

УДК 669.18

АНАЛИЗ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ КОВШЕВОМ РАФИНИРОВАНИИ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ГАЗОВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ*

Бурмасов С.П.¹, к.т.н., профессор кафедры «Металлургия железа и сплавов»

Гудов А.Г.¹, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов» (a.g.gudov@urfu.ru)

Ярошенко Ю.Г.¹, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

Мелинг В.В.², старший мастер участка внепечной обработки стали

Дресвянкина Л.Е.², начальник группы внепечной обработки металлургической лаборатории НИЦ

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

² ОАО «Северский трубный завод»

(623388, Россия, Свердловская обл., Полевской, ул. Вершинина, 7)

Аннотация. Актуальность задачи интенсификации рафинировочных процессов при ковшовой обработке стали и повышения производительности современного сталеплавильного производства в целом выдвигают проблему аналитического описания массообменных процессов при рафинировании металла в условиях газового перемешивания, являющегося основным на современном этапе. Анализ производственных данных с привлечением имеющейся информации и моделей не позволил сделать вывод об адекватности реальным условиям. В работе приведены методические подходы и результаты оценки объемного коэффициента массопереноса как обобщенного показателя, определяющего динамику рафинирования металла в условиях газового перемешивания. На базе большого массива промышленных данных по шлаковой десульфурации низко- и среднеуглеродистого металла на установке ковш-печь и вакуумной деазотации на установке VD с привлечением разработанных моделей перемешивания и рафинирования получены новые соотношения, связывающие интенсивность продувки перемешивающим газом с величиной объемного коэффициента массопереноса как для условий открытых процессов ковшовой обработки, так и для вакуумной дегазации. Приводятся результаты проверки адекватности предложенных моделей рафинирования на основе полученных соотношений связи интенсивности продувки и показателей массопереноса, показавшие достаточное соответствие рекомендованных режимов и достигнутой эффективности рафинирования.

Ключевые слова: ковшевая обработка, десульфурация, дегазация, динамика, газовое перемешивание, массоперенос, объемный коэффициент массопереноса, интенсивность продувки, модель, адекватность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-638-644

В условиях современной технологической схемы сталеплавильного производства качество стали определяется, прежде всего, эффективностью внепечного рафинирования. При этом ключевыми технологическими задачами внепечной обработки являются десульфурация и дегазация металла. Решение этих задач в условиях современных сталеплавильных процессов связано:

- с одной стороны, с необходимостью постоянно повышения глубины удаления нежелательных примесей в условиях непрерывного возрастания требований к качеству стали;
- с другой стороны, с необходимостью интенсификации процессов вследствие жестких ограничений на время обработки из-за напряженной логики технологической схемы.

С учетом того, что в качестве основного направления повышения эффективности сталеплавильного производства в настоящее время рассматривается увеличение производительности за счет сокращения про-

должительности технологических этапов, второй аспект приобретает все большее значение.

Скорость процессов внепечного рафинирования определяется скоростью массообмена между металлом и рафинировочными средами. Исходя из диффузионного режима процессов, динамика изменения концентрации примеси в металле определяется соотношением

$$\ln \frac{[X] - [X]_{\text{равн}}}{[X]_0 - [X]_{\text{равн}}} = -k_V \tau, \quad (1)$$

где $[X]_0$ – начальное содержание примеси в металле, %; $[X]_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация примеси, определяемая термодинамическими условиями, %; $[X]$ – фактическая концентрация примеси, %; τ – время от начала процесса, с; k_V – объемный коэффициент массопереноса, с⁻¹.

$$k_V = k \frac{S}{V}, \quad (2)$$

где k – коэффициент массопереноса, м·с⁻¹; S – площадь поверхности раздела, м²; V – объем металла, м³.

* Работа выполнена по поддержке гранта РФФИ № 13-08-12167.

