

Математична модель гідродинамічних процесів при десульфурзації чавуну диспергованим магнієм в ковші з використанням заглибної обертової фурми

Є.М. СІГАРЬОВ, А.Г. ЧЕРНЯТЕВИЧ, Р.Р. ГНИП

Дніпродзержинський державний технічний університет

Запропоновано математичну модель гідродинамічних процесів під час десульфурзації чавуну в ковші шляхом введення диспергованого магнію через заглибну обертову фурму.

Предложена математическая модель гидродинамических процессов во время десульфурации чугуна в ковше путем вдувания диспергированного магния через погружную вращающуюся фурму.

The mathematical model of hydrodynamical processes during desulphurization pig-iron in a casting ladle by inflation dispersed magnesium through submersible rotating lance.

Сучасне промислове впровадження позадоменної обробки чавуну диспергованим магнієм стало можливим після розробки [1] ефективних способів регулювання газоутворення під час вдування у розплав магнію, який має низьку температуру плавлення (650°C) та кипіння (1107°C) в порівнянні із температурою рідкого чавуну ($1250\text{--}1400^{\circ}\text{C}$).

Відомо [1], що позитивний ефект з точки зору прискорення десульфурзації чавуну дає активізація розчинення магнію у розплаві за рахунок підвищення площі поверхні контакту рідкої та газової фаз. Встановлено [2], що використання обертової заглибної фурми для продувки чавуну диспергованим магнієм, замість стаціонарної, призводить до підвищення швидкості розчинення магнію у розплаві. При цьому ефективність десульфурзації підвищується на 20% при однакових витратах магнію на обробку чавуну.

Моделювання гідродинамічних процесів у ковші під час десульфурзації чавуну вдуванням диспергованого магнію через заглибну обертову фурму дозволить отримати необхідну інформацію, яка приблизить прийняття рішення про доцільність застосування обертових фурм без проведення великомасштабних промислових досліджень.

Моделювання проведено для промислових умов десульфурзації чавуну у 200-т заливальному ковші при наступних параметрах обробки:

Параметри	Значення
Маса чавуну	200 т
Висота металеві ванни	3150 мм
Діаметр металеві ванни на поверхні розплаву	3600 мм
Діаметр заглибної фурми	250 мм
Кількість сопел	2 шт
Діаметр сопла	10 мм
Глибина занурення фурми від дна ковша	150 мм
Швидкість обертання фурми	$10 (\text{об}/\text{хв})$
Витрати магнію	$18 (\text{кг}/\text{хв})$
Витрати азоту	$3 (\text{м}^3/\text{хв})$

Задану швидкість обертання фурми прийнято на основі отриманої інформації [3] про швидкість вспливання газових бульбашок суміші пару магнію з азотом у ванні розплаву. При цьому розрахунком було встановлено (діаметр) реакційної зони вспливання бульбашок вздовж стовбура фурми, який дорівнює 1900 мм.

Метою даної роботи є побудова математичної моделі гідродинамічних процесів під час обробки чавуну у ковші шляхом вдування диспергованого магнію через заглибну обертову фурму при вищезазначених технологічних параметрах.

Побудова даної математичної моделі враховує перш за все декілька факторів: суміш пару магнію із азотом, що вдувається в область ковша заповненого чавуном при нестационарному розташуванні сопел фурми; сопла фурми розташовані на певній висоті відносно дна ковша; тривимірну конфігурацію граничних умов; соленодальний характер руху газорідного середовища.

В основу математичної моделі покладено наступні вихідні припущення :

- А. По геометрії розрахункової області:
 1. ківш припускається циліндричної форми;
 2. поперечний переріз ковша близький до квадратного;
- В. По гідродинаміці розплаву:
 1. вільна поверхність металу вважається рівною, на ній відсутні хвилі;
 2. розплав металу в ковші в певній степені турбулізований.

Математична модель гідродинамічних процесів при наявності газової і рідкої фази описується сумісно в одношвидкісному підході [4] в якому припускається, що газорідке середовище є суцільним, в'язким та нестисливим. При цьому немає необхідності робити якісні припущення щодо розміру і форми бульбашок магнію із азотом та їхньої кількості.

