

УДК 621.791.793

**В. Г. Ефимова, А. В. Ноговицын\*, В. Н. Баранова\***

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

\*Физико-технологических институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ВЛИЯНИЕ ПРОДУВКИ ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ**

*Рассмотрены теоретические аспекты удаления неметаллических включений инертным газом при продувке металла в промежуточном ковше. Показано, что скорость образования металлических капель снижается при увеличении размера пузыря аргона. Проведенные промышленные испытания продувки металла инертным газом показали наилучшие результаты в случае использования малых диаметров газовыпускных каналов.*

**Ключевые слова:** промежуточный ковш, неметаллические включения, шлак, оксидные включения.

*Розглянуто теоретичні аспекти видалення неметалевих включень інертним газом при продувці металу в проміжному ковші. Показано, що швидкість утворення металевих крапель знижується при збільшенні розміру бульбашки аргону. Проведені промислові випробування продувки металу інертним газом показали найкращі результати в разі використання малих діаметрів газовипускних каналів.*

**Ключові слова:** проміжний ківш, неметалеві включення, шлак, оксидні включення.

*The deals with the theoretical aspects of removing non-metallic inclusions in an inert gas purging of the metal in the tundish with an inert gas. It is shown that the rate of formation of metallic droplets decreases with increasing argon bubble size. Industrial tests conducted metal inert gas purge showed the best results in the case of small diameter flue channels.*

**Keywords:** tundish, nonmetallic inclusions, slag, oxide inclusions.

**Н**епрерывная разливка широко используется и является важным этапом в производстве стали. В целом ряде стран Европы, Японии и США она составляет 97 %. Прогрессивно увеличивается объем производства непрерывнолитой металлопродукции, возрастают строгие требования потребителей к ее качеству. Поэтому чистота стали и контроль заданного ее состава, наряду с качеством поверхности непрерывнолитой заготовки, становятся для металлургов первоочередными задачами.

Степень чистоты стали по неметаллическим включениям (НВ) зависит от количества, природы, размера, формы и распределения их в металле заготовки и является главным показателем качества.

Технология рафинирования металла от неметаллических включений (НВ) в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) занимает в настоящее время особое место.

Промежуточный ковш – это последняя металлургическая емкость, в которой можно управлять чистотой готового продукта, применяя продувку через продувочные фурмы с различным диаметром газовыделительных каналов.

## Получение и обработка расплавов

Известно, что степень рафинирования металлургического расплава при использовании продувки инертным газом зависит от диаметра пузыря, а следовательно, и диаметра газовыделительного канала. Многочисленные исследования показали, что использование пузырей малых размеров благоприятно влияет на процесс очистки стали от неметаллических включений.

Поэтому целью исследований являются теоретическое обоснование размера газового пузыря, используемого при продувке, а также подтверждение аналитических расчетов данными распределения неметаллических включений в металле заготовок после проведения серии промышленных экспериментов.

Общая скорость удаления неметаллических включений в шлаковой фазе из капель металла в промежуточном ковше может быть представлена как [2]

$$V = (k_{\text{ш-м}}A_{\text{ш}} + A_{\text{НВ}}k_{\text{ш-НВ}} + k_{\text{ш-м}}(A_{\text{к}} + A'_{\text{к}}))X_{\text{FeO}}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{ш-м}}$ ,  $k_{\text{ш-НВ}}$  – константы скорости реакции шлак-металл и шлак-неметаллические включения соответственно;  $A_{\text{ш}}$ ,  $A_{\text{НВ}}$  – площадь шлаковой и неметаллической фаз, соответственно;  $A_{\text{к}}$ ,  $A'_{\text{к}}$  – площадь металлических капель и снижение площади металлических капель за счет ассимиляции неметаллической фазы;  $X_{\text{FeO}}$  – массовая доля FeO в шлаке. Однако при использовании уравнения (1) возникают некоторые трудности с определением площади металлических капель. Поэтому для определения скорости массопереноса неметаллической фазы в системе металл-шлак часто определяют разность между объемом образовавшихся капель металла и эмульгированных в шлаке  $k_{\text{ш-м}}(V_{\text{об}} - V_{\text{эм}})$ .

