

**С.И.Семькин, В.Ф.Поляков, С.А.Дудченко, Е.В.Семькина,  
В.В.Вакульчук, Т.С.Кияшко**

### **ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗА С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РАСПЛАВОМ С ПОМОЩЬЮ ГОРЯЧЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ПОДВОДА ДУТЬЯ**

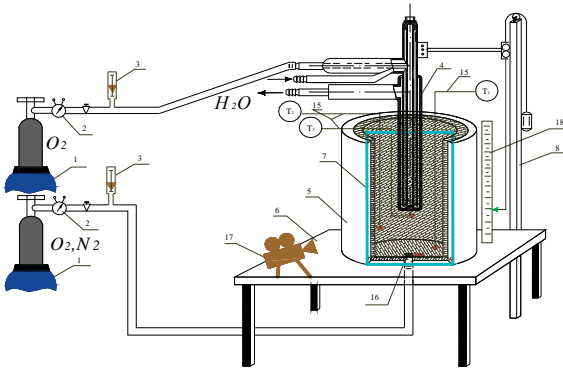
Целью данной работы является изучение на горячей модели условий формирования и параметров высокотемпературного очага газовой струи при различных вариантах продувки металлического расплава. Выявлены особенности формирования газовой струи в металлической ванне при разных вариантах подвода дутья и их влияние на изменение температуры в объёме ванны. Показано, что для верхней продувки характерно плавное нарастание температуры по ходу продувки расплава. При комбинированной продувке (кислород – кислород) температура также плавно нарастает, как при верхней продувке, но при этом она численно выше.

**металлический расплав, продувка кислородом, подвода дутья температура ванны**

**Современное состояние вопроса.** Аэродинамика струи в кислородно–конвертерном процессе определяет как механическое воздействие дутья на ванну (размеры реакционной зоны, поверхность контакта струи с металлом, интенсивность перемешивания ванны и т.д.), так и скорость окисления углерода, мощность перемешивания ванны пузырями СО и т.д. Таким образом, струя кислорода является главным управляющим фактором этого процесса [1].

Первичная реакционная зона – это преимущественно газовая фаза, где происходит подсос и дробление металлического расплава на мелкие капли с последующим их воспламенением при энергичном окислении турбулентной кислородной струей. Горение в замкнутом объёме реакционной зоны с малым отводом тепла приводит к сильному местному перегреву прилегающих слоев металла. Вокруг первичной реакционной зоны образуется вторичная реакционная зона, состоящая из продуктов окисления. Знания о процессах в реакционной зоне имеют большое практическое значение, связанное с решением задачи уменьшения образования дыма при продувке. От температуры этой зоны в значительной степени зависят стойкость днищ и фурм. Изменение условий продувки (состав и способ подвода дутья) вызывает соответствующие изменения скорости и последовательности окисления элементов [2].

**Методика исследований.** Для выполнения работы по изучению характера и особенностей взаимодействия струи газа с металлическим расплавом была изготовлена модель, принципиальная схема которой представлена на рис.1.



1 - Баллоны с газом; 2 - Редукторы давления; 3 - Измерители расхода газа; 4 - Верхняя продувочная фурма; 5 - Реактор; 6 - Стенд; 7 - Окно из кварцевого стекла; 8 - Устройство для перемещения фурмы; 9 - Термопары; 10 - Нижняя продувочная фурма; 11 - Видеокамера; 16 - Указатель положения фурмы.

Рис.1. Принципиальная схема стенда горячего моделирования продувки металла в конвертере.

Модель состоит из реактора 5 со встроенной в него кварцевой пластиной для возможности визуализации очага реакционной зоны, верхней водоохлаждаемой продувочной фурмы 4, нижней продувочной фурмы 16, баллонов для подачи газа 1 и высокоскоростной видеокамеры 10.

