

4. Лыков А. А. Тепломассобмен: Справочник. – М.: Изд-во «Энергия», 1972. – 560 с.
5. Поволоцкий Д. Я. Основы технологии производства стали. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 191 с.
6. Ackerman M. J., Urban W. G. A Perspective of Practical Issues Relating to Tundish Development // Iron&Steelmaker. – 2004. – № 4. – P. 41-43.
7. Винниченко Е. В., Вишкарёв А. Ф., Явойский В. И. Физическая химия металлургических процессов и систем. – М.: МИСИС, Металлургия, 1966. – С. 16-31.

Поступила 18.03.2013

УДК 629.162.267

В. Г. Ефимова, А. В. Ноговицын*, А. В. Кравченко,
И. Н. Салмаш****

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

**Донецкий национальный технический университет Украины, Донецк

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПРОДУВКИ МЕТАЛЛА В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ МНЛЗ С ЦЕЛЮ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УСЛОВИЙ ФЛОТАЦИИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Рассмотрены количественные характеристики удаления неметаллической фазы при ламинарном и турбулентном движении потока в промковше. Показано, что при турбулентном движении потока увеличение размера пузыря приводит к увеличению скорости удаления включений. Установлено, что оптимальный размер пузыря при продувке стали инертным газом должен быть менее 6 мм, что достигается при расходе газа 10-12 л · мин⁻¹. Промышленные испытания свидетельствуют о снижении содержания недеформируемых силикатов на 25 %, что находит согласование с теоретическими расчетами.

Ключевые слова: промежуточный ковш, продувочная фурма, турбулентный поток, рафинирование.

Розглянуто кількісні характеристики видалення неметалевої фази при ламінарному і турбулентному русі потоку в промковші. Показано, що при турбулентному русі потоку збільшення розміру бульбазя призводить до збільшення швидкості видалення включень. Встановлено, що оптимальний розмір бульбазя при продувці сталі інертним газом повинен бути менше 6 мм, що досягається при витраті газу 10-12 л · хв⁻¹. Промислові випробування свідчать про зниження вмісту недеформованих силікатів на 25 %, що знаходить узгодження з теоретичними розрахунками.

Ключові слова: проміжний ковш, продувальна фурма, турбулентний потік, рафінування.

The article describes the quantitative characteristics of the removal of non-metallic phases in laminar and turbulent flow in the tundish flow. It is shown that the turbulent motion of the flow of increasing the size of the bubble increases the rate of removal of impurities. The optimal size of the bubble by blowing inert gas began to be less than 6 mm, which is achieved with the consumption of gas 10-12 l · min⁻¹. Industrial tests show a decrease in the content of non-deformable silicates by 25 %, which is an agreement with the theoretical calculations.

Keywords: tundish, purging lance, turbulent motion, refining.

Металлургическое производство Украины было и остается базовой отраслью промышленности, ориентированной, в основном, на собственные сырьевые и топливно-энергетические ресурсы. В настоящее время на непрерывную разливку приходится ~ 95 % мирового объема стали. В чрезвычайно конкурентной сталелитейной промышленности высокое качество продукции и ориентация на запросы клиента являются весьма актуальными. Одним из наиболее важных показателей качества стали является ее загрязненность неметаллическими включениями (количество, морфология и распределение в металлопродукции). Известно, что неметаллические включения весьма эффективно удаляются при продувке металлической ванны инертным газом.

Изучение механизма удаления включений из жидкой стали за счет прикрепления к пузырькам при продувке инертным газом вызывает сложности в связи с многочисленными переменными и турбулизацией потока в промковше. Барботаж аргоном является перспективной технологией, используемой для управления гидродинамических потоков и удаления включений, поскольку он принудительно воздействует на потоки металла в промковше, сокращая мертвые зоны и увеличивая резидентное время [1-3]. Кроме того, экспериментально было показано, что применение продувки улучшает условия удаления включений и уменьшает заключительный размер включений в готовом продукте [4].

