



УДК 669.187.2

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ РАСПЛАВА В УСТАНОВКЕ КОВШ–ПЕЧЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

И. В. Крикент¹, С. Е. Самохвалов¹, Д. Ю. Кабаков¹,
И. В. Кривцун², В. Ф. Демченко², В. П. Пиптюк³, С. В. Греков³

¹Днепродзержинский государственный технический университет.
51900, г. Днепродзержинск, Днепростроевская ул., 2. E-mail: science@dstu.dp.ua

²Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

03680, г. Киев-150, ул. Боженко 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины.
49050, г. Днепропетровск, пл. Акад. Стародубова, 1. E-mail: office@nas.gov.ua

При внепечной обработке стали в сталеразливочном ковше с использованием подогрева электрической дугой (установка ковш–печь) существенное влияние на интенсификацию газовыделения из металлического расплава и его взаимодействие с вводимыми в ковшевую ванну раскислителями и легирующими присадками оказывает перемешивание расплава. Формирование сложного движения в системе газ–металлический расплав происходит в результате взаимодействия всплывающих пузырей инертного газа с расплавом при барботаже ванны газом, а также за счет электромагнитной силы, возникающей в объеме расплава при прохождении через ванну электрического тока. С целью количественной оценки степени перемешивания стали в ковше в статье используется метод математического моделирования. Для описания гидродинамических процессов привлекается трехмерная модель, учитывающая асимметричное расположение продувочной фурмы. Электромагнитные процессы в сталеразливочном ковше описываются в осесимметричном приближении. Для задания распределения плотности тока на свободной поверхности расплава используются ранее опубликованные результаты моделирования магнитогидродинамических процессов в столбе сильноточной дуги. Проведен сравнительный анализ раздельного влияния различных силовых факторов и их комбинации на движение расплавленного металла в ковше. Установлено, что электромагнитные силы способствуют уменьшению застойных зон в расплаве. При заданной производительности продувки ванны инертным газом из двух параметров дугового разряда (тока и длины дуги) более эффективным средством интенсификации перемешивания жидкого металла в ковше является ток дуги. Библиогр.12, табл. 1, ил. 5.

Ключевые слова: установка ковш–печь; продувка газом; математическое моделирование; перемешивание металла; электромагнитные силы

Одним из эффективных способов внепечной обработки стали является процесс рафинирования в сталеразливочном ковше с использованием подогрева электрической дугой (установка ковш–печь – УКП). В этом процессе существенное влияние на интенсификацию газовыделения из металлического расплава и его взаимодействие с вводимыми в ковшевую ванну раскислителями и легирующими присадками оказывает перемешивание расплава. В УКП циркулирующая жидкой стали происходит под воздействием следующих силовых факторов: взаимодействия всплывающих пузырей инертного газа с расплавом при барботаже ванны газом, нагнетаемым через продувочную фурму; электромагнитных

сил; вязкого трения дуговой плазмы с поверхностью жидкометаллической ванны. Как показано в работах [1–4], эти факторы оказывают существенное влияние на формирование сложного движения в системе газ–металлический расплав. В настоящей работе с помощью метода математического моделирования изучается влияние первых двух факторов на перемешивание стали в УКП.

При моделировании процессов переноса импульса и заряда ковшевую ванну будем представлять в виде цилиндра заданного радиуса и высоты; центр симметрии анодного пятна на поверхности ванны положим совпадающим с осью ванны. Деформацией свободной поверхности ванны под воздейст-

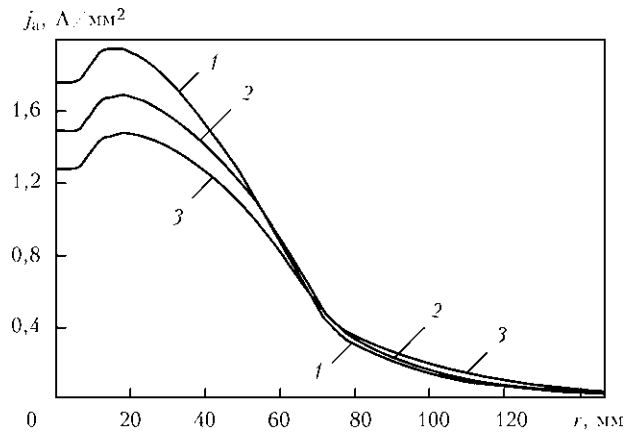


Рис. 1. Распределение плотности тока на поверхности анода j_a для различных значений длины дуги L , мм: 1 – 150; 2 – 180; 3 – 210

