

7. Сосонкин О. М. Уменьшение угара металла при выплавке стали в высокоомощных дуговых печах // Сталь. – 2008. – № 8. – С. 40-42.
8. Горелик С. С., Расторгуев Л. Н., Скаков Ю. А. Рентгенографический и электронно-оптический анализы. – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.
9. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. – 863 с.
10. Нарита. К. Кристаллическая структура неметаллических включений в стали. – М.: Металлургия, 1969. – 166 с.
11. Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Дж. Гоулдстейна, Х. Яковица. – М.: Мир, 1978. – 656 с.
12. Григорьев С. М. Получение и использование сплава для легирования и раскисления быстрорежущей стали // Сталь. – 1994. – № 5. – С. 45-48.

Поступила 24.11.2011

УДК 669:532.516.13

Н. И. Захаров, Е. В. Комиссарова

Национальный технический университет, Донецк

ФИЗИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЕ К ТЕХНОЛОГИИ ВНЕПЕЧНОЙ ДЕГАЗАЦИИ СТАЛИ

Предложен согласующийся с экспериментом механизм физического эффекта при движении жидкого металла в электростатическом поле умеренных напряженностей. Результаты компьютерного моделирования массообменных процессов при внепечной дегазации жидкой стали в электростатическом поле вскрывают резерв интенсификации технологии деазотации расплава с кинетическим звеном лимитирования массопереноса азота.

Ключевые слова: массообмен, интенсификация, аргон, азот, дегазация, вакуумирование, диффузия, электростатическое поле, кинетическое звено.

Запропоновано узгоджений з експериментом механізм фізичного ефекту при русі рідкого металу в електростатичному полі помірних напруженостей. Результати комп'ютерного моделювання масообмінних процесів при позапічній дегазації рідкої сталі в електростатичному полі розкривають резерв інтенсифікації технології деазотації розплаву з кінетичною ланкою лімітування масопереносу азоту.

Ключові слова: масообмін, інтенсифікація, аргон, азот, дегазація, вакуумування, дифузація, електростатичне поле, кінетична ланка.

We propose a mechanism physical effect in the motion of the liquid metal in the electrostatic field of moderate intensity consistent with experiment. The results of computer simulation of mass transfer processes for degassing of liquid steel in an electric field reveal reserve the intensification of technology deazotatsii a melt with a kinetic limiting mass transfer nitrogen.

Keywords: mass transfer, intensification, argon, nitrogen, degassing, vacuum, diffusion, electrostatic field, kinetic melt.

К наиболее перспективным способам рафинирования металлических расплавов от растворенных газов, как известно, относятся внепечные, связанные с воздействием на жидкий металл вакуума, продувки инертным газом, электростатического поля и др.

Электрический эффект и соответствующий способ [1] возбуждения электрического тока в металле являются следствием физического эффекта, состоящего в непрерывном перераспределении свободных зарядов поверхности этого проводника при его движении в электростатическом (кулоновском) поле.

Эти частицы, подвергнутые указанному воздействию, в каждый момент времени стремятся к равновесию с внешним полем, что при движении металла относительно источника рассматриваемого поля (в условиях замыкания электрической цепи) и приводит к формированию тока «электродинамической индукции» – обобщенного динамического аналога электростатической индукции, в которую он вырождается при приближении к нулю скорости движения металлического проводника относительно источника электростатического поля. Предложенный механизм согласуется с результатом экспериментальных исследований [1].

Авторы работы [2] выделяют, как особо значимые, физические эффекты, характеризующиеся универсальностью, из которых следует целый ряд изобретений и новых физических закономерностей в различных областях науки и техники.

Свойством универсальности обладает и рассматриваемый физический эффект. Из него вытекают как ряд изобретений (например [1, 3]), так и новые физические закономерности (зависимость величины возбужденного электрического тока от напряженности E кулоновского поля и скорости движения металлического проводника [1], зависимость концентрации ионов газа на поверхности «вакуум-расплав металла» от величины E [4] и др.).

Благодаря способности электростатического поля создавать на зеркале движущего расплава металла при вакуумировании область повышенной концентрации ионов удаляемого газа существует возможность интенсификации кинетического (химического) звена массопереноса и повышения глубины деазотации ответственных марок стали в условиях, когда это звено становится лимитирующим [5].

Поле умеренной напряженности перераспределяет ионы удаляемого газа по зеркалу металла. Последнее представляет собой значительный интерес, так как этот процесс для движущегося (под влиянием продувки инертным газом) расплава, впервые рассмотренный в работах [3-7], исследован недостаточно.

Краевые условия:

- для уравнения конвективной диффузии с концентрацией $C(r, z, \tau)$:
а – твердые стенки ковша:

$$\frac{\partial c}{\partial n} = 0; \tag{1}$$

б – стык с вакуумом:

$$C(r, H, \tau) = f(PN_2, \vec{E}, V); \tag{2}$$

– начальное условие:

$$C(r, z, 0) = C_0; \tag{3}$$

- для уравнения конвективной теплопроводности с температурой $T = T(r, z, \tau)$:
а – твердые стенки ковша:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0; \tag{4}$$

б – стык с вакуумом:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=H} = \varepsilon_{\text{ип}} \sigma (T_{\text{H}}^4 - T_{\text{B}}^4); \quad (5)$$

– начальное условие:

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (6)$$

Для уравнения гидродинамики со скоростями $V_r = V_r(r, z, \tau)$; $V_z = V_z(r, z, \tau)$:

