

19. *Скребцов А. М.* О механизме плавления стального лома в промышленных агрегатах выплавки металла // Тепло- и массообмен в ваннах сталеплавильных агрегатов. – М.: Металлургия, 1970. – С. 65-68.
20. *Никитин В. И.* Наследственность и технологии генной инженерии в литых сплавах // Литейн. пр-во. – 2002. – № 10. – С. 8-10.
21. *Скребцов А. М.* Температура ликвидус сплава как характеристика кинетики распада кластеров в жидком металле // Процессы литья. – 2004. – № 2. – С. 22-28.
22. *Путилов К. А.* Курс физики. – М.: ГИТТЛ, 1954. - Т. 1. – 708 с.

Поступила 02.12.2008

УДК 621.745.56:538.4

А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, Е. В. Ошовская, С. Жемеров, К. Е. Писмарев*

Донецкий национальный технический университет МОН Украины, Донецк

*ОАО «Алчевский металлургический комбинат», Алчевск

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ ПРОДУВКЕ МЕТАЛЛА В КОВШЕ ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ. Сообщение 3

Рассмотрены результаты физического моделирования процессов перемешивания жидкости в ковше при продувке через один или два продувочных узла, в частности, исследовано влияние толщины шлакового слоя, расхода вдуваемого газа, а также количества и расположения продувочных узлов на поведение шлаковой фазы. Предложены оригинальные эмпирические зависимости между площадью оголения «металла» и основными управляющими факторами.

Розглянуто результати фізичного моделювання процесів перемішування рідини в ковші при продувці через один або два продувочних вузли. Зокрема, було досліджено вплив товщини шлакового шару, а також кількості та положення продувочних вузлів на поведінку шлакової фази. Запропоновано оригінальні емпіричні залежності між площею оголення «металу» та головними управляючими факторами.

Results of physical modeling mixing processes in the ladle for injection with one or two purging plugs had been presented. In particular influence of thickness layer, consumption of injection gas, quantity and position purging plugs on behavior slag in ladle had been research. Original empiric formulas between area spout eyes in "metal" and basic control factors had been obtained.

Ключевые слова: металл, ковш, продувочный узел, инертный газ, инжектирование, интенсивность перемешивания.

В сообщениях 1, 2 [1, 2] были обсуждены современные методы, применяемые для оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Показано, что известные из литературных источников выражения и зависимости не учитывают ряд весьма важных с точки зрения металлургической технологии параметров (например, расположение продувочного узла в днище ковша, количество продувочных узлов, уровень жидкости в ковше и другие), что практически исключает их применение для конкретных металлургических ковшей. В результате экспериментов, выполненных на физической модели, получен массив количественных данных, позволяющих проследить влияние основных технологических факторов (количество и место расположения продувочных узлов, расход вдуваемого газа, конфигурация ковша и другие) на интенсивность перемешивания жидкости в ковше. Математическая обработка этих данных позволила получить эмпирические выражения для расчета времени перемешивания

жидкости для одного и двух продувочных узлов. Применение полученных выражений дает возможность более обоснованно подходить к вопросу оптимизации конструктивных и технологических параметров перемешивания расплава в сталеразливочном ковше от выпуска до разливки как в действующих сталеплавильных цехах, так и на стадии проектирования и реконструкции оборудования.

Техника компенсации тепловых потерь металла в сталеразливочном ковше существенно расширила возможности организации шлакового режима как ключевого фактора внешнего воздействия на процесс рафинирования жидкой стали [3, 4]. При этом наряду с традиционными функциями (экстракционные процессы, ассимиляция неметаллических включений, снижение потерь тепла зеркалом металла и другие) в рамках современной системы технологий роль шлака в существенной степени проявляется при нагреве стали электрической дугой, легировании, а также в ходе ковшового вакуумирования. Управление поведением шлака при десульфурации, вводе ферросплавов, нагреве металла и снижении теплотерь осуществляется, как правило, с помощью инжектирования инертного газа в металлическую ванну.

