

УДК 669.046.554:669.184.132:53.072

Волкова Е.И. – к.т.н., зав. лаб., Институт производства чугуна и стали, Технический Университет «Горная академия Фрайберг» (IEST TUBAF)

Рябов Д.Ю. – ас., IEST TUBAF

Шеллер П.Р. – д.т.н., проф., IEST TUBAF

ОБРАЗОВАНИЕ ГАЗОВОЙ СТРУИ И РАЗРЫВ ШЛАКОВОГО СЛОЯ ПРИ ПРОДУВКЕ ЖИДКОЙ СТАЛИ ГАЗОМ В КОВШЕ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ

Продувку инертным газом используют для гомогенизации химического состава и температуры, для удаления неметаллических включений и для легирования. Знание характеристик двухфазового потока при этом важно для оптимизации и управления перечисленными процессами. Были проведены промышленные и лабораторные исследования геометрических и скоростных характеристик двухфазового потока, а также геометрии разрыва шлакового слоя. Геометрические характеристики и скорость движения двухфазового потока показывают сильную зависимость от вдуваемого количества аргона. Анализ подобия показал, что критерий Мортонна подходит для моделирования процесса продувки жидкой стали газом. Экспериментальные исследования подтвердили хорошую сходимость результатов между лабораторными и производственными агрегатами.

Ключевые слова: продувка стали, продувочное пятно, двухфазовый поток, диаметр пузырька, гидравлическая модель, физическое подобие.

Введение

В данной работе представлены результаты промышленных и лабораторных исследований образования двухфазового потока, продувочного пятна и разрыва шлакового слоя при продувке жидкой стали в ковше. Продувку инертным газом используют для гомогенизации химического состава и температуры, для удаления неметаллических включений и для легирования. Промышленные исследования проводились в заводских условиях в 30-тонном ковше. Во время лабораторных исследований использовалась гидравлическая модель ковша (масштаб 1:4,5), причём расходы газа устанавливались в соответствии с критерием подобия Мортонна.

Постановка задачи

Использование гидравлических моделей для изучения гидродинамики продувки жидкой стали газом не ново. Процессы перемешивания и разрыва шлакового слоя при продувке, используя гидравличе-

ские модели с различными маслами, были изучены в [1 – 8]. При этом, площадь разрыва шлакового слоя или размер продувочного пятна измерялись как функции геометрии газового сопла, количества сопел, скорости продувки, соотношения диаметра и высоты ковша, а также толщины шлакового слоя. В качестве критерия подобия в работе [4 – 5] использовался критерий Фруда, а в работах [6] и [8] следующие функции:

$$\dot{V}_{\text{модель}} = \lambda^{2,75} \dot{V}_{\text{ковш}}, [\text{м}^3/\text{с}]; \quad (1)$$

$$\dot{V}_{\text{модель}} = \lambda^{2,5} \dot{V}_{\text{ковш}}, [\text{м}^3/\text{с}], \quad (2)$$

где λ – масштаб геометрического подобия.

Целью данной работы являлось изучение гидродинамики образования двухфазового потока (размер пузырьков, угол раскрытия струи, скорость двухфазового потока, размер продувочного пятна) и разрыва шлакового слоя как функции скорости продувки в лабораторных и промышленных условиях. Кроме того, был проведен анализ подобия и найден необходимый критерий для условий продувки.

Экспериментальная часть

Лабораторные исследования проводились в гидравлической модели диаметром 445 мм и высотой 500 мм, выполненной из плексигласа. В качестве жидкой стали использовалась вода, шлака – масло, продувочного газа – аргон. При этом, высота слоя воды была 440 мм, а высота слоя масла 6 мм. Исследования проводились как с маслом, так и без. Для подвода аргона в центр днища модели была встроена пористая пробка диаметром 30 мм. Для определения скорости двухфазового потока, диаметра пузырьков и угла раскрытия струи использовалось лазерное оборудование по методам PIV (particle image velocimetry) и PLIF (planar laser-induced fluorescence). Диаметр продувочного пятна и разрыва шлакового слоя измерялся с помощью программы «Image C» по фотографиям, полученным во время съемки процесса CCD-камерой.

