

С.А.Шевченко, А.П.Толстопят, Т.А.Рузова, А.Ф.Шевченко

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УГЛА ИНЖЕКТИРОВАНИЯ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ НА ГИДРОГАЗОДИНАМИКУ БАРБАТИРУЕМОЙ ВАННЫ

Проведены экспериментальные исследования влияния угла инжектирования затопленной струи на гидрогазодинамические процессы в чугуновозном ковше в условиях обработки чугуна диспергированным магнезием на холодной модели. Для количественной оценки степени диспергирования струи в жидкости впервые была разработана и применена методика компьютерной обработки видеоизображения. Определены наиболее рациональные углы инжектирования.

Современное состояние вопроса. Для инжектирования магнийсодержащих реагентов при внепечной обработки чугуна применяют различные типы фурменных устройств [1]. Конструктивным отличием данных фурменных устройств является различный угол размещения сопла α° относительно вертикали. Истечением струи в сторону от оси фурмы решается ряд задач. В частности, для многосопельных фурм, изменение угла позволяет реакционные зоны отдалить друг от друга. Уменьшить износ днища ковша и футеровки фурмы. Переместить зону брызговоыноса ближе к носу заливочного ковша или в торец миксерного, этим снизить бурность процесса.

Процесс диффузии паров магния из пузыря в расплав протекает через межфазную поверхность пузыря. В силу этого, эффективность десульфурации напрямую связана со степенью диспергирования газомagneзиевой струи и равномерности ее распределения в объеме жидкометаллической ванны. Уменьшение размера газовых включений с одной стороны увеличивает межфазную поверхность, с другой продлевает время пребывания пузыря в расплаве. Кроме этого, дробление газовой струи и распределение ее в объеме снижает бурность процесса, волнообразование на поверхности жидкометаллической ванны.

Постановка задачи. В силу вышесказанного, оценка влияния инжектирования под различным углом на эффективность процесса сводится к исследованию особенности пузыреобразования, степени диспергации всплывающих пузырей, развитие (распределения) зоны барботирования в объеме ванны.

Процесс рафинирования чугуна в ковшах вдуванием диспергированного магния представляет собой достаточно многосторонний технологический комплекс, натурные исследования которого весьма сложны в силу целого ряда естественных причин. Но динамическая сторона отдельных явлений может быть исследована на холодных моделях путем вдувания, например, воздуха в ванну с водой [2,3], при условии сохранения геометрического и гидрогазодинамического подобия процессов.

Изложение основных материалов исследования. Объектом моделирования при экспериментальном исследовании являлись гидрогазодинамические процессы, протекающие в заливочном ковше при следующих основных параметрах вдувания:

- диаметр канала фурмы $D_k = 12$ мм;
- глубина погружения фурмы в расплав $H_f = 2,5$ м;
- расход инжектирующего газа $V_T = 60 - 200$ $\text{нм}^3/\text{ч}$.

В качестве модели ковша, размеры которой соотносятся с размерами природы как 1:10, была выбрана прозрачная емкость из органического стекла имеющая размеры: диаметр нижней – 330 мм, диаметр верхний – 390 мм, глубина – 430 мм. Эта модель соответствовала натурному образу ковшей с массой чугуна более 160 – 180 т. В качестве жидкости использовалась вода, кинематическая вязкость, которой, близка к вязкости расплавленного чугуна.

Моделирующее фурму дутьевое устройство представляло собой латунную трубку с наружным диаметром 3 мм и внутренним 2 мм. Величина внутреннего диаметра модели фурмы была выбрана исходя из требования реализовать на выходе из нее скорость газа, близкую к натуре (в заданном диапазоне изменения расхода дутья). Изменение угла инжектирования осуществляли благодаря набору трубок, которые отличались отогнутым на заданный угол концом.

С помощью компрессора через дутьевое устройство в жидкость вдували воздух с заданным расходом. Прозрачные стенки емкости позволили отснять зону барботирования на аналоговую видеокамеру с частотой видеосъемки 25 кадров в секунду. Контрастность изображения всплывающих пузырей обеспечивал белый экран, установленный за стенкой модели ковша и подсвеченный с тыльной стороны осветительным устройством.