а – твердые стенки ковша:

$$V_r = V_z = 0; \quad (7)$$

б – стык с вакуумом:

$$\frac{\partial V_n}{\partial s} + \frac{\partial V_s}{\partial n} = 0. \quad (8)$$

Начальное условие:

$$V_r(r, z, 0) = V_z(r, z, 0) = 0. \quad (9)$$

Граничные условия в области пористых элементов, расположенных в днище ковша:

$$C(r, 0, \tau) = 0; \quad (10)$$

$$T(r, 0, \tau) = T_{\text{Ar}}; \quad (11)$$

$$V_r = 0; \quad (12)$$

$$V_z(r, 0, \tau) = V(r), \quad (13)$$

где T_{Ar} – температура вдуваемого аргона, подогретого расплавом металла; $V(r)$ – заданное поле скорости расплава в днище ковша, определяемое распределением по нему интенсивности продувки; r, z, τ – радиальная, вертикальная координаты и время; n, s – нормальное и касательное направления к межфазной границе; H – высота расплава в ковше; T_{B} – средняя температура полости вакууматора; E – напряженность электростатического поля на рассматриваемой поверхности; P_{N_2} – парциальное давление азота в полости вакууматора.

Необходимо отметить, что специфика и новизна рассматриваемой задачи определяются граничными условиями (2). Уравнения переноса, напротив, имеют классический вид (область малых чисел Re)

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial C}{\partial r} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right]; \quad (14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]; \quad (15)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \nu \Delta \vec{V} + \vec{g}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad (17)$$

При записи уравнений (14)-(16) учтено, что в условиях, когда $\Delta T_{\max} \ll T_{\max}$, можно пренебречь изменением теплофизических коэффициентов с изменением температуры, используя в расчете их среднее в интервале температур значение. Здесь T_{\max} , ΔT_{\max} – максимальные значения температуры расплава и ее перепада в объеме ковша; D – коэффициент диффузии удаляемого газа в расплаве; a – коэффициент температуропроводности металла; ρ , ν – плотность и кинематическая вязкость расплава; P – давление в расплаве; g – ускорение силы тяжести.

Результаты компьютерного моделирования на основе предложенной математической модели в целом согласуются с работой [6]. Учет теплового уравнения Фурье, как показал расчет, не нарушает закономерности слабого влияния электростатического поля умеренных напряженностей на интегральные характеристики диффузионного звена массообменного процесса [7]. Влияние этого внешнего поля особенно значимо для кинетического (химического) звена, которое усиливается в этой области вследствие формирования области повышенной концентрации ионов удаляемого газа на межфазной границе «вакуум-металл» при движении расплава вследствие его продувки аргоном. Последнее, как известно, приводит к возрастанию во второй степени скорости химической реакции объединения ионов в молекулу в этой области рассматриваемой границы, что имеет существенное значение, если массообменный процесс лимитируется кинетическим звеном. Для жидкой стали эта ситуация возникает при дегазации расплава от растворенного азота, ионы которого, как известно, испытывают энергетические трудности при молизации на рассматриваемой межфазной поверхности. Подключение источника электростатического поля умеренных напряженностей, локализованного в вакуум-камере, на этапе внепечной дегазации жидкого металла, на котором кинетическое звено лимитирует массообменный процесс, может привести к интенсификации технологии и повышению глубины деазотации стали.

Предложенный комплексный способ дегазации жидкого металла [3] может дополнять существующие [8, 9], а рассмотренный физический эффект при широком подходе может быть использован и в других технологиях.



Список литературы

1. Дюдкин Д. А., Захаров Н. И. «Электродинамическая индукция» и проблема ее приложения к процессам с движением металла в электростатическом поле // *Металлургия и металлурги XXI века*. – М.: МГИСиС, 2001. – С. 500-503.
2. Чус А. В., Данченко В. Н. Основы технического творчества. – Киев; Донецк: Высш. шк., 1983. – 184 с.
3. Пат. 2009040713. Способ дегазации металлургического расплава / Н. И. Захаров, Ф. В. Недопекин, А. А. Овдиенко. – Оpubл. 27.04.09, Бюл. № 8.
4. Захаров Н. И., Троцан А. И. Учет в законе Сиверта фактора воздействия на движущийся металл электростатического поля // *Процессы литья*. – 2009. – № 3. – С. 15-16.
5. Захаров Н. И., Троцан А. И., Овдиенко А. А. Об использовании электростатического поля в технологии внепечной дегазации стали // Там же. – 2009. – № 1. – С. 8-11.
6. Захаров Н. И. Интенсификация массообменных процессов внепечной дегазации стали // Там же. – 2010. – № 4. – С. 8-12.
7. Захаров Н. И., Недопекин Ф. В., Степанникова Е. Л. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации металла с использованием электростатического поля // *Математичне моделювання*. – 2007. – Вып. 1 (16). – С. 41-43.
8. А. с. 36317 Япония, МКИ С 21 С 7/10. Способ рафинирования стали в ковше // М. Эйдзи, К. Йоситэру, Т. Тосио и др. – Оpubл. 11.01.91. – Сер. 3 (4), № 2. – С. 83-89.
9. Найдек В. Л., Наривский А. В., Ганжа Н. С. Дегазация алюминиевых сплавов вакуумно-плазменной обработкой их расплавов // *Процессы литья*. – 2008. – № 3. – С. 35-38.

Поступила 03.01.2012