

С.А. Шевченко, В.И. Елисеев, А.Ф. Шевченко, А.В. Остапенко.

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ МАГНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ СТРУИ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ УСЛОВИЙ И ПАРАМЕТРОВ ИНЖЕКТИРОВАНИЯ

Представлена модель движения двухфазного потока в канале фурмы в условиях ковшевой обработки чугуна гранулированным магнием. Проведена расчетная оценка скорости движения газа и частиц магния в канале и на выходе из него при различных условиях проведения обработки и варьировании типоразмера канала фурмы.

Широкое распространение в металлургии получили инжекционные методы ввода магнийсодержащих реагентов через погружные фурмы. При попытках инжектировать магний в жидкий чугун [1] столкнулись с рядом проблем. Ввод его в расплав с температурой 1250 – 1450⁰С сопровождался бурностью и нестабильностью протекания процесса из-за частых случаев заваривания сопла фурмы. С целью успокоения процесса инжекции и повышения его устойчивости, ввод магния в расплав осуществляют в смеси с пассивирующими добавками (известь, карбид кальция) или применяют фурму с испарительной камерой на выходе [1]. Последнее позволяет удалить сопло от расплава и исключить случаи его захлестывания расплавом. Это решение позволяет вдувать магний без разубоживающих добавок с низким расходом транспортирующего газа, одновременно обеспечивая стабильность процесса и высокое (до 95%) усвоение магния чугуном.

Применение технологии вдувания чистого магния через фурму с испарителем на выходе, для обработки чугуна в глубоких ковшах, может сопровождаться рядом нерациональностей. Так, при глубине погружения фурмы в расплав (h_{ϕ}) более 3 м и при температуре расплава менее 1250⁰С магний может находиться в жидком состоянии. В таких условиях роль испарительной камеры теряет свое назначение, а скопившийся под колоколом жидкий магний делает процесс рафинирования недостаточно управляемым. Поэтому в ковшах с глубиной жидкометаллической ванны более 2,8 м для вдувания магния без пассивирующих добавок рациональным является применение фурмы без испарительной камеры на выходе.

Опыт вдувания магния в чугун без пассивирующих добавок через фурму с условно постоянным сечением показывает, что устойчивость процесса во многом зависит от типоразмера фурмы и параметров вдувания. Условия устойчивости инжекции и процессы, протекающие в прифурменной зоне, во многом связаны со скоростью двухфазного потока на выходе из канала фурмы, а именно скорости газа и твердой фазы.

Такую оценку можно выполнить, описав движение потока по магниепроводу системой дифференциальных уравнений. Поскольку подводящий участок магниепровода должен обеспечивать в основе только пнев-

мотранспортирование, мы ограничились рассмотрением движения магниевого потока в канале фурмы. Была создана модель движения частиц магния по каналу фурмы со следующими основными условиями и допущениями. Канал фурмы с цилиндрическим сечением погружен на глубину $h_{\text{ф}}$ в расплав плотностью 7000 кг/м^3 и температурой 1325°C . Двухфазный поток ($T_0 = 20^{\circ}\text{C}$) движется вертикально по направлению сверху вниз. Начальная скорость движения частиц на входе в канал близка к нулю. Частицы магния плотностью 1740 кг/м^3 имеют правильную сферическую форму. Инжектируемый газ – азот. Согласно исследованиям [3], во время инжекции нагрев канала фурмы незначителен. Так как канал вертикальный, движение потока направлено вниз, а концентрация магния в газе незначительна, то приняли, что частицы движутся, в основе, не касаясь стенки канала. При движении газа в канале фурмы имеет место градиент давления по длине [4], что обусловило необходимость учета сжимаемости газа и, соответственно, теплообменных процессов в потоке.

Согласно [5], при параметрах обработки чугуна магнием через погружаемую в расплав фурму, двухфазный поток можно отнести к разреженным потокам с крупными частицами. В данном потоке объемная концентрация твердых частиц составляет не более 2%. Когда двухфазный поток разрежен, механическое (столкновения частиц), гидродинамическое и тепловое влияние одной частицы на другую становится незначительным, вследствие чего течение можно рассматривать как движение однородного газа с одиночными частицами.

Представленная модель описана системой уравнений (1 – 5), полученных из уравнений движения газа, дисперсной фазы и теплообмена, конечный вид которой следующий:

Уравнение состояния газа;

$$P = \rho_{\text{г}} R T_{\text{г}}, \quad (1)$$

Уравнения движения газа в канале фурмы;

$$\frac{dP}{dx} = -2\pi R_{\text{к}} \frac{k}{\overline{W}_{\text{г}} G_{\text{г}}} \frac{M^2}{(1 - M^2)} \left[\frac{R G_{\text{г}}}{F_{\text{к}} c_p} q_{\text{к}} - \left(P + \frac{R G_{\text{г}} \overline{W}_{\text{г}}}{F_{\text{к}} c_p} \right) \tau_{\text{к}} \right], \quad (2)$$

$$G_{\text{г}} \frac{d\overline{W}_{\text{г}}}{dx} = -2\pi R_{\text{к}} \frac{M^2}{(1 - M^2)} \left(k \tau_{\text{к}} - \frac{k - 1}{\overline{W}_{\text{г}}} q_{\text{к}} \right), \quad (3)$$

