

В. П. Пиптюк, И. В. Крикент*, С. Е. Самохвалов*, С. В. Греков, Д. Ю. Кабаков*

Институт черной металлургии НАН Украины, Днепропетровск

*Днепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск

Влияние электромагнитных сил на перемешивание ванны установки ковш-печь переменного тока

Приведены основные положения методики расчета величины, и оценено влияние электромагнитных сил (э.м.с.), возникающих при нагреве металлического расплава в ковше емкостью 60 т на установке ковш-печь переменного тока. Численно изучен характер перемешивания и скорость потоков расплава на этапе нагрева и доводки металла по температуре в зависимости от интенсивности его продувки через донную фурму ковша.

Ключевые слова: электромагнитные силы, перемешивание, нагрев расплава, ковшовая ванна

Состояние вопроса и цель исследования. Увеличение объемов производства стали с использованием установок ковш-печь (УКП) на металлургических и машиностроительных предприятиях Украины и стран СНГ, преимущественное использование переменного тока в качестве энергоносителя модуля нагрева такого оборудования, с одной стороны, и отсутствие знаний о влиянии электромагнитных сил (э.м.с.), возникающих в металлической ванне при ее электродуговом нагреве, с другой стороны, обуславливают актуальность исследований с целью познания происходящих в расплаве процессов и их учета для повышения эффективности производства.

Основные положения методики расчета. 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 объеме ковшовой 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 УКП постоянного тока обеспечивает достаточно высокую точность моделирования силового поля.

При использовании трехфазной схемы питания УКП на расплав в ковше практически одновременно действуют три дуговых разряда. Каждая 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 имеются три зоны ввода переменного тока, которые принимаются точечными.

Используя ранее полученные результаты [1], рассчитываются векторные поля плотности тока и магнитной индукции в металлической ванне как результат суперпозиции (наложения) соответствующих физических полей, создаваемых тремя дуговыми разрядами, действующими на поверхности металлического расплава в разных точках [2]. При этом сдвиг фаз между токами, протекающими в дугах, питающихся от разных фаз источника питания, учитывается методом комплексных амплитуд [3]. Плотность электромагнитных сил, действующих на металлический расплав, определяется как вектор-

ное произведение плотности тока на вектор магнитной индукции.

В результате принятых положений и аналитических преобразований получили следующее выражение для расчета усредненной по периоду переменного тока плотности электромагнитной силы, действующей на жидкий металл:

$$\vec{f} = \mu_0 \left(\frac{\vec{J}_a}{\sqrt{2}} \right) \cdot \left(\frac{\vec{H}_a}{\sqrt{2}} \right) + \mu_0 \left(\frac{\vec{J}_b}{\sqrt{2}} \right) \cdot \left(\frac{\vec{H}_b}{\sqrt{2}} \right), \quad (1)$$

где $\frac{\vec{J}_a}{\sqrt{2}} = \frac{Re(\vec{J})}{\sqrt{2}}$ и $\frac{\vec{J}_b}{\sqrt{2}} = \frac{Im(\vec{J})}{\sqrt{2}}$ – действительная и мнимая

части действующего значения комплексной

плотности тока соответственно, а $\frac{\vec{H}_a}{\sqrt{2}} = \frac{Re(\vec{H})}{\sqrt{2}}$ и $\frac{\vec{H}_b}{\sqrt{2}} = \frac{Im(\vec{H})}{\sqrt{2}}$ – действительная и мнимая части дей-

ствующего значения комплексной напряженности магнитного поля соответственно.

После вычисления векторного произведения, получили следующее выражение для определения вектора \vec{f} в декартовой системе координат:

$$\vec{f} = f_x \vec{e}_x + f_y \vec{e}_y + f_z \vec{e}_z, \quad (2)$$

$$f_x = -\frac{\mu_0}{2} \left(J_{az} H_{ay} + J_{bz} H_{by} \right),$$

$$f_y = -\frac{\mu_0}{2} \left(J_{az} H_{ax} + J_{bz} H_{bx} \right),$$

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

Если задача динамики жидкого металла при нагреве на УКП решается с использованием цилиндрической системы координат, последнюю рационально вводить таким образом, чтобы начало отсчета и направление оси z в принятой нами ранее декартовой и предложенной в данной работе цилиндрической

системах координат совпадали. Пересчет вектора объемной плотности э.м.с. в цилиндрические координаты осуществляли стандартным методом [4].

Результаты исследования и их обсуждение. Ниже представлены результаты расчетно-аналитической оценки объемной плотности э.м.с. для разных вариантов электродугового нагрева расплава на УКП (рис. 1 и 2).

Как видно на рис. 1 и 2, при использовании трехфазной схемы питания на УКП переменного тока зоны относительно 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 (рис. 2). В такой ситуации часть расплава, подверженная существенным электромагнитным воздействиям, занимает меньший объем, по сравнению с вариантом нагрева на УКП постоянного тока [1].

