

УДК 669.046

ПРИЛОЖЕНИЕ ЗАКОНА СИВЕРТСА К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ДЕГАЗАЦИИ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ ОТ РАСТВОРЕННОГО АЗОТА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ ДОКРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ

*Захаров Н.И., д.т.н., профессор кафедры «Металлургия стали и сплавов»
Тупилко И.В., аспирант кафедры «Металлургия стали и сплавов» (irishhka89@gmail.com)*

Донецкий национальный технический университет
(83001, Украина, Донецк ул. Артема, 58)

Аннотация. При компьютерном моделировании процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации металлов (с достаточно высокой температурой плавления) от растворенного азота в электростатическом поле докритических напряженностей возникает проблема постановки граничного условия к уравнению конвективной диффузии на границе «вакуум – металл». Назначение компьютерного моделирования – оптимизация технологии. Классическая запись закона Сиверкса не учитывает этого внешнего воздействия на расплав. Правильность предложенной авторами обобщающей записи этого закона, которая включает напряженность электростатического поля и степень ионизации атомов азота, растворенного в металле в поверхностном слое этой границы, подтверждена проверкой по трем критериям.

Ключевые слова: внепечная дегазация, азот, тепломассоперенос, компьютерное моделирование, закон Сиверкса.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-920-921

Азот в расплавах железа и металлов с высокой температурой плавления растворим, а его молекулы диссоциированы на атомы [1].

В прошлом столетии начались исследования по рафинированию жидких металлов в электростатическом поле, среди которых наиболее масштабными по мнению авторов являются разработки, представленные в работе [2]. В них поле сверхкритических напряженностей срывает ионы удаляемой вредной примеси, в том числе и азота, с зеркала металла в условиях вакуумирования. Вместе с тем вопрос о степени ионизации атомов азота, растворенного в расплавах металлов, остается открытым.

Поле докритических напряженностей при дегазации стали от водорода лишь перераспределяет ионы этого газа по зеркалу металла [3]. Современные представления о форме нахождения атомов азота, растворенного в расплавах, должны включать в себя исторически сложившуюся концепцию электрически нейтральных атомов этого газа как частный вариант, относящийся к жидкому металлу недостаточно высокой температуры. При этом степень ионизации атомов азота возрастает с ростом температуры. Таким образом, при определенной достаточно высокой температуре расплава атомы азота, хотя бы частично, будут ионизированы.

При исследовании с позиций компьютерного моделирования процессов тепломассопереноса (массопереноса азота в расплаве при неравномерном распределении по его объему температуры) при дегазации перемеще-

ваемого металла воздействием вакуума и электростатического поля докритических напряженностей возникает проблема постановки граничного условия к уравнению конвективной диффузии. Классическая запись закона Сиверкса не учитывает воздействия на жидкий металл этого внешнего поля. Обобщение данного соотношения может быть записано в виде:

$$C_n = K_N \sqrt{P_{N_2}} [(1-i) + iK(r, E)], \quad (1)$$

где C_n – концентрация атомов азота в поверхностном слое межфазной границы «вакуум – металл»; P_{N_2} – парциальное давление азота в вакуум-камере; K_N – постоянная Сиверкса для азота; i – степень ионизации атомов азота в этом слое; K – безразмерная функция напряженности E электростатического поля и радиальной координаты r (в условиях осевой симметрии системы), определяемая решением уравнения Максвелла по методике работы [3].

Отметим, что функция, определяемая таким образом, при $E = 0$ принимает значение $K = 1$ и соотношение (1) преобразуется в классическую форму закона Сиверкса. Аналогичная форма уравнения реализуется и при $i = 0$. Дополнительным доказательством правильности соотношения (1) является экспериментальное подтверждение наличия максимума в распределении C_n по координате r [4].

Как известно, повышение концентрации химически реагирующих частиц приводит к повышению скорости химической реакции.

