

## Формирование металлических капель в шлаковой фазе при продувке стали инертным газом в промежуточном ковше МНЛЗ

Рассмотрено поведение металлических капель в шлаковой фазе, которые образуются в результате продувки металла в промковше инертным газом с использованием законов химической кинетики и жидкой механики. В результате проведённых расчётов установлено резидентное время пребывания капли металла в шлаковой фазе, а также определена средняя скорость процесса рафинирования. Результаты теоретических исследований подтверждены данными промышленных испытаний.

**Ключевые слова:** неметаллические включения, промежуточный ков, шлак, рафинирование

Роль промежуточного ковша в процессах непрерывной разливки эволюционировала от переточной ёмкости между сталь-ковшом и кристаллизатором, разделяющей перемещающиеся неметаллические включения, в металлургический реактор, где осуществляется последний этап их удаления [1]. Переход неметаллических включений на границу раздела фаз металл-шлак в промежуточном ковше в значительной степени управляется межфазными явлениями в системе металл-шлак – включения [2]. Одним из постулатов высокого качества стали в мире является малое содержание неметаллических включений в готовом продукте [3]. Известно, что весьма эффективно удаляются неметаллические включения при продувке металлической ванны инертным газом, благодаря прикреплению их к пузырькам на границе раздела фаз металл-газ [4]. Однако механизм и количество удалённых включений в данном случае всё ещё недостаточно изучен.

Известно, что продувка стали инертным газом приводит к образованию металлической эмульсии в шлаке, что увеличивает массоперенос между двумя несмешивающимися жидкостями, в результате чего возрастает скорость ассимиляции неметаллической фазы шлаком [5, 6].

По данным работы [7] процесс очистки стали от неметаллических включений при продувке инертным газом большей частью зависит от резидентного времени пребывания капли металла в шлаковой фазе. При этом большая часть исследований [8-10] рассматривает только механизм захвата металлических капель в шлак и выдвигает предположение, что этот процесс осуществляется за счёт разрыва металлической пленки на пузыре аргона. Поэтому целью исследования являлось детальное изучение

поведения металлических капель в шлаковой фазе, определение их резидентного времени, а также массы диспергированного металла с использованием законов химической кинетики и жидкой механики.

Для определения траектории движения единичной капли железа в шлаке, перемещающейся в шлаковой фазе, воспользуемся баллистическим принципом движения. Этот принцип был применён в работе [11] для расчёта резидентного времени пребывания железной капли в шлаковой фазе. Схематическое движение капли металла, содержащей неметаллические включения в шлаковой фазе, представлено на рис. 1.

Предполагая, что шлаковая фаза неподвижна, баланс сил в вертикальном ( $z$  – координата) и горизонтальном ( $r$  – координата) направлении может быть представлен как [11]:

$$z\text{-направление} \quad \rho_k V_k \frac{du_z}{dt} = F_{\Pi} - F_{\Gamma} - F_{Cz} - F_{Mz}, \quad (1)$$

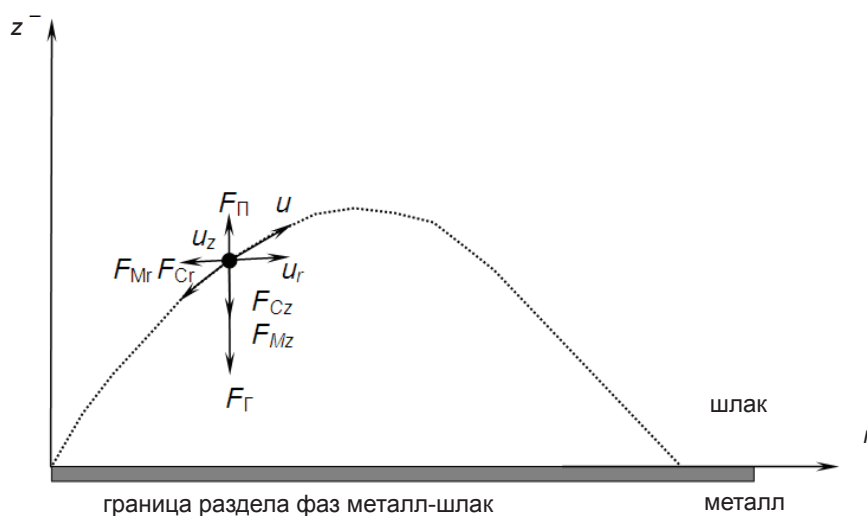


Рис. 1. Схема движения капли металла с прикреплёнными включениями в шлаковой фазе

$$r - \text{направление} \quad \rho_k V_k \frac{du_r}{d\tau} = -F_{Cr} - F_{Mr}, \quad (2)$$