Уравнение движения частиц в канале;

$$\frac{4}{3} \pi r_{\text{т}}^3 \left(\rho_{\text{т}} + \frac{1}{2} \rho_{\text{г}} \right) W_{\text{т}} \frac{dW_{\text{т}}}{dx} = 2\pi r_{\text{т}}^3 \rho_{\text{г}} \overline{W}_{\text{г}} \frac{d\overline{W}_{\text{г}}}{dx} + \frac{1}{2} \pi r_{\text{т}}^2 c_z \rho_{\text{г}} \Delta W |\Delta W| + \frac{4}{3} \pi r_{\text{т}}^3 g (\rho_{\text{г}} - \rho_{\text{т}}), \quad (4)$$

Уравнение теплообмена в двухфазном потоке;

$$\frac{4}{3} \pi r_{\text{т}}^3 W_{\text{т}} \frac{dT_{\text{т}}}{dx} = 4\pi r_{\text{т}}^2 (q_{\text{к}} + q_{\text{и}}), \quad (5)$$

где: P , $W_{\text{г}}$, $W_{\text{т}}$, $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{т}}$, $F_{\text{к}}$, $r_{\text{г}}$ – давление, скорость и плотность газа (г) и

частиц (t), площадь сечения канала, и радиус частиц соответственно в исследуемом сечении.

Для решения системы уравнений разработан алгоритм расчета параметров движения и теплообмена газа и частиц магния в канале фурмы, основу которого составил численный метод Рунге–Кутты. Разработанная программа по расчету параметров движения двухфазного потока в канале фурмы. Программа позволяет рассмотреть моделируемый процесс и путем изменения начальных условий провести количественную оценку влияния каждого компонента уравнения.

Для проверки модели выполнен контрольный расчет по условиям ранее проведенного [6] экспериментального исследования разгона двухфазного потока в канале. Сопоставительный анализ расчетных величин по нашей методике и экспериментальных показал отклонение не более, чем на 10 %.

С помощью программы оценены закономерности изменения параметров двухфазного (содержащего магний) потока при движении по реальным магниепроводам. Принятые исходные данные для расчетов охватывали пределы условий работы реальных инжекционных систем для обработки различных масс чугуна (от 40 до 300 т) в ковше и составляли:

- расход газа (V_T) – 40, 60, 90, 120, 150, 180 $\text{м}^3/\text{час}$;
- глубина погружения фурмы (h_Φ) – 2, 3 и 4 м;
- диаметр канала (D_K) – 8, 10, 12, 15, 20 мм;
- длина канала фурмы (L_K) – до 9 м;
- диаметр частиц магния – 1,6 мм (максимально применяемый).

В результате расчетов получены величины параметров (давления, скорости газа и частиц, температур и др.) магниесодержащего потока по длине и на выходе канала. При варьировании параметров в указанных пределах скоростные характеристики двухфазного потока на выходе из канала изменяются в следующих пределах:

- скорость газа (W_T): 9,5 – 330 м/с;
- скорость гранул магния (W_T): 12,8 – 143,0 м/с.
- отношение W_T/W_T : 0,43 – 1,35.

Изменения этих величин в зависимости от расхода газа отображают зависимости рис.1, из которых видно, что при минимальной скорости газа скорость частиц на выходе из канала близка к скорости газа. Повышение скорости газа увеличивает отставание твердых частиц от газового потока. Указанная зависимость получена при различной глубине погружения фурмы.

Анализ полученных данных показал следующее. При практикуемых расходах газа для фурм с испарительной камерой на уровне 40 $\text{м}^3/\text{ч}$, при массе чугуна в ковше до 100–120 т ($h_\Phi = 2$ м) и диаметре канала 12 мм скорость истечения газа из канала фурмы составляет 42 м/с, а частиц магния 33 м/с. При обработке чугуна в большегрузных ковшах емко-

стью 150–300 т глубина ванны достигает 4 м. В таких условиях для обработки чугуна магнием рекомендуется [4] фурма без испарителя с диаметром канала 12 мм и расходами газа в пределах 120 – 180 $\text{нм}^3/\text{ч}$. Согласно расчету, в этих условиях скорость газа на выходе из фурмы составляет 78,7–183 м/с и частиц магния 62,6 – 110 м/с.