Для определения количества капель, принимающих участие в эмульгировании, используем закон сохранения массы для границы раздела фаз металл-шлак [3]

$$V_{\text{Д}}(\tau) = V_{\text{об}}\tau - \int_0^{\tau} V_{\text{эм}}(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $V_{\text{Д}}(\tau)$  – объем капель, которые скапливаются в шлаковой фазе в момент времени  $\tau$ , м<sup>3</sup>;  $V_{\text{об}}\tau$  – общий объем капель, образующихся в момент времени  $\tau$ ; в свою очередь,  $V_{\text{об}}$  – объем образовавшейся капли в единицу времени, который остается постоянным в процессе эмульгирования, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{эм}}$  – объем капель, принимающих участие в эмульгировании в момент времени  $\tau$ , м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>.

Дифференцирование уравнения (2) приводит к уравнению, характеризующему скорость перемещение металлических капель в эмульгируемую фазу

$$\frac{dV_{\text{Д}}(\tau)}{d\tau} = V_{\text{об}} - V_{\text{эм}}(\tau). \quad (3)$$

Исходя из этих предпосылок, скорость скопившихся и эмульгировавшихся капель может быть представлена как

$$\frac{dV_{\text{Д}}}{d\tau} = V_{\text{об}}e^{-\tau/t} \quad \text{и} \quad V_{\text{эм}}(\tau) = \left(1 - e^{-\tau/t}\right), \quad (4)$$

в работе [4] было проведено интегрирование уравнения (3), которое позволило получить следующую зависимость:

$$V_{\text{Д}}(\tau) = V_{\text{об}} \cdot \tau \left(1 - e^{-\tau/t}\right), \quad (5)$$

где  $t$  – время продувки, с.

Расчеты, выполненные с использованием данных уравнений, показали, что при скоростях потока 10-12 л · мин<sup>-1</sup> общий объем капель металла в шлаковой фазе увеличивается с течением времени продувки (рис. 1). При таких условиях скорость эмульгирования капель увеличивается в соответствии со скоростью их образования, в результате устанавливается стационарный режим и  $V_D(\tau)$  становится постоянной. При скоростях потока свыше 12 л · мин<sup>-1</sup> скорость образования капель выше, однако равновесные условия достигаются дольше.

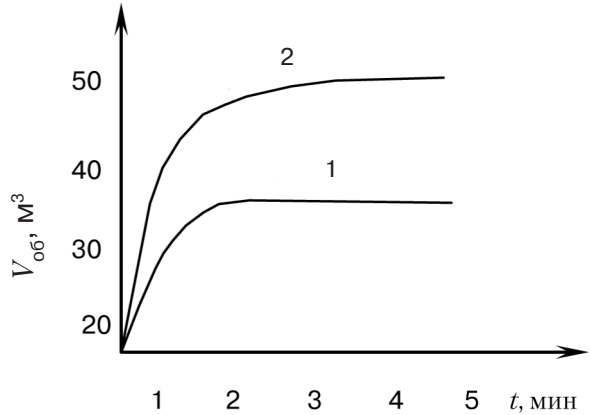


Рис. 1. Общий объем капель металла в шлаковой фазе в течение времени: 1 – расход газа 10-12 л · мин<sup>-1</sup>; 2 – расход газа свыше 12 л · мин<sup>-1</sup>

В механизме образования капля межфазное натяжение и след, оставленный за пузырем, не оказывают влияния на переход газовой фазы поверхности раздела металл-шлак. Однако следует отметить, что как только пузырь пройдет границу раздела, межфазное натяжение начинает играть значительную роль в процессе образования капель [5].

Основываясь на экспериментальных данных, можно предположить, что объем перенесенной металлической фазы пузырями в шлак  $V_D^0$  зависит от следующих параметров

$$V_D^0 = f(r_{II}, \Delta\rho, \rho_{ш}, \eta_{ш}, \eta_{M}, g), \quad (6)$$

где  $r_{II}$  – диаметр пузыря, м;  $\Delta\rho$  – разность между плотностями двух жидких фаз, кг · м<sup>-3</sup>;  $\rho_{ш}$  – плотность шлаковой фазы, кг · м<sup>-3</sup>;  $\eta_{ш}$  и  $\eta_{M}$  – вязкость шлака и металла, соответственно, Па · с;  $g$  – ускорение силы тяжести, м · с<sup>-2</sup>.