вием набегающего потоком дуговой плазмы будем пренебрегать, как и напряжением вязкого трения потока плазмы со свободной поверхностью. Поскольку расположение продувочной фурмы в установке ковш–печь не совпадает с осью симметрии ванны, то для описания гидродинамических процессов в расплаве будем использовать трехмерную модель. Для выбранной формы ванны ее удобно формулировать в цилиндрической системе координат $\{r, \theta, z\}$ (θ – угловая координата), начало которой совпадает с центром анодного пятна дугового разряда. Модель гидродинамических процессов в металлической ванне, подвергающейся продувке газом [5], построена в рамках концепции многоскоростного континуума [6], в соответствии с которой многофазная среда (расплав–газ) представляется в виде набора континуумов (фаз). Каждая фаза характеризуется макроскопическими параметрами: плотностью, скоростью и удельной энергией. В модели приняты следующие допущения: вакуумное приближение; постоянная плотность металла; кинетические энергии, а также работа поверхностных и объемных сил пренебрежимо малы по сравнению с внутренними энергиями. Для численной реализации модели использовали методику, описанную в работе [7].

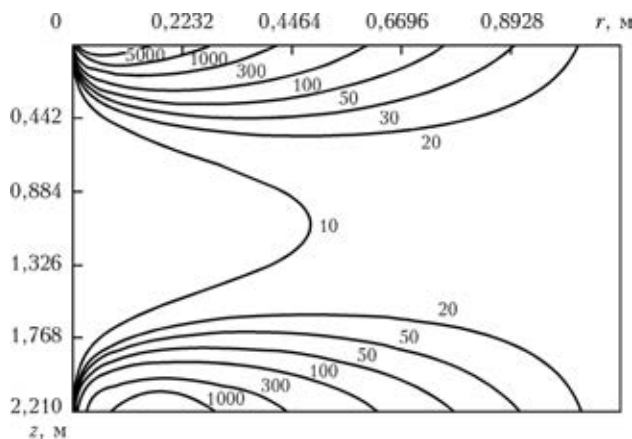


Рис. 2. Абсолютные значения плотности вихревой составляющей электромагнитной силы (H/m^3) в ванне УКП при $I = 26,2 \text{ кА}$, $L = 21 \text{ см}$

Распределение характеристик электромагнитного поля (плотность тока, напряженность магнитного поля, объемная плотность электромагнитной силы) в ванне УКП постоянного тока существенно зависит от диаметра подового электрода и распределения плотности тока в анодном пятне на поверхности металлической ванны. В работах [8–10] электромагнитные силы, действующие на металл, и их влияние на перемешивание расплава оценивали исходя из предположения, что размер анодного пятна равен диаметру подового электрода. В реальных условиях обработки металла сильноточной дугой размер анодного пятна и распределение плотности тока в нем определяются условиями горения дуги, которые зависят от значения тока и длины дуги. В работе [11] предложена математическая модель дугового разряда сильноточной дуги, базирующаяся на полной системе уравнений магнитной газовой динамики и уравнении энергии. В модели, учитывающей перенос тепла заряженными частицами, теплопроводностью и конвекцией, характеристики электромагнитного поля в столбе дуги рассчитывают с учетом скачка потенциала электрического поля на анодном слое. Это позволяет определить размеры анодного пятна и распределение в нем плотности электрического тока в зависимости от длины дуги, тока и свойств плазмообразующего газа. На рис. 1 представлено распределение плотности тока на свободной поверхности ванны для различных значений длины дуги L при токе 26,2 кА.

Распределение плотности тока в пределах анодного пятна носит весьма неравномерный характер. В таких условиях в объеме расплава под анодным пятном дуги возникают значительные электромагнитные силы, способные внести заметный вклад в циркуляцию расплава металлической ванны.