Промышленные исследования проводились в 30-тонном ковше VOD-(вакуум-кислородное обезуглероживание)-процесса. При этом высота слоя жидкой стали была 190 – 220 см, а соотношение диаметра и высоты было 1,1 – 1,2. Аргон подавался в днище ковша через пористую пробку диаметром от 6 до 10 см в зависимости от износа. С целью измерения геометрии продувочного пятна, в ковш с жидкой сталью, без шлака, опускался на 15 – 30 с стальной лист толщиной 5 мм. Профиль листа после оплавления измерялся. Скорость движения отдельных пузырьков в двухфазовой струе была определена в «спокойном»

ковше путем быстрого (время менее 1 с) открывания преднастроенной газовой задвижки. Скорость продувки составляла 35 – 230 нЛ/мин. Исходя из диаметра, высоты продувочного пятна (профиль оплавленного листа) и скорости движения пузырьков, с помощью методики, описанной в [9], были рассчитаны скорость двухфазового потока, диаметр пузырьков и угол раскрытия струи.

Анализ подобия

При анализе подобия было принято, что процесс продувки жидкой стали газом в ковше зависит от следующих параметров: плотность жидкости ρ_l [кг/м³], плотность газа ρ_g [кг/м³], динамическая вязкость жидкости η_l [кг/(с·м)], диаметр сопла d [м], скорость газа v_g на выходе из сопла [м/с], ускорение силы тяжести g [м/с²], поверхностное натяжение σ [кг/с²].

Для нахождения решения использовался матричный метод Крамера. Решение показало, что процесс продувки может быть модифицированным критерием Мортонна:

$$Mo = \frac{(\rho_l - \rho_g)^3 g^2 d \eta_l^4}{\sigma^6 \rho_g^4 v_g^2} = \frac{Eo^3 Fr^2}{Re^4}, \quad (3)$$

где Eo – Оетвос, Fr – Фруд и Re – Рейнольдс критерии.

При проведении исследований на гидравлической модели в качестве критерия подобия использовался критерий Мортонна. Свойства воды, стали и аргона для расчета Мортонна приведены в таблице 1. В таблице 2 приведены рассчитанные для промышленных и лабораторных условий критерии Мортонна и расходы газа.

Таблица 1
Свойства воды, стали и аргона

	Плотность [кг/м ³]		Динамическая вязкость [Па·с]	Поверхностное натяжение [кг/с ²]
Сталь	7000		0,004998	1
Вода	998,2		0,001001	0,073
Аргон	25 °С	1550 °С	22,7·10 ⁻⁶	–
	1,662	0,275		

Таблица 2

Рассчитанные критерии Мортонна и скорости продувки

Критерий Мортонна		Расход аргона	
Промышленный 30т. ковш	Гидравлическая модель	Промышленный 30т. ковш [нЛ/мин]	Гидравлическая модель [Л/ч] при 3 атм
11582	11582	35	15
3941	3941	60	25
985	985	120	50
438	438	180	75
246	246	240	100

Результаты

В таблице 3 представлены значения угла раскрытия струи и диаметра продувочного пятна. Экспериментально полученные лабораторные данные по углу раскрытия двухфазной струи полностью совпадают с промышленными результатами, полученными в ходе исследований в 30-тонном ковше. Соотношение диаметров продувочных пятен лабораторных и промышленных исследований равно приблизительно 4,5, что соответствует геометрическому подобию гидравлической модели.

Таблица 3

Угол раскрытия двухфазной струи и диаметр продувочного пятна

Критерий Мортонна	Расход аргона		Угол раскрытия струи [°]		Диаметр продувочного пятна при работе без шлака/ масла [мм]		
	30т ковш [нЛ/мин]	модель [Л/ч], 3 атм	30т- ковш	модель	30т- ковш	модель	соотношение
11582	35	15	3,06	3,56	603,52	143	4,22
3941	60	25	4,38	4,79	658,27	153	4,30
985	120	50	6,93	5,77	789,67	169	4,67
438	180	75	9,07	8,01	921,07	200	4,61
246	240	100	10,98	9,46	1052,47	231	4,56

Наблюдаемый разрыв шлака и высота подъема жидкой стали показаны на рис. 1. С повышением расхода аргона увеличивается как диаметр разрыва, так и высота поднятия жидкой стали. Подъем стали имеет максимальную высоту в центре разрыва. Диаметр увеличивается с увеличением расхода газа, а высота подъема зависит от количества газа и кинетической энергии потока.