Умова нестисливості рідкого металу в нашому випадку (постійної густини) представляє собою умову соленодальності вектора швидкості:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0.$$

Рівняння руху газорідного середовища матимуть наступний вигляд :

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + (\tilde{v} \cdot \nabla) \tilde{v} = -\nabla \tilde{p} + \nu \Delta \tilde{v} + (1 - \alpha) \tilde{g} + \tilde{F}'; \\ \nabla \cdot \tilde{v} = 0; \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + (\tilde{v} \cdot \nabla) \alpha = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де $\tilde{p} = \frac{p}{\rho}$ - тиск, нормований на густину; $\tilde{F}' = \frac{\tilde{F}}{\rho}$ -

об'ємна складова зовнішніх сил; $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ - коефіцієнт кінематичної в'язкості, який враховує турбулентний характер руху металу; \tilde{g} - вектор прискорення вільного падіння; α - коефіцієнт газовмісту; \tilde{v} - вектор швидкості середовища.

Вектор швидкості середовища \tilde{v} не співпадає ні зі швидкістю руху рідини, ні зі швидкістю руху повітря, а є середнім між ними і достатньо повно характеризує рух газорідкого середовища як єдиного цілого.

Окрім того, в даній моделі припускається, що основним фактором, який визначає характер руху газорідкого середовища, являється підйомна сила $\tilde{f} = -\alpha \tilde{g}$, яка виникає через неоднорідність по щільності, що обумовлена наявністю газових включень; коефіцієнт газовмісту α залежить лише від точки простору і часу. З фізичної точки зору це означає, що ми зневажаємо явищами кавітації та стисливістю бульбашок газу.

Подача диспергованого магнію і азоту через сопла фурми проводиться шляхом введення в місці їх розташувань джерела газової фази об'ємної густини $\psi = \frac{q T_{met}}{V_0 273}$, де q - розхід пару диспергованого магнію і азоту через фурму поділений на кількість сопел фурми і V_0 - об'єм зони формування барботажного режиму в області біля сопла фурми.

Дана система рівнянь доповнюється умовами однозначності - граничними умовами.

Граничні умови для швидкості газорідного середовища на вісі симетрії, стінках ємності та вільній поверхні обираються умовами не протікання та умовами вільного ковзання:

$$v_{\perp} = 0 \quad \tilde{n} \cdot \nabla \psi|_l = 0$$

де \tilde{n} - одиничний вектор нормалі до поверхні.

На коефіцієнт газовмісту α накладається на вісі симетрії та стінках ємності умова не протікання

$$\tilde{n} \cdot \nabla \alpha = 0,$$

а на вільній поверхні - умова вільного протікання (конвективний перенос):

$$\alpha = a,$$

Граничні умови для тиску отримуємо із другого рівняння системи (1) проєктуючи його на нормаль \tilde{n} до поверхні.

Турбулентний характер руху враховується шляхом введення ефективних коефіцієнтів в'язкості і дифузії бульбашок газової фази, які включають турбулентну і апроксимаційну складові.

$$\nu' = \nu + \frac{\Delta}{\text{Re}_{\Delta}} \nu_{\Delta}$$

де ν_{Δ} - швидкість в границях даної комірки; Re_{Δ} - сіткове число Рейнольдса.

З чисельних експериментів відомо, що при $\text{Re}_{\Delta} = 2$ забезпечується стійкість розрахунку гідродинамічних характеристик.

Система рівнянь (1), що описує рух газорідного середовища вирішується чисельно у природних змінних методом розщеплення по фізичним факторам за допомогою трьох етапної схеми розщеплення:

$$\text{I. } \frac{\tilde{v} - \tilde{v}^n}{\tau} = -(\tilde{v}^n \cdot \nabla) \tilde{v}^n + \nu' \Delta \tilde{v}^n + (1 - \alpha^n) \tilde{g} + \tilde{F}', \quad (2)$$

$$\frac{\tilde{\alpha} - \alpha^n}{\tau} = -(\tilde{v}^n \cdot \nabla) \alpha^n; \quad (3)$$

$$\text{II. } \Delta \tilde{p} = \nabla \cdot \tilde