Полагая электромагнитное поле в ванне УКП осесимметричным, запишем уравнение для скалярного потенциала $\varphi = \varphi(r, z)$ в виде

$$\text{div} (\sigma \text{grad } \varphi) = 0,$$

где σ – удельная электрическая проводимость жидкой стали. Для однозначного решения данного уравнения дополним его условиями на границах рассматриваемой области. В зоне анодной привязки дуги $z = 0$ в соответствии с рис. 1 зададим распределение плотности тока $j_a(r)$, поступающего из дуговой плазмы в металл

$$-\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \Big|_{z=0} = j_a(r).$$

Полагая контакт металлического расплава с донным электродом идеальным, можно положить потенциал донного электрода равным нулю. Граница Γ металлического расплава в ковше с футеровкой, шлаковой и газовой фазами является изолированной от источника питания. Следовательно, на границе Γ выполняется условие

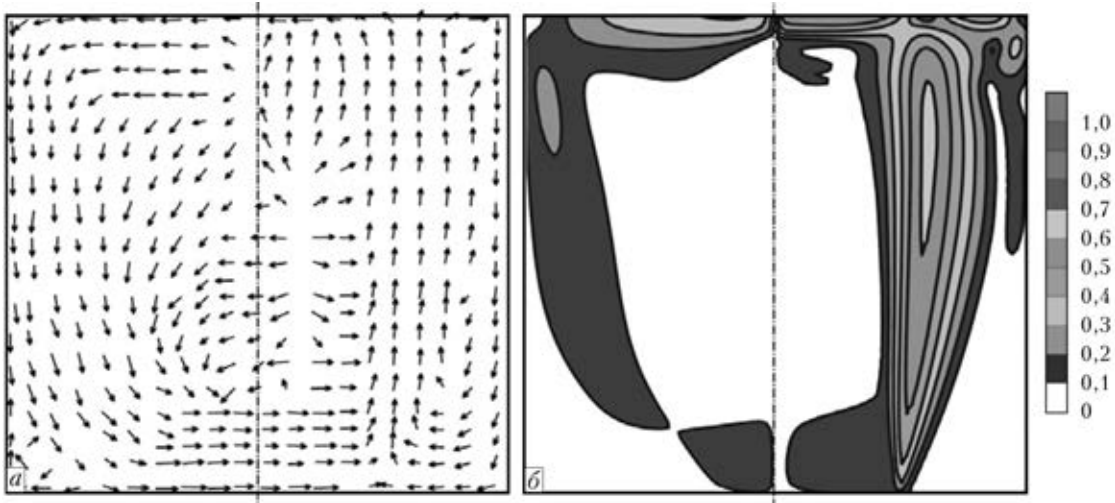


Рис. 3. Скорость движения металла в УКП (м/с) при продувке газа; *a* — направление движения; *б* — абсолютные значения вектора скорости

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{\Gamma} = 0.$$

Вектор объемной плотности электромагнитной силы \vec{f} можно представить в виде суммы градиентной \vec{f}_{grad} и вихревой \vec{f}_{rot} составляющих. На движение расплава оказывает влияние только вихревая составляющая силового поля [12], которая в осесимметричном электромагнитном поле определяется по формуле $\vec{f}_{rot} = -\mu_0 \frac{H_0^2}{r} \vec{e}_r$, где μ — относительная магнитная проницаемость среды; μ_0 — универсальная магнитная постоянная; H_0 — азимутальная компонента вектора напряженности магнитного поля; \vec{e}_r — единичный вектор, направленный вдоль радиальной оси r . Составляющая H_0 может быть определена из интегрирования уравнения $rot \vec{H} = \vec{j}$.

Вычислительный эксперимент проводили для ковша с массой жидкого металла 60 т. Диаметр металлической ванны полагали равным 2,232 м, а ее глубину — 2,21 м. Распределение плотности тока под анодным пятном дуговых разрядов различной

длины для токов 26,2 и 32,8 кА задавали в соответствии с результатами моделирования электрических дуг постоянного тока [11].

Ток, поступающий из анодного пятна дуги, растекается по металлической ванне и вновь концентрируется вблизи подового электрода. Вследствие этого вихревая составляющая электромагнитной силы неравномерно распределяется по объему ванны, достигая наибольших значений вблизи свободной поверхности ванны и в придонной ее части (рис. 2).