При этом зависимость текущего содержания примеси в металле от времени обработки имеет вид

$$[X] = [X]_{\text{равн}} + ([X]_0 - [X]_{\text{равн}}) \exp(-k_V \tau). \quad (3)$$

В этих условиях фактическая эффективность процессов внепечного рафинирования во многом определяется величиной объемного коэффициента массопереноса. При наличии жестких ограничений на продолжительность процесса величина коэффициента определяет степень реализации рафинировочного потенциала термодинамических условий внепечной обработки.

Как правило, в расчетах ковшевого рафинирования в условиях газового перемешивания величина объемного коэффициента массопереноса оценивается на основе эмпирических соотношений, в частности обобщенного соотношения, предложенного Янгом, Юном и Лю [1]:

$$K_V = 0,0125 \dot{\epsilon}^{0,817}, \text{ с}^{-1}, \quad (4)$$

где $\dot{\epsilon}$ – удельная мощность перемешивания, Вт/кг.

При этом оценка удельной мощности перемешивания встречает определенные трудности, поскольку имеющаяся в литературных источниках информация содержит, как правило, высокую долю привязки к конкретным процессам [2]. Авторами получено аналитическое соотношение для условий газового перемешивания как в открытых, так и вакуумных процессах:

$$\dot{\epsilon} = G \frac{P_0 T}{273} \ln \frac{P + \rho g H}{P}, \quad (5)$$

где G – удельная интенсивность продувки, м³/(кг·с); P_0 – давление газа при нормальных условиях, Па; P – фактическое давление над металлом, Па; T – температура металла, К.

Сравнительный анализ результатов расчета по приведенным выше соотношениям с фактическими данными для условий внепечного рафинирования в ковше емкостью 140 т металла с двумя продувочными блоками, расположенными в одной половине ковша, свидетельствует, что фактические темпы десульфурации при шлаковом рафинировании в условиях атмосферного давления и темп деазотации в вакууме в большинстве случаев превышают расчетные значения.

В связи с этим авторами была предпринята попытка получить эмпирические соотношения для расчета объемного коэффициента массопереноса, наиболее адекватно описывающие динамику ковшевого рафинирования металла в условиях открытых процессов и в вакууме.

Для получения зависимости в условиях открытых процессов был проанализирован значительный объ-

ем промышленных данных по десульфурации шлаком низко- и среднеуглеродистого металла на установке ковш-печь. Объемный коэффициент массопереноса в каждом случае оценивали, решая уравнение (1) относительно K_V при известных из эксперимента значениях начальной и конечной концентраций примеси:

$$K_V = \frac{\ln \frac{[S]_0 - [S]_{\text{равн}}}{[S] - [S]_{\text{равн}}}}{\tau}. \quad (6)$$

При этом основную проблему использования уравнения (6) для оценки K_V составляло нахождение в каждом конкретном случае равновесного значения содержания примеси в металле. Задачу нахождения равновесного значения содержания серы, входящего в уравнение (6), решали на основе полученного из балансовых представлений соотношения

$$[S]_{\text{равн}} = \frac{[S]_{\text{нач}}}{1 + \lambda L_S}, \quad (7)$$

где $[S]_{\text{нач}}$ – концентрация серы в полупродукте, %; λ – кратность шлака, доли; L_S – равновесный коэффициент распределения серы между металлом и шлаком, который, в свою очередь, определяли из условий равновесия в системе «металл–шлак–газовая фаза» по сере и кислороду, исходя из зависимости [3]

$$L_S = C_S P_{\text{O}_2}^{-1/2} \gamma_{[S]} \frac{1}{K_{[S]}}, \quad (8)$$

где C_S – сульфидная емкость шлака; p_{O_2} – окислительный потенциал системы «металл–шлак»; $\gamma_{[S]}$ – коэффициент активности серы в металле; $K_{[S]}$ – константа равновесия реакции $1/2 \{S_2\} = [S]$.