Согласно работе [6], переменные и фундаментальные значения, входящие в зависимость (6), можно объединить в четыре безразмерные группы, в которых прослеживается зависимость от  $V_D^0$

$$Z_1 = f(\rho_{ш}, \eta_{M}, g, V_D^0); \quad Z_2 = f(\rho_{ш}, \eta_{M}, g, r_{II});$$

$$Z_3 = f(\rho_{ш}, \eta_{M}, g, \eta_{ш}); \quad Z_4 = f(\rho_{ш}, \eta_{M}, g, \Delta\rho).$$

Применив множественный регрессионный анализ к вышеприведенным уравнениям, авторы работы [6] получили формулу для расчета объема металла, захваченного в шлаковую фазу

$$V_D^0 = 1,04 \left( \frac{\eta_{ш}^2}{\rho_{ш}^2 g} \right) \left( \frac{\rho_{ш}^2 g r_{II}^3}{\eta_{ш}^2} \right)^{0,66} \left( \frac{\eta_{ш}}{\eta_{M}} \right)^{-0,34} \left( \frac{\rho_{ш}}{\Delta\rho} \right)^{1,66}. \quad (7)$$

В единицах СГС зависимость (7) будет иметь следующий вид:

$$V_{\text{Д}}^0 \approx 0,11 \eta_{\text{М}} \rho_{\text{Ш}} \eta_{\text{Ш}}^{-1/3} \Delta \rho^{-5/3} r_{\text{П}}^2. \quad (8)$$

Общий объем капель металла, образующихся в шлаковой фазе в момент времени  $\tau$ , будет составлять

$$V_{\text{об}} = \frac{Q}{V_{\text{П}}} V_{\text{Д}}^0, \quad (9)$$

где  $Q$  – расход газа при продувке, л · мин<sup>-1</sup>;  $V_{\text{П}} = 1,378 Q^{1,2} g^{0,6}$  – объем пузыря, мм.  
После подстановки (8) в (9) получим

$$V_{\text{об}} \approx 0,19 \eta_{\text{М}} \rho_{\text{Ш}} \eta_{\text{Ш}}^{-1/3} \Delta \rho^{-5/3} \frac{Q}{r_{\text{П}}}. \quad (10)$$

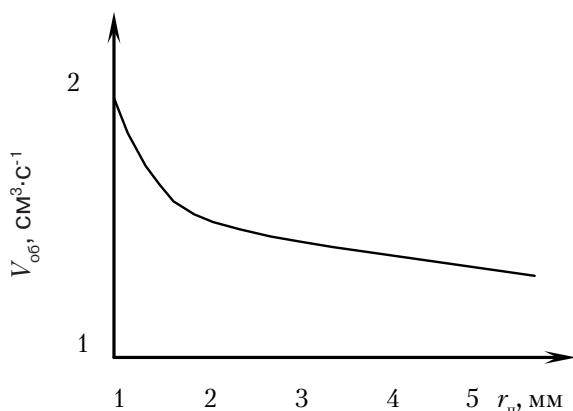


Рис. 2. Зависимость скорости образования капель металла в шлаковой фазе от размера пузыря аргона

Формула (10) показывает, что скорость образования капель возрастает при увеличении вязкости металла, плотности шлака и расходе газа и уменьшается при увеличении вязкости шлака, разности плотностей между двумя фазами и размера пузыря (рис. 2).

Данные, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что наибольшее количество капель наблюдается при диаметре пузырями 1 мм. Пузыри меньших размеров имеют определенные недостатки, которые следует учитывать при реализации метода продувки в промышленных условиях. Первый недостаток – большое время всплытия пузыря;

второй – возможность захвата пузырьками конвективными потоками и затягивания их в зону выпускного отверстия стакана-дозатора.

Следует отметить, что турбулизация шлаковой фазы, вызванная донной продувкой, увеличивает коэффициент массопередачи между металлом и шлаком, что приводит к возрастающему захвату всплывающих частиц неметаллической фазы. Однако чрезмерная скорость продувки может негативно влиять на процесс рафинирования, поскольку капли металла с адсорбированными неметаллическими включениями могут увлекаться обратно в фазу металла [5]. При движении вверх пузырьки газа, проникая в шлак, вовлекают с собой некоторое количество частиц металла, которые всплывают до границы раздела шлак-атмосфера, а затем, после разрушении пузырька, погружаются назад в шлак и далее в ванну металла.