Для эффективной организации той или иной технологической операции выбирают оптимальную интенсивность перемешивания расплава. Так, если максимальной интенсивностью продувки считать расход инертного газа, который обеспечит надежное усвоение ферросплавов, то для проведения операций ожидания, нагрева и десульфурации значения интенсивности составят примерно 20, 30, 50 % от ее величины соответственно. При этом удельный расход инертного газа за период продувки в сталеразливочном ковше обычно достигает 0,40–0,60 м³/т.

В связи с вышеизложенным, от поведения шлаковой ванны при вдувании инертного газа в металл существенным образом зависят вторичное окисление стали, условия дугового нагрева, тепловые потери и износ футеровки. Таким образом, основная задача выбора режима продувки для проведения конкретной операции требует учета достаточно большого количества внешних факторов.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния толщины шлакового слоя, расхода вдуваемого газа, а также количества и расположения продувочных узлов на поведение шлаковой фазы. В качестве критерия, по которому количественно оценивали поведение шлаковой фазы, использовали величину площади оголения поверхности «металла» в зоне выхода газовой струи при продувке.

Известно, что при вдувании инертного газа в жидкую ванну ковша пузырьки газа поднимаются в потоке газожидкостной смеси, которая образует приподнятую область или так называемый «глаз» на поверхности расплава. Восходящий поток смеси газа и металла частично отражается от поверхности и отодвигает шлаковый слой к периферии зеркала ковша. Если шлаковый слой достаточно тонкий, данный процесс приводит к образованию оголенной области жидкого металла, подверженной атмосферному воздействию. Необходимо отметить, что процесс образования «глаза» достаточно недавно стал предметом серьезных исследований [5–8]. При этом до настоящего времени в литературе не представлены исследования о поведении шлака в зоне выхода газовой струи при различном положении продувочного узла в днище, а также сравнительные исследования при продувке через один и два продувочных узла.

Исследования проводились на физической «холодной» модели сталеразливочного ковша. Модель ковша выполнена в виде цилиндрического сосуда с внутренним диаметром 0,24 м и высотой 0,45 м, оснащенного продувочными узлами. Конструкция модели позволяла изменять количество продувочных узлов (один или два) и их положение в днище. Положение двух продувочных узлов в днище ковша определялось углом, который измерялся в горизонтальной плоскости относительно вертикальной оси ковша. Учитывая специфику работы агрегата ковш–печь, заключающуюся в расположении трех электродов в центральной части зеркала шлака, для исследований были выбраны углы в 60 и 135° как наиболее характерные. В качестве жидкостей, моделирующих расплав стали и шлака, применяли соответственно воду и силиконовое масло, имеющие различную вязкость при разной температуре. Для продувки использовали сжатый воздух. Физические свойства моделирующих жидкостей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физические свойства моделирующих жидкостей

Жидкость	Плотность, кг/м ³	Вязкость, Па · с
Вода	1000	0,001
Силиконовое масло	935	0,1-0,5 (в зависимости от температуры)

В ходе продувки на поверхности жидкости образовывалась зона выхода газовой струи, форму и положение которой фиксировали с помощью цифровой видеокамеры. Все эксперименты проводились при одинаковой высоте воды в сосуде, равной 0,24 м, диапазон изменения остальных факторов эксперимента приведен в табл. 2. Каждый опыт повторялся 3 раза.

Таблица 2. Диапазон изменения факторов эксперимента

Фактор	Диапазон значений
Расход газа, л/мин	0,1-0,6
Толщина слоя масла, мм	5-30
Количество продувочных узлов	1 или 2
Радиальное расположение продувочного узла относительно вертикальной оси модели, м: – при одном продувочном узле – при двух продувочных узлах	0 0,12
Угол между двумя продувочными узлами, град	60; 135

Полученные изображения зоны выхода газовой струи обрабатывали на компьютере с помощью специального программного обеспечения, позволяющего четко выделить границы оголенной части «металла» и оцифровать координаты граничных точек. После чего по известной методике рассчитывали их площадь.