где индекс  $k$  относится к капле металла;  $F_{\Pi}, F_r, F_c, F_M$  – подъёмная сила гравитации, сопротивления и присоединённой массы соответственно,  $H$ ;  $V_k$  – объём капли,  $\text{м}^3$ ;  $u$  – скорость движения капли относительно шлака,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\rho_k$  – плотность капли металла,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ .

Поэтому соответствующие силы можно представить как:

$$F_{\Pi} = V_k \rho_{\text{ш}} g, \quad (3)$$

$$F_r = V_k \rho_k g, \quad (4)$$

$$F_{C,z} = \frac{1}{2} A_k C_{k,z} \rho_{\text{ш}} u_z^2, \quad (5)$$

$$F_{C,r} = \frac{1}{2} A_k C_{k,r} \rho_{\text{ш}} u_r^2, \quad (6)$$

$$F_{A,z} = \frac{1}{2} A_k V_k \rho_{\text{ш}} \frac{du_z}{d\tau}, \quad (7)$$

$$F_{A,r} = \frac{1}{2} A_k V_k \rho_{\text{ш}} \frac{du_r}{d\tau}, \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{ш}}$  – плотность шлака,  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести  $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ ;  $A_k$  – площадь капли,  $\text{м}^2$ ;  $u_z$  и  $u_r$  – скорость движения капли в  $z$  и  $r$  направлениях, соответственно,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $C_k$  – коэффициент лобового сопротивления, который по данным работы [5] может быть вычислен как:

$$\begin{aligned} C_{k,z} &= 24 N_{\text{Re},z}^{-1} (N_{\text{Re},z} \leq 1,0) \\ C_{k,z} &= 18,5 N_{\text{Re},z}^{-0,6} (1,0 \leq N_{\text{Re},z} \leq 1000) \\ C_{k,z} &= 0,44 (1000 \leq N_{\text{Re},z} \leq 10000) \end{aligned} \quad (9)$$

и

$$\begin{aligned} C_{k,r} &= 24 N_{\text{Re},r}^{-1} (N_{\text{Re},r} \leq 1,0) \\ C_{k,r} &= 18,5 N_{\text{Re},r}^{-0,6} (1,0 \leq N_{\text{Re},r} \leq 1000) \\ C_{k,r} &= 0,44 (1000 \leq N_{\text{Re},r} \leq 10000) \end{aligned} \quad (10)$$

где число Рейнольдса  $N_{\text{Re}}$  в направлениях  $z$  и  $r$  определяется как:

$$N_{\text{Re},z} = \frac{\rho_{\text{ш}} u_z D_k}{\mu_{\text{ш}}}, \quad (11)$$

$$N_{\text{Re},r} = \frac{\rho_{\text{ш}} u_r D_k}{\mu_{\text{ш}}}, \quad (12)$$

где  $D_k$  – диаметр капли,  $\text{м}$ ;  $\mu_{\text{ш}}$  – вязкость шлака,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

Учитывая в уравнениях (3) и (8) уравнения (1) и (2) получаем:

$$\begin{aligned} \rho_k V_k \frac{du_z}{d\tau} &= V_k \rho_{\text{ш}} g - V_k \rho_k g - \frac{1}{2} A_k C_{k,z} \rho_{\text{ш}} u_z^2 - \\ &- \frac{1}{2} V_k \rho_{\text{ш}} \frac{du_z}{d\tau}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\rho_k V_k \frac{du_r}{d\tau} = -\frac{1}{2} A_k C_{k,r} \rho_{\text{ш}} u_r^2 - \frac{1}{2} V_k \rho_{\text{ш}} \frac{du_r}{d\tau}. \quad (14)$$

После преобразования

$$\frac{du_z}{d\tau} = \frac{2(\rho_{\text{ш}} - \rho_k)g}{\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k} - \frac{\rho_{\text{ш}} C_{k,z}}{\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k} \cdot \frac{A_k}{V_k} u_z^2, \quad (15)$$

$$\frac{du_r}{d\tau} = -\frac{\rho_{\text{ш}} C_{k,r}}{\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k} \cdot \frac{A_k}{V_k} u_r^2. \quad (16)$$