Целью данной работы является определение оптимальных условий продувки через многоканальную протяженную фурму в условиях разливки стали через промежуточные ковши МНЛЗ.

Во время энергичного барботажа, охватывающего весь объем ванны, в ней устанавливается режим развитой однородной и изотропной турбулентности, при которой коагуляция взвешенных частиц за счет пульсаций устанавливается быстрее. Следовательно, продувку целесообразно вести пузырями, равномерно распределенными по объему расплава, при максимальном объеме газа, который бы не допускал оголения металла из-под шлака. По данным исследователей [5], время, необходимое для перехода неметаллических включений через межфазную границу металл-газ, составляет 10^{-4} - 10^{-6} с. Это свидетельствует о том, что любое столкновение неметаллической частицы с газом, независимо от состава и гидродинамических условий, должно приводить к прикреплению неметаллической фазы к пузырю.

На практике не достигается столь значительного снижения содержания включений при обычных режимах продувки, поскольку далеко не все встречи пузырьков с включениями приводят к их слиянию. Удаление неметаллических частиц из стали при продувке газами происходит благодаря прикреплению их к границе металл-газ [6].

Различная степень удаления из стали включений разного состава при идентичных гидродинамических условиях свидетельствует о различной эффективности встреч частиц друг с другом и межфазной поверхностью. Устойчивость дисперсной системы, которой является расплав стали, в условиях, когда оправдан процесс коагуляции, определяется поведением тонких прослоек расплава, разделяющего частицы [7].

Возможность укрупнения включений, агрегации их с газовыми пузырями и переход в шлаковую фазу определяются кинетикой утоньшения и прорыва тонких прослоек металла. Высокая устойчивость металлических пленок при больших размерах частиц является причиной того, что из стали в ряде случаев трудно удаляются включения размером > 30 мкм.

Еще одним важным условием быстрого удаления из стали неметаллических включений является обновление границы раздела фаз металл-шлак за счет принудительного их перемещения в шлак.

Вероятность прикрепления пузыря к частице $P_{\text{прикрепления}}$ состоит из трех этапов: утончение пленки; прорыв пленки; стабилизация пленки.

В исследованиях [6] было установлено, что для осуществления последних 2-х

Получение и обработка расплавов

этапов вероятность утончения пленки сопоставима с возможностью прикрепления пузыря к включению. В свою очередь, возможность прикрепления возрастает при уменьшении размера пузыря и увеличении размера частиц.

Данные работы [8] свидетельствуют, что вероятность прикрепления при таких условиях возрастает более чем на 80 % и описывается полуаналитическим уравнением Навье-Стокса

$$P_{\text{прикрепления}} = \frac{2u_b D}{9(u_i + u_b)Y} \left(\frac{d_i}{d_b} \right) \left[\sqrt{(X+C)^2 + 3Y^2} + 2(X+C) \right]^2, \quad (1)$$

где d_b и d_i – диаметр пузыря и включения соответственно; u_b – скорость подъема пузыря; X, Y, C, D – безразмерные параметры, которые, в свою очередь, определяются из следующих соотношений:

$$X = \frac{3}{2} + \frac{9\text{Re}}{32 + 9,888\text{Re}^{0,694}}; \quad Y = \frac{3\text{Re}}{8 + 1,736\text{Re}^{0,694}};$$

$$C = \frac{u_i}{u_b} \left(\frac{d_b}{d_i} \right)^2; \quad D = \frac{\sqrt{(X+C)^2 + 3Y^2} - (X+C)}{3Y}.$$

Это уравнение применимо для продольно симметричного и асимметричного потоков пузырей с числом Рейнольдса $\text{Re} < 400$. Полуаналитическое решение уравнения Навье Стокса, выполненное А. В. Нгуеном и другими [9], подтвердило, что вероятность столкновения увеличивается при уменьшении размера пузыря и увеличении размера частицы.