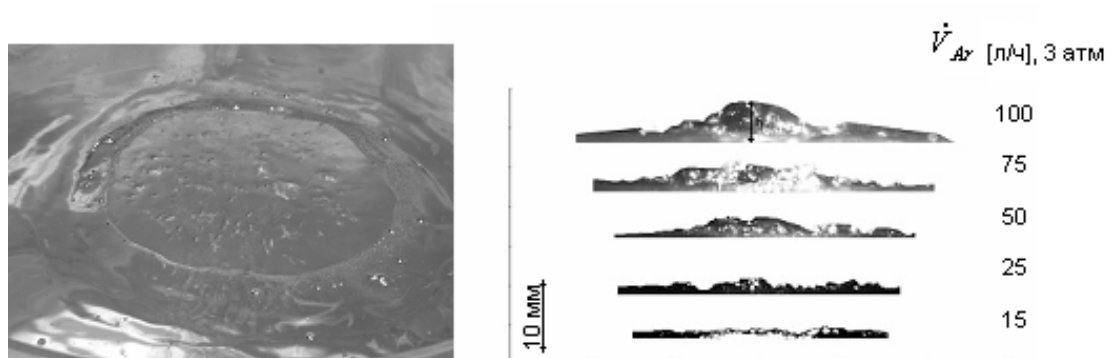


Рис. 1. Разрыв шлака и высота поднятия жидкой стали в гидравлической модели

Скорость подъема пузырьков была исследована в «спокойном» ковше путем быстрого (время менее 1 с) открывания преднастроенной газовой задвижки, рис. 2. Экстраполяцией полученных значений установили, что скорость движения пузырька при расходе газа, близком к нулю, составляет 37 см/с. С помощью уравнения Мендельсона (4)

$$v_b = \left(\frac{2\sigma}{\rho_l \cdot d_b} + \frac{1}{2} g \cdot d_b \right)^{0,5}, \quad (4)$$

где v_b скорость пузырька [м/с], d_b диаметр пузырька [м], был вычислен эквивалентный средний диаметр пузырька в 30-ковше. При значении 37 см/с средний диаметр пузырька равен 2,5 см для раскисленных плавов.

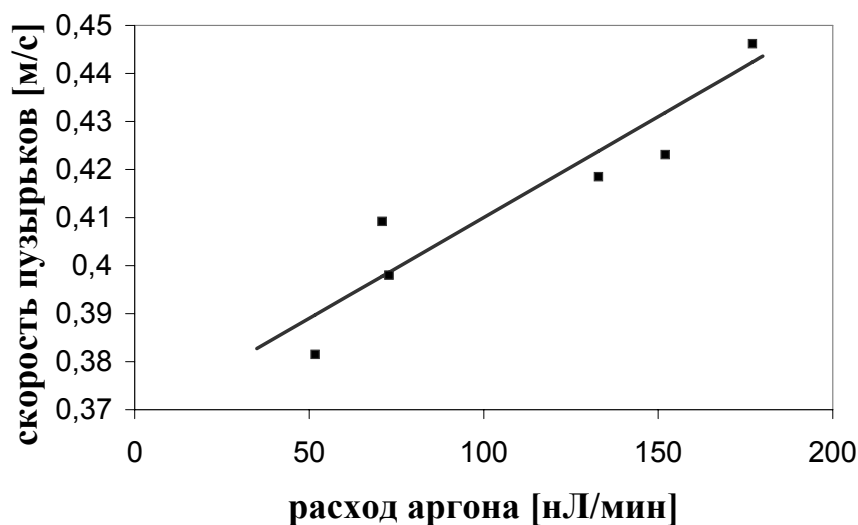


Рис. 2. Скорость отдельных пузырьков в двухфазовом потоке в 30т-ковше

Размер газовых пузырьков изменяется по высоте гидравлической модели и увеличивается с повышением расхода газа, рисунок 3. Двухфазовый поток ускоряется по высоте ковша, а также его скорость растет с увеличением расхода газа, рисунок 4.

