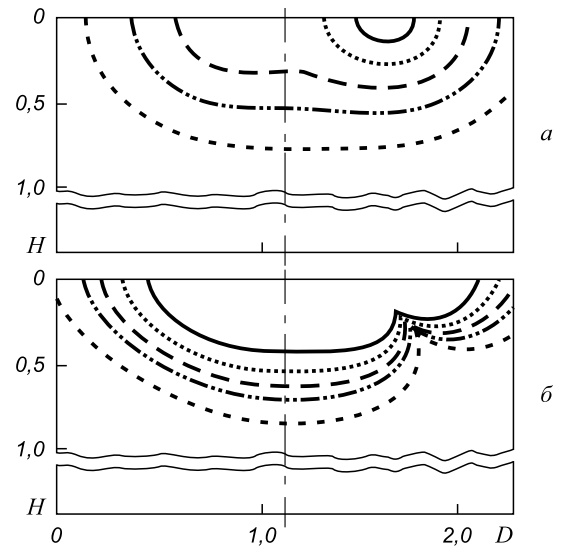


Рис. 2. Распределение абсолютных величин плотности тока (а) и э.м.с. (б) в ванне УКП переменного тока. Мощность нагрева 7,7 МВт. Емкость ковша 60 т. Диаметр электродов 30 см, глубина ванны 221 см. Обозначения аналогично рис. 1

На рис. 3 и 4 приведены некоторые результаты численного исследования влияния э.м.с. на характер изменения гидродинамических условий при фиксированном нагреве и изменяющейся продувке расплава на УКП переменного тока в ковше емкостью 60 т. Представленные и другие имеющиеся результаты свидетельствуют о незначительном их влиянии (в 3 и более раза меньше по сравнению с аналогичными параметрами нагрева и продувки на УКП постоянного тока такой же мощности [5, 6]) на гидродинамику ванны в процессе ее нагрева.

Полученные данные свидетельствуют также об аналогичных ранее выявленным для УКП постоянного тока закономерностях влияния э.м.с. (увеличение с

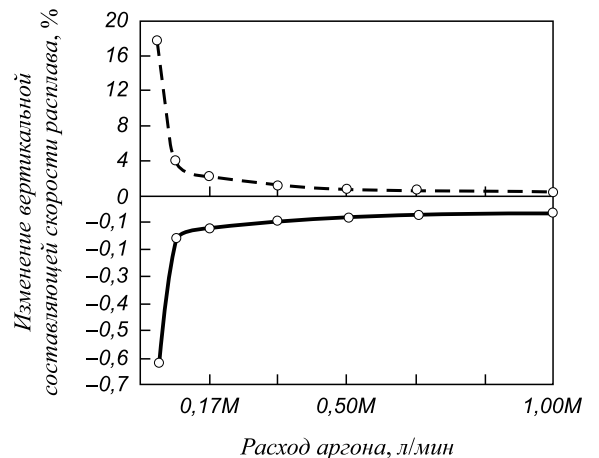


Рис. 4. Изменение вертикальной составляющей скорости потоков расплава в ковшовой ванне за счет воздействия э.м.с. на УКП переменного тока при разной интенсивности продувки:

— — восходящие потоки, - - - - нисходящие,
«+» – увеличение, «-» – уменьшение, M – выбранный максимальный расход аргона

уменьшением интенсивности продувки ванны и наобор-
рот) на процессы перемешивания расплава.

Однако, учитывая значительно меньшую для рас-
смотренных условий величину указанного фактора и,
соответственно, малое его влияние на гидродинами-
ческие процессы при обработке расплава на У КП пе-
ременного тока, в дальнейших исследованиях оценки
влияния переменных факторов на технологические ус-
ловия и эффективность обработки ванны воздействием
э.м.с. можно пренебречь.

Выводы. Разработана методика расчетно-аналити-
ческой оценки э.м.с. в металлической ванне У КП при
электродуговом нагреве от источника переменного
тока, определена их величина и характер распределе-
ния в ванне ковша У КП, оценена степень их влияния
на гидродинамические процессы, происходящие при
обработке расплава на У КП.