Под анодным пятном дуги формируется зона с весьма существенной (более 5000 Н/м³) плотностью электромагнитной силы. В донной части ванны столь значительного силового воздействия электромагнитного поля на металл не обнаружено. Повышение значения тока от 26,2 до 32,8 кА при неизменной длине дуги приводит к увеличению абсолютных значений вихревой составляющей электромагнитной силы. При этом характер ее распределения по объему ванны сохраняется таким же, как показано на рис. 2. Уменьшение длины дуги от 21 до 15 см при постоянном уровне тока 32,8 кА способствует лишь незначительному увеличению силового воздействия

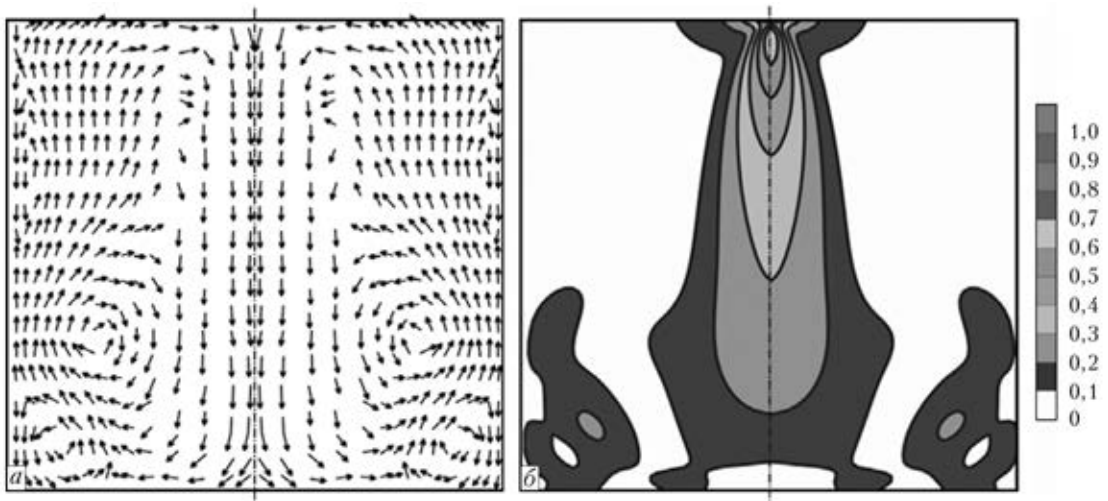


Рис. 4. Скорость движения металла (м/с) в УКП под воздействием электромагнитных сил ($I = 32,8$ кА, $L = 15$ см); обозначения *a* и *б* см. на рис. 3

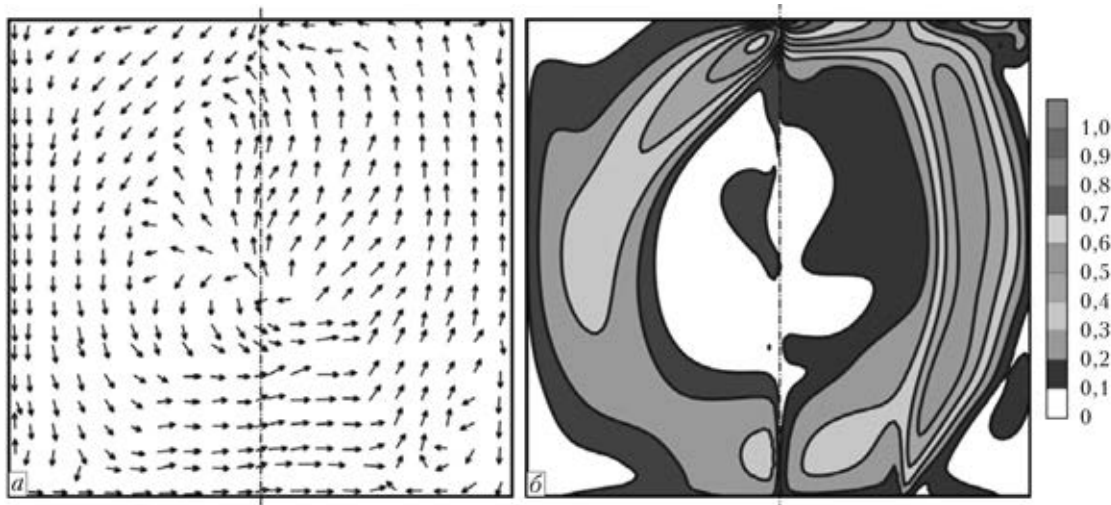


Рис. 5. Скорость движения металла (м/с) в УКП при совместном действии продуваемого газа и электромагнитных сил ($I = 32,8$ кА, $L = 15$ см); обозначения *a* и *б* см. на рис. 3

Влияние параметров дугового разряда на показатели перемешивания ковшевой ванны

I , кА	L , см	$ v_{\max} $, м/с	$ v_{\text{cp}} $, м/с	η , %
32,8	15	1,246	0,162	13,0
32,8	21	1,035	0,152	15,3
26,2	21	0,778	0,126	19,4

электромагнитного поля на жидкий металл в весьма ограниченной области, находящейся непосредственно под анодным пятном дугового разряда.