На рис. 3 и 4 приведены некоторые результаты численного исследования влияния э.м.с. на характер изменения гидродинамических условий при фиксированных режимах нагрева и продувки расплава на УКП переменного тока в ковше емкостью 60 т. Представленные и другие имеющиеся результаты

свидетельствуют о незначительном их влиянии (в 3 и более раз 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 (рис. 5) свидетельствуют также об аналогичных, ранее выявленных для УКП постоянного тока закономерностях влияния э.м.с. (увеличение с уменьшением интенсивности продувки ванны и повышением мощности нагрева) на процессы перемешивания расплава.

Однако, учитывая значительно меньшую для рассмотренных условий величину указанного фактора, и, соответственно, незначительное его влияние на гидродинамические процессы при обработке расплава на УКП переменного тока, в дальнейших исследованиях

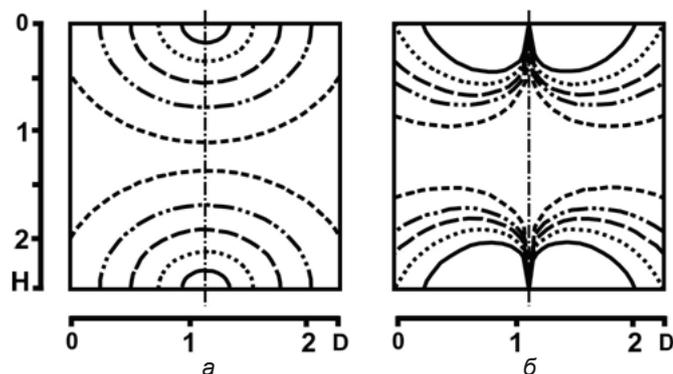


Рис. 1. Распределение абсолютных величин плотности тока (а) и э.м.с. (б) в ванне УКП постоянного тока; мощность нагрева 7,7 МВт; емкость ковша 60 т; диаметр катода (электрода) 0,3 м, глубина ванны 2,21 м. обозначения: D – диаметр ванны (м), H – глубина ванны (м); обозначение кривых: плотность тока (A/cm^2) — 20, 5, — — — 2, — · — · — 1, — — — — 0,5; э.м.с. (H/m^3) — — — — 100, 50, — — — — 30, — · — · — 20, — — — — 10

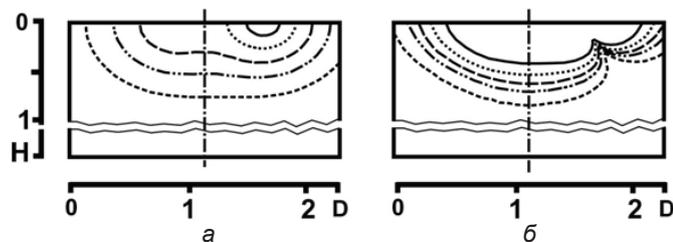


Рис. 2. Распределение абсолютной величины плотности тока (а) и э.м.с. (б) в ванне УКП переменного тока; мощность нагрева 7,7 МВт; емкость ковша 60 т; диаметр электродов 0,3 м, глубина ванны 2,21 м; обозначения аналогично рис.1

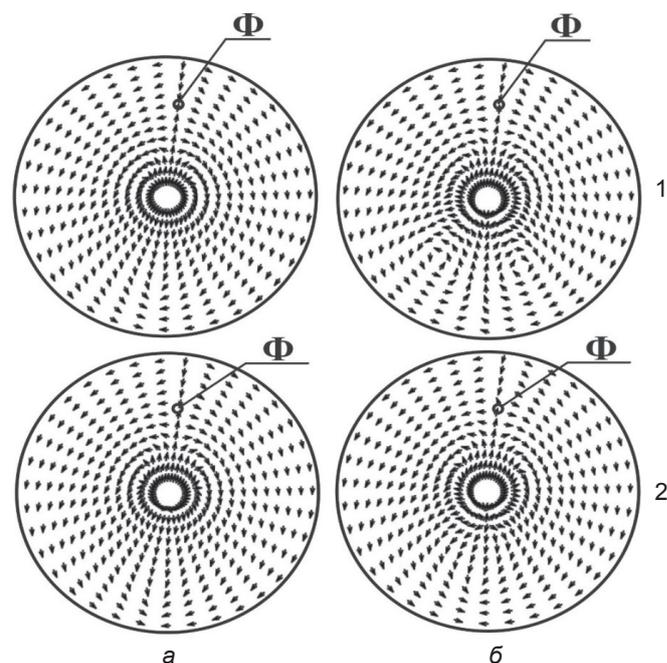


Рис. 3. Поле скоростей в горизонтальном сечении ванны емкостью 60 т; УКП переменного тока на высоте 1,9 м (при интенсивности продувки 0,04М (1) и 0,17М (2)) без воздействия э.м.с. (а) и с воздействием э.м.с. в период нагрева (б); обозначения: Φ – донная продувочная фурма; M – выбранный максимальный расход аргона

