



The problem of the mathematic modeling of the mass transfer processes in liquid metal in conditions of its degassing by complex vacuum influence on melt, of blowout with inert gas and of electrostatic field is discussed. New data – phenomenon of “electrodynamical induction” is attracted for arrangement of boundary condition on the surface “vacuum-moving metal”.

Н. И. ЗАХАРОВ, Д. А. ДЮДКИН, Ф. В. НЕДОПЕКИН,
Донецкий национальный технический университет

УДК 532.13:669

К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ЖИДКОМ МЕТАЛЛЕ В УСЛОВИЯХ “ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИИ”

Введение

Известно, что наиболее перспективными методами рафинирования металла от газов являются выпечные, связанные с комплексным воздействием на расплав вакуума, продувки инертным газом и электростатического поля [1–3].

Влияние вакуума на технологический процесс сводится к снижению концентрации удаляемого из металла газа на поверхности расплава. Это создает градиент концентрации как движущую силу процесса диффузии. Например, для водорода [1]:

$$C_n = K_H \sqrt{P_{H_2}}, \quad (1)$$

где C_n – концентрация, кг/м³; P_{H_2} – парциальное давление водорода в вакууматоре, Н/м²; K_H – постоянная Сиверса для водорода, кг^{1/2} · м^{-5/2} с.

Продувка инертным газом с целью дегазации расплава преследует две основные цели. Во-первых, это развитие межфазной поверхности, что существенно усиливает массоперенос к всплывающим пузырькам инертного газа за счет высокого значения суммарной площади поверхности контакта «инертный газ – металл» [1]; во-вторых, в нашем случае интенсификация процесса массопереноса вследствие снижения толщины диффузионного пограничного слоя на границе «вакуум – металл» по причине движения последнего [4, 5].

Если электрическое поле отрицательного потенциала при значительных напряженностях срывает положительно заряженные водородные частицы с зеркала металла (потенциал 5–30 кВ на расстояниях до 1,7 см электрода от поверхности неподвижного расплава [2]), то поле умеренной напряженности лишь перераспределяет данные частицы по этой поверхности. Последнее представляет собой значительный интерес, так как для движущегося металла (под влиянием продув-

ки инертным газом) этот процесс ранее не исследовался.

Характер распределения заряженных водородных частиц по зеркалу металла зависит как от формы электрода, так и напряженности электростатического поля. Исследуем динамически равновесный процесс для электрода прямоугольной формы с плоскостью, параллельной поверхности движущегося расплава, которую в первом приближении также будем считать плоской.

Равновесное распределение ($\vec{E} = -\vec{E}'$) заряженных водородных частиц определяется по уравнению Максвелла [6]

$$\text{div} \vec{E}' = 4\pi\rho, \quad (2)$$

где \vec{E}, \vec{E}' – напряженности электростатического поля внешнего и системы свободных зарядов границы «металл – вакуум», В/м; ρ – объемная плотность заряда, Кл/м³.

В нашем случае $\rho = \rho(x, y, z)$. Выбирая начало отсчета вертикальной координаты z от поверхности расплава к электроду, горизонтальной координаты y – по поверхности зеркала металла перпендикулярно движению последнего, рассмотрим искомое распределение вдоль координаты x – направления движения расплава:

$$\rho = \rho(x, 0, 0).$$

В этих условиях уравнение (2) примет вид

$$\rho(x) - \frac{1}{4\pi} \left[\frac{\partial E'_y}{\partial y} + \frac{\partial E'_z}{\partial z} \right]_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial E'_x}{\partial x}.$$

Здесь индекс «0» соответствует $y=0, z=0$. Обозначив левую часть этого уравнения через $\rho'(x)$, имеем:

$$\rho'(x) = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial E'_x}{\partial x}, \quad E'_x = -E_x. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) найдено в работе [7]:

$$\rho'(x) = \frac{kQ}{2\pi ab} \int_{-a}^{+a} F(x, \xi) d\xi, \quad (4)$$

где Q – модуль заряда электрода, Кл; a, b – полудлина и полуширина электрода, м; k – постоянная Кулона, Н·м²/Кл²;

$$-F(x, \xi) = \frac{(x+\xi)}{[H^2 + (x+\xi)^2]^2} \times \left[b + \arctg \left(\frac{b}{\sqrt{H^2 + (x+\xi)^2}} \right) \sqrt{H^2 + (x+\xi)^2} \right].$$

Производные $\frac{\partial E'_y}{\partial y}$ и $\frac{\partial E'_z}{\partial z}$ определяются аналогично $\frac{\partial E'_x}{\partial x}$ [8].