В ходе экспериментов установлены следующие характерные варианты поведения «расплава» при продувке:

- в зоне выхода газовой струи не происходит явного оголения «металла» (рис. 1, *а* - одно продувочное устройство);
- оголяется центральный участок «металла» в зоне выхода газовой струи, при этом значительная часть его поверхности находится под «шлаком» (рис. 1, *б* - два продувочных устройства);
- «металл» оголяется по всей площади выхода каждой из газовых струй (рис. 1, *в* - два продувочных устройства);
- «металл» оголяется по всей площади выхода каждой из газовых струй при слиянии двух зон продувки в общее пятно (рис. 1, *г* - два продувочных устройства).

В ходе экспериментов установлено, что при продувке через один центрально расположенный узел «металл» в зоне выхода продувочного газа оголяется практически при всех вариантах продувки, за исключением режима минимального расхода газа (0,1 л/мин) при максимальной толщине слоя масла (25-30 мм).

На основании визуальных наблюдений, выполненных на «плоской» модели (рис. 2, *а, б*), установлено, что характер раскрытия поверхности металла в зоне «глаза» определяется интенсивностью дувания газа, толщиной «шлака» и имеет ряд особенностей. Так, когда газожидкостная струя находится на небольшом расстоянии от поверхности «металла» (1,0-1,5 радиуса струи), она расширяется, двигаясь преимущественно вверх. Этот динамично изменяющийся поток смещает верхний слой «шлака» к стенкам сосуда, тем самым формируя зону выхода газа. При этом восходящая струя должна иметь достаточно высокий энергетический потенциал, необходимый для поднятия струи выше уровня «шлака».

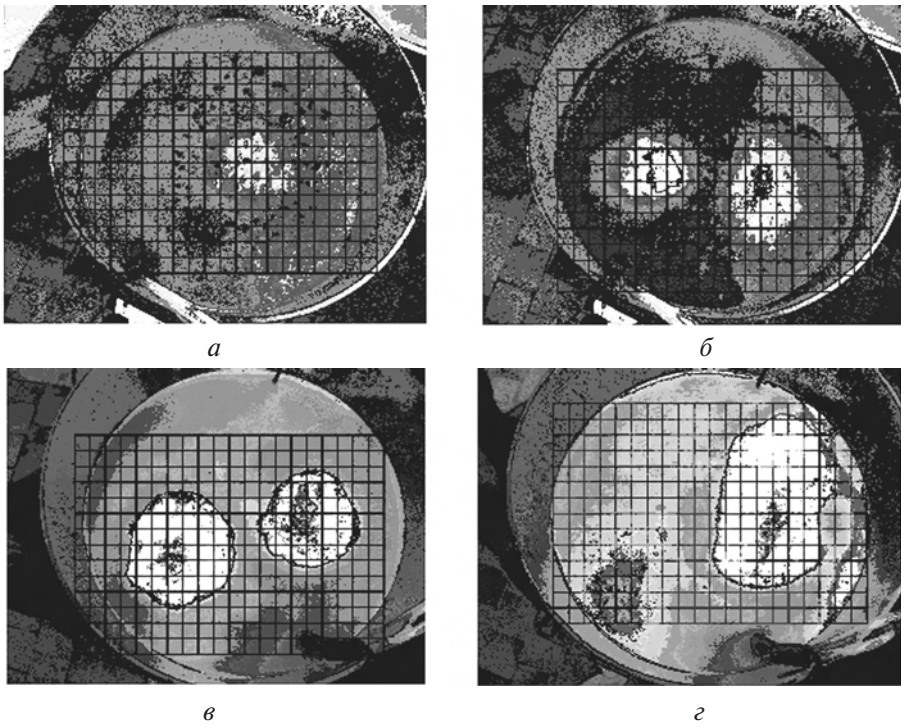


Рис. 1. Основные варианты поведения «шлака» при продувке: *а* - поверхность металла не оголяется (продувка одной пробкой); *б* - на поверхности «металла» образуется бурун (продувка одной пробкой); *в, г* - буруны при продувке через две пробки

