

Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации металла с использованием электростатического поля

Н.И. ЗАХАРОВ, Ф.В. НЕДОПЁКИН, Е.Л. СТЕПАННИКОВА

Донецкий национальный технический университет

Разработана математическая модель процессов конвективного тепломассопереноса при дегазации металла воздействием вакуума, продувки инертным газом и электростатического поля. Как показали результаты моделирования на ПЭВМ, электростатическое поле умеренных напряженностей при малых интенсивностях продувки расплава аргоном усиливает локальные характеристики кинетического звена массопереноса (это является предпосылкой интенсификации дегазации металла с кинетическим звеном лимитирования процесса) и не влияет на интегральные характеристики диффузионного звена.

Розроблена математична модель процесів конвективного тепломасопереносу при дегазації металу впливом вакууму, продувки інертним газом і електростатичного поля. Як показали результати моделювання на ПЕВМ, електростатичне поле помірних напруженостей при малих інтенсивностях продувки расплаву аргоном посилює локальні характеристики кінетичного звена масопереносу (це являється передумовою інтенсифікації дегазації металу с кінетичним звеном лімітування процесу) і не впливає на інтегральні характеристики дифузійного звена.

Mathematical model proceses of convective masstransfer for degassing the metal by action vacuum, inert gas and electrostatic field was worked. Results of modeling on computer showd, that not very, strong electrostatic field for small intensity flowing Ar intensify kinetic stage the masstransfer, but not influence on diffusion stage.

Известно, что наиболее перспективными методами дегазации металла являются внепечные, 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.

При сосредоточенной продувке металла аргоном снижается толщина диффузионного пограничного слоя на границе "расплав-вакуум", что приводит к интенсификации технологического процесса [4].

Электростатическое поле умеренной напряженности перераспределяет ионы удаляемого газа (например, водорода) по рассматриваемой межфазной границе [5]. Характер распределения концентрации этих ионов зависит от парциального давления водорода D_{H_2} в полости вакууматора, напряженности \vec{A} внешнего электростатического поля и, в общем случае, от скорости перемещения этой межфазной границы [6]:

$$C_n = K_v \cdot K_E \cdot K_H \cdot \sqrt{P_{H_2}} \quad (1)$$

где K_n – постоянная Сивергса для водорода; K_v , K_E – безразмерные коэффициенты, зависящие от V и E .

Введем следующие безразмерные величины:

$$F_0 = a \tau / L^2; \quad \Theta = (T - T_b) / (T_0 - T_b); \quad l = \lambda / \lambda_0; \\ \vec{v} = \vec{v} / v_0; \quad P_e = v_0 \cdot L / a. \quad (2)$$

Здесь: F_0 – тепловой критерий Фурье; Θ – безразмерный перепад температур; l – безразмерный коэффициент теплопроводности; Pe – критерий Пекле; \vec{v} – безразмерный вектор скорости; L, λ_0, v_0 – масштабы длины, теплопроводности и скорости; T_0 – температура расплава в начальный момент времени.

В этих обозначениях имеем:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F_0} + \frac{v_0 L}{a} \left(\vec{v}, \vec{\nabla} \Theta \right) = \text{div} \left(l \vec{\nabla} \Theta \right).$$

При $\lambda = \text{const}$: $l \equiv 1$, поэтому:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F_0} + P_e \left(\vec{v}, \vec{\nabla} \Theta \right) = \Delta \Theta. \quad (3)$$

Дифференциальные операторы $\vec{\nabla}$ и Δ являются безразмерными:

$$\vec{\nabla} = \vec{\nabla} \cdot L, \quad \Delta = \Delta \cdot L^2.$$

Вводя безразмерную концентрацию удаляемого из жидкого металла газа:

$$\vec{N} = C / C_0,$$

где C_0 – начальное размерное значение этой характеристики, находим:

$$\frac{\partial \vec{C}}{\partial F_0} + P_e \cdot \left(\vec{v}, \vec{\nabla} \vec{C} \right) = L_u \cdot \Delta \cdot \vec{C}, \quad (4)$$

где $L_u = D/a$ – число Льюиса. Критерий Фурье является тепловым.