Принимая во внимание, что

$$A_k = \frac{1}{4} \pi D_k^2, \quad (17)$$

$$V_k = \frac{1}{6} \pi D_k^3. \quad (18)$$

Уравнения (15) и (16) принимают вид:

$$\frac{du_z}{d\tau} = \frac{2(\rho_{\text{ш}} - \rho_k)g}{\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k} - \frac{3\rho_{\text{ш}} C_{k,z}}{2(\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k)D_k} u_z^2 \quad (19)$$

$$\frac{du_r}{d\tau} = -\frac{3\rho_{\text{ш}} C_{k,r}}{2(\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k)D_k} u_r^2. \quad (20)$$

Для упрощения уравнений (19) и (20) объединим постоянные величины в константы:

$$K_0 = \frac{2(\rho_{\text{ш}} - \rho_k)g}{\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k} u_r^2. \quad (21)$$

$$K_z = -\frac{3\rho_{\text{ш}} C_{k,z}}{2(\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k)D_k}, \quad (\text{если } u_z > 0) \quad (22)$$

$$K_z = \frac{3\rho_{\text{ш}} C_{k,z}}{2(\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k)D_k}, \quad (\text{если } u_z < 0) \quad (23)$$

$$K_r = -\frac{3\rho_{\text{ш}} C_{k,r}}{2(\rho_{\text{ш}} + 2\rho_k)D_k}, \quad (24)$$

где  $D_k$  – диаметр капли,  $\text{м}$ .

В итоге приходим к выражениям:

$$\frac{du_z}{d\tau} = K_0 + K_z u_z^2, \quad (25)$$

$$\frac{du_r}{d\tau} = K_r u_r^2. \quad (26)$$

Уравнения (25) и (26) описывают баллистическую модель движения капель. В работе [5] они решены в цифровой форме для  $u_z$  и  $u_r$ . Далее координаты и траектории движения капель могут быть вычислены как:

$$L_z = \int_0^{\tau} u_z d\tau, \quad (27)$$

$$L_r = \int_0^{\tau} u_r d\tau. \quad (28)$$

Поэтому из уравнения (27) резидентное время капли металла в шлаке может быть представлено как:

$$L_z = \int_0^{\tau} u_z d\tau = 0. \quad (29)$$

Решение уравнений (25) и (26) приведено в работе [6] и имеют вид:

$$\frac{u_z(i) - u_z(i-1)}{\Delta\tau} = K_0 + K_z(i-1)u_z(i-1)^2, \quad (30)$$

$$\frac{u_r(i) - u_r(i-1)}{\Delta\tau} = K_0 + K_r(i-1)u_r(i-1)^2, \quad (31)$$

где  $i$  – скорость в интервале времени и может быть вычислена как:

$$u_z(i) = u_z(i-1) + K_0\Delta\tau + K_z(i-1)u_z(i-1)^2\Delta\tau, \quad (32)$$

$$u_r(i) = u_r(i-1) + K_r(i-1)u_r(i-1)^2\Delta\tau, \quad (33)$$

где  $u_z(i)$ ,  $u_r(i)$ , – числовые решения уравнений (25) и (26), которые позволяют определить резидентное время и траекторию движения капли.

Траектория капель может быть рассчитана с использованием числовых значений  $u_z$  и  $u_r$  как:

$$L_z(i) = \sum_i \frac{1}{2} [u_z(i) + u_z(i-1)] \Delta\tau, \quad (34)$$

$$L_r(i) = \sum_i \frac{1}{2} [u_r(i) + u_r(i-1)] \Delta\tau. \quad (35)$$

Когда  $L_z(i)$  равно или стремится к нулю, соответствующий промежуток времени определяется как резидентное, т. е.

$$\tau = \sum_i \Delta\tau. \quad (36)$$

При поступлении капель металла в шлак с содержащимися в них неметаллическими включениями начинается процесс рафинирования. Когда процесс рафинирования заканчивается, капля металла покидает фазу шлака. Резидентное время представляет собой отрезок времени, при котором капля металла находится в шлаковой фазе.

Так, используя уравнения (32) и (33) было определено резидентное время пребывания капель металла в шлаковой фазе при различных расходах инертного газа и диаметрах пузыря (рис. 2). Как свидетельствуют данные рис. 2 увеличение диаметра пузыря и расхода газа приводит к увеличению резидентного времени пребывания капли металла в шлаковой фазе, что благоприятно сказывается на процессе рафинирования металла от неметаллических включений.

