

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОВШЕ В ПРОЦЕССЕ ИНЖЕКЦИИ
МАТЕРИАЛОВ ЧЕРЕЗ ПОГРУЖЕННУЮ ФУРМУ С
ОДНОВРЕМЕННОЙ ПРОДУВКОЙ СНИЗУ**

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования движения потоков металла в разливочном ковше при одновременной продувке через донную и погруженную сверху фурмы. Определены скорости и распределение потоков металла для различных расходов и взаимного расположения фурм, сформулированы требования к размерам инжектируемых частиц.

Ключевые слова: Математическое моделирование, продувка, перемешивание, ковш, поток, частицы, инжектирование.

В металлургической практике при внепечной обработке чугуна и стали широко используют инжекционные технологии. Вдувание порошкообразных материалов в объем металлической ванны в струе газа носителя обеспечивает высокую скорость протекания физико-химических процессов в сочетании с высокой степенью использования вдуваемых материалов, даже при использовании легкоплавких, легкоокисляющихся материалов [1,2].

Применение метода инжекции порошкообразных материалов в струе инертного газа позволило повысить эффективность процесса сульфидного рафинирования железоуглеродистых расплавов от растворенной меди [3,4]. При этом порошкообразную смесь реагентов, содержащих серу, вводят в объем расплавленного металла с помощью погруженной фурмы в потоке аргона. Вследствие интенсивного перемешивания расплава происходит эффективное насыщение расплава серой и формирование частиц сульфидной фазы в объеме металла. С целью стимулирования процесса образования неметаллических включений в расплав предложено инжектировать твердые частицы тугоплавкого материала, не взаимодействующего с расплавом. При этом важно, чтобы они как можно лучше распределялись в объеме металла. Однако добиться этого непросто. Восходящие потоки металла в зоне барботажа интенсивно выносят инжектированные в расплав частицы на поверхность ванны,

существенно сокращая время их пребывания в расплаве и соответственно коэффициент полезного использования.

Обработку металла в опытно-промышленных условиях осуществляли в разливочном ковше емкостью две тонны, что исключало длительную продувку в связи с существенными потерями тепла расплавом. Работа по поиску возможных технических решений выдвинула на передний план задачу по определению характеристик потоков жидкого металла, формирующихся в ковше в ходе продувки, чтобы оптимизировать ее организацию и параметры, добившись более длительного пребывания частиц в объеме расплава.

Динамика движения частиц, погруженных в жидкость, зависит, прежде всего, от их плотности, размеров и смачиваемости металлом [5,6]. В общем случае уравнение движения отдельной частицы может быть записано на основе второго закона Ньютона:

$$\frac{d(m\vec{U}_p)}{d\tau} = \sum \vec{F}, \quad (1)$$

где \vec{U}_p – скорость движения частицы, м/с;

\vec{F} – сила, действующая на частицу, Н;

m – масса частицы, кг.

Для адекватного описания траектории движения частиц требуется учет сил тяжести, архимедовой силы, силы сопротивления, а для крупных частиц и сил, обусловленных наличием присоединенной массы [5]. Характер движения частиц, инжектированных в расплав, тесным образом связан с условиями движения потоков металла, возникающих под влиянием газовой струи. Если скорость потока больше или равна скорости всплывания частицы, то последняя увлекается этим потоком. Максимальный размер частиц, которые могут быть захвачены потоком металла, или минимальную скорость, при которой поток может увлечь частицу определенного размера, можно оценить с помощью следующего неравенства:

$$\frac{4}{3}\pi gr^3(\rho_m - \rho_p) \leq 6\pi r\eta_m u_m, \quad (2)$$

где r – радиус частицы, м;

ρ_m, ρ_p – плотность металла и частицы, кг/м³;

η_m – динамическая вязкость металла, Па·с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

u_m – скорость металла, м/с.