Сульфидную емкость шлака оценивали термодинамически из соотношения

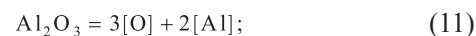
$$C_S = K_{(S)} a_{\text{O}^{2-}}, \quad (9)$$

для которого температурная зависимость константы $K_{(S)}$ была получена в виде

$$\lg K_{(S)} = -\frac{4813,2}{T} + 0,2475. \quad (10)$$

Активность анионов кислорода в шлаке $a_{\text{O}^{2-}}$, входящую в соотношение (9) и объективно определяющую основность шлаков, отождествляли с ионной долей и рассчитывали с использованием аппарата полимерной модели оксидных расплавов [4].

При расчетах p_{O_2} исходили из того, что в условиях агрегата ковш-печь окислительный потенциал системы определяется алюминием и может быть рассчитан из равновесий



$$1/2\{O_2\} = [O] \quad (12)$$

с использованием соотношений

$$\lg[O] = \frac{1}{3} \lg K'_{Al_2O_3} - \frac{2}{3} \lg[Al] + 5,25[Al] + \frac{1}{3} \lg a_{Al_2O_3} \quad [5]; \quad (13)$$

$$p_{O_2} = 10^{2\left(\lg[O] - \frac{6114}{T} - 0,151\right)} \quad [6], \quad (14)$$

где $K'_{Al_2O_3}$ – константа равновесия реакции (11).

Активность продуктов раскисления в условиях интенсивного перемешивания металла и шлака отождествляли с активностью Al_2O_3 в рафинировочных шлаках и оценивали в соответствии с представлениями полимерной модели оксидных расплавов [4].

При решении элементов модели (7) – (10), (13) и (14) для конкретных значений температуры, количества и состава металла и шлака были учтены различия термодинамических условий десульфурации в ковше в условиях газового перемешивания для исследованных плавов. Наиболее важные показатели рафинировочных свойств шлаков, проконтролированных при исследовании плавов, приведены на рис. 1.

Полученные значения объемного коэффициента массопереноса для каждой плавки были поставлены в соответствие усредненным за время рафинирования значениям интенсивности продувки инертным газом (табл. 1).

В результате было получено эмпирическое соотношение, позволяющее оценить величину объемного ко-

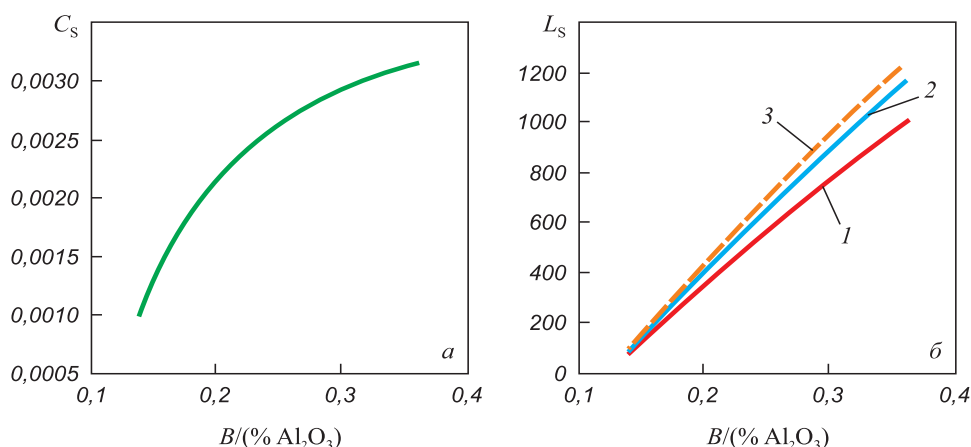


Рис. 1. Зависимость сульфидной емкости (а) и коэффициента распределения серы между металлом и шлаком (б) от состава рафинировочных шлаков при 1600 °С (B – показатель основности, CaO/SiO_2) при $[Al]$, %:
1 – 0,002; 2 – 0,003; 3 – 0,004

Fig. 1. Dependence of sulfide capacity (a) and sulfur distribution ratio between metal and slag (б) from composition of refining slags at 1600 °С (B – basicity of slag, CaO/SiO_2) at $[Al]$, %:
1 – 0.002; 2 – 0.003; 3 – 0.004

Таблица 1

Параметры десульфурации в ковше в условиях газового перемешивания для исследованных плавов