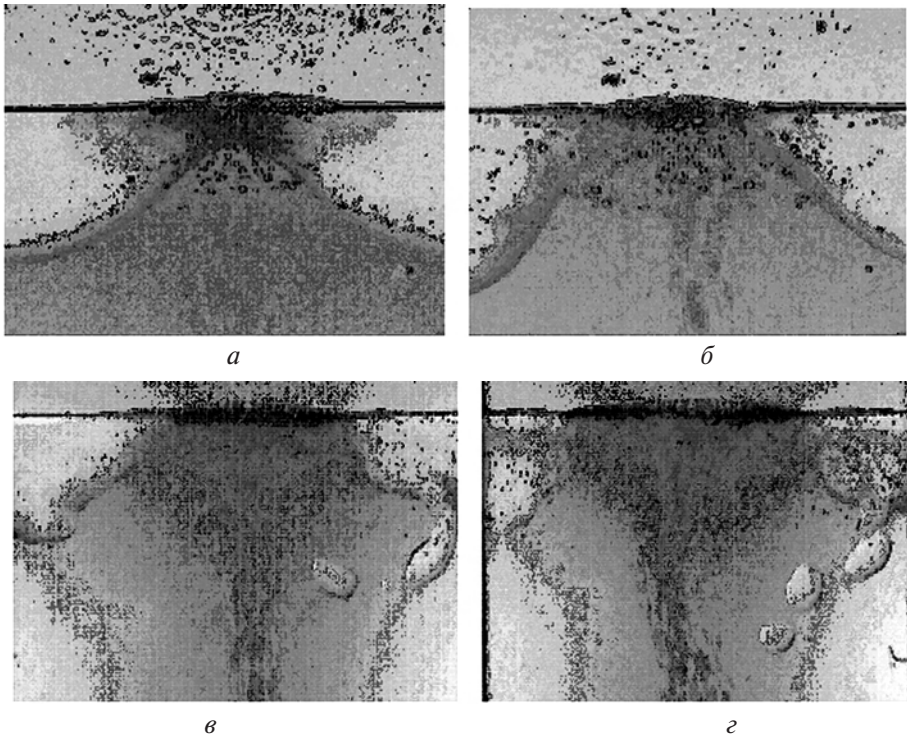


Рис. 2. Характер перемешивания «шлака» и «металла» при продувке с разной интенсивностью через одну пробку, установленную в днище ковша

Получение и обработка расплавов

Между тем, на периферии «глаза» формируется зона, в которой потоки «металла» стекают вниз вдоль границы со «шлаком». Таким образом, уравнивание инерционных сил восходящего и стекающего вниз потоков в области «металл-шлак» способствует формированию более плотного «металлического» столба при меньшем «шлаковом» слое. При этом поток стекающей жидкости может разрушать окружающий его шлак при условии достаточно интенсивной продувки (рис. 2 в, з).

Также установили, что вязкость жидкости верхнего «шлакового» слоя оказывает ничтожное влияние на размер и форму «глаза». Отметили, что при более вязком состоянии силиконового масла требовалось больше времени для образования «глаза», но его размер в устойчивом состоянии получался таким же, как и в случае с менее вязким маслом. Следовательно, для таких систем влияние вязкого рассеивания и сопротивления между слоями весьма ограничено.

При продувке через два продувочных узла, разнесенных в днище ковша под углом 60°, не происходило оголения «металла» в зоне выхода вдуваемого газа при минимальном его расходе и максимальной толщине слоя шлака (0,1 л/мин и 25-30 мм соответственно), что полностью соответствует ситуации с продувкой через один продувочный узел. Вместе с тем, при повышении расхода газа на поверхности масла отмечалась только одна зона оголения. В случае снижения толщины шлака наблюдалось образование двух отдельных зон оголения «металла», объединение которых происходило при увеличении расхода газа до 0,2 л/мин и выше.