На основании вышеприведенных теоретических принципов нами, а также другими исследователями [7-10] установлено, что наилучшие результаты рафинирования стали от неметаллических включений достигаются при диаметре пузырей в диапазоне 1-5 мм. Для проверки этих выводов провели промышленные испытания в условиях ПАО МК «Азовсталь» на двухручьевой МНЛЗ при разливке стали марки К-60.

На двух ручьях устанавливали продувочные элементы. На первом ручье – продувочную фурму с диаметром газовыделительного канала 1,5-2,0 мм, которая в результате продувки позволяла получать пузыри размером 4,5-5,0 мм, рис. 3, а. Второй ручей был оборудован продувочной балкой с диаметром газовыделительных

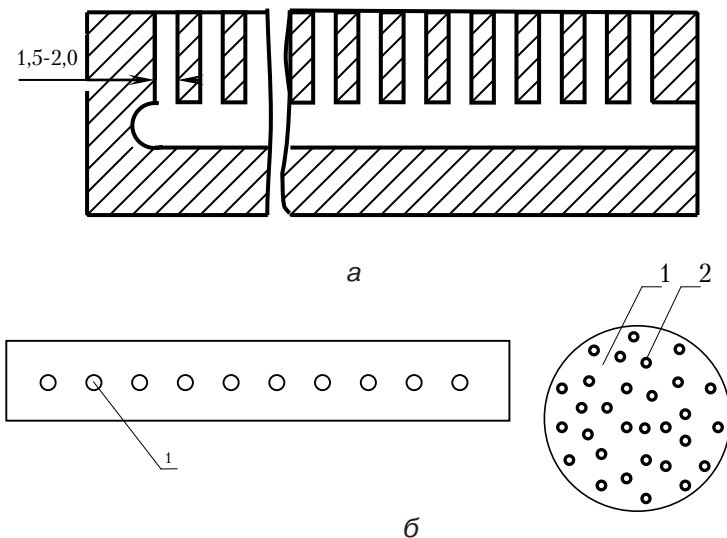


Рис. 3. Конструкция продувочных устройств: *а* – многоканальная протяженная фурма; *б* – продувочная балка (1 – продувочный элемент; 2 – газовыделительный канал)

каналов 0,14-0,16 мм, что позволило получать пузыри диаметром 3,0-3,25 мм, рис. 3, б. Расход газа составлял 10-12 л · мин<sup>-1</sup>.

Монтаж продувочных элементов в днище промежуточного ковша не вызывал дополнительных трудностей и по сложности был соизмерим с операциями его футеровки. Режим сушки и разогрева промежуточного ковша, оснащенного продувочной фурмой, не требует изменений и полностью соответствует принятому в цехе графику.

Для оценки состояния поверхности из слябов первого и второго ручьев отбирали образцы (по углам и серединам граней). Оценку выполняли после удаления окалины путем травления в 50 %-ном растворе соляной кислоты при 70 °С по методике ЦНИИЧермета. Обобщая результаты оценки качества поверхности образцов первого и второго ручьев, следует отметить наличие явно выраженных «следов» осцилляции с шагом, соответствующим режиму качания кристаллизатора (≈5 мм) и глубиной канавки до 0,9-1,0 мм, что соответствует 0 баллу согласно вышеуказанной методике для обоих случаев. На некоторых плавках отмечена мелкая сетка трещин в углах узких граней со стороны малого или большого радиуса. Между тем, видимых существенных различий между образцами первого и второго ручьев не отмечено.

Загрязненность стали (НВ) определяли на полированных шлифах на микроскопе «Axiovert-200» в светлом, темном и DIC полях при увеличении 100 по ГОСТу 1778-70 и ASTM E45-97 (метод наихудших полей).