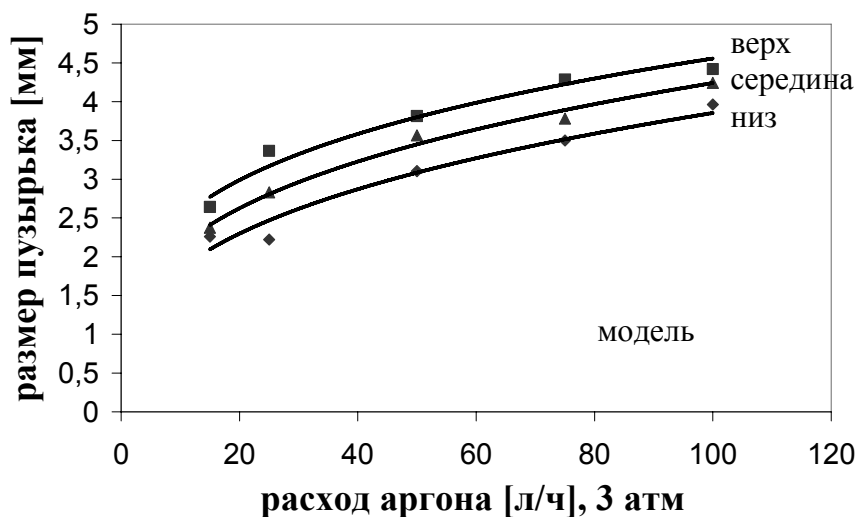


Рис. 3. Измеренный диаметр пузырьков, гидравлическая модель

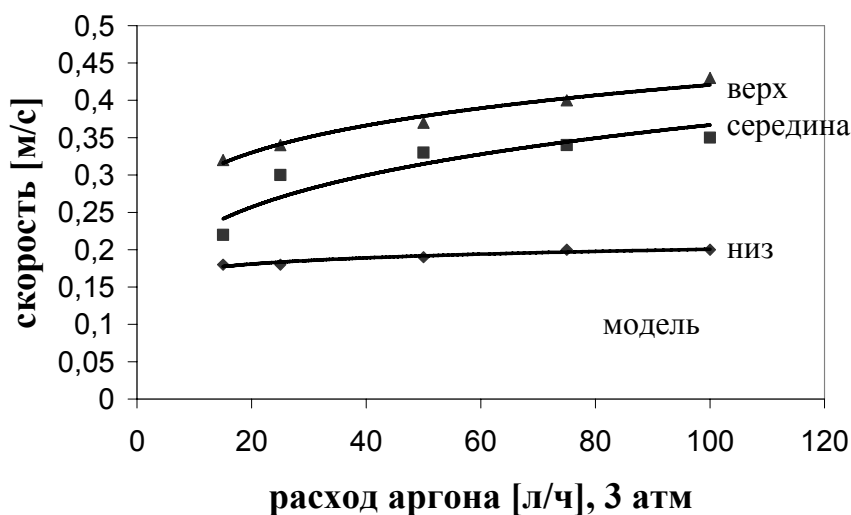


Рис. 4. Измеренная скорость двухфазового потока, гидравлическая модель

Диаметр разрыва шлакового слоя увеличивается с повышением расхода газа и уменьшается с утолщением шлакового слоя, рисунок 5.

