

## ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КОВШЕ В ПРОЦЕССЕ ИНЖЕКЦИИ МАТЕРИАЛОВ

Ю.В. Костецкий, А.В. Мач

Донецкий национальный технический университет

*Представлені результати комп'ютерного моделювання руху потоків рідкого металу в розливному ковші під час інжекції порошкових матеріалів крізь занурену зверху фурму відповідно до конкретних умов виробництва. Визначені швидкості і розподіл потоків металу для різних варіантів організації продування, сформульовані вимоги до розмірів часток, які інжектують в об'єм розплаву.*

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 легкоплавких и легкоокисляющихся материалов [1-3].

Применение метода инъекции порошкообразных материалов в струе инертного газа позволило повысить эффективность процесса сульфидного рафинирования железоуглеродистых расплавов от растворенной меди [4,5]. При этом порошкообразную смесь реагентов, содержащих серу, вводят в объем расплавленного металла в потоке аргона с помощью погруженной фурмы. Для стимулирования образования дисперсной сульфидной фазы в расплав также инжектируют твердые частицы огнеупорного материала, химически не взаимодействующего с расплавом. Важно, чтобы данные частицы распределялись по всему объему ванны. Однако восходящие потоки металла в зоне барботажа интенсивно выносят их на поверхность ванны, что снижает коэффициент их полезного использования.

В общем случае уравнение движения отдельной частицы может быть записано на основе второго закона Ньютона:

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

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

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

$m$  – масса частицы, кг.

Для адекватного описания траектории движения отдельных частиц в расплаве требуется учет сил тяжести, архимедовой силы, силы сопротивления, а для крупных частиц и сил, обусловленных наличием

присоединенной массы [6,7]. Характер движения твердых частиц, инжектированных в расплав, тесным образом связан с условиями движения потоков металла, возникающих под влиянием газовой струи и восходящего газожидкостного потока. Максимальный размер частиц, которые могут быть захвачены потоком металла, или минимальную скорость потока, при которой он может увлечь частицу определенного размера, можно оценить с помощью следующего неравенства [8]:

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

где  $r$  – радиус частицы, м;

$\rho_m, \rho_p$  – плотность металла и частицы, кг/м<sup>3</sup>;

$\eta_m$  – динамическая вязкость металла, Па·с;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$u_m$  – скорость потока жидкого металла, м/с.

Отсюда:

$$u_m \geq \frac{2}{9} \frac{g r^2 (\rho_m - \rho_p)}{\eta_m}. \quad (3)$$

Либо:

$$r \leq \left( \frac{9 \eta_m u_m}{2 g (\rho_m - \rho_p)} \right)^{0,5}. \quad (4)$$

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.

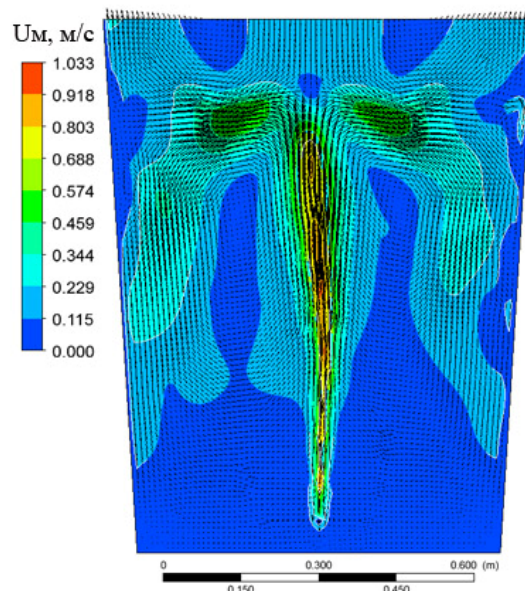
Для решения гидродинамической задачи о движении жидкого металла в ковше воспользовались методом компьютерного моделирования с использованием прикладного пакета ANSYS. Математическая модель описания гидродинамического перемешивания жидкого металла базируется на уравнениях Навье-Стокса [9]. Она включает уравнение неразрывности в форме Эйлера (уравнение несжимаемости) и уравнение сохранения импульса. Для учета эффектов турбулентности была применена стандартная  $k - \varepsilon$  модель, основанная на рассмотрении кинетической энергии пульсации скоростей  $k$  и скорости диссипации энергии  $\varepsilon$ . 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 [10].

Задачу решали в двумерной постановке. Целью моделирования было исследование распределения и характеристик потоков жидкого

металла в объеме ванны в ходе инъекции материалов через погруженную фурму и выбор варианта организации продувки, обеспечивающего эффективное использование твердых частиц, инжектированных в расплав. Для двухтонного ковша было создано несколько геометрических и конечно-разностных моделей, учитывающих различное положение погруженной в расплав фурмы – осевое и эксцентричное, с глубинами погружения 0,55 м и 0,25 м. Донная фурма во всех случаях располагалась на удалении от центральной оси ковша равном  $2/3$  внутреннего радиуса днища ковша. Расход инертного газа через донную фурму в расчетах изменяли в интервале 1,2-6,4 л/мин, а расход через погруженную фурму во всех случаях оставался равным 56 л/мин.