При продувке через два продувочных узла, разнесенных под углом 135°, оголение «металла» в зоне выхода вдуваемого газа происходило при толщине слоя масла 15 мм и расходе газа 0,1 л/мин. При этом увеличение толщины слоя масла до 25-30 мм и расхода газа 0,2 л/мин приводило к оголению «металла» над одним из продувочных узлов. Объединение зон выхода газа в одно общее пятно наблюдали при продувке с расходом 0,3-0,6 л/мин и слое масла толщиной 5-15 мм. В остальных случаях на поверхности масла образовывались две отдельные расположенные зоны выхода газа.

Таблица 3. Сведения о конфигурации зоны выхода газовой струи

Вариант продувки	Толщина слоя масла, мм	Расход газа, л/мин					
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Один продувочный узел	5	1	1	1	1	1	1
	10	1	1	1	1	1	1
	15	1	1	1	1	1	1
	20	1	1	1	1	1	1
	25	×	1	1	1	1	1
	30	×	1	1	1	1	1
Два продувочных узла, 60°	5	2	2o	2o	2o	2o	2o
	10	2	2o	2o	2o	2o	2o
	15	2	2o	2o	2o	2o	2o
	20	2	2	2o	2o	2o	2o
	25	×	1	1	2	2o	2o
	30	×	1	1	1	1	2
Два продувочных узла, 135°	5	2	2	2o	2o	2o	2o
	10	2	2	2o	2o	2o	2o
	15	2	2	2o	2o	2o	2o
	20	×	2	2	2	2	2
	25	×	1	2	2	2	2
	30	×	1	2	2	2	2

Обозначения: 2o – две объединенные зоны; 2 – две отдельные зоны;
1 – одна зона; × – оголение отсутствует

В табл. 3 обобщены сведения о конфигурации зоны выхода газовой струи для всех исследуемых случаев.

Оценка закономерностей изменения площади оголения «металла» в зависимости от расхода газа и толщины слоя масла при продувке через одно отверстие представлено на рис. 3. Так, при увеличении расхода газа с 0,1 до 0,6 л/мин для тонкого слоя масла (5-10 мм) площадь оголения возрастает в 5-6 раз, а для слоя толщины 20-30 мм – в 2,5-4,0. Аналогичные закономерности получены и для двух продувочных узлов (рис. 4).

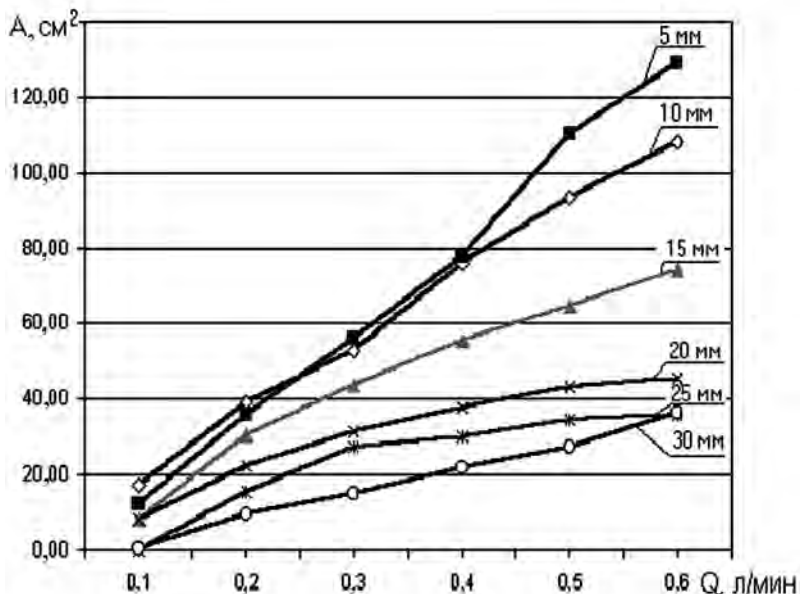


Рис. 3. Изменение площади оголения зеркала «металла» в зависимости от расхода газа при различной толщине слоя масла (продувка через один продувочный узел)

На рис. 4 приведены графики изменения суммарной площади оголения при продувке через два продувочных узла, расположенных под углом 60 и 135°. Видно, что для обоих случаев отмечаются такие же тенденции изменения площади оголения, как при одном продувочном узле.