Table 1. Parameters of desulfurization in the ladle at gas mixing for the investigated heats

Номер п/п	T , К	B	$B/(Al_2O_3)$	C_s	$a_{(Al_2O_3)}$	$[Al]$, %	$P_{O_2} \cdot 10^{12}$, Па	L_s	$[S]_{п/п-г}$, %	$[S]_{равн}$, %	$K_V \cdot 10^3$, с ⁻¹	$Q_{Ar} \cdot 10^3$, м ³ /с
1	1844	4,0	0,24	0,0022	0,00038	0,025	7,20	759	0,072	0,004	1,198	5,953
2	1842	4,8	0,24	0,0022	0,00039	0,026	6,57	814	0,071	0,0036	1,037	4,318
3	1850	6,0	0,31	0,0026	0,00024	0,031	5,77	1036	0,077	0,0031	1,087	3,411
4	1838	5,6	0,26	0,0024	0,00032	0,025	5,41	951	0,078	0,0034	1,158	4,615
5	1846	5,7	0,30	0,0026	0,00022	0,019	6,71	935	0,057	0,0025	0,625	3,543
6	1838	4,7	0,24	0,0021	0,00041	0,019	7,59	702	0,064	0,0037	1,168	4,664
7	1858	4,6	0,26	0,0024	0,00030	0,02	12,16	668	0,071	0,0043	1,110	7,995
8	1849	5,3	0,27	0,0025	0,00027	0,026	6,74	891	0,074	0,0034	1,445	7,775
9	1859	4,2	0,24	0,0024	0,00034	0,015	18,04	523	0,035	0,0027	1,225	8,613
10	1858	4,8	0,25	0,0022	0,00047	0,016	20,16	472	0,034	0,003	0,965	6,778

эфициента массопереноса, исходя из интенсивности продувки инертным газом:

$$K_V = 0,0069 Q_{Ar}^{0,3571}, \text{ с}^{-1}, \quad (15)$$

где Q_{Ar} – интенсивность продувки инертным газом, $\text{м}^3/\text{с}$.

Сравнительный анализ результатов расчета значений объемного коэффициента массопереноса для условий открытых процессов по зависимостям (4) и (15) позволяет отметить их близость при больших интенсивностях продувки инертным газом (порядка $0,0135 \div 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$) и значительное различие при относительно небольших интенсивностях (рис. 2). Величина K_V , рассчитанная по полученному авторами соотношению, превышает величину объемного коэффициента массопереноса, рассчитанную по соотношению (4), в 1,4 раза при интенсивности продувки инертным газом $0,0067 \text{ м}^3/\text{с}$ и в 1,6 раза при интенсивности $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$.

Уточнение эмпирической зависимости коэффициента объемного массопереноса от интенсивности продувки инертным газом позволило адаптировать приведенную выше модель десульфурации шлаком в ковше для конкретных технологических условий. Сделанное на рис. 3 сопоставление фактических промышленных данных и результатов расчета по соотношению (3) с использованием зависимости (15) указывает на достаточную адекватность описания фактической динамики десульфурации при обработке шлаком.

Проведенный с помощью усовершенствованной модели анализ условий десульфурации стали шлаком в 140-т ковше позволил сделать вывод, что для полной реализации условий рафинирования за время не более 3600 с требуется интенсивность продувки инертным га-

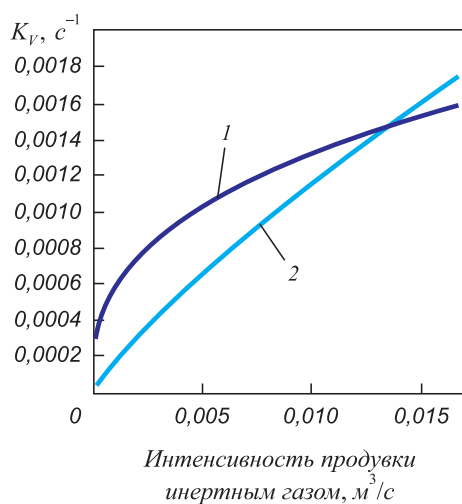


Рис. 2. Сравнение результатов расчета объемного коэффициента массопереноса по полученной эмпирической зависимости (15) – 1 и соотношению (4) – 2

Fig. 2. Comparison of calculation results of volume mass transfer factor by empirical dependence (15) – 1 and formula (4) – 2

зом не менее $0,0167 \text{ м}^3/\text{с}$. Это подтверждается промышленными данными.