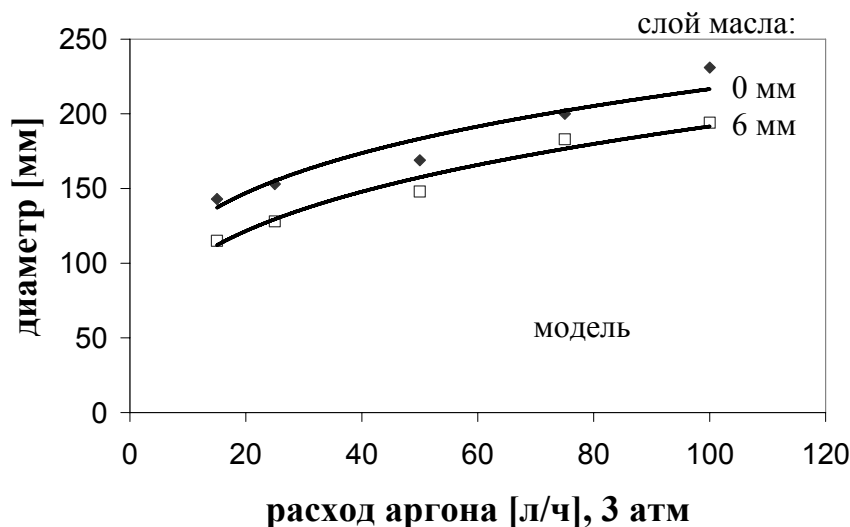


Рис. 5. Діаметр розрива шлакового слоя, гидравлическая модель

Выводы

Геометрические характеристики и скорость движения двухфазового потока показывают сильную зависимость от вдуваемого количества аргона. Анализ подобия показал, что критерий Мортон подходит для моделирования процесса продувки жидкой стали газом. Экспериментально подтверждена хорошая сходимость результатов лабораторных и производственных исследований.

Список литературы

1. Dayal P. Study of slag/metal interface in ladle treatment / P. Dayal, K. Beskow, J. Bjorkvall // Ironmaking and Steelmaking. – 2006. – № 6. – С. 454–464.
2. Sand U. Control of gas bubbles and slag layer in a ladle furnace by electromagnetic stirring [Электронный ресурс] : AISTech 2008, Iron and Steel Technology Conference / U. Sand, Y. Hongliang, Y.E. Eriksson, Fdilla B. Rebei – 80 Min / 700 MB. – Pittsburgh : Iron and Steel Technology Conference, 2008. – (AISTech) – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; 12 см. – Систем. вимоги : Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows 95, 98, 2000, XP ; MS Word 97-2000. – Назва з контейнера.
3. Sand U. Study on fluiddynamic features of combined gas and electromagnetic stirring in ladle furnace / U. Sand, Y. Hongliang, Y.E. Eriksson, Fdilla B. Rebei // Scanmet, 3rd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking. – 2008. – С. 459–468.
4. Smirnov A. Optimization of argon-injection process parameters for ladle treatment of steel / A. Smirnov, S. Eronko, I. Kovalenko, R. Giessen // EOSC, 5th European Oxygen Steelmaking Conference. – 2006. – № 5. – С. 272 – 279.

5. Maruoka N. Influence of bottom stirring conditions on gas-liquid reaction rate / N. Maruoka, F. Lazuardi, T. Maeyama, H. Nogami // Scanmet, 3rd International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking. – 2008. – С. 449–458.

6. Dong-Yuan Sheng Study on steel/slag interaction in a gas stirring ladle by numerical simulation and physical modelling experiment / Sheng Dong-Yuan // Clean Steel, 7th International Conference on Clean Steel. – 2007. – С. 183–192.

7. Krishnakumar K. A model study of slag eye formation during gas purging at the surface of a metal bath / K. Krishnakumar, G.A. Irons // ICS 2005, 3rd International Congress on the Science and Technology of Steelmaking. – 2005. – № 1. – С. 833 – 844.

8. Pereira J. A. M. Variation on the geometric profile of a steelmaking ladle and its effect on the mixing / J. A. M. Pereira, M. G. Francois, J. L. D. Ribero, A. C. F. Viela // Steel Grips. – 2006. – № 1. – С. 34–39.

9. Steinmetz E. Beitrag zu den Stroemungsverhaeltnissen in einer Spuelsteinpfanne / E. Steinmetz, P.R. Scheller // Stahl und Eisen. – 1987. – № 9. – С. 57–65.

Рукопись поступила 10.06.2009 г.