Концентрация включений n является функцией времени пребывания жидкой стали в продуваемой области. Скорость удаления включений можно представить как

$$-\frac{dn}{d\tau} = K \cdot n, \quad (2)$$

где K – константа, которая имеет следующее выражение:

$$K = \frac{3U_{\Gamma} P_{\text{прикрепления}} T_C}{2d_n T_0}, \quad (3)$$

где U_{Γ} – скорость истечения газа в единице площади; $T_C = 1800$, $T_0 = 300$ – температура стали и температура газа в метре потока, K .

Резидентное время жидкости продуваемой области промковша (τ) можно рассматривать как время пребывания расплава в продуваемом регионе

$$\tau = \tau_T \frac{L_n}{L}, \quad (4)$$

где τ_T – время пребывания жидкой стали в промковше, с; L_n – длина продуваемого потока в промковше, м; L – длина промковша, м.

Эффективность удаления включений ε может быть представлена как функция константы K и времени пребывания жидкой стали в продуваемой области промковша (τ)

$$\varepsilon = (1 - e^{-K\tau}) 100. \quad (5)$$

Результаты вычислений с использованием уравнения (5) представлены на рис. 1. Из этих данных видно, что для пузырей диаметром $d_n \leq 3$ мм высокая эффективность удаления включений не зависит от объема продуваемой области и времени пребывания металла в практическом диапазоне 240-720 с. Однако для пузырей размером более 5 мм объем продуваемой области и время пребывания жидкого металла оказывают существенное влияние.

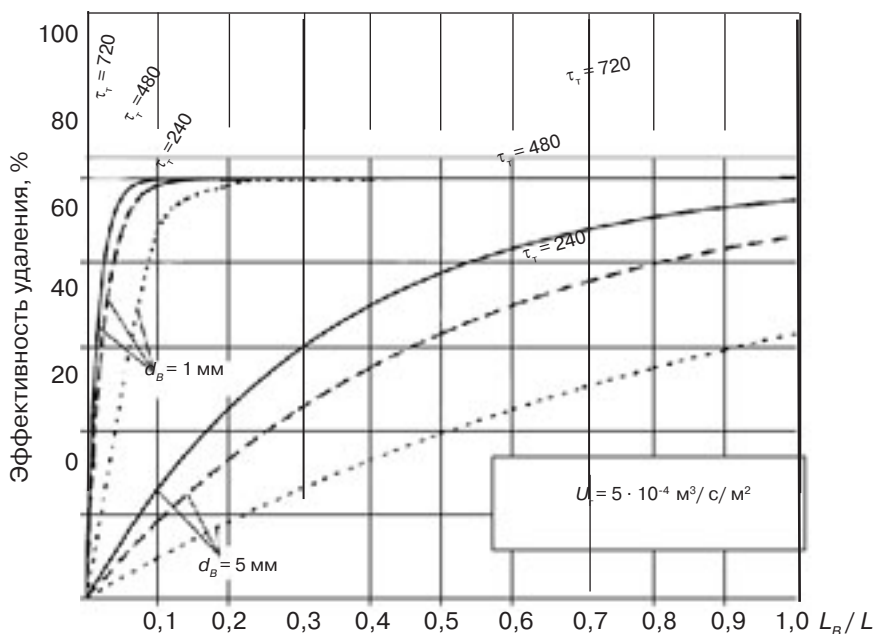


Рис. 1. Влияние размера пузырька, объема продуваемой области и резидентного времени промковша на эффективность удаления включений

Минимальный размер пузыря в данной работе определяли также, исходя из значения скорости истечения расплава U_p , глубины промковша H и минимального расстояния между продувочным устройством и выпускным отверстием L_{min} промковша. Отношение времени, за которое пузырек смог подняться и удалиться ($H/U_{n,min}$), мин ко времени достижения расплава выпускного отверстия промковша (L_{min}/U_p) даст минимальную скорость поднятия пузыря

$$U_{n,min} = \frac{H \cdot U_p}{L_{min}}. \quad (6)$$

Для $H = 1$ м, $L_{min} = 0,25$ м и времени пребывания металла в промковше $\tau_T = 480$ с скорость движения жидкой стали u_L составляет $8,5 \cdot 10^{-3}$ м/с. Исходя из этого, приблизительное значение скорости поднятия пузыря составит $3,3 \cdot 10^{-2}$ м/с, которая согласно закону Стокса соответствует минимальному размеру пузырька (0,25 мм), при этом пузырек не будет захвачен в нисходящие потоки. Поэтому пузыри размером $d_n \leq 3$ мм обеспечивают высокую вероятность всплытия пузыря в промковше, поскольку, исходя из теоретических предпосылок, такой размер может обеспечить наилучшую эффективность удаления включений, что согласуется с данными работы [10].