Результатами расчета являлись значения векторов скорости и суммарная скорость в каждой узловой точке расчетной области.

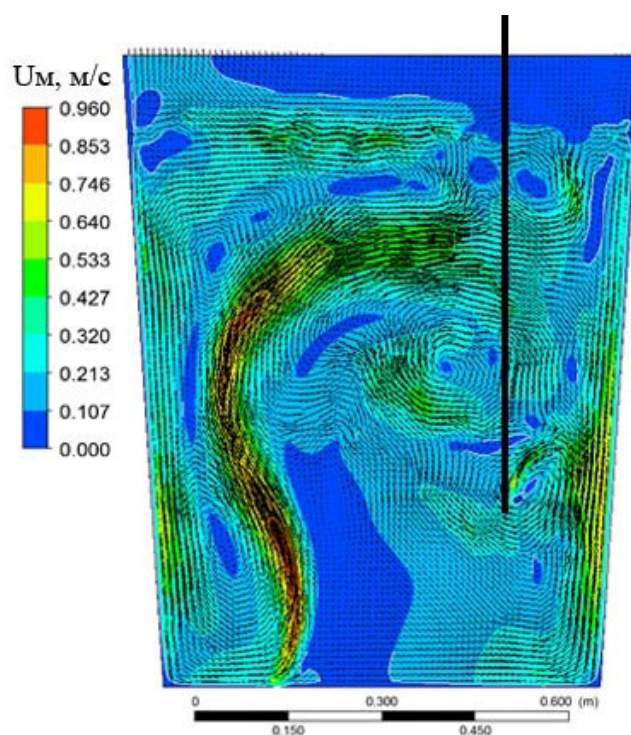
На рис. 1 показаны результаты расчета, полученные при осевом расположении погруженной фурмы без дополнительной продувки через донную фурму. Эта расчетная схема соответствовала условиям инъекции материалов в опытно промышленных условиях. Видно, что нисходящие потоки у стенок ковша характеризуются малой интенсивностью и глубиной проникновения, в то время как интенсивный восходящий поток в зоне барботаж будет выносить частицы к поверхности ванны.



**Рис.1. Поле скоростей жидкого металла при центральном расположении погруженной фурмы с глубиной погружения 0,8 м и расходом газа носителя 56 л/мин**

Дополнительное вдувание газа через донную фурму с максимальным для заданных условий расходом газа в большинстве рассмотренных случаев обеспечивает необходимое нарушение целостности восходящего потока от погруженной фурмы и формирование интенсивных циркуляционных потоков в объеме металла. Это создает предпосылки для затягивания инжесктированных частиц в объем ванны жидкого металла. Максимальные скорости потоков наблюдаются в зонах барботажа и достигают 0,9-1,0 м/сек. Основная масса металла движется со скоростями до 0,3-0,4 м/с. Расчет по формуле (4) показывает, что при такой скорости потоки металла должны увлекать частицы размером до  $(5\div 6) \cdot 10^{-4}$  м с плотностью 2200-3900 кг/м<sup>3</sup>.

Анализ результатов моделирования показывает, что наилучший результат с точки зрения целей моделирования достигается при максимальном заданном заглублении погруженной фурмы и эксцентричном ее расположении (рис. 2).



**Рис. 2. Поле скоростей жидкого металла при эксцентричном расположении погруженной фурмы с глубиной погружения 0,55 м и расходом аргона через донную фурму 6,4 л/мин**

Таким образом, проведенное компьютерное моделирование позволило определить наилучший вариант организации продувки, а

также сформулировать требования к размерам инжестируемых частиц для конкретных опытно-промышленных условий.

#### Библиографический список

1. Senk D. Dust Injection in Iron and Steel Metallurgy /D. Senk, H.W. Gude-  
nau, S. Geimer, E.Gorbunova // ISIJ International. – 2006. – V46. – N12. –  
P. 1745-1751.
2. Ghosh A. Secondary Steelmaking: Principles and Application / A. Ghosh. –  
CRC Press, 2001. – 344 p.
3. Поволоцкий Д.Я. Внепечная обработка стали /Кудрин В.А., Вишкарев  
А.Ф. – М. :МИСиС, 1995. – 255 с.
4. Костецкий Ю.В. Перспективы использования сульфидов для рафини-  
рования 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.
5. Kostetsky Y. Advanced Technological Solutions for Quality Steel Produc-  
tion with Scrap Contaminated by Copper / Y. Kostetsky, V. Karpov, D. Mi-  
ronov // Proceeding of the 2007 Symposium on Liquid Metal Processing and  
Casting. – Nancy : Ecole des Mines de Nancy, 2007. – P. 339-343.
6. 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.
7. 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.
8. Минаев Ю.А. Физико-химия в металлургии. (Термодинамика,  
Гидродинамика, Кинетика) /Ю.А. Минаев, В.В. Яковлев. – М. :  
МИСИС, 2001. – 320 с.
9. Ландау Л.Я. Гидродинамика / Л.Я. Ландау, В.М. Лифшиц. – М. : Наука,  
1986. – 710 с.
10. Ranade V. V. Computational Flow Modelling for Chemical Reactor Engi-  
neering / V.V. Ranade. – Academic Press, 2002. – 452 p.