Отсюда:

$$u_M \geq \frac{2}{9} \frac{gr^2(\rho_M - \rho_P)}{\eta_M} . \quad (3)$$

Либо:

$$r \leq 3 \left(\frac{\eta_M \cdot u_M}{2g(\rho_M - \rho_P)} \right)^{0,5} . \quad (4)$$

Таким образом, располагая данными о направлении движения и скоростях потоков металла, формирующихся в объеме жидкометаллической ванны в ходе продувки можно в первом приближении прогнозировать траекторию движения частиц, инжектированных в расплав.

Для решения гидродинамической задачи о движении жидкого металла в ковше воспользовались методом компьютерного моделирования с использованием прикладного пакета ANSYS. Математическая модель описания гидродинамического перемешивания жидкого металла базируется на уравнениях Навье-Стокса [7]. Она включает уравнение неразрывности в форме Эйлера (уравнение несжимаемости) и уравнение сохранения импульса. Для расчета турбулентной вязкости была применена стандартная $k-\varepsilon$ модель, основанная на рассмотрении кинетической энергии пульсации скоростей k и скорости диссипации энергии ε . Константы, для стандартной $k-\varepsilon$ модели принимали равными $C_1=1,44$, $C_2=1,92$, $C_\mu=0,09$, $\sigma_k=1,0$, $\sigma_\varepsilon=1,3$.

Для моделирования взаимодействия аргона с металлом использовали VOF модель многофазных течений [8]. Уравнение объемной доли аргона в металле решалось по явной схеме дискретизации:

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} + S_{\alpha_q}) \right] V , \quad (5)$$

где $n+1$ – индекс текущего шага по времени;

n – индекс предыдущего шага по времени;

$\alpha_{q,f}$ – значение объемной доли q -той фазы на грани расчетной ячейки;

V – объем ячейки, м^3 ;

U_f – объемный поток через грань ячейки, базирующийся на векторе скорости, направленном по нормали к поверхности, $\text{м}^3/\text{с}$.

При выполнении расчетов была применена неструктурированная сетка на 8264 ячейки. Плотность жидкого металла принимали равной 7000 кг/м^3 , а вязкость равной $0,006 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Для аргона эти величины составляли соответственно $1,623 \text{ кг/м}^3$ и $8,9\cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Поверхностное натяжение на границе металл-аргон принимали равным $1,823 \text{ Н/м}$

Для двухтонного разливочного ковша было создано несколько геометрических и конечно-разностных моделей, учитывающих различное положение погруженной в расплав фурмы. Донная фурма во всех случаях располагалась на удалении от центральной оси ковша равном $2/3R$, где R – внутренний радиус днища ковша. В ходе моделирования рассматривали четыре характерных варианта расположения погруженной фурмы – осевое положение с глубинами погружения $0,55 \text{ м}$ и $0,25 \text{ м}$ и эксцентричное со смещением от оси в сторону, противоположную расположению донной фурмы, с аналогичными глубинами погружения. Расход инертного газа через нижнюю фурму варьировали в интервале $1,2\text{-}6,4 \text{ л/мин}$. Расход аргона через погружную фурму во всех расчетах оставался неизменным и составлял 56 л/мин . Выбранные значения расходов газа через фурмы определялись исходя из технических характеристик оборудования, применяемого в опытно-промышленных условиях.

Задачу решали в двумерной постановке. Результатами расчета являлись значения векторов скорости и суммарная скорость в каждой узловой точке расчетной области. Результаты, полученные для случаев с максимальной и минимальной интенсивностью продувки через донную фурму, представлены на рисунках 1 и 2. Жирной точкой на рисунках показано расположение среза сопла погруженной фурмы.

Максимальные скорости потоков наблюдаются в зонах барботажа. При малых расходах газа через донную фурму не удается существенно деформировать восходящий поток в зоне всплывания пузырей газа, вдуваемого через погруженную фурму (рис.1). Более того, анализ поведения потоков металла в динамике, показывает, что восходящие потоки металла от фурм имеют тенденцию к сливанию, что будет способствовать выносу инжесктированных частиц на поверхность ванны. Максимальные скорости потоков металла

достигают 0,7-0,8 м/с. При этом основная масса потоков металла движется со скоростями, не превышающими 0,2 м/с.