Вводя масштабы ускорения силы тяжести $\vec{g} = g \vec{e}_g$ и давления $D = D_0 \vec{D}$, умножая обе части уравнения Навье-Стокса на $L^2 / (a \cdot v_0)$, получим:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial F_0} + P_e \left(\vec{v}, \vec{\nabla} \vec{v} \right) \vec{v} = \\ = -Eu \cdot Pe \cdot \vec{\nabla} p + Pr \cdot \Delta \vec{v} + \frac{Pe}{Fr} \cdot \vec{e}_g \quad (5)$$

Здесь: $Pr = \nu/a$; $Eu = P_0 / (\rho v_0^2)$; $F_r = v_0^2 / (gL)$ - критерии Прандтля, Эйлера и Фруда соответственно.

При малых числах Рейнольдса второй член левой части уравнения (5) исчезает.

Заметим, что в качестве безразмерного времени взят не критерий гомохронности, а снова тепловой критерий Фурье.

Начальные условия:

$$\Theta = 1; \quad \overset{0}{C} = 1; \quad \vec{v} = \vec{0}. \quad (6)$$

Граничные условия:

- твердые стенки ограничивающих поверхностей:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \overset{0}{C}}{\partial n} = 0; \quad \vec{v} = \vec{0}. \quad (7)$$

- стык с вакуумом:

$$\left(\frac{\partial \Theta}{\partial z} \right)_z = \frac{\varepsilon_{np} \sigma L}{\lambda_m} \cdot \frac{(T_z^4 - T_g^4)}{T_o - T_g} = S_{k_z} \Theta_z. \quad (8)$$

Здесь: $\Theta_z = (T_z - T_g) / (T_o - T_g)$ - граничное ($Z = H$) значение безразмерного перепада температур;

$$S_{k_z} = \frac{\varepsilon_{np} \sigma L (T_z^2 + T_g^2) \cdot (T_z + T_g)}{\lambda_m} - \text{соответствующее граничное значение числа Старка.}$$

Концентрация газа на этой границе вычисляется по формуле (1)

$$\frac{\partial V_s}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

где s и n - касательное и нормальное направления к межфазной границе.

Соотношение (9) учитывает в выбранном приближении факт отвердевания границы при наличии в расплаве поверхностно-активных веществ.

- стык с пористыми элементами днища ковша:

$$\Theta = 1, \quad (10)$$

что соответствует подогретому до температуры T_o аргону.

$$\overset{0}{C} = 0, \quad \overset{0}{V}_r = 0, \quad \overset{0}{V}_z = \Phi(r) - \text{заданная функция г.} \quad (11)$$

Для расчета задачи использован интегроинтерполяционный конечно-разностный метод на основе схемы переменных направлений [7]. Уравнение (5) реализовано в переменных "Функция тока - вихрь скорости", граничные условия для которых соответствуют работе [8].

При моделировании на ПЭВМ в качестве базовых выбирались следующие значения параметров: длительность вакуумирования: 600с; давление в вакууматоре: 0,001 Pa; суммарная интенсивность продувки: 0,001 м³/с; начальная температура стали в ковше: 1600°C; температура вакууматора: 1300°C; напряженность электростатического поля: 1·10⁵В/м; начальная концентрация водорода в металле: 10см³/100г.

На рис. 1 показано полученное с помощью ПЭВМ распределение концентрации удаляемого из металла водорода по радиусу ковша на разной глубине жидкой ванны.

Как следует из рисунков, значительного снижения концентрации водорода не происходит по причине

практически неподвижного металла (область малых интенсивностей Ω продувки аргонном). Вместе с тем можно установить следующие закономерности.

При увеличении времени обработки металла в сравнении с базовым вариантом а) происходит некоторое снижение рассматриваемой характеристики (вариант б). Изоконцентрационные поверхности в рассматриваемом приближении суть горизонтальные плоскости.

Увеличение давления в вакууматоре (вариант в)) и снижение интенсивности продувки (вариант г)) замедляют процесс дегазации.