Вакуумирование в ковше в условиях газового перемешивания, как правило, характеризуется существенно меньшими расходами инертного газа при достаточно высокой интенсивности перемешивания, фиксируемой визуально. Это согласуется с влиянием понижения давления над металлом на зависимость удельной мощности перемешивания от удельной интенсивности продувки, которое следует из соотношения (5): при той же интенсивности продувки понижение внешнего давления с $1,01 \cdot 10^5$ до $1,01 \cdot 10^2$ Па увеличивает удельную мощность перемешивания в 4,766 раз.

Адекватность математического описания условий массопереноса при ковшевом вакуумировании изучалась для условий 140-т ковша с двумя продувочными блоками при остаточном давлении в вакуумной камере около $1,01 \cdot 10^2$ Па. Поскольку при вакуумной дегазации стали наибольшие трудности вызывает удаление азота, основное внимание было сосредоточено на процессе деазотации.

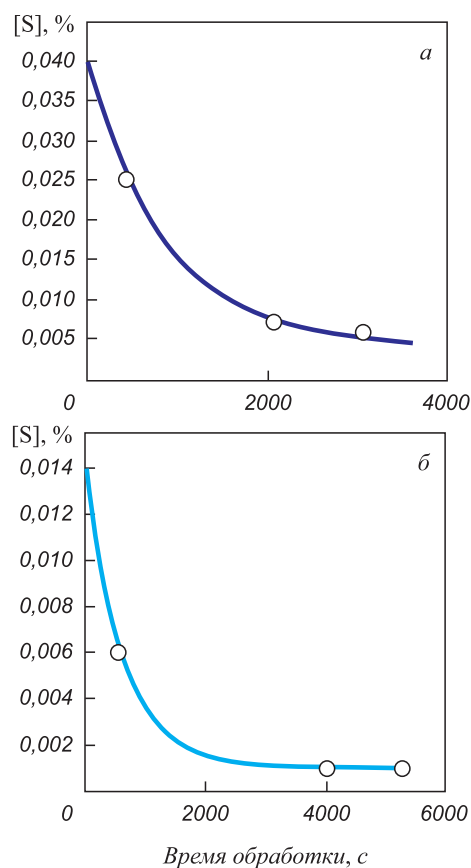


Рис. 3. Сопоставление фактических данных и результатов расчета десульфурации стали шлаком в ковше в условиях газового перемешивания: точки – фактические промышленные данные, линии – результаты расчета; а, б – различные плавки

Fig. 3. Comparison of industrial data and calculation results of steel desulfurization by slag in a ladle in conditions of gas stirring: dots – industrial data, lines – calculation results; a, b – different melts

С учетом роли поверхностных явлений при десорбции газов в уравнение (1) динамики деазотации при обработке на установке вакуумирования стали должна быть внесена поправка в виде [7]

$$(1 - \theta) = \frac{1}{4 + 620[S]}, \quad (16)$$

характеризующая долю свободной поверхности в присутствии поверхностно-активной серы. Тогда зависимость текущего содержания азота в металле от времени обработки принимает вид

$$[N] = [N]_{\text{равн}} + ([N]_0 - [N]_{\text{равн}}) \exp[-K_V (1 - \theta) \tau]. \quad (17)$$

Для анализа были взяты плавки, у которых известны:

- интенсивность подачи инертного газа под глубоким вакуумом (оценивалась по диаграммам расхода инертного газа);
- содержание азота в металле непосредственно до и после вакуумной обработки.