Эксперименты проводились по следующей схеме. Исходный металл (чугун) в количестве 60–100 кг расплавляли в 200–килограммовой индукционной печи. После расплавления и нагрева до заданной температуры металл сливался в ковш для подачи его в модель, футеровка которой предварительно прогревалась газовой горелкой в течение примерно 1 часа до температуры 500 – 600<sup>0</sup>С. Перед заливкой металла в модель верхняя продувочная фурма устанавливалась на рабочую высоту и начиналась первичная подача дутья в расчете 5–10 % от рабочего режима (в случае использования комбинированной продувки для предотвращения закупоривания донных сопел во время заливки металлического расплава в модель дополнительно подавали технологические газы через донную фурму в количестве 30 – 50% от расчётного).

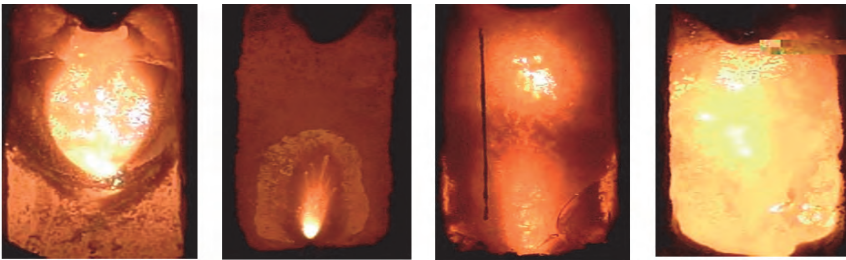
В течение всей продувки проводилась регистрация технологических параметров и выполнялась видеозапись очага реакционной зоны, как с помощью стандартной видеокамерой JVC (с частотой 30 кадр/сек) так и высокоскоростной камеры CASIO EXILIM EX F1 (с частотой 300 кадр/сек).

Два сопла верхней продувочной фурмы устанавливались таким образом, чтобы ось струи одного из сопел была направлена на оптически прозрачную кварцевую пластину. Условия проведения экспериментов по

изучению характера взаимодействия газовой струи с металлическим расплавом приведены в табл.1.

Таблица 1. Условия проведения экспериментов

<b>Параметры модели и условия проведения экспериментов</b>	
Садка модели	30–40 кг
Футеровка	Магнезит, огнеупорный цемент
<b>Геометрические параметры</b> – внутренний диаметр внизу емкости – внутренний диаметр сверху емкости – высота емкости модели – размер кварцевого стекла	190 мм; 220 мм 280 мм 10 X 120X 300 мм
<b>Параметры продувки</b> 1. <u>Верхняя фурма:</u> – дутье	двухсопловая, d=1,7 мм, угол раскрытия 30 град технический кислород, чистотой 99,6%
– Давление кислородного дутья – Расход дутья – Высота расположения фурмы над расплавом	0 – 6 ати 0 – 230 л/мин 30–33 калибров
2. <u>Донная фурма:</u> – дутье	двухконтурная с диаметром центрального сопла 1,5 мм и щелью 0,3мм кислород в оболочке природного газа, азот
– Давление дутья: азот кислород природный газ	0,5 – 1 ати 0,5 – 1 ати 0 – 0,5 ати
Температура чугуна	1300 – 1370 °С
Высота металлической ванны	100– 120 мм



А

Б

В

Г

Рис.2. Вид очага взаимодействия струи газа с металлическим расплавом при различных вариантах продувки: А–верхняя продувка (давление 5 ати); Б–донная продувка кислородом при давлении 1 ати в оболочке природного газа; В–комбинированная продувка  $O_2/O_2$  (давление сверху –5 ати, снизу – 1 ати в оболочке природного газа); Г–комбинированная продувка  $O_2/N_2$  (давление сверху –5 ати, снизу азота – 0,5 ати).

**Изложение основных материалов исследований.** Как видно из приведенных фотографий (рис.2), существуют определенные различия между

реакционными зонами, сформированными при изучаемых вариантах подвода дутья.

#### Верхняя продувка (Вариант А)

Под соплами фурмы расположены направленные вниз высокоскоростные потоки с увлекаемыми в них каплями металла – первичные реакционные зоны. Струя газа, достигнув максимальной глубины погружения в ванну, отражается от дна кратера и, изменив свое направление на обратное, вытекает из него.