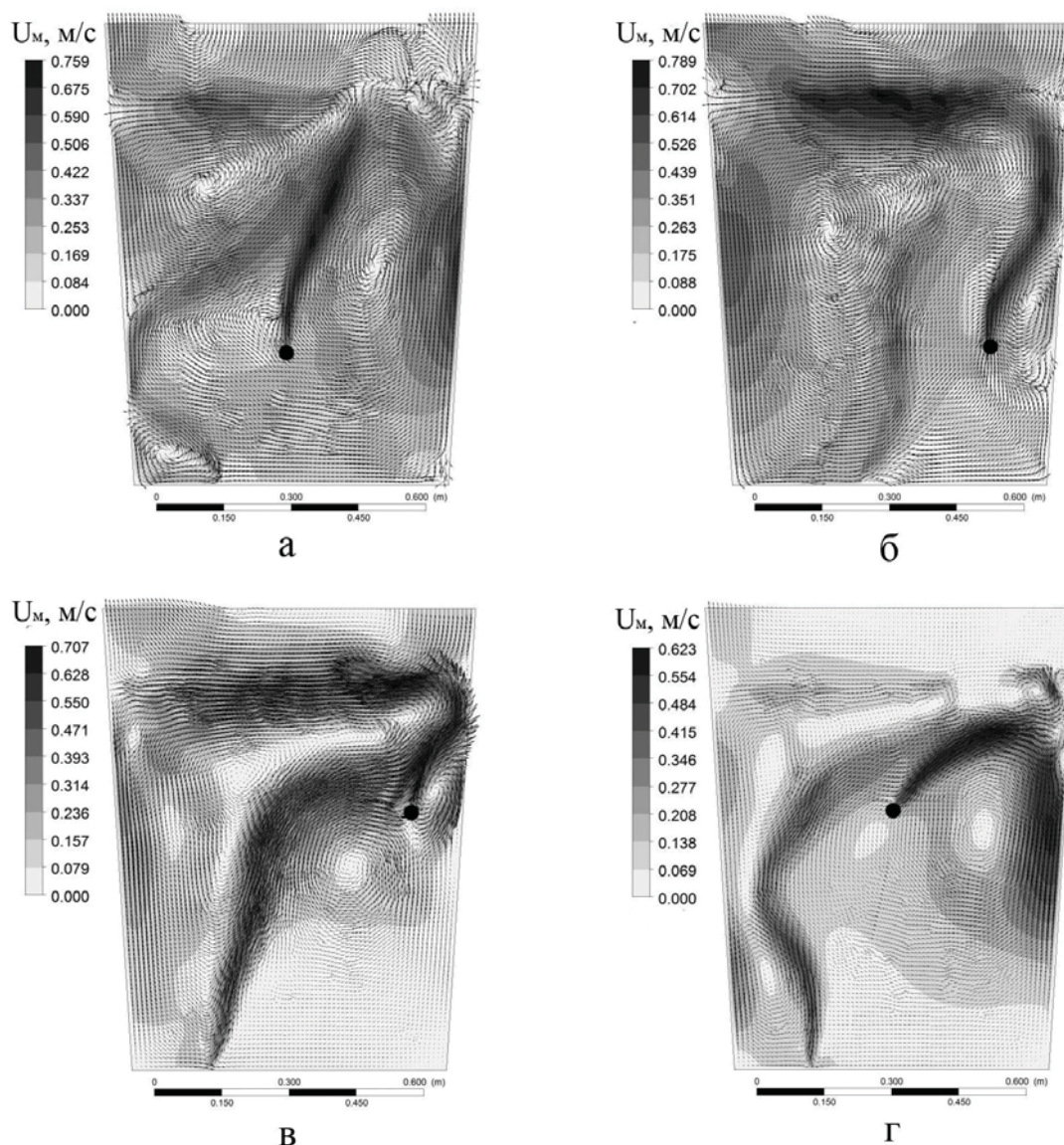


Рис. 1 – Поля скоростей жидкого металла при различном положении погруженной фурмы: а – осевое расположение, глубина погружения 0,55 м; б – эксцентрическое расположение, глубина погружения 0,55 м; в – эксцентрическое расположение, глубина погружения 0,25 м; г – осевое расположение, глубина погружения 0,25 м.