Содержание включений в каплях можно рассчитать как количество включений ассимилированных шлаком во времени:

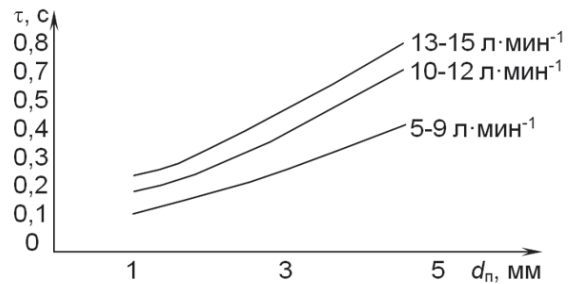


Рис. 2. Влияние диаметра пузыря и расхода газа на резидентное время пребывания капли металла в шлаковой фазе

$$[\% \text{мас.НВ}] = a(1 + e^{-k\tau}), \quad (37)$$

где  $[\% \text{мас.НВ}]$  – содержание неметаллических включений в капле;  $a$  и  $k$  – константы по данным работы [5] равные 1,47 и 0,313 соответственно.

Отсюда скорость рафинирования можно представить как:

$$V_{\text{раф.}} = - \frac{d[\% \text{мас.НВ}]}{d\tau} = ake^{-k\tau}. \quad (38)$$

Учитывая тот факт, что гетерогенные реакции, протекающие на границе раздела фаз имеют 1-й порядок, скорость ассимиляции неметаллических включений с использованием данных по резидентному времени можно представить как:

$$V_{\text{раф.}} = \frac{d[\% \text{мас.НВ}]}{d\tau} = k_{\text{эф.}} \frac{A_k}{V_k} ([\% \text{мас.НВ}] - [\% \text{мас.НВ}]_p), \quad (39)$$

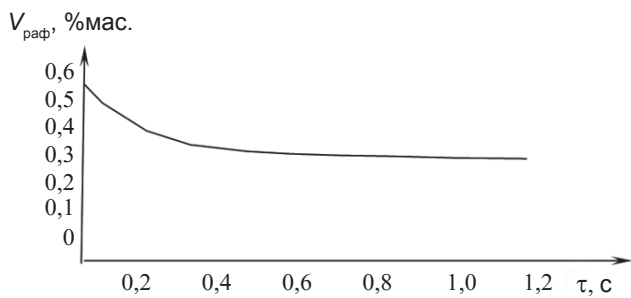
где  $[\% \text{мас.НВ}]_p$  – равновесное содержание неметаллических включений;  $k_{\text{эф.}}$  – эффективная константа скорости реакции,  $\text{с}^{-1}$ , которая определяется как:

$$k_{\text{эф.}} = 2\sqrt{\frac{D_{\text{НВ}}u_k}{\pi D_k}}, \quad (40)$$

где  $D_{\text{НВ}}$  – коэффициент диффузии неметаллических включений в жидкое железо,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $u_k$  – скорость движения капли,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

На рис. 3. приведены результаты расчётов с использованием уравнения (39), которые показали, что скорость рафинирования, а следовательно и  $\% \text{мас.}$  содержания неметаллических включений снижается со временем и при достижении резидентного времени 0,4 с становится постоянным.

В процессе внепечной обработки сталь покрыта жидким синтетическим шлаком, поэтому в технологическом плане интенсификация перемешивания металла в зоне, непосредственно прилегающей к шлаку, имеет большое значение. Благодаря увеличению мощности перемешивания фаз и площади поверхности контакта, перемешивание способствует более полному протеканию реакций и позволяет



**Рис. 3.** Изменение скорости рафинирования металлических капель в шлаке

существенно повысить эффективность использования шлака. Увеличение площади поверхности контакта происходит за счёт образования шлакометаллической эмульсии на границе контактирующих фаз как результат прохождения газовых пузырей через межфазную границу. При этом перенос металла в шлаковую фазу и частиц шлака в металл происходит за счёт прямого или косвенного диспергирования. Перенос частиц шлака и металла осуществляется непосредственно газовыми пузырями, которые проходя через межфазную поверхность, поднимают её с образованием купола металлической плёнки в слое шлака, которая при дальнейшем движении пузыря разрушается с образованием колонны жидкой фазы, вовлекаемой в слой шлака нижней периферийной частью всплывающего пузыря.