Для рассматриваемой системы жидкостей (вода-масло) на основании регрессионного анализа полученных данных установили, что площадь оголения находится в линейной зависимости от логарифма толщины слоя шлака δ , которая в общем виде описывается следующим уравнением:

$$S = A + B \cdot \ln \delta, \quad (1)$$

где A, B – коэффициенты регрессии.

В ходе дальнейших исследований определили, что коэффициенты регрессии с достаточной степенью достоверности можно представить следующими функциями, выражающими связь с расходом продувочного газа (в скобках приведена величина достоверности аппроксимации R^2):

- для одной пробки:

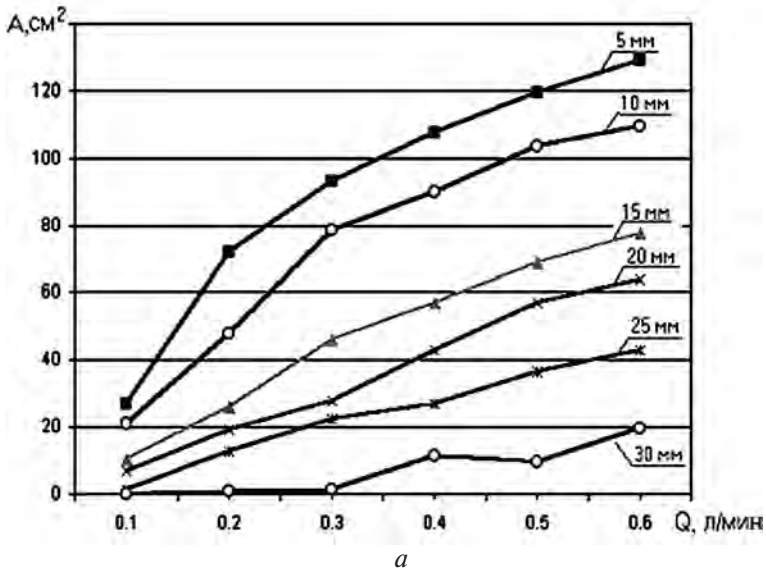
$$A_0 = -80,97Q - 11,12 \quad (0,958);$$

$$B_0 = 340,60Q + 32,54 \quad (0,971);$$

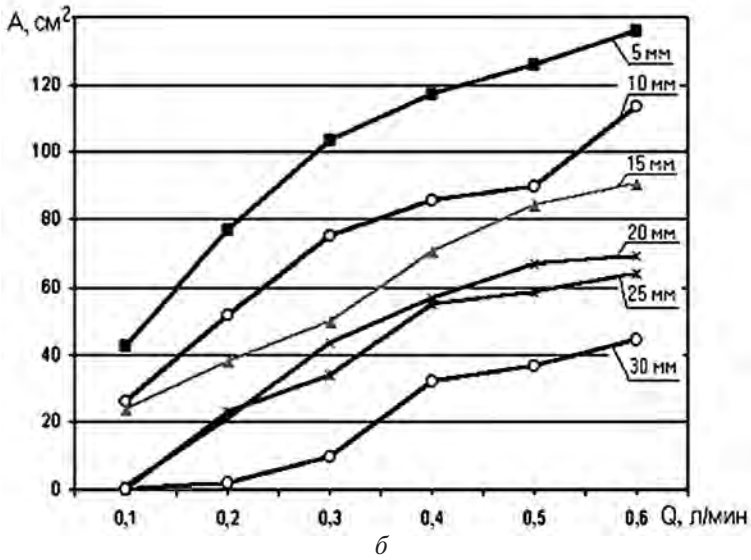
- для двух пробок (60°):

$$A_{60} = -60,82Q - 27,76 \quad (0,896);$$

$$B_{60} = 240,30Q + 77,80 \quad (0,936);$$



а



б

Рис. 4. Изменение суммарной площади оголения зеркала «металла» при различной толщине слоя масла (через два продувочных узла, расположенных под углом 60 (а) и 135° (б))