Расход аргона через донную фурму 1,2 л/мин

Таким образом, выполненное моделирование позволило определить наилучший вариант организации продувки, а также сформулировать требования к размерам инжестируемых частиц для конкретных опытно-промышленных условий. Кроме того, полученные результаты создают основу для постановки задачи физического моделирования рассмотренных процессов.

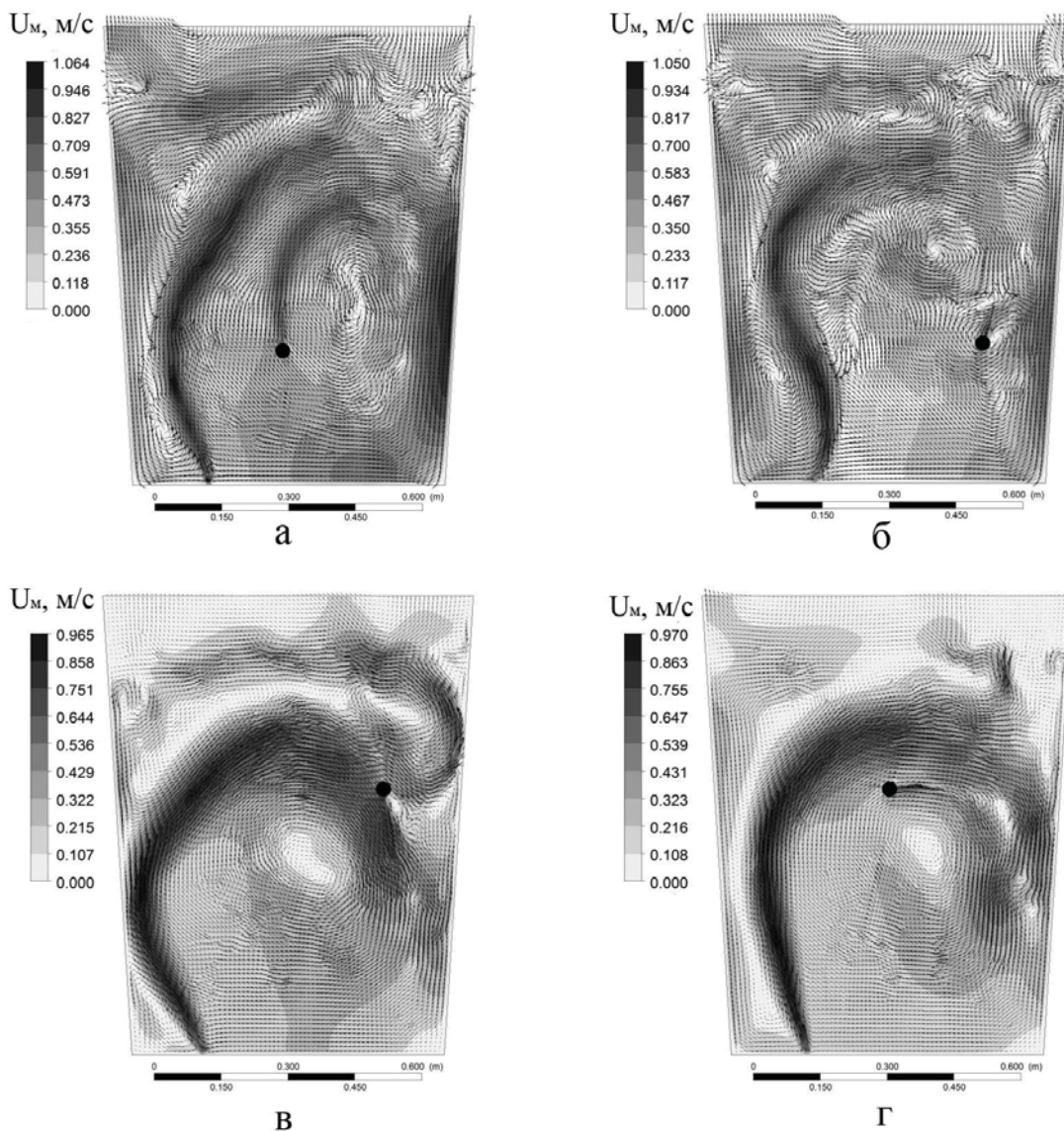


Рис. 2 – Поля скоростей жидкого металла при различном положении погруженной фурмы: а – осевое расположение, глубина погружения 0,55 м; б – эксцентрическое расположение, глубина погружения 0,55 м; в – эксцентрическое расположение, глубина погружения 0,25 м; г – осевое расположение, глубина погружения 0,25 м.

Расход аргона через донную фурму 6,4 л/мин

Продувка через донную фурму с максимальным для данных условий расходом газа в большинстве случаев обеспечивает необходимое нарушение целостности восходящего потока от погруженной фурмы и формирование интенсивных циркуляционных потоков в объеме металла (рис.2). Это создает предпосылки для затягивания инжесктированных частиц в объем ванны жидкого металла. Максимальные скорости потоков в этом случае несколько выше (0,9-1,0 м/с). Основная масса металла также движется быстрее

со скоростями 0,3-0,4 м/с. Расчет по формуле (4) показывает, что при такой скорости потоки металла должны увлекать частицы размером до $(5-6) \cdot 10^{-4}$ м (плотность частиц 2200-3900 кг/м³).