Равновесную концентрацию азота оценивали по закону Сиверта, исходя из промышленных данных по температуре и максимальному разрежению. Для каждой плавки была сделана оценка фактического значения объемного коэффициента массопереноса. Затем в результате регрессионного анализа было получено соотношение, связывающее фактический объемный коэффициент массопереноса и фактическую интенсивность подачи инертного газа под глубоким вакуумом:

$$K_V = 1,267 Q_{\text{Ar}}, \text{ c}^{-1}. \quad (18)$$

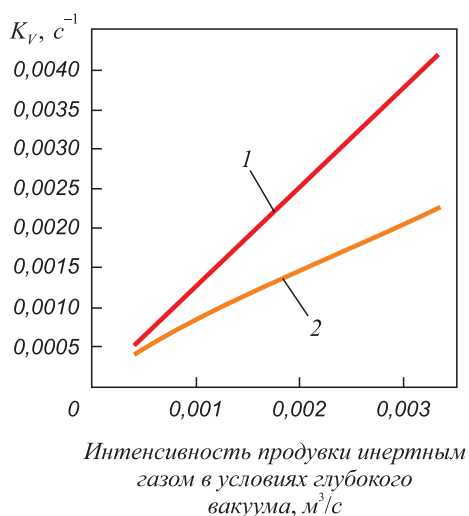


Рис. 4. Сравнение результатов расчета объемного коэффициента массопереноса по полученной эмпирической зависимости (18) – 1 и соотношению (4) – 2 для условий вакуума

Fig. 4. Comparison of calculation results of volume mass transfer factor according to found empirical dependent (18) – 1 and formula (4) – 2 for vacuum conditions

Сравнительный анализ результатов расчета значений коэффициента объемного массопереноса для условий вакуума по зависимостям (4) и (18) позволяет отметить, что величина K_V , рассчитанная по полученной авторами эмпирической зависимости, превосходит величину, рассчитанную по соотношению (4). При этом с увеличением интенсивности продувки степень различий возрастает (рис. 4): при интенсивности продувки инертным газом $8,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ расчет по вновь полученному соотношению дает результат в 1,46 раза больше, при расходе $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ – в 1,65 раза.

Сопоставление расчетных и фактических концентраций азота после вакуумирования, сделанное в табл. 2, свидетельствует, что новое соотношение для оценки объемного коэффициента массопереноса существенно повысило адекватность описанной выше модели: в большинстве случаев величина расхождения не превышала 10 %.

С использованием нового эмпирического соотношения для определения объемного коэффициента массопереноса авторами была сделана расчетная оценка степени деазотации в зависимости от интенсивности продувки инертным газом в условиях глубокого вакуума при остаточном давлении $1,01 \cdot 10^2 \text{ Па}$, температуре 1873 К и продолжительности вакуумирования 900 с (рис. 5). Полученные результаты в целом согласуются с промышленными данными.

Таким образом, в условиях современного сталеплавленного производства при необходимости сочетания сокращения продолжительности и увеличения глубины внепечного рафинирования фактор интенсификации массообменных процессов приобретает первостепенное значение. Полученные эмпирические зависимости объемного коэффициента массопереноса от интенсивности продувки инертным газом могут способствовать выработке оптимальных режимов газового перемешивания при внепечном рафинировании стали в ковше.

Таблица 2

Сопоставление фактических и расчетных концентраций азота после вакуумирования

Table 2. Comparison of actual and calculated concentrations of nitrogen after evacuation

Номер плавки	Фактическая концентрация азота, ppm	Расчетная концентрация азота, ppm	Величина отклонения, %
1	57,4	52,0	– 9,3
2	55,8	54,3	– 2,7
3	44,6	51,4	15,3
4	45,7	49,6	8,7