В ходе проведения исследований расход газа изменялся в пределах 0,6 – 2,0 $\text{нм}^3/\text{ч}$, что соответствует натурному расходу 60 – 200 $\text{нм}^3/\text{ч}$. При этом скорость на срезе сопла равнялась 53 – 178 м/с и соответственно для природы 49 – 164 м/с. Угол отклонения от вертикали изменялся: $\alpha = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$.

Следует отметить, что уменьшение на 2 порядка расхода газа на модели (по сравнению с натурой) отвечает геометрическому моделированию с линейным соотношением 1:10. Поскольку в этом случае поперечное сечение модели (площадь зеркала ковша) уменьшается в соотношении 1:100, то газовая нагрузка на единицу площади для модели и природы будет одинакова.

Таким образом, была отснята серия экспериментов. Съемка каждой серии длилась 5 секунд. Видеоизображение в последующем было оцифровано, разрезано на отдельные кадры и представлено в виде точечных графических объектов (формата BMP). В итоге получили 56 серий по 125 кадров в каждой.

Фото- и киноматериалы по исследованиям гидрогазодинамических процессов ранее, как правило, давали лишь качественную оценку. Появление компьютеров и связанных с этим методик исследований предоставило новые возможности обработки и анализа видеоизображений на основе кинограмм процесса с последующей компьютерной обработкой их, методика которой отрабатывалась в процессе выполнения настоящей работы.

Отметим, что поскольку модель (ковш) представляет собой тело вращения, а обработка велась по фотографиям, то все определяемые по ним параметры представляют собой условную проекцию на диаметральное сечение ковша. Поэтому полученные результаты, приведенные к числовым значениям, следует рассматривать в сравнительном сопоставлении измеренных параметров. При этом важным фактором является возможность программными средствами обрабатывать все полученные в данном временном интервале изображения установившегося процесса и усреднять по ним полученный результат.

Низкая контрастность изображения в целом, сочетающаяся с неоднородностью прорисовки контуров различных объектов, перекрытие одного пузыря другим, присутствующие блики и ряд других неблагоприятных факторов усложнили процесс обработки изображения. В связи с этим создана специальная процедура обработки изображений данного класса с помощью которой, автоматически выделяется необходимая для исследования область кадра. Область позиционируется так, чтобы ширина ее совпадала с диаметром ковша, а бурность поверхности ванны не вносила свои помехи. Фурменное устройство размещено строго по оси. Размеры выделяемой области и положение его относительно сопла фурмы для всех кадров постоянны. Так на рис.1 приведены вырезанные области двух способов размещения сопла $\alpha = 0^\circ$ и 45° . После этого изображение переводится в ахроматический режим и по специальной процедуре осуществляется выделение перепадов яркости нелинейными методами контрастирования [4,5]. После очередных преобразований, применения математическую модель выделения цветовых подпространств пространства *RGB* и двухцветную систему выделения объектов [5] с заливкой тела пузыря, для корректного определения площади изображение приводится к итоговому виду рис.2.

Программно определяются отличительные от фона места, соответствующие проекциям газовых пузырей объема ванны на плоскость исследуемой области. В цифровом виде исследуемая область представляет собой матрицу светлых и темных точек (пикселей). В результате чего по полученному изображению методами численного интегрирования с применением аппроксимационной модели описания периметров [5] определялись площади и периметры пятен, выраженные в пикселях, и строились их распределения в относительных величинах (рис.3).

Для количественной оценки гидрогазодинамических процессов протекающих в жидкой ванне использовали следующие относительные величины.

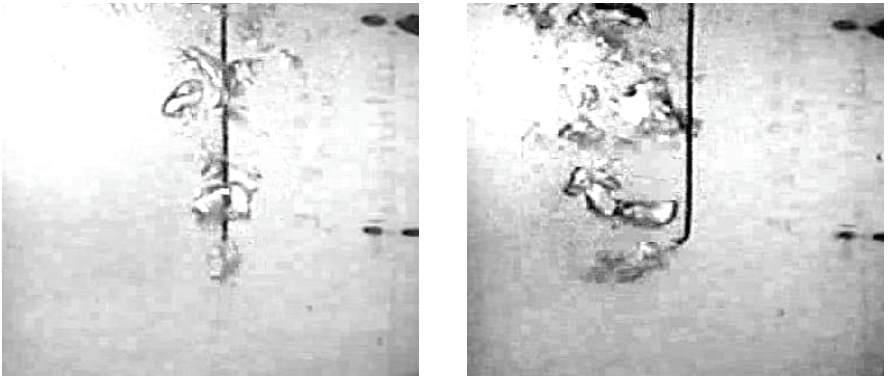
а) $\alpha = 0^\circ$ б) $\alpha = 45^\circ$