При больших расходах нейтрального газа на продувку через днище ковша над продувочным устройством образуется динамическая газожидкостная область, которая кроме создания циркулирующего потока металла в ковше, приводит к образованию так называемой области «открытого глаза». Данная область представляет собой область на зеркале металла, где отсутствует шлак. Образование области «открытого глаза» при больших расходах газа приводит к формированию вблизи него слоя, состоящего из отдельных капель шлака, которые достаточно легко могут вовлекаться в жидкую ванну металла нисходящими и горизонтальными потоками и тем самым являться дополнительным источником неметаллических включений.

Сравнительный анализ эффективности трансформации характера перемешивания стали в промковше при наличии продувочных балок на количество и состав неметаллических включений в непрерывнолитых слябах и готовом прокате исследовали путём разливки опытно-промышленных серий плавки на МНЛЗ № 1 ОАО «Алчевский металлургический комбинат» на 60-тонном промежуточном ковше двухручьевого слябовой МНЛЗ.

После окончательной установки промковша МНЛЗ для разливки медную трубку соединяли с источником аргона, подачу которого начинали при достижении уровня, соответствующего примерно 40 т жидкого металла. Расход аргона составлял 5, 9, 12 и 15 л·мин<sup>-1</sup> при давлении 6 атм.

В процессе исследований разливалась сталь марки ВВА на слябы сечением 200x1245 мм. Сталь предварительно обрабатывалась на установке ковш-печь и затем вакуумировалась. Результаты исследований сравнительных и опытных темплетов по серным отпечаткам и после глубокого травления практически не отличаются. Химический состав отобранных образцов также не отличается.

Оценка неметаллических включений проводилась по DIN 50602-1985 методом К4 под микроскопом сравнением с эталонными восьмибальными шкалами при просмотре всей площади нетравленных шлифов с продольным направлением волокон.

Сульфидные и оксидные включения подсчитываются отдельно. Количество обнаруженных неметаллических включений каждого типа и каждого балла умножается на соответствующий индекс, и полученные произведения суммируются отдельно для сульфидов и для всех оксидов. Полученная при этом сумма для отдельных шлифов суммируется для 9-ти шлифов плавки, в результате получается вторая промежуточная сумма (в мм<sup>2</sup>). Эти результаты пересчитываются для площади шлифа 1000 мм<sup>2</sup> и получается суммарный параметр отдельно для сульфидов и всех оксидов. Суммарные параметры для сульфидов и оксидов суммируются, и получается общий суммарный параметр, округленный до целого числа.

При оценке неметаллических включений методом К4 выбираются баллы, начиная с 4-го и крупнее.

Суммарный параметр является параметром доли площади неметаллических включений в структуре, отнесённой к площади 1000 мм<sup>2</sup>. Данный параметр является численной мерой содержания включений в металле.

Метод К4 дает более полную картину загрязнённости металла крупными неметаллическими включениями. Данные исследований представлены в таблице.

Как свидетельствуют данные таблицы, наилучшие результаты рафинирования металла от неметаллических включений наблюдаются при расходах газ 10-12 л·мин<sup>-1</sup>. При расходе газа 5-9 л·мин<sup>-1</sup> практически не наблюдается разницы в содержании неметаллических включений в образцах опытного и сравнительного металла, что объясняется недостаточным перемешиванием металла и шлака на межфазной границе металл-шлак. При этом если расход газа лежит в диапазоне 13-15 л·мин<sup>-1</sup>, то содержание крупных неметаллических включений в образцах опытного

#### Оценка неметаллических включений по шкале DIN 50602

Номер плавки	Расход Ar, л·мин <sup>-1</sup>	Суммарный параметр К4		Общий суммарный параметр К4
		сульфиды	оксиды	
K13696	13-15	0	5	5
	без продувки	3	3	6
K13698	12	0	1	1
	без продувки	0	3	3
K13698	10	0	1	1
	без продувки	5	3	8
	5-9	1	1	2
	без продувки	0	1	1

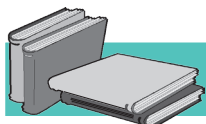
металла резко возрастает, что обусловлено активным перемешиванием металла и шлака и приводит к захвату неметаллических включений конвективными потоками металла.