На пути движения струи от уровня максимального заглубления до выхода из реакционной зоны происходит поглощение кислорода металлом, а затем шлаком. Таким образом, скорость поглощения кислорода и характер распределения его между шлаком и металлом в общем случае определяются глубиной погружения струи в жидкую ванну, а следовательно, и толщиной слоя шлакометаллической эмульсии. Возможность управления усвоением кислорода и его распределением является основным преимуществом способа продувки ванны кислородом сверху.

Из всех рассмотренных выше звеньев процесса относительно медленным обычно является процесс подвода или отвода реагентов от места реакции. Поэтому результирующая скорость процесса чаще всего определяется скоростью переноса. Перемешивание приводит к уменьшению толщины диффузионного слоя, через который за счет молекулярной диффузии должны проникнуть молекулы, и ускоряет, таким образом, самую медленную стадию.

Однако, как видно из фото (рис.3), характерное интенсивное перемешивание начинает проявляться только в период интенсивного горения углерода. В начале периода интенсивного горения углерода по границам первичной реакционной зоны, вследствие высокой концентрации кислорода, окисляется углерод до образования СО и формируется мощный поток всплывающих пузырей увлекающих за собой металл. В результате металл начинает интенсивно перемешиваться и в его объеме происходит быстрое нарастание температуры. Поскольку контур циркуляции должен быть замкнутым, у стенок конвертера, согласно многим авторам, металл должен двигаться вниз.

#### Донная продувка (Вариант Б)

При донной продувке, также как и при верхней образуются очаги реакционных зон (рис.2). В ходе экспериментов было установлено, что такой вид продувки характеризуется интенсивным перемешиванием уже на начальной стадии процесса и усиливается по мере приближения к периоду интенсивного горения углерода. Однако, существенного прироста тепла, как будет показано ниже, при этом не происходит в связи с тем, что снижается роль прихода тепла от окисления железа в шлак и дожигания СО до СО<sub>2</sub>, как при верхней продувке.

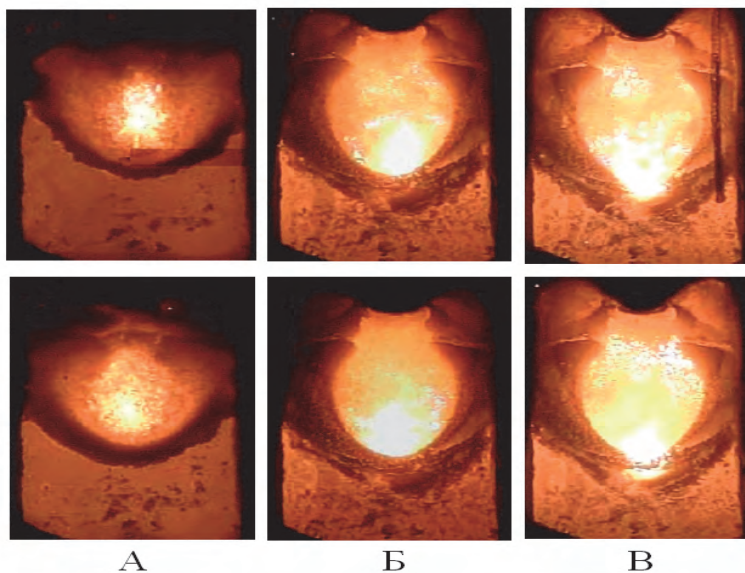


Рис.3. Вид очага реакционной зоны при верхней продувке: А – давление 3 ати (период горения кремния); Б – давление 5 ати (период горения кремния); В – давление 5 ати (период интенсивного окисления углерода)

#### Комбинированная продувка кислород–кислород (Вариант В)

Как показали эксперименты, такая продувка, также как и донная, обеспечивает интенсивное перемешивание ванны уже в начальный период. Образующиеся при такой продувке реакционные зоны имеют общие закономерности, как для верхней, так и для донной продувок. Однако, при подводе дополнительного дутья снизу происходит сжатие верхней зоны в результате её вытеснения донным дутьём. Также было отмечено, что с определённой периодичностью наблюдаются дополнительные очаги возгорания между обеими зонами, что может быть связано с их несинхронной работой. В результате чего продукты окисления одного очага взаимодействуют, вероятно, воспламеняются высокотемпературным факелом другого очага, что также способствует дополнительному перемешиванию.

Комбинация верхней и нижней продувки кислородом даёт возможность более гибко управлять режимом продувки путём регулирования процесса окисленности шлака и дожигания СО с помощью верхней фурмы, а с помощью нижней интенсифицировать процессы перемешивания и тем самым ускорять процесс продувки.

#### Комбинированная продувка кислород – азот (Вариант Г)

В ходе проведения эксперимента особый интерес представила продувка кислород сверху – азот снизу. Как было установлено с помощью видеокамеры, в начале продувки происходит интенсивное равномерное

перемешивание ванны азотом с образованием мощных циркуляционных потоков. Такое перемешивание вызвано тем, что азот не усваивается ванной и его работа расходуется на перемешивание. При начале процесса интенсивного горения углерода вспышки начинают появляться с различной частотой во всём объёме ванны в разных её частях. При этом происходит интенсивное перемешивание и интенсивный нагрев ванны без локального перегрева. Это, по-видимому, может быть связано с внедрением в азотные объёмы продуктов СО, их интенсивное перемещение в объёме ванны и воспламенение при контакте с кислородной струей.

На рис.4 представлены результаты динамики изменения температуры в донной области ванны во время продувки при различных вариантах подвода дутья. Как видно из графиков, при верхней продувке характерно плавное нарастание величины температуры по ходу продувки расплава, при донной – снижение, а при комбинированной (кислород – кислород) температура находится на определенном уровне, но при использовании в дутье через донную фурму азота температура плавно нарастает, как при верхней продувке, но при этом она численно выше. Это можно объяснить более высокой степенью перемешивания ванны азотом, вследствие того, что азот при данных условиях можно считать инертным по отношению к компонентам ванны.

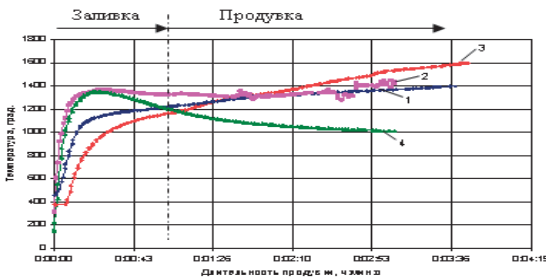


Рис.4. Изменение температуры металла в донной части модели при:

1 – верхней продувке кислородом; 2 – комбинированной (O<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>); 3 – комбинированной (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>); 4 – донной продувке кислородом

## Выводы.

1. По разработанной методике горячего моделирования продувки металла в конвертере с помощью высокоскоростной видеосъемки выполнены записи очага взаимодействия газовой струи с металлическим расплавом.

2. Выявлены особенности формирования очага газовой струи в металлической ванне, а также динамики её перемешивания при различных комбинациях подвода дутья.

3. Определены параметры очага взаимодействия газовой струи с расплавом в зависимости от дутьевого режима продувки.

4. Определено влияние подвода дутья на изменение температуры в объёме ванны по ходу эксперимента.

1. *Баттизманский В.И.* Теория кислородно–конвертерного процесса. – М.:Металлургия, 1975. – 376с.
2. *Явойский В.И., Дорофеев Г.А.,Повх И.Л.* Теория продувки сталеплавильной ванны.– М.: Metallurgiya, 1974. – 496с.

*Статья рекомендована к печати  
докт. техн. наук А.С.Вергуном.*

***С.І.Семикін, В.Ф.Поляков, С.О.Дудченко, О.В.Семикіна, В.В.Вакульчук,  
Т.С.Кіяшко***

**Вивчення умов взаємодії газу з металевим розплавом за допомогою гарячого моделювання при різних варіантах підведення дуття**

Метою роботи є вивчення на гарячій моделі, умов формування і параметрів високотемпературного вогнища газового струменя при різних варіантах продування з металевого розплаву. Виявлено умови формування газового струменя у металевому розплаві при різних варіантах підводу дуття та їх вплив на зміну температури в об'ємі ванни. Показано, що для верхнього продування є характерним плавне наростання температури під час процесу. При комбінованому продуванні (кисень-кисень) температура металу також плавно підвищується, однак чисельно вона є вищою, ніж при верхньому продуванні.