Рис.1. Исходный вид исследуемой области на примере двух типов фурм

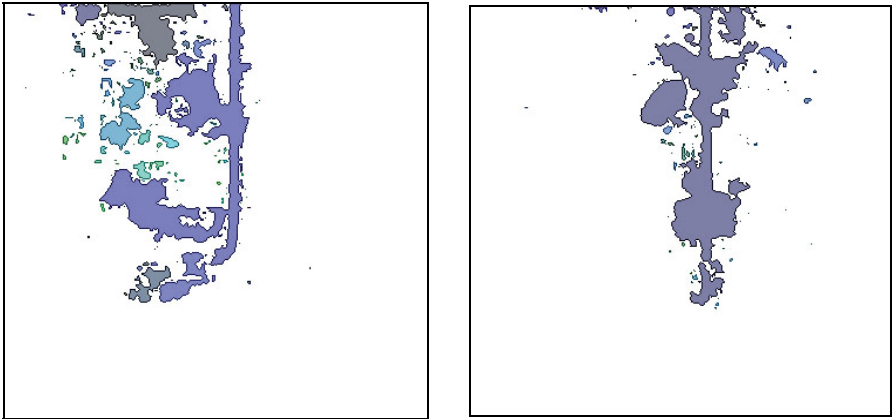
а) $\alpha = 0^\circ$ б) $\alpha = 45^\circ$

Рис.2. Итоговый вид исследуемой области на примере двух типов фурм

S_Γ , % – величина характеризующая газосодержание в жидкой ванне, является процентным отношением площади проекций газовых пузырей в кадре (S_p) к общей площади исследуемой области – S_k .

$$S_\Gamma = \frac{S_p}{S_k} \cdot 100 \% ; \quad (1)$$

Ψ – коэффициент характеризующий условную фазовую поверхность пузырей в объеме ванны и является отношением периметра проекций пузырей (Π_p) к общей площади исследуемого участка – S_k .

$$\Pi_s = \frac{\Pi p}{S_k}; \quad (2)$$

Πp – аналог коэффициента дисперсности, характеризующий отношение фазовой поверхности газовых включений (аналог Πp) к эквивалентному периметру газовых включений в жидкой ванне ($\Pi_{\text{Экв}}$)

$$\Pi n = \frac{\Pi p}{\Pi_{\text{Экв}}}; \quad (3)$$

$\Pi_{\text{Экв}}$ определяется из суммарной площади газовых включений (S_p) через эквивалентный радиус окружности ($R_{\text{Экв}}$) площадь которой равна суммарной площади газовых включений:

$$\Pi_{\text{Экв}} = 2 \cdot \pi \cdot R_{\text{Экв}}; \quad R_{\text{Экв}} = \sqrt{\frac{S_p}{\pi}};$$

В силу упомянутых ранее причин абсолютная погрешность данного метода велика. Но, поскольку в рамках проведенного эксперимента выделяемый участок для каждого кадра эксперимента имеет равные оптические условия, одинаковые размер и расположение, оценку работы различных типов фурм провели путем сопоставления усредненных величин из каждой серии кадров. С целью сохранения характерной зависимости изменения величин по диаметру ковша, их усреднение проводили по каждому x -столбцу матрицы $S_{\Gamma}(x)$, $\Pi_s(x)$, $\Pi_{\Pi}(x)$ где x – номер столбца матрицы ($0 < x < D_k$), с последующим выведением среднего значения для всей серии кадров $S_{\Gamma_{\text{ср}}}$, $\Pi_{s_{\text{ср}}}$, $\Pi_{\Pi_{\text{ср}}}$.