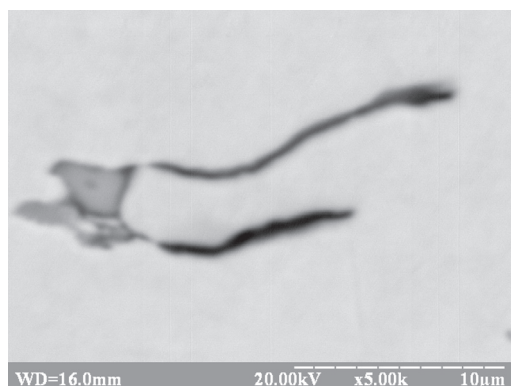
Установили, что в опытном и сравнительном металлах встречаются преимущественно тонкие сульфидные включения (до 0,5 балла), точечные оксидные включения (до 0,5 балла) и силикатные включения как глобулярной, так и строчечной формы (до 4 баллов). В образцах из опытных слябов количество оксидов и сульфидов несколько меньше, чем в сравнительном. На всех нетравленных микрошлифах встречаются неметаллические включения в виде скоплений (конгломератов) мелких включений округлой и неправильной геометрической форм. Максимальные размеры крупных включений для металла первого ручья достигают до 20 мкм, для второго – до 10.

Следует дополнительно отметить, что в образцах из первого и второго ручьев наблюдается высокий балл недеформирующихся крупных силикатов, что указывает на высокую загрязненность стали этими включениями. На микрошлифах всех плавков крупные силикатные включения округлой формы располагаются близко к

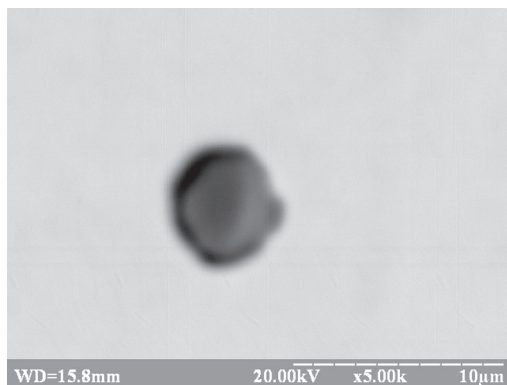
## Получение и обработка расплавов

поверхности (на глубине 0,08-0,73 мм), а некоторые даже выходят на поверхность. Количество и размеры силикатов в теле слябов заметно уменьшаются. Это позволяет предположить, что наличие крупных силикатов следует связывать с работой шлакообразующей смеси и развитием волнообразных процессов в кристаллизаторе.

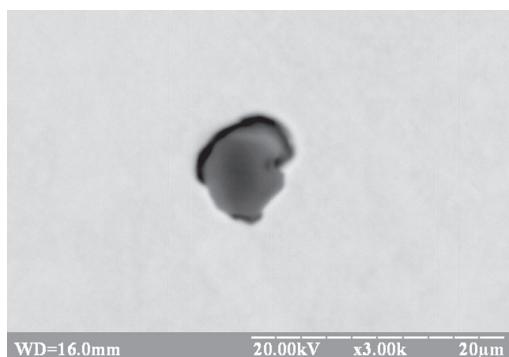
Как показали количественные оценки в образцах из слябов, отлитых с продувкой аргоном через продувочную балку, количество крупных неметаллических включений (размер более 20 мкм) уменьшается в среднем на 40-80 % по сравнению с продувкой через продувочную фурму. Уменьшение количества включений размером 5-10 мкм для сляба второго ручья составляет 14-26 %. В среднем преобладают мелкие включения размером 1-5 мкм, равномерно распределенные в объеме металла.