Определена возможность исключения э.м.с из чи-
сла рассматриваемых факторов влияния на условия пе-
ремешивания расплава при нагреве в ковше емкостью
60 т на У КП переменного тока мощностью 7,7 МВт
ввиду его незначительности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пиптюк В.П., Крикент И.В., Самохвалов С.Е. и др. Влияние постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш–печь. Часть 1. Действие электромагнитных сил. // Теория и практика металлургии. 2007. № 4 – 5. С. 14 – 17.
2. Ячиков И.М., Зарецкая Е.М. Анализ поведения магнитного поля вблизи электродов дуговых печей посредством математического моделирования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 1. С. 18 – 21.
3. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1969. – 424 с.
4. Бронштейн М.С., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
5. Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Крикент И.В. и др. Изучение массопереноса железоуглеродистого расплава при обработке на установке ковш–печь постоянного тока // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 66 – 69.
6. Пиптюк В.П., Поляков В.Ф., Самохвалов С.Е. и др. Факторы и их влияние на параметры перемешивания расплава при обработке на установке ковш–печь постоянного тока // Тр. XI Междунар. конгресса сталеплавателей – TRANSMET-2010. Нижний Тагил, 3 – 8 октября 2010 г. С. 283 – 287.

© 2014 г. Пиптюк В.П., Крикент И.В., Самохвалов С.Е.,
Греков С.В., Кабаков Д.Ю.
Поступила 23 июня 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. No. 9. Vol. 57, pp. 40–44.

ASSESSMENT OF MAGNITUDE AND IMPACT OF ELECTROMAGNETIC FORCES IN BATH OF LADLE–FURNACE AC

Piptyuk V.P.¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher
(office.isi@nas.gov.ua)

Krikent I.V.², Lecturer of the Chair of Welding
Samokhvalov S.E.², Dr. Sci. (Eng.), Head of the Chair of
Applied Mathematics

Grekov S.V.¹, Research associate

Kabakov D.Yu.², Postgraduate

¹ Institute of Ferrous Metallurgy named after Nekrasov Z.I.,
Ukrainian National Academy (1, Ak. Starodubova sq., Dnepro-
petrovsk, 49050, Ukraine)

² Dneprodzerzhinsk State Technical University (2, Dneprostro-
evskaya str., Dneprodzerzhinsk, Dnepropetrovsk Region, 51900,
Ukraine)

Abstract. The design procedure are described with the estimation of values of the electromagnetic parameters that arise in a bath with capacity of 60 t of ladle–furnace (LF) AC and DC during the heating of molten metal by arc with the same input power – 7.7 MW. The features of the current density distribution and electromagnetic force (e.m.f.) into the ladle bath are shown depending on the type of current used by the aggregate LF. Numerically studied the effect of three-dimensional formulation of e.m.f. with the nature of changes in the conditions of mixing and melt flow rates depending on the intensity of argon feed through asymmetrically located in the bottom of ladle blowdown node. The rational modes are installed from the standpoint of effective influence e.m.f. by melt mixing process and energy-saving on the melt processing in aggregate LF AC ladle of studied design.

Keywords: electromagnetic force, mixing, heating of the melt, ladle bath.

REFERENCES

1. Piptyuk V.P., Krikent I.V., Samokhvalov S.E., etc. *Vliyanie postoyannogo toka na kharakter massopere-nosa v metallicheskom rasplave ustanovki kovsh-pech'.* Part 1. *Deistvie elektromagnitnykh sil. Teoriya i praktika metallurgii* [Effect of DC on the nature of the mass transfer in molten metal at ladle furnace. Part 1: The action of electromagnetic forces. Theory and practice of metallurgy]. 2007, no. 4–5. pp. 14–17. (In Russ.).
2. Yachikov I.M., Zaretskaya E.M. Magnetical field behaviour close to electric arc furnace electrodes analysis with mathematical modeling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy.* 2011, no. 1, pp. 18–21. (In Russ.).
3. Atabekov G.I. *Osnovy teorii tsepei* [Basics of circuit theory]. Moscow: Energiya, 1969. 424 p. (In Russ.).
4. Bronshtein M.S., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya VTUZov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges]. Moscow: Nauka. 1986. 544 p. (In Russ.).
5. Piptyuk V.P., Polyakov V.F., Krikent I.V., Samokhvalov S.E., etc. Study of mass transfer of iron-carbon melt processing at the facility of ladle furnace with direct current. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy.* 2011, no. 10, pp. 66–69. (In Russ.).
6. Piptyuk V.P., Polyakov V.F., Samokhvalov S.E. etc. *Fakторы i ikh vliyanie na parametry peremeshivaniya rasp-lava pri obrabotke na ustanovke kovsh-pech' postoyannogo toka. Trudy XI Mezhdunarodnogo Kongressa staleplavil'shchikov – TRANSMET-2010. g. Nizhny Tagil. 3–8 oktyabrya 2010 g.* [Factors and their influence on the mixing parameters of the melt in the processing in ladle-furnace DC, in: Proceedings of the XI International Congress of Steelmakers – TRANSMET. Nizhny Tagil. 3–8 October 2010]. Pp. 283–287. (In Russ.).

Received June 23, 2014