- для двух пробок (135°):

$$A_{135} = -32,08Q - 31,68 \quad (0,687);$$

$$B_{135} = 234,10Q + 89,13 \quad (0,895).$$

Обобщенные результаты оценки влияния количества продувочных узлов и их расположения представлены в виде соотношения суммарной площади оголения «металла» от толщины «шлака» при продувке через один и два продувочных узла в зависимости от расхода вдуваемого газа (рис. 5).

Для малой толщины слоя «шлака» в случае продувки через одну пробку площадь оголения «металла» минимальна во всем диапазоне изменения расхода продувочного газа. Так, площадь оголения для режима продувки одной пробкой меньше чем двумя на 30-35% при малом расходе газа (0,1 л/мин) и на 5-10% - при высоком (0,6 л/мин). Объяснение этого, на наш взгляд, заключается в том, что при образовании двух зон выхода газа их общая площадь оказывается больше.

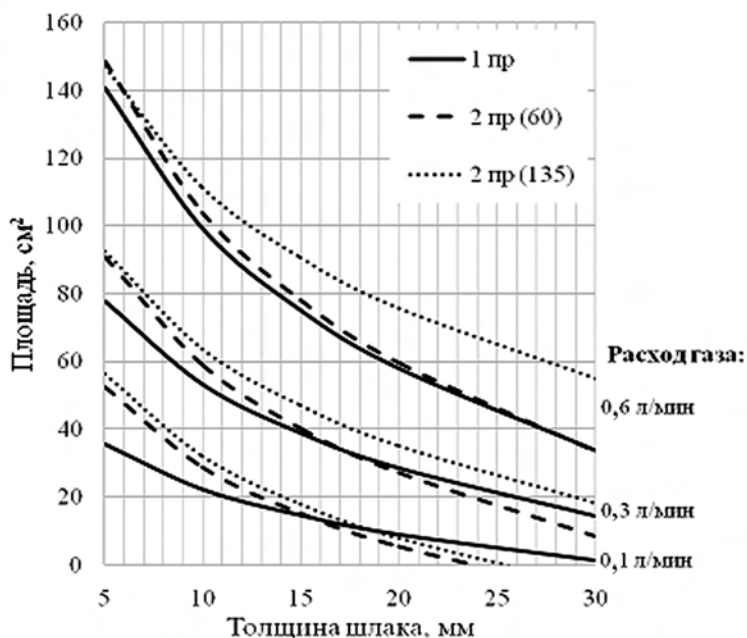


Рис. 5. Изменение площади оголения «металла» при продувке от толщины шлака

Между тем, при большой толщине слоя «шлака» применение двух продувочных пробок позволяет избежать оголения «металла» (продувка с расходом 0,1 л/мин). Действительно, разделение одной газовой струи на две равные части при малом расходе продувочного газа не позволяет каждой из них нарушить сплошность верхнего слоя масла. Увеличение расхода продувочного газа до 0,6 л/мин приводит к тому, что площади зон оголения для режима продувки одной пробкой и двумя (60°) становятся равны, так как газовые струи близко расположенных пробок объединяются. Вместе с тем, в результате применения режима продувки двумя удаленными друг от друга пробками (135°) из-за образования двух зон выхода газа площадь оголения увеличивается на 30 %.

Таким образом, на физической модели исследованы особенности формирования зоны выхода газовой струи при продувке через один и два продувочных узла. Получен массив количественных данных, позволяющих проследить влияние основных технологических факторов (количество и место расположения продувочных узлов, расход вдуваемого газа, толщина слоя «шлака» и др.) на площадь оголения «металла» в ковше. Математическая обработка этих данных позволила получить эмпирические выражения для расчета площади оголения «металла» для одного и двух продувочных узлов.