Рассмотрим результаты расчета движения металла, возникающего в жидком металле в результате силового воздействия продуваемого газа (аргона). Интенсивность продувки полагали равной 25 л/мин, донная фурма отстояла на 0,6 м от оси ванны. На рис. 3 показано поле скоростей движения жидкого металла в вертикальном сечении ковшевой ванны, проходящем через ось продувочной фурмы.

Как следует из рис. 3, интенсивность перемешивания металла над зоной подачи газа значительно выше, чем в диаметрально противоположной области ванны. Максимальное значение модуля скорости движения металла составило 0,623, среднее — 0,079 м/с. Степень перемешивания расплава оценивали исходя из объема застойных зон, выраженного через относительный объем металла, в котором полная скорость движения расплава меньше 0,05 м/с. В случае, приведенном на рис. 3, этот показатель равняется 47,1 %. Картина течения расплава, обусловленного электромагнитным перемешиванием металла при длине дуги 15 см и значении тока 32,8 кА (без продувки), показана на рис. 4. Максимальная скорость движения металла под действием электромагнитных сил составила 0,685 м/с, средняя скорость движения расплава равна 0,076 м/с, объем застойных зон — 43,1 %.

Таким образом, барботаж ванны продуваемым газом и перемешивание за счет электромагнитных сил обеспечивают примерно одинаковые размеры застой-

ных зон в расплаве. При увеличении длины дугового разряда до 21 см максимальная и средняя скорости движения металла составляют соответственно 0,594 и 0,083 м/с, а объем застойных зон — 38,0 %.

При длине дуги 21 см уменьшение значения тока до 26,2 кА приводит к ощутимому уменьшению эффективности перемешивания расплава. Максимальная скорость движения расплава снижается до 0,484 м/с, а средняя составляет всего 0,06 м/с. Объем застойных зон равняется 48,2 %.

Гидродинамическая обстановка, создаваемая в ванне УКП при совместном воздействии продувки и электромагнитного фактора, характеризуется высокими скоростями движения расплава вблизи свободной поверхности ванны (рис. 5). Электромагнитные силы заметно интенсифицируют движение металла в зоне, удаленной от продувочной фурмы. Вследствие этого объем застойных зон уменьшается до 13,0 %.

Влияние токового режима на перемешивание ковшевой ванны представлено в таблице следующими параметрами: $|v_{\max}|$ и $|v_{\text{cp}}|$ — соответственно максимальная и средняя скорости движения расплава; η — относительный объем застойных зон в ванне, рассчитанных при учете обоих силовых факторов, воздействующих на расплав.

Из этих данных следует, что при неизменной производительности продувки ванны газом ток дуги является наиболее эффективным средством управления потоками расплава.

Выводы

1. Электромагнитные силы, действующие на жидкий металл в ковше УКП постоянного тока, интенсифицируют перемешивание расплава и способствуют уменьшению объема застойных зон в расплаве. Наибольшее влияние электромагнитной силы на перемешивание металлической ванны УКП постоянного тока обнаружено в приэлектродных областях расплава.



2. Установлено, что из двух параметров дугового разряда (ток и длина дуги) более эффективным средством интенсификации перемешивания жидкого металла в ковше является ток дуги (при заданной производительности продувки ванны инертным газом).