Таким образом, наличие максимума в распределении C_n приводит к повышению скорости реакции молидации: $2[N] = \{N_2\}$ на межфазной поверхности «вакуум-металл» (при этом реакция имеет второй порядок [5]). Последнее имеет решающее значение, если молидационное (кинетическое) звено участвует в лимитировании тепломассопереноса азота, растворенного в расплаве, при его внепечной дегазации [6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фромм Е., Гебхард Е. Газы и углерод в металлах. – М.: Металлургия, 1980. – 712 с.
2. Кайбичев А.В., Лепинский Б.М. Рафинирование жидких металлов и сплавов в электрическом поле. – М.: Наука, 1983. – 120 с.
3. Zakharof N.I., Trojansky A.A., Djudkin D.A. Physical and chemical peculiarities liquid steel degassing from hydrogen during ladle treatment in electrostatic field // *Achievements of electrometallurgy*. 2014. No.1. С. 49 – 52.
4. Захаров Н.И. О постановке граничного условия к уравнению конвективной диффузии водорода в жидком металле под действием электростатического поля // *Инженерно- физический журнал*. 2017. Т. 90. № 3.С. 758 – 762.
5. Kazuo A., Koin I., Hiroshi S. Kinetics of nitrogen excretion by liquid iron // *Tetsu-To-Hagane. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1976. Vol. 62. No. 9. P. 1179 – 1188.
6. Явойский А.В., Явойский В.И., Терзьян С.П. Кинетические особенности дегазации расплавов на основе железа // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1981. № 7. С. 5 – 8.

Поступила 19 июня 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 11, pp. 920–921.

APPLICATION OF SIVERTS LAW TO THE STUDY OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES DURING THE MOLTEN METALS DEGASSING FROM DISSOLVED NITROGEN IN AN ELECTROSTATIC FIELD OF SUBCRITICAL STRENGTHS

N.I. Zakharov, I.V. Tupilko

Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

Abstract. In computer simulation of heat and mass transfer at metals ladle degassing (with a sufficiently high melting point) from the dissolved nitrogen in electrostatic field of subcritical tensions, there is a problem of statement of a boundary condition to the equation of convective diffusion on border “vacuum–metal”. The purpose of computer simulation was the technology optimization. Classical form of the Siverts law doesn’t consider the external impact on fusion. The authors offer the generalizing record of this law which includes tension of the electrostatic field and extent of atoms ionization of nitrogen dissolved in metal in upper layer of this border. Its correctness is confirmed by three-criteria check.

Keywords: ladle degassing, nitrogen, heat and mass transfer, computer simulation, Siverts law.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-920-921

REFERENCES

1. Fromm E., Gebhardt E. *Gase and kohlenstoff in metals*. Berlin: Springer-Verlag, 1976, 712 p. (Russ.ed.: Fromm E., Gebhardt E. *Газы и углерод в металлах*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 712 p.).
2. Kaibichev A.V., Lepinskii B.M. *Rafinirovanie zhidkikh metallov i spлавov v elektricheskom pole* [Refinement of liquid metals in electrostatic field]. Moscow: Nauka, 1983, 120 p. (In Russ.).
3. Zakharof N.I., Trojansky A.A., Djudkin D.A. Physical and chemical peculiarities liquid steel degassing from hydrogen during ladle treatment in electrostatic field. *Achievements of electrometallurgy*. 2014, no.1, pp. 49–52.
4. Zakharov N.I. On the formulation of the boundary condition to equation of convective diffusion of hydrogen in a liquid metal under the action of electrostatic field. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 2017, vol. 90, no. 3, pp. 758–762. (In Russ.).
5. Kazuo A., Koin I., Hiroshi S. Kinetics of nitrogen excretion by liquid iron. *Tetsu-To-Hagane. Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1976, vol. 62, no. 9, pp. 1179–1188.
6. Yavoiskii A.V., Yavoiskii V.I., Terznian S.P. Kinetic degassing peculiarities of liquid iron melts. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1981, no. 7, pp. 5–8. (In Russ.).

Information about the authors:

N.I. Zakharov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy of Steel and Alloys”

I.V. Tupilko, Postgraduate of the Chair “Metallurgy of Steel and Alloys” (irishhka89@gmail.com)

Received June 19, 2017