Вместе с тем подогрев вакуум-камеры (вариант д)) замедляет охлаждение металла, ускоряет диффузионный процесс и дегазацию в жидкой ванне.

Отключение источника электрического напряжения (вариант е)) приводит к результатам базового варианта.

Последнее имеет важное значение. Действительно, распределение концентрации удаляемого из металла газа на межфазной границе имеет области повышенного и пониженного значения этой характеристики в сравнении с вариантом Е=0 (см. рис. 1). Следовательно, ускорение диффузии во второй области нивелируется замедлением процесса в первой области.

Отсюда следует стратегический вывод: электростатическое поле умеренных напряженностей для малых интенсивностей продувки жидкой стали аргонном усиливает локальные характеристики кинетического звена массопереноса и не влияет на интегральные характеристики звена диффузионного.

Если дегазация металла была блокирована слабым кинетическим лимитирующим звеном (малые концентрации удаляемого газа либо повышенные значения концентрации ПАЭ в расплаве), то, благодаря перераспределению ионов водорода по межфазной границе с помощью электростатического поля, возникают локальные очаги молизации рассматриваемых атомов и десорбции образованных молекул в полость вакууматора.

Дегазация при этом становится возможной. Это положение согласуется с выводами проф. В.И. Явойского [9], по которым, если дегазация лимитируется кинетическим звеном, т.е. химическим актом объединения атомов удаляемого газа в молекулы на межфазной границе, то это звено массопереноса, как и процесс дегазации в целом, усиливается с возрастанием (локальной) концентрации этих атомов на рассматриваемой границе и понижении концентрации ПАЭ в жидкой ванне.

Выводы

Как показали теоретические исследования, электростатическое поле умеренных напряженностей при малых интенсивностях продувки жидкой ванны инертным газом усиливает локальные характеристики кинетического звена массопереноса и не влияет на интегральные характеристики звена диффузионного. При этом создаются предпосылки интенсификации процессов дегазации с кинетическим звеном лимитирования.

Предложенные разработки могут служить методологической основой последующего исследования (теоретического и экспериментального) процессов дегазации с воздействием на металл электростатического поля в области более высоких, используемых на практике, интенсивностей продувки жидкой стали инертным газом.