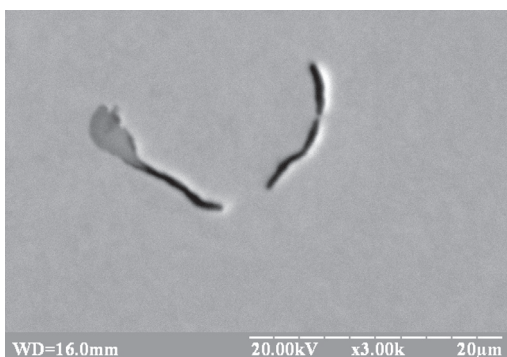
*а*



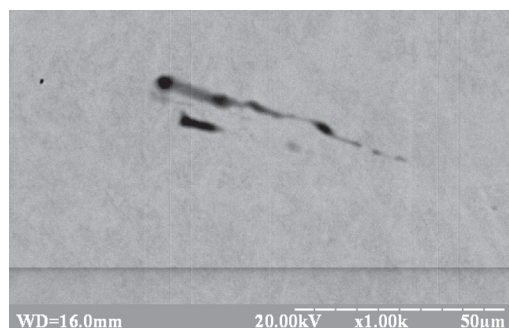
*г*



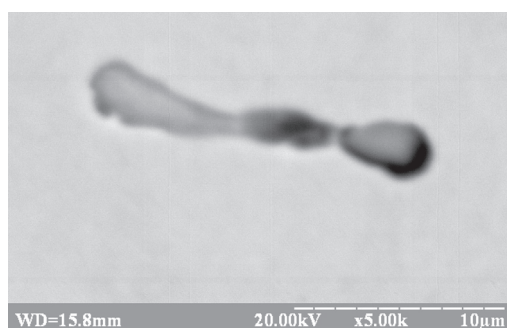
*б*



*д*



*в*



*е*

Рис. 4. Основные виды неметаллических включений в пробах металла первого (*а-в*) и второго (*г-е*) ручьев



Основные виды неметаллических включений в пробах металла первого и второго ручьев представлены на рис. 4.

Анализируя причины образования крупных неметаллических включений в отобранных пробах из опытного металла и изменение их количества при продувке аргоном, следует, прежде всего, отметить, что они имеют преимущественно округлую форму и представляют собой оксисульфидные конгломераты, включающие такие элементы, как кремний, алюминий, кальций, сера, кислород и пр. Соответственно при попадании этих включений в восходящий поток газометаллической смеси они вовлекаются в движение и захватываются металлом, прилегающим к пузырькам газа. Таким образом, значительная часть неметаллических включений транспортируется в область покровного шлака. При этом восходящие пузырьки газа препятствуют проникновению включений в столб металла, которые вытекает через стакан-дозатор в кристаллизатор МНЛЗ.

### Выводы

В результате проведенных теоретических исследований и промышленных испытаний установлено, что наилучшие результаты по рафинированию металла от неметаллических включений достигаются при продувке металла через балку с диаметром газовыделительных каналов 0,14-0,16 мм.



### Список литературы

1. *Yogeshwar Sahai, Toshihiko 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. *Satish Kumar D., Rajendra T., Sarkar A.* Forced Flotation of Inclusions in Tundish // Ironmaking & Steelmaking. – 2009. – Vol. 36, № 6. – P. 470-475.
3. *Valdez M., Shannon G. S., Sridhar S.* The Ability of Slags to Absorb Solid Oxide Inclusions // ISIJ International. – 2006. – Vol. 46, № 3. – P. 450-457.
4. *Kobayas S.* Iron Droplet Formation Iron / Slag Interface due to Bubbles Passing Through Molten // ISIJ International. – 1993. – Vol. 33, № 5. – P. 577-582.
5. *Nguyen A. V.* Hydrodynamics of Liquid Flows Around Air Bubbles in Flotation // International Journal of Mineral Processing. – 1999. – № 4. – P. 165-205.
6. *Zuohua Lin, Guthrie R.* Modelling of Metallurgical Emulsions. Metallurgical and Materials // Transaction B. – 1994. – Vol. 25B, № 12. – P. 855-870.
7. *Nguyen A. V., Shulze H. J.* Probability of Collision Between Particles and Bubbles in Flotation: The Theoretical Inertialess Model Involving a Swarm of Bubbles in Pulp Phase // International Journal of Mineral Processing. – 2000. – № 3. – P. 155-169.
8. Fluid Flow Behaviour in Slab Continuous Casting Tundish with Different Configurations of Gas Bubbling Curtain / L. C. Zhong, L. Y. Li, B. Wang et. el. // Ironmaking and Steelmaking. – 2008. – Vol. 35, № 6. – P. 436-440.
9. Forced flotation of inclusions in tundish /K. D. Satish, T. Rajendra, R. Prasad et. el. // Ironmaking & Steelmaking – 2009. – Vol. 36, № 6. – P. 470-475.
10. *Zhang L., Taniguchi S.* Fundamentals of Inclusion Removal from Liquid Steel by Bubble Flotation // International Materials Reviews. – 2000. – Vol. 45, № 2. – P. 59-82.

Поступила 14.02.2014