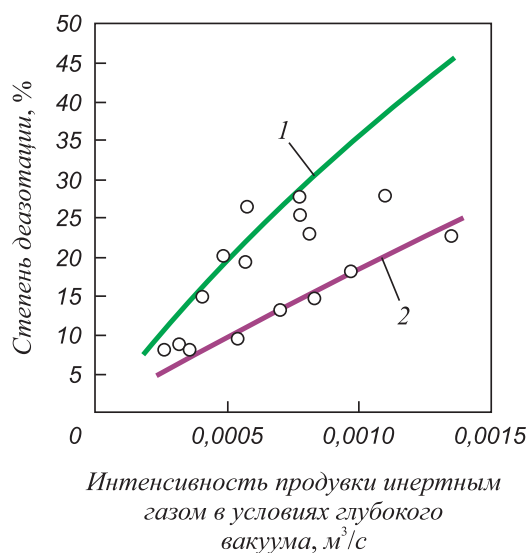


Рис. 5. Зависимость степени деазотации от интенсивности продувки инертным газом под глубоким вакуумом. Линии – расчетные зависимости при остаточном давлении $1,01 \cdot 10^2$ Па, температуре 1873 К и продолжительности вакуумирования 900 с и [S], %: 1 – 0,002, 2 – 0,006. Точки – промышленные данные при времени вакуумирования 780 ÷ 1020 с и содержании серы в металле 0,002 ÷ 0,006 %

Fig. 5. Dependence of nitrogen removal from inert gas stirring rate under deep vacuum. Lines – calculated dependence at residual pressure $1,01 \cdot 10^2$ Pa, temperature 1873 K and degassing time 900 sec. and [S], %: 1 – 0.002, 2 – 0.006 %. Dots – industrial data for degassing time 780 ÷ 1020 sec. and sulfur content in metal 0.002 ÷ 0.006 %

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Янг Ку, Юн Лианг, ЛюЛю. Исследование на модели процессов перемешивания и массопереноса при ковшевой продувке // Тр. конф. «Инжекционная металлургия '83» (Лулеа, Швеция, 15 – 17 июня 1983 г.) / Пер. с англ. под ред. М.Ф. Сидоренко. – М.: Металлургия, 1986. С. 135 – 146.
2. Сано М., Мори К. Модель циркуляционного течения в расплавленном металле для специального случая барботажа ванны и ее применение к процессам инжектирования газа // Тр. конф. «Инжекционная металлургия '83» (Лулеа, Швеция, 15 – 17 июня 1983 г.) / Пер. с англ. под ред. М.Ф. Сидоренко. – М.: Металлургия, 1986. С. 124 – 134.
3. Бурмасов С.П. Технологические аспекты проблемы качества стали // Вестник ГОУ УГТУ-УПИ. Теплотехнические и технологические проблемы производства стали: Тр. науч.-техн. конф., посвященной 98-летию со дня рождения заслуженного изобретателя РСФСР, профессора Н.И. Кокарева. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. С. 50 – 58.
4. Новиков В. К. Развитие полимерной модели силикатных расплавов // Расплавы. 1987. Т. 1. № 6. С. 21 – 23.
5. Бурмасов С.П., Гудов А.Г., Панфилов А.М. Внепечное рафинирование стали в условиях газового перемешивания: методические указания к выполнению инженерных расчетов внепечной обработки стали. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 37 с.
6. Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавиловых процессов. – М.: Металлургия, 1969. – 252 с.
7. Шахин М.А., Эль-Никхайли А., Эль-Зеки М. Перемешивание жидкого металла продувкой азотом в ковше. Применение, ограничения, контроль // Тр. IV Междунар. конф. по инжекционной металлургии «Инжекционная металлургия'86» (Лулеа, Швеция, 11 – 13 июня 1986 г.) / Пер. с англ. под ред. В.А. Кудрина. – М.: Металлургия, 1990. С. 146 – 156.

Поступила 7 апреля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 638–644.