В результате экспериментов установлено, что характер изменения площади оголения «металла» от толщины слоя «шлака» в случае низкой интенсивности продувки двумя пробками не зависит от их расположения. При этом продувка двумя пробками в сравнении с одной приводит к оголению большей площади «металла» под слоем «шлака» минимальной толщины и меньшей — в случае максимального слоя «шлака».

Картина поведения «шлака» меняется при увеличении интенсивности продувки. Так, в случае максимальной интенсивности продувки характер изменения площади оголения «металла» от толщины слоя «шлака» практически не отличается при продувке одной и двумя пробками, которые расположены под углом 60°, при этом во всем диапазоне толщины шлака для указанных вариантов площадь оголения «металла» меньше, чем для двух пробок (135°).

Применение полученных выражений позволит более обоснованно подходить к вопросу оптимизации конструктивных и технологических параметров перемешивания расплава в сталеразливочном ковше от выпуска до разливки как в действующих сталеплавильных цехах, так и на стадии проектирования и реконструкции оборудования.



Список литературы

1. Смирнов А. Н., Ошовская Е. В., Салмаш И. Н. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 1 // Процессы литья. – 2008. – № 4. – С. 41-48.
2. Смирнов А. Н., Ошовская Е. В., Салмаш И. Н. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 2 // Там же. – 2008. – № 5. – С. 30-35.
3. Смирнов А. Н., Сафонов В. М., Дорохова Л. В., Цупрун А. Ю. Металлургические мини-заводы. – Донецк: Норд-пресс, 2005. – 469 с.
4. Stolte G. Secondary metallurgy. Fundamentals, Processes, Applications. - Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2002. – 216 p.
5. Yonezawa K., Schwerdtweger K. Dynamics of the Spout of Gas Plumes Discharging from Melt: Experimental Investigation with a Large-Scale Water Model // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2000. – V. 31B, № 6. – P. 461-468.
6. Yonezawa K., Schwerdtweger K. Height of the Spout of Gas Plumes Discharging from Melt // Metallurgical and Materials Transactions B. – 1999. – V. 30B, № 6. – P. 655-660.
7. Subagyo, Brooks G. A., Irons G. A. Spout Eyes Area Correlation in Ladle Metallurgy // ISIJ International. – 2003. – V. 43, № 2. – P. 262-263.
8. Krishnapisharody K. Irons G. A. Modeling of Slag Eye Formation over a Metal Bath Due to Gas Bubbling // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2006. – V. 37B, № 6. – P. 764-772.

Поступила 02.03.2009

УДК 669.158:621.785.74

Б. Ф. Белов, А. И. Троцан, И. Л. Бродецкий, В. В. Щиголев, В. А. Драчук*

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев

*Приазовский государственный технический университет, Мариуполь

СТРУКТУРИЗАЦИЯ ОКСИДНЫХ ФАЗ В ПРОЦЕССАХ РАСКИСЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ РАСПЛАВОВ КРЕМНИЕМ И АЛЮМИНИЕМ. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ И СТРУКТУРИЗАЦИЯ СИЛИКАТОВ АЛЮМИНИЯ. Сообщение 4.

Построена полигональная диаграмма системы Al_2O_3 - SiO_2 , включающая последовательный ряд промежуточных фаз. Выполнен анализ структурно-химического состояния жидких и твердых силикатов алюминия – неметаллических включений при раскислении стали кремнием и алюминием.

Побудовано полігональну діаграму системи Al_2O_3 - SiO_2 , яка включає послідовний ряд проміжних фаз. Виконано аналіз структурно-хімічного стану рідких і твердих силікатів алюмінію – неметалевих включень при розкисненні сталі кремнієм і алюмінієм.

It is built polygonal diagram of the system Al_2O_3 - SiO_2 , including on consequent row of the intermediate phases executed analysis structured-chemical condition fluid and hard silicate aluminum - non-metallic inclusion under deoxidation steel silicon and aluminum.

Ключевые слова: полигональная диаграмма, промежуточные фазы, силикаты алюминия, ионно-молекулярный комплекс, анализ структурно-химического состояния.