Однако следует учесть тот факт, что текущая технология продувки, используемая в сталеплавильном производстве, связана с трудностью образования пузырей размером < 3 мм [11]. Следует заметить, что вышеприведенные рассуждения применимы к ламинарному потоку. При этом необходимо учесть, что 2-фазный газожидкостный поток в промежуточном ковше является турбулентным, что вызывает необходимость провести анализ удаления включений с учетом данного условия.

По данным работы [6] скорость столкновения между пузырьем и включением в жидкости, то есть количество столкновений в единице объема и в единицу времени может быть определено как

$$Z_{ПВ} = 5nN_n \left(\frac{d_b + d_n}{2} \right)^2 (\bar{U}_b^2 + \bar{U}_n^2)^{1/2}, \quad (7)$$

где n и N_n – концентрация включений и пузырей соответственно; \bar{U}_b и \bar{U}_n – среднеквадратичное значение турбулентной скорости частиц и пузыря соответственно, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Относительная турбулентная скорость может быть вычислена как

$$(\bar{U}_i^2)^{1/2} \approx 0,33 \frac{\varepsilon^{4/9} d_i^{7/9}}{\nu^{1/3}} \left(\frac{\rho_i - \rho_M}{\rho_M} \right), \quad (8)$$

где ε – рассеяние энергии диссипации, которая в нашем случае имеет значения $\varepsilon < 1000 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; ν – кинематическая вязкость расплава, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; ρ_i и ρ_M – плотность включения и металла соответственно, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Константу скорости процесса столкновения пузыря с включением можно представить как

$$\beta_{ПВ} = 5 \left(\frac{d_b + d_n}{2} \right)^2 (\bar{U}_b^2 + \bar{U}_n^2)^{1/2}. \quad (9)$$

По данным работ [5, 6] уравнение (9) применимо для оценки эффективности удаления включений более 20 мкм. Расчет константы скорости, а соответственно и скорости столкновения пузырей с включением под действием турбулентности приведен на рис. 2.

Из этих данных видно, что увеличение рассеяния энергии диссипации и размера пузыря приводит к увеличению скорости и эффективности столкновения, а, следовательно, и рафинирования.

Как известно, размер пузыря в большей степени зависит от расхода газа. Так, по данным работы [6] размер пузыря при турбулентном режиме продувки можно рассчитать согласно уравнению

$$d_n = \left(\frac{6,828}{\pi} Q_r^{1,2} \cdot g^{-0,6} \right)^{1/3}, \quad (10)$$

где Q_r – расход газа, $\text{л} \cdot \text{мин}^{-1}$; g – ускорение силы тяжести, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$.

При этом необходимо учитывать тот факт, что пузырь при достижении критического размера разрушается. По данным работ [6, 7] критический размер пузыря может быть найден как

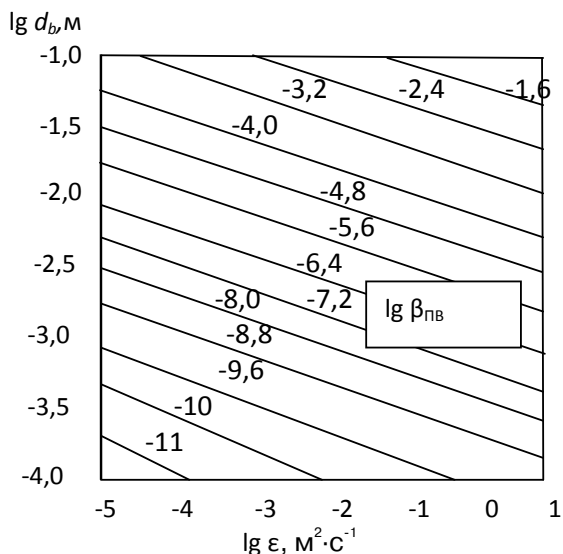


Рис. 2. Рассчитанные значения констант скоростей процесса столкновения между пузырьем и включением при различных