THE ANALYSIS OF MASS TRANSFER IN CONDITIONS OF GAS STIRRING AT LADLE REFINING OF STEEL

Burmasov S.P.¹, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys”

Gudov A.G.¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys” (a.g.gudov@urfu.ru)

Yaroshenko Yu.G.¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

Meling V.V.², Chief Foreman of the Section of Steel Ladle Treatment

Dresvyankina L.E.², Head of the Ladle Treatment Group at Metallurgical Laboratory of R&D Centre

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

² JSC “Severskii Tube Steelworks” (7, Vershinina str., Polevskoi, Sverdlovsk region, 623388, Russia)

Abstract. The intensification of steel refining at ladle treatment and improvement of production efficiency of modern steelmaking require the analytical description of mass transfer in conditions of gas stirring at ladle refining. The analysis of industrial data on the basis of standard models does not allow to describe adequately the real processes. The methods and results of estimation of mass transfer volume factor which can be considered as a key factor for dynamics of steel refining in conditions of gas stirring are presented in the paper. The analysis of

industrial data on desulfurization of low- and medium-carbon metal at furnace-ladle (EAF) and vacuum degassing unit (VD) was made on the basis of proposed models of gas stirring and refining. New data on the correlation of stirring rates and volume mass transfer factor were found for EAF and VD processes of steel treatment. The adequacy of proposed models of refining processes was tested on the basis of correlation data on gas stirring rate and mass transfer factor and confirmed a good agreement with recommended process parameters and archived refining efficiency.

Keywords: ladle treatment, desulfurization, degassing, dynamics, gas stirring, mass transfer, volume factor of mass transfer, stirring rate, model, adequacy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-638-644

REFERENCES

1. Yang Ku, Yun Liang, Lyu Lyu A model study of mixing and mass transfer in ladle injection. In: *3rd Int. Conf. on refining of iron and steel by powder injection*, Lulea, Sweden, June 15–17, 1983. Proceedings. Sweden: MEPOS, 1983.
2. Sano M., Mori K. Circulating flow model in a molten metal bath with special respect to behavior of bubble swarms and its application to gas injection processes. In: *3rd Int. Conf. on refining of iron and steel by powder injection*, Lulea, Sweden, June 15–17, 1983. Proceedings. Sweden: MEPOS, 1983.

3. Burmasov S.P. Technological aspects of the steel quality. *Vestnik GOU UGTU-UI. Teplotekhnicheskie i tekhnologicheskie problemy proizvodstva stali: Trudy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 98-letiyu so dnya rozhdeniya zaslužennogo izobretatelya RSFSR, professora N.I. Kokareva* [Vestnik GOU UGTU-UI. Thermal and technological problems of steel production: Proceedings of scientific conference devoted to the 98 anniversary of Honored Inventor of the RSFSR, professor Kokarev N.I.]. Ekaterinburg: UGTU-UI, 2002, pp. 50–58. (In Russ.).
4. Novikov V. K. Development of the polymer model of silicate melts. *Rasplavy*. 1987. Vol. 1, no. 6, pp. 21–23. (In Russ.).
5. Burmasov S.P., Gudov A. G., Panfilov A. M. *Vnepechnoe rafinirovaniye stali v usloviyakh gazovogo peremeshivaniya: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu inzhenernykh raschetov vnepechnoi obrabotki stali* [Ladle refining of steel in a gas mixing: guidelines for the implementation of engineering calculations for furnace steel processing]. Ekaterinburg : UrFU, 2012. 37 p. (In Russ.).
6. Elliott John F., Gleiser Molly, Ramakrishna V. Thermochemistry for Steelmaking. Addison-Wesley Inc. 1963. (Russ.ed.: Elliott J., Gleiser M., Ramakrishna V. *Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1969. 252 p.).
7. Shakhin M.A., El'-Nikkhaili A., El'-Zeki M. Stirring the molten metal in the ladle nitrogen purge. Applying, restrictions, control. In: *Inzheksionnaya metallurgiya '86: Tr. IV mezhdunar. konf. po inzheksion. metallurgii, g. Lulea, Shchvetsiya, 11–13 iyunya 1986 g.* [Injection Metallurgy '86: Proceedings of the 4th Int. Conf. 11–13 June, 1986. Lulea, Sweden]. Kudrin V.A. ed. Moscow: Metallurgiya, 1990, pp. 146–156. (In Russ.).

Acknowledgements. The study was supported by RFBR grant no.13-08-12167.

Received April 7, 2015