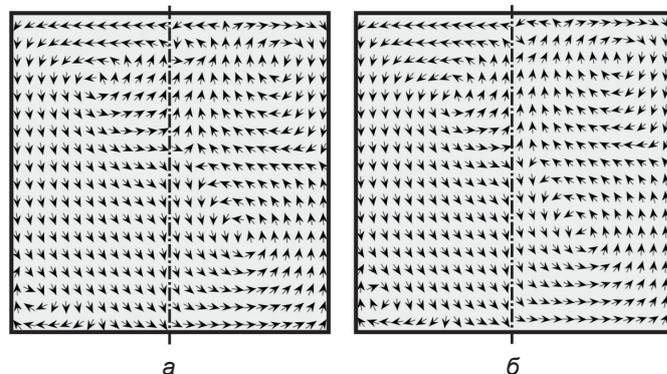


Рис. 4. Поле скоростей потоков расплава в вертикальном осевом сечении, проходящем через электрод (правая половина), без электрического воздействия (а) и с воздействием э.м.с. (б) (при интенсивности продувки 0,04М) ванны емкостью 60 т УКП переменного тока

Изменение вертикальной составляющей скорости расплава, %

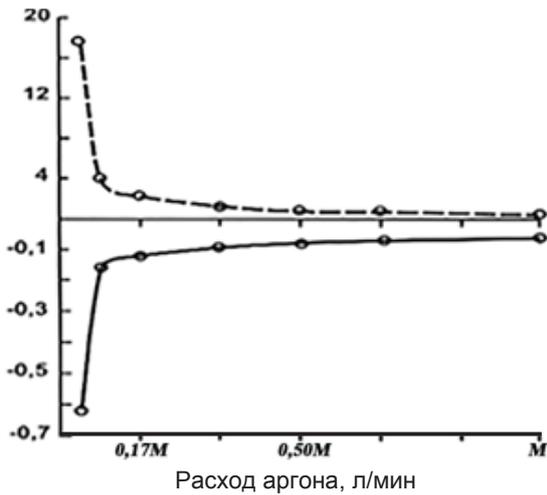


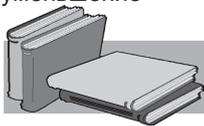
Рис. 5. Изменение вертикальной составляющей скорости потоков расплава в ковшовой ванне за счет воздействия э.м.с. на УКП переменного тока при разной интенсивности продувки; обозначения: сплошная линия – восходящие потоки, пунктирная – нисходящие, «+» – увеличение, «-» – уменьшение

оценки влияния переменных факторов на технологические условия и эффективность обработки ванны воздействием э.м.с. можно пренебречь.

Выводы

Разработана методика расчетно-аналитической оценки э.м.с. в металлической ванне УКП при электродуговом нагреве от источника переменного тока, определена их величина и характер распределения в ванне ковша УКП, оценена степень их влияния на гидродинамические процессы, происходящие при обработке расплава на УКП.

Определена возможность исключения э.м.с. из числа рассматриваемых факторов влияния на условия перемешивания расплава при нагреве в ковше ёмкостью 60 т на УКП переменного тока с мощностью 7,7 МВт ввиду его незначительности.



ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш-печь. Часть 1. Действие электромагнитных сил // В. П. Пиптюк, И. В. Крикент, С. Е. Самохвалов и др. // 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. ВУЗов. 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. Изучение массопереноса железоуглеродистого расплава при обработке на установке ковш-печь постоянного тока / В. П. Пиптюк, В. Ф. Поляков, И. В. Крикент, С. Е. Самохвалов и др. // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 2011. – № 10. – С. 66-69.
6. Факторы и их влияние на параметры перемешивания расплава при обработке на установке ковш-печь постоянного тока / В. П. Пиптюк, В. Ф. Поляков, С. Е. Самохвалов и др. / Труды XI Международного Конгресса сталеплавильщиков – ТРАНСМЕТ-2010 (3-8 октября 2010 г.) Нижний Тагил. – С. 395-397.

Анотація

Піптюк В. П., Крикент І. В., Самохвалов С. Є., Греков С. В., Кабаков Д. Ю.

Вплив електромагнітних сил на перемішування ванни установки ківш-піч змінного струму

Наведено основні положення методики розрахунку величини, і оцінено вплив електромагнітних зусиль (е.м.з.), що виникають при нагріванні металевого розплаву в ковші ємністю 60 т на установці ківш-піч змінного струму. Чисельно вивчено характер перемішування і швидкість потоків розплаву на етапі нагріву і доведення металу по температурі в залежності від інтенсивності його продувки через донну фурму ковша.

Ключові слова

електромагнітні зусилля, перемішування, нагрів розплаву, ковшова ванна

Summary

Piptyuk V. P., Krikent I. V., Samohvalov S. E., Grekov S. V., Kabakov D. Yu.

The influence of electromagnetic forces on mixing bath ladle furnace ac

The main principles of the methodology for calculation the value and estimated the influence of electromagnetic forces (e.m.f.) arising during the heating of the molten metal in the ladle capacity of 60t on aggregate LF AC. The character of mixing and melt flow rate studied numerically on of step heating and operational development metal by temperature, depending on the intensity of his blowing through the bottom blowdown node.

Keywords

electromagnetic force, mixing, heating the melt, ladle bath

Поступила 22.05.14