$$d_{n, \text{крит}} = \left(\frac{2,11 \cdot \sigma_M}{\rho_M (\varepsilon \cdot 10^4)^{0,66}} \right)^{0,6} 10^{-2}, \quad (11)$$

где σ_M – поверхностное натяжение расплава металла, Н · м⁻¹.

Принимая во внимание вышеприведенные рассуждения, в данной работе был проведен теоретический анализ влияния расхода газа на диаметр пузыря с целью определения оптимальных условий продувки.

Проведенные расчеты показали, что в условиях продувки стали в промежуточном ковше при $\varepsilon = 800 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ критический размер пузыря ($d_{n, \text{крит}}$) составляет 6 мм. С использованием уравнения (10) были произведены расчеты диаметра образующегося пузыря при различных расходах инертного газа, табл. 1.

Таблица 1. Размер образующегося пузыря при различных расходах инертного газа

$Q_1, \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$	9	10	11	12	13
$d_n, \text{ мм}$	4,7	5	5,4	5,7	6

Данные таблицы свидетельствуют, что наилучшие результаты достигаются при расходе газа в пределах 10-12 л · мин⁻¹.

Для подтверждения данных теоретических расчетов в работе были проведены промышленные испытания в условиях конвертерного цеха ПАО МК «Азовсталь» с целью определения наилучших условий рафинирования стали от неметаллических включений. Для этого была изготовлена опытная партия фурм (150 шт) длиной 850 мм и сечением 70x80 мм. Материалом фурм служил высокоглиноземистый шамот, содержащий не менее 75 % Al₂O₃.

Фурмы устанавливали на определенном расстоянии от перегородки на правом ручье. Таким образом, металл левого ручья не обрабатывали инертным газом.

Получение и обработка расплавов

Сравнительная раздаточная камера была оснащена реакционной камерой, оборудованной двумя перегородками.

Методика проведения промышленных испытаний основывалась на исследовании проб металла, взятых из кристаллизаторов опытного и сравнительного ручьев. Образцы для исследования отбирались из готовой продукции. Загрязненность стали определяли на полированных шлифах на микроскопе «Ахисверт-200» в светлом, темном и DIC полях при увеличении 100 по ГОСТу 1778-70. Всего было разлито 5 серий по 6-8 плавов в каждой. В ходе исследований разлиты серии для стали марки К-60. Характерные результаты выполненных металлографических исследований по оценке среднего балла неметаллических включений приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка качества поверхности опытных и сравнительных слябов стали марки К-60

Номер плавки	Сляб	Q_r , л · мин ⁻¹	Дефекты, балл		
			сульфиды	силикаты хрупкие	силикаты недеформируемые
1512943 2512903	сравнительный опытный	9	<u>0,5</u> 0,5	<u>4</u> 3,8	<u>4</u> 3,9
1512846 1512943	– " –	10	<u>0,5</u> 0,48	<u>3,9</u> 1,8	<u>3,5</u> 2,8
1512853 1512950	– " –	11	<u>0,5</u> 0,47	<u>3,8</u> 1,39	<u>3,33</u> 2,6
1512891 1512960	– " –	12	<u>0,5</u> 0,48	<u>4</u> 2	<u>3</u> 2,5
1512901 1512964	– " –	13	<u>0,5</u> 0,5	<u>3,8</u> 4	<u>2</u> 2,5

Данные таблицы свидетельствуют, что наилучшие результаты по рафинированию стали от неметаллических включений достигаются при расходе газа 10-12 л · мин⁻¹, так, содержание силикатов хрупких, размером > 20 мкм снижается на 44 %, а силикатов недеформируемых – на 25 %.