## Выводы

В результате проведённых расчётов установлено, что увеличение резидентного времени пребывания капли металла в шлаковой фазе благоприятно сказывается на процессе рафинирования металла от

неметаллических включений. При этом его диапазон лежит в 0,1-0,6 с, а средняя скорость рафинирования составляет 0,27-0,30 %мас·с<sup>-1</sup>.

Проведённые промышленные испытания показали, что высокий расход инертного газа приводит к снижению эффекта рафинирования за счёт захвата шлака конвективными потоками в ванну промежуточного ковша. Металлографические исследования подтвердили, что наилучшие результаты рафинирования достигаются при расходе газа в диапазоне 10-12 л·мин<sup>-1</sup>.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Yogeshwar Sahai, Toshiniko Emi.* Tundish Technology for clean steel production / The Ohio State University, USA; Institute of research of Iron and Steel, Jangsu/ Sha – Steel, China. – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2008. – 329 p.
2. *Rogler J.* Modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling. – Canada: Eng. Ryerson University, 2004. – 54 p.
3. *Greene G. A., Finfrook C., Burson S. B.* Phenomenological studies on molten core-concrete interactions// Nuclear Engineering and Design. – Vol. 108. – ISS 1-2. – June. – 1988. – P. 167-177.
4. *Momoko A., Manabu I.* Filament and droplets formed behind a solid sphere rising across a liquid-liquid interface// Materials Transactions. – Vol. 45. – № 3. – 2004. – P. 870-876.
5. *Geoffrey Brooks, Yuhua Pan, Subagyo and Ken Coley.* Modeling of trajectory and residence time of metal droplets in slag-metal-gas emulsions in oxygen steelmaking // Metallurgical and Materials Transactions B. – Vol. 36. – № 4. – 2005. – P. 525-535.
6. *Solhed H., Jonsson L., Jönsson P.* A theoretical and Experimental Study of Continuous Casting Tundish Focusing on Slag-Steel Interaction// Metallurgical and Materials Transactions B. – Vol. 33. – № 2. – April. – 2002. – P. 173-185 (13).
7. *Sami Jani. A.* Solid Inclusion Separation at the Steel – Slag Interface for Tundish Conditions in the Continuous Steel Casting Process // Master's Thesis in Scientific Computing at Stockholm University, Sweden 2007. – Department of Numerical Analysis and Computer Science Royal Institute of Technology SE-10044. – P. 23-37.
8. Удаление неметаллических включений из стали в промковше при её продувке аргоном через пористые блоки / А. Н. Смирнов, В. Г. Ефимова, А. В. Кравченко, К. Е. Письмарёв // Наукові праці Донецького національного технічного університету «Металургія», 2010. – № 12 (177). – С. 108-114.
9. *Rogler J.* Modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling. – Canada: Eng. Ryerson University, 2004. – 54 p.
10. *Kobayas S.* Iron Droplet Formation Iron/Slag interface due to bubbles passing through molten// ISIJ International. – Vol. 33. – 1993. – № 5. – P. 577-582.
11. Study of Slag-Metal Reactions in an LD-LBE Converter / C. Cicutti, M. Valdez, T. Pérez, J. Petroni, A. Gómez, R. Donayo, L. Ferro Proc. Slag Conf., Stockholm. 2000. – P. 79-88.

### Анотація

Ефимова В. Г.

Формування металевих крапель в шлаковій фазі при продуванні сталі інертним газом у проміжному ковші МБРЗ

Розглянуто поведінку металевих крапель в шлаковій фазі, які утворюються в результаті продування металу у проміжному ковші інертним газом з використанням законів хімічної кінетики та рідкої механіки. В результаті проведених розрахунків встановлено резидентний час перебування краплі металу в шлаковій фазі, а також визначена середня швидкість процесу рафінування. Результати теоретичних досліджень підтверджені даними промислових випробувань.

### Ключові слова

неметалеві включення, проміжний ківш, шлак, рафінування

### Summary

Yefimova V. G.

Formation of metal drops in slag phase at steel blowing inert gas in the tundish

This article examines in the slag phase the behavior of metal droplets formed as a result of blowing the metal in the tundish with inert gas using laws of chemical kinetics and fluid mechanics. As a result of settlements established resident time of metal drops in the slag phase, and determined the average speed of the process of refining. The results of theoretical studies confirmed the data of industrial tests.

### Keywords

non-metallic inclusions, tundish, slag, refining

Поступила 09.12.13