1. *Математическое моделирование гидродинамики шлако-металлической ковшевой ванны на установке ковш-печь переменного тока* / В. А. Вихлевщук, В. П. Пиптюк, В. Ю. Болотов и др. // Математичне моделювання. — 2005. — № 1 (13). — С. 53–58.
2. *Самохвалов С. Э.* Теплофізичні процеси в багатозонних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. — Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. — 174 с.
3. *Самохвалов С. Е.* Метод расщепления по физическим факторам для несолоноидального движения газожидкостных сред // Инженерно-физический журнал. — 1998. — № 3. — С. 454–459.
4. *О перемешивании расплава под действием электромагнитных сил при обработке на установке ковш-печь постоянного тока* / В. П. Пиптюк, И. В. Крикент, С. Е. Самохвалов и др. // Тр. IX Междунар. конгресса сталеплавыльщиков (г. Старый Оскол, 27–28 окт. 2006 г.). — М.: ОАО «Черметинформация», 2007. — С. 416–421.
5. *Моделирование гидродинамики и теплопереноса расплава стали при дуговом нагреве на установке ковш-печь* / Д. Ю. Кабаков, С. Е. Самохвалов, В. П. Пиптюк, О. А. Филатова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2013. — № 3. — С. 33–37.
6. *Нигматулин Р. И.* Динамика многофазных сред. — Ч. 1. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 464 с.
7. *Озуров А. П., Самохвалов С. Е., Надригайло Т. Ж.* Методи розщеплення в задачах гідродинаміки і тепломасопереносу. — Дніпропетровськ: Системні технології, 2003. — 260 с.
8. *Влияние постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш-печь. Ч. 1.* Действие электромагнитных сил / В. П. Пиптюк, И. В. Крикент, С. Е. Самохвалов и др. // Теория и практика металлургии. — 2007. — № 2, 3. — С. 60–64.
9. *Влияние постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш-печь. Ч. 2.* Модель массопереноса / В. П. Пиптюк, С. Е. Самохвалов, И. А. Павлюченков и др. // Там же. — 2007. — № 4, 5. — С. 14–17.
10. *Влияние постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш-печь. Ч. 3.* Гидродинамика ванны / В. П. Пиптюк, С. Е. Самохвалов, И. А. Павлюченков и др. // Там же. — 2007. — № 6. — С. 3–7.
11. *Численное моделирование сильноточного дугового разряда в установке ковш-печь постоянного тока* / И. В. Крикент, И. В. Кривцун, В. Ф. Демченко, В. П. Пиптюк // Современ. электрометаллургия. — 2013. — № 3. — С. 45–50.
12. *Демченко В. Ф., Крикент И. В.* Компьютерное моделирование электромагнитных явлений при электрошлаковом переплаве // Математичне моделювання. — 2002. — № 1. — С. 16–20.

At out-of-furnace treatment of steel in casting ladle with application of electric arc heating (ladle-furnace unit) melt stirring has a significant influence on intensification of gas evolution from the metal melt and its interaction with deoxidizers and alloying fillers added to the ladle bath. Formation of complex motion in gas-metal melt system occurs as a result of interaction of floating inert gas bubbles with the melt and bath sparging by gas, as well as due to electromagnetic force arising in the melt volume at electric current passage through the bath. Mathematical simulation method is used in the paper for quantitative evaluation of the extent of steel stirring in the ladle. A 3d model allowing for asymmetrical layout of blow-off tuyere, is used to describe hydrodynamic processes. Electromagnetic processes in the casting ladle are described in axisymmetric approximation. Earlier published results of simulation of magnetogasdynamic processes in the column of high-current arc, are used to assign current density distribution on melt free surface. Comparative analysis of separate influence of various force factors and their combination on molten metal movement in the ladle was performed. It is established that electromagnetic forces promote reduction of stagnant zones in the melt. At the specified efficiency of bath blowing by inert gas, of the two parameters of arc discharge (current and arc length) arc current is the more effective tool for intensification of liquid metal stirring in the ladle. 12 Ref., 1 Table, 5 Figures.

Keywords: ladle-furnace unit; gas blowing; mathematical simulation; metal stirring; electromagnetic forces

Поступила 18.02.2014

ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ПАТОН»

www.patonpublishinghouse.com

ТИТАН. ТЕХНОЛОГИИ. ОБОРУДОВАНИЕ. ПРОИЗВОДСТВО. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. — 280 с.



Сборник включает 55 статей, опубликованных в журналах «Современная электрометаллургия» и «Автоматическая сварка» за период 2011–2013 гг., по электрометаллургии и сварке титана и его сплавов. Тематика статей посвящена созданию новых технологических процессов и оборудования для производства и сварки титана. Представлены обзоры по дисперсионному упрочнению титановых сплавов и по сварке сплавов алюминидов титана, а также обзор рынка титана. Сборник предназначен для инженеров, технологов, конструкторов, занятых в машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, металлургии и других отраслях промышленного производства, связанных с обработкой и потреблением титана; полезен также преподавателям и студентам высших учебных заведений.

Заказы на книгу просьба направлять в редакцию журнала