Выводы

В результате проведенных теоретических исследований и промышленных испытаний установлено, что при продувке металла через многоканальную протяженную фурму в условиях турбулентности оптимальным следует считать пузырь размером 5 мм, который достигается при расходе газа 10-12 л · мин⁻¹.



Список литературы

1. Modeling Study of the Vortex and Short Circuit Flow Effect on Inclusion Removal in a Slab Tundish / S. Garcia-Hernandez, J. J. de Barreto, J. A. Ramos-Banderas and et. el. // Steel Research-International. – 2010. - Vol. 81, № 36. - P. 453-460.
2. Минаев Ю. А., Яковлев В. В. Физико-химия в металлургии. – М.: МИСИС, 2001. – 320 с.
3. Thomas B. , Huang X. , Sussman R. Simulation of Argon Gas Flow Effects in a Continuous Slab Caster// Metallurgical and Materials Transaction B. – 1994. – Vol. 25 B. – P. 527-547.
4. Modelling of Inclusion Motion and Flow Patterns in Swirling Flow Tundishes with Symmetrical

Получение и обработка расплавов

- and Asymmetrical Structures / Q. Hou, Q. Yue, H. Wang and et. el. / ISIJ International. – 2008. – Vol. 48, № 6. – P. 787-792.
5. Zhang L., Taniguchi S., Matsumoto K. Water Model Study on Inclusion Removal from Liquid Steel by Bubble Flotation under Turbulent Conditions // Ironmaking and Steelmaking. – 2002. – Vol. 29, № 5. – P. 326-336.
 6. Zhang L., Taniguchi S. Fundamentals of Inclusion Removal from Liquid Steel by Bubble Flotation // International Materials Reviews. – 2000. – Vol. 45, № 2. – P. 59-82.
 7. Wang L., Lee H. G., Hayes P. Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal from Molten Steel by Flotation // ISIJ International. – 1996. – Vol. 36, № 1. – P. 7-16.
 8. Nguyen A. V., Ralston J., Schulze H. J. On Modelling of Bubble-particle Attachment Probability in Flotation // International Journal of Mineral Processing. – 1998. – Vol. 53, № 4. – P. 225-249.
 9. Model Experiment on Inclusion Removal by Bubble Flotation Accompanied by Particle Coagulation in Turbulent Flow / H. Arai, K. Matsumoto, S. I. Shimasaki and et. el. // ISIJ International. – 2009. – Vol. 49, № 7. – P. 965-974.
 10. Rogler P., Heaslip L. J., Mehrvar M. Inclusion Removal in a Tundish by Gas Bubbling // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2004. – Vol. 43, № 3. – P. 407-416.
 11. Nguyen V., Kmet S. 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. – 1994. – Vol. 40, № 3-4. – P. 155-169.

Поступила 18.03.2013

ВНИМАНИЕ!

Предлагаем разместить в нашем журнале рекламу Вашей продукции или рекламный материал о Вашем предприятии. Редакция также может подготовить заказной номер журнала.

Стоимость заказного номера - 4000 грн.

**Расценки на размещение рекламы
(цены приведены в гривнях)**

Размещение	Рекламная площадь	Стоимость, грн.
Рекламные блоки в текстовой части журнала		
Цветные	1/2 страницы	900
	1/3 страницы	600
	1/4 страницы	300
Черно-белые	1/2 страницы	550
	1/3 страницы	380
	1/4 страницы	200
Цветная реклама на обложке		
Третья страница обложки	1 страница	2800
	1/2 страницы	1400
	1/4 страницы	700
Четвертая страница обложки	1 страница	3100
	1/2 страницы	1550
	1/3 страницы	1000

При повторном размещении рекламы - скидка 15 %

Наш адрес: **Украина, 03680, г. Киев-142, пр. Вернадского, 34/1**
Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины
телефоны: (044) 424-04-10, 424-34-50
факс: (044) 424-35-15; E-mail: proclit@ptima.kiev.ua