Анализ результатов моделирования показывает, что наилучший результат с точки зрения целей моделирования достигается при максимальном заглублении фурмы и эксцентричном ее расположении (рис. 2, б). При осевом расположении фурмы наилучший результат достигается при малом ее заглублении (рис. 2, г).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ghosh A. Secondary Steelmaking: Principles and Application / A. Ghosh. – CRC Press, 2001. – 344 p.
2. Поволоцкий Д.Я. Внепечная обработка стали /Кудрин В.А., Вишкарев А.Ф. – М. :МИСиС, 1995. – 255 с.
3. Костецкий Ю.В. Перспективы использования сульфидов для рафинирования железоуглеродистых расплавов от растворенной меди /Ю.В. Костецкий, В.П. Карпов, В.И. Омельченко, Д.Ю. Миронов // Металл и литье Украины. – 2005. - №3-4. – С.87-88.
4. Kostetsky Y. Advanced Technological Solutions for Quality Steel Production with Scrap Contaminated by Copper / Y. Kostetsky, V. Karpov, D. Mironov // Proceeding of the 2007 Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. – Nancy : Ecole des Mines de Nancy, 2007. – P. 339-343.
5. Гутри Р.Л. Физико-химические и гидродинамические аспекты легирования расплава методом вдувания порошков / Р.Л. Гутри //Инжекционная металлургия’80, Лула, Швеция. – М.:Металлургия, 1982. – С.75-92.
6. Guthrie R. L. Fluid Flows in Metallurgy – Friend or Foe? / L.R. Guthrie //Metallurgical and Materials Transactions B. – 2004. – V 35, N3. – P. 417-437.
7. Ландау Л.Я. Гидродинамика / Л.Я. Ландау, В.М. Лифшиц. – М. : Наука, 1986. – 710 с.
8. Ranade V. V. Computational Flow Modelling for Chemical Reactor Engineering /V.V. Ranade. – Academic Press, 2002. – 452 p.