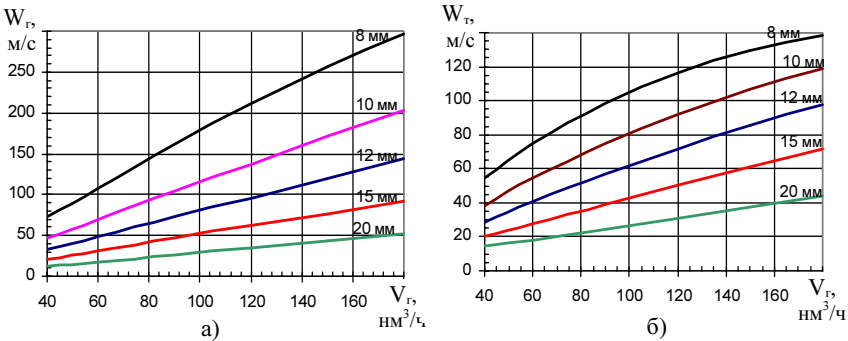


Рис.1. Изменение скорости газовой фазы (W_g) и частиц магния (W_p) на выходе из канала фурмы; длина канала 9 м, глубина погружения фурмы в чугун 3 м. Цифры у кривых – диаметр канала. а) изменение скорости газа; б) изменение скорости частиц магния.

Оценка влияния глубины погружения фурмы показала, что увеличение глубины на 1 м (например, с 2 до 3 м), при всех прочих равных условиях, снижает скорость истекающего из канала газового потока на 18–23%. Но в силу увеличения плотности газа скорость частиц уменьшается всего на 3–12%. Следовательно, увеличение глубины погружения фурмы благоприятно влияет на условия ввода магния в расплав чугуна.

Оценка влияния длины канала выполнена для канала диаметром 12 м и длиной 1,2,4,6 и 9 м, погруженного на глубину 2 м. Расходы газа выбраны для условий обработки в доменных и заливочных ковшах – 60 и 150 $\text{нм}^3/\text{ч}$ соответственно. Сравнение представлено на диаграммах рис.2, из которого видно, что в канале длиной 1 м частицы магния разгоняются до скорости равной половине скорости газа. В дальнейшем прирост скорости снижается. При длине канала более 6 м, для расхода газа 60 $\text{нм}^3/\text{ч}$, и 4 м для расхода 150 $\text{нм}^3/\text{ч}$ скорость твердых частиц на выходе изменяется не значительно на 2 – 15%.

Оценены теплообменные процессы в двухфазном потоке. Показано, что температура азота в условиях движения по реальным инжекционным системам может снижаться на 3–10⁰С. Это не оказывает существенного влияния на скорость газовой фазы и на температуру частиц. При движении частицы магния в оконечной части канала имеет место воздействие на нее теплового излучения со стороны расплава. Оценка

этого влияния показала, что роль излучения незначительна – максимальный нагрев частицы составляет 1°C .

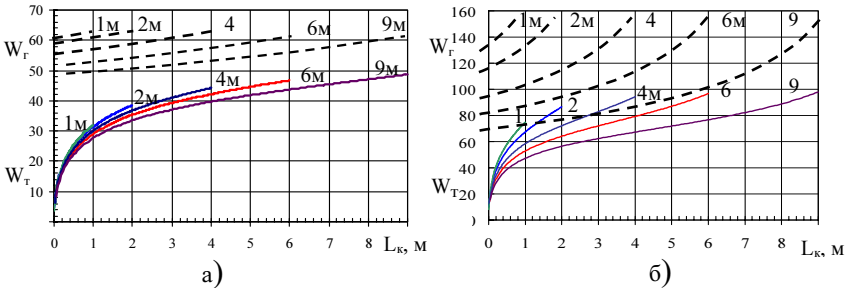


Рис.2. Изменение скорости газовой фазы (W_g , м/с) и частиц магния (W_{g20} , м/с) при разгоне в канале фурмы различной длины ($D_k = 12$ мм, $h_{\phi} = 2$ м). Цифры у кривых – длина канала. а) расход газа $60 \text{ nm}^3/\text{ч}$; б) расход газа $150 \text{ nm}^3/\text{ч}$.

Оценены в качестве газов–носителей азот и аргон. Показано что, несмотря на разницу параметров магнийсодержащего потока (P , W_g , W_{g20}) во время движения в канале, на выходе из него они оказываются практически близкими по значению.

Таким образом, выполненные исследования позволяют оценить закономерности изменения параметров двухфазных потоков, дуваемых в расплав чугуна при инжекционном рафинировании. Полученные абсолютные величины этих параметров дают возможность уточнить представления о механизме тепло–массообменных процессов в прифурменной зоне.

1. Воронова Н.А. Десульфурация чугуна магнием. –М.: Metallurgy, 1980. 239с.
2. Сопоставление эффективности способов десульфурации чугуна. / А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, А.С.Вергун и др. // Сталь. – 2000 г. – №8. – С.14–17.
3. Костицын Е.А., Воронова Н.А. Тепловые условия вдувания магния в доменный чугун через фурму погружения. // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема. Сб. ИЧМ. – М.: Metallurgy, 1978. С.63–66.
4. Газодинамическая оценка инжекционной системы ковшевого рафинирования жидкого чугуна / С.А.Шевченко, А.Ф.Шевченко, Б.В.Двоскин, А.В.Остапенко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сборник ИЧМ. – № 9. – 2004г. –С.74–79.
5. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. – М. Мир, 1971. –320 с.
6. Шевченко А.Ф. Исследование процесса внепечной десульфурации жидкого чугуна вдуванием порошковых реагентов. Дис. канд.техн. наук. Днепропетровск. ИЧМ, 1968, 175с.

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