При этом

$$\left(\frac{\partial E'_y}{\partial y} \right)_{x,y,z=0} = \left(\frac{\partial E'_x}{\partial x} \right)_{x,y,z=0} = \text{const} \rho'(0) = 0, \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial E'_z}{\partial z} \right)_{x,y,z=0} = \frac{kQH}{2ab} \iint_{(\xi, \eta)} \frac{d\xi d\eta}{[H^2 + \xi^2 + \eta^2]^2}, \quad (6)$$

где $\xi \in [-\alpha, +\alpha]$, $\eta \in [-b, +b]$.

Введем безразмерную характеристику $\tilde{C}_n(x)$ поверхностной плотности ионов водорода на зеркале металла:

$$\tilde{C}_n(x) = \frac{M_H}{e_H K_H \sqrt{P_{H_2}}} \rho(x), \quad (7)$$

где M_H – масса атома водорода, кг; e_H – заряд атома водорода, Кл.

Проведено численное исследование на ПЭВМ искомого распределения $\tilde{C}_n(x)$, из которого следует, что в выбранном приближении оно симметрично относительно середины ($x=0$) электрода. В этой точке $\rho(x)$ проходит через минимум, поскольку

в ней обращается в нуль $\frac{\partial E'_x}{\partial x}$ и

$\rho'(x)$ (E'_x равно по величине и противоположно по знаку для двух половин электрода, расположенных по разные стороны линии $x=0$). Величина этого минимума

$$\rho(0,0,0) = \rho'(0) + \frac{1}{4\pi} \left[\frac{\partial E'_y}{\partial y} + \frac{\partial E'_z}{\partial z} \right]_{x,y,z=0} \quad (8)$$

вычисляется по формулам (5) и (6).

При $x = \pm a$ (края электрода) наблюдается максимум этой величины, так как E'_x для этих половин плоскости электрода суммируются.

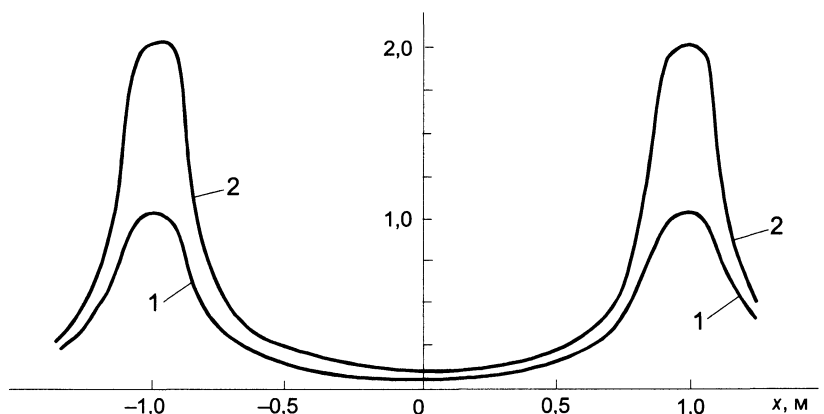
Значение $\rho(\pm a, 0, 0)$ определяется по выражению:

$$\rho(\pm a, 0, 0) = \rho'(\pm a) + \frac{1}{4\pi} \left[\frac{\partial E'_y}{\partial y} + \frac{\partial E'_z}{\partial z} \right]_{x=\pm a, y, z=0}. \quad (9)$$

С увеличением напряженности внешнего поля соответствующая кривая $\tilde{C}_n(x)$ лежит выше, что согласуется с экспериментом.

Анализ рисунка показывает, что наряду с областью $\tilde{C}_n < 1$, в которой массоперенос, очевидно, интенсифицируется по сравнению с отсутствием внешнего электростатического поля, существуют области $\tilde{C}_n > 1$. Помимо их отрицательного влияния на градиент концентрации водорода как движущую силу процесса диффузии они играют и положительную роль. Во-первых, они стимулируют десорбцию водородных частиц с зеркала металла в вакуумное пространство по причине повышенного значения их концентрации на этой поверхности, во-вторых, по этой же причине эти области способствуют молизации удаляемых частиц на зеркале металла, что имеет решающее значение в процессах дегазации, в которых кинетическое звено массопереноса является лимитирующим (например, рафинирование расплавов от азота [9]).

При движении зеркала металла относительно электрода, которое вызвано перемешивающим действием продувки расплава инертным газом, наблюдается непрерывная последовательность перераспределений заряженных водородных частиц



Распределение концентрации водородных частиц по зеркалу металла в области действия источника электростатического поля: 1 – $E_z = 1 \cdot 10^5$ В/м; 2 – $E_z = 2 \cdot 10^5$ В/м

по поверхности металла под влиянием поля электрода. Частицы в каждый момент времени стремятся к равновесию с внешним полем. Это приводит к поверхностному электрическому току, который трудно измерить. Его индукция может квалифицироваться как «электродинамическая индукция», которая вырождается в обычную электростатическую при приближении к нулю скорости движения металла относительно источника электростатического поля. Данная теоретическая модель, представленная в [10] и заложенная в объяснение и построение теории экспериментальным путем обнаруженного этого нового явления, оказалась перспективной [11].

Описанный характер электропереноса на поверхности расплава, очевидно, существенно влияет на массоперенос в объеме жидкой ванны, особенно вблизи рассматриваемой поверхности. Учет этого влияния достигается постановкой граничного условия для уравнения конвективной диффузии [12]:

$$C_n = f(P_{H_2}, E(x)), \quad (10)$$

которое обобщает (1) и сводится к нему при $\vec{E} = \vec{0}$.

Выводы

Приведенные разработки вносят вклад в развитие нового научного направления «Процессы переноса в условиях «электродинамической индукции», имеющего практическое приложение.

Литература

1. Баканов К.П., Бармотин И.П., Власов Н.Н. Рафинирование стали инертным газом. М.: Металлургия, 1975.
2. Кайбичев А.В., Лепинских Б.М. Рафинирование жидких металлов и сплавов в электрическом поле. М.: Наука, 1983.
3. Дюдкин Д.А., Захаров Н.И. К вопросу энергосбережения при дегазации металла // *Металл и литье Украины*. 1996. №3. С. 17–18.
4. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959.
5. Явойский В.И., Повх И.Л., Дорофеев В.А. Теория продувки сталеплавильной ванны. М.: Металлургия, 1974.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.2. М.: Наука, 1988.
7. Захаров Н.И. К теории воздействия электростатического поля на процессы дегазации металла // *Металл и литье Украины*. 1998. №3. С. 11–12.
8. Дюдкин Д.А., Захаров Н.И. «Электродинамическая индукция» тока в металле и ее приложение к внепечной дегазации // *Процессы литья*. 2003. №1. С. 3–6.
9. Masamitsu T., Hiromu M., Masamichi S. Rate desorption azote from metals // Тэцу то хаганэ. I. Iron and Steel Inst. Yarp. 1986. Vol.2. N3. P. 419 – 425.
10. Дюдкин Д.А., Захаров Н.И. «Электродинамическая индукция» тока в металле и проблема ее приложения к процессам с движением металла в электростатическом поле // *Междунар. конф. «Металлургия и металлурги 21 века»*. М.: МГИСиС. 2001. С. 500–503.
11. Дюдкин Д.А., Комаров А.А. Явление возбуждения электрического тока в проводнике, движущемся в электростатическом поле // *Науч. открытие*. 2000. № 149.
12. Захаров Н.И. Процессы массопереноса при внепечной дегазации металла // *Процессы литья*. 2000. №2. С. 3–6.