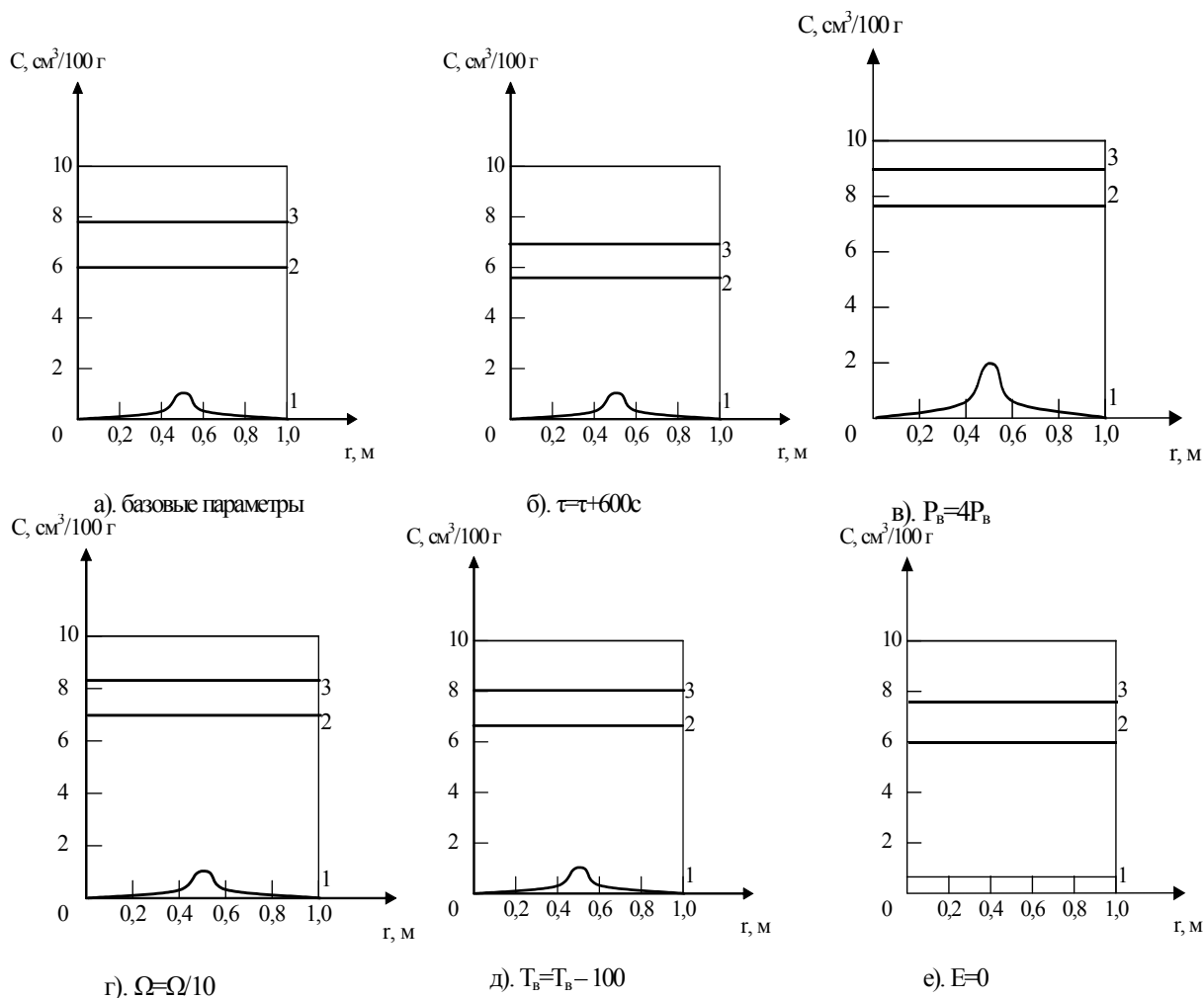


Рис. 1. Распределение концентрации удаляемого водорода по радиусу ковша на разной глубине жидкой ванны. 1- $H=0,0$ м; 2- $H=0,5$ м; 3- $H=1,0$ м

ЛИТЕРАТУРА

1. Баканов К.П., Бармотин И.П., Власов Н.Н. Рафинирование стали инертным газом. – М.: Металлургия. – 1975. – 229 с.
2. Кайбичев А.В., Лепинских Б.М. Рафинирование жидких металлов и сплавов в электрическом поле. – М.: Наука. – 1983. – 120 с.
3. Дюдкин Д.А., Захаров Н.И. К вопросу энергосбережения при дегазации металла// Металл и литьё Украины. – 1996. - № 3. – С. 17-18.
4. Явойский В.И., Повх И.Л., Дорофеев В.А. Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия. – 1974. – 495 с.
5. Захаров Н.И. Процессы переноса в жидком металле в условиях "электродинамической индукции"// Промышленная теплотехника. – 2005. – т. 27. - № 3. – С. 17-20.
6. Захаров Н.И., Недопёкин Ф.В., Троцан А.И., Степанникова Е.Л. Обобщение закона Сивергса и его приложение к диффузионным процессам внепечной дегазации металла// 10 ЮВЛІЙНА Міждержавна науково-методична конференція. – Дніпродзержинськ. – 2006. – С. 65-66.
7. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука. – 1977. – 656 с.
8. Захаров Н.И., Недопёкин Ф.В., Сапронова Е.В. Математическая модель стационарного гидродинамического взаимодействия капель порошкового материала с металлом в процессе его рафинирования// Математичне моделювання – 2004. - №2. – С. 32-35.
9. Явойский В.И., Явойский А.В., Терзиян С.П. Кинетические особенности удаления водорода из расплавов на основе железа// Известия вузов. Черная металлургия. – 1981. - №7. – С. 5-8.

пост. 18.12.06