Полученные распределение площади газовых включений по диаметру ковша позволяет провести оценку неравномерности распределения газовых включений в объеме ванны:

$$K_s = \frac{S_{\Gamma_{\text{ср}}} - S_{\Gamma}(x)}{S_{\Gamma_{\text{ср}}}}; \quad \text{для всех } S_{\Gamma}(x) \leq S_{\Gamma_{\text{ср}}}. \quad (4)$$

Определенная величина K_s является характерным параметром для данного варианта эксперимента и режима, а следовательно и конструкции фурмы. Величина K_s , изменяющаяся в диапазоне $[0-1]$ численно определяет качество ведения процесса или эффективность работы выбранной фурмы. При $K \rightarrow 1$ неравномерность распределения исследуемого параметра по диаметру наибольшая, при $K \rightarrow 0$ достигается наибольшая равномерность распределения параметра.

Аналогично определяется неравномерность распределения межфазной поверхности газовых включений:

$$K_{\Pi} = \frac{\Pi_{s_{\text{ср}}} - \Pi_s(x)}{\Pi_{s_{\text{ср}}}}; \quad \text{для всех } \Pi_s(x) \leq \Pi_{s_{\text{ср}}}. \quad (5)$$

Полученные для единичного кадра относительные величины и их распределения по диаметру ковша демонстрируются на рис.3, где наглядно представлено отличие работы фурм без отгиба (а) и с отгибом сопла на 45° .

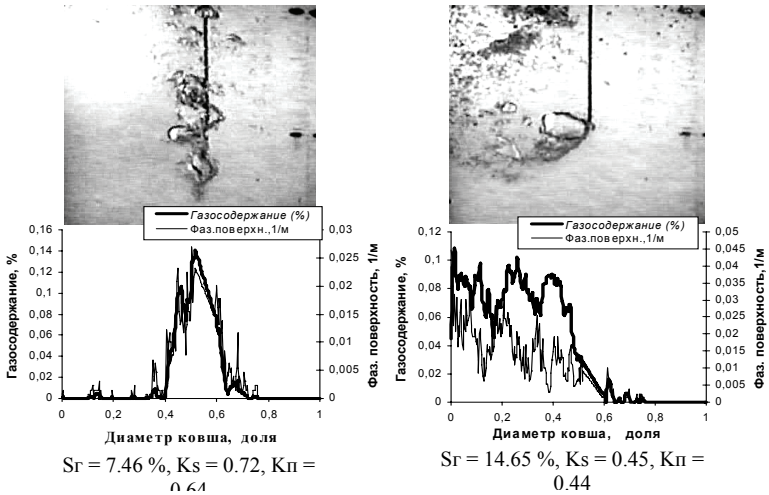


Рис.3. Исследуемая область барботируемой ванны и характеризующие ее величины, полученные по ходу компьютерной обработки экспериментальных данных для двух типов фурм.

Видно, что истекающая газовая струя образует пульсирующую, но стационарную газовую полость, вытянутую вдоль оси сопла под тем же углом. Ее размер, по длине, увеличивается с увеличением скорости истечения [6]. В случае прямого расположения сопла ($\alpha=0^\circ$) образование и отрыв отдельных газовых включений от основной стационарной полости происходит в верхней ее части с некоторой периодичностью. При этом включения могут иметь относительно большой объем, равный примерно объему стационарной полости. Зона барботирования сконцентрирована вдоль ствола фурмы. Дробление такой газовой полости на более мелкие пузыри, по мере всплытия, не значительно. Что подтверждается количественными величинами (рис.3,а), где изменяющееся по диаметру ковша газосодержание практически накладывается на изменение условной фазовой поверхности. В случае вдувания под углом образование и отрыв отдельных газовых включений происходит ближе к хвостовой части стационарной полости и их размеры значительно меньше, чем в случае с прямоточной фурмой. По мере всплытия большего размера пузыри продолжают дробиться и рассредоточиваются в объеме ванны, что отражают количественные величины и характер их изменения по диаметру ковша (рис.3,б). Также заметно снижается волнообразование на поверхности жидкой ванны.

При анализе всех кадров подряд из одной серии имеет место немонотонность изменения величины газосодержания и фазовой поверхности с характерной периодичностью по длине серии, что, может быть обусловлено пульсирующим характером процесса отрыва пузырей от стационарной газовой полости в прифурменной зоне. На основе итоговых величин, полученных после обработки всех массивов и последующего их усреднения, построены наглядные графические зависимости, учитывающие изменение угла инжектирования и расходов газа. Некоторые из них представлены на диаграммах рис.4 и рис.5.

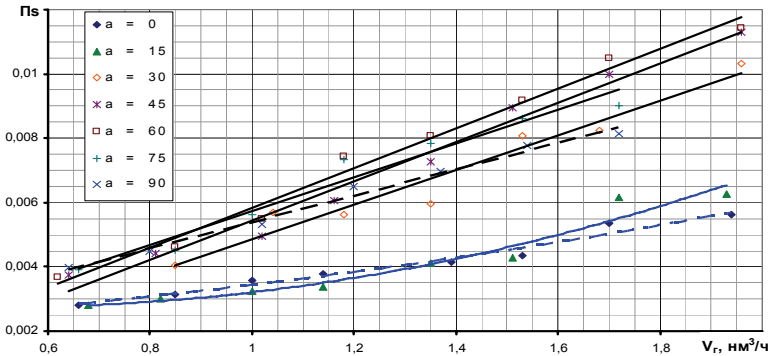


Рис.4. Изменение условной межфазной поверхности в зависимости от расхода газа для различных углов инжектирования.

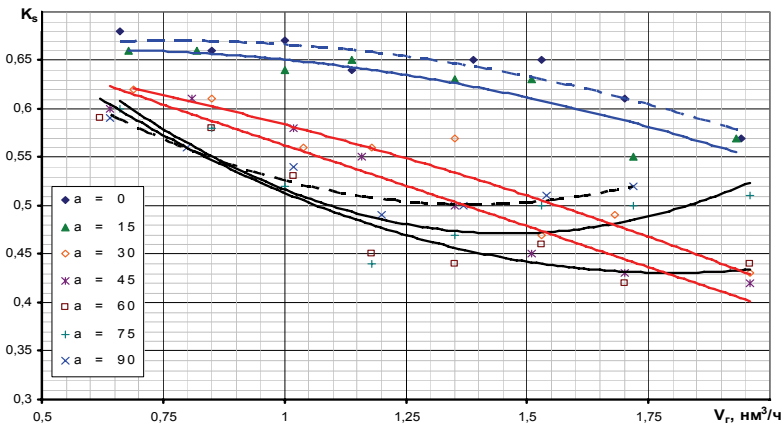


Рис.5. Изменение коэффициента неравномерности распределения газосодержания в объеме ванны для различных углов инжектирования.

На основе проведенного анализа определено, что наибольшая степень диспергирования газомagneйной струи и более равномерное распределение ее в объеме жидкометаллической ванны достигается при углах инжектирования струи $30^\circ - 60^\circ$.

Заклучение. Таким образом, в ходе сопоставительного анализа определены наиболее рациональные углы размещения сопла α° относительно вертикали фурменных устройств и рекомендуется при проектировании фурм выбирать их в диапазоне $30^\circ - 60^\circ$.

1. *The VI International Symposium for desulphurization of hot metal and steel.* – September 14–16. – 2000. –Magdeburg/Germany. – P.82
2. *Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л.* Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия, 1974. – 496с.
3. *Ефименко С.П., Пилюшенко В.Л., Смирнов А.Н.* Пульсационное перемешивание металлургических расплавов. – М., Металлургия, 1989. –С. 168
4. *Прэнтт Р.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 302с.
5. *Рузова Т.А., Карнов О.Н., Флеер Л.А.* Оперативный контроль параметров частиц дисперсных образований // Науковий вісник Національного гірничого університету.–Дніпропетровськ.–2004, – № 2. – С. 83–88
6. *Оценка параметров проникновения истекающей из фурмы магнийсодержащей струи в расплав чугуна.* / С.А. Шевченко, А.Ф. Шевченко, В.И. Елисеев и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* Сб. тр. ИЧМ, вып..13. – 2006. – С.48–51.

Статья рекомендована к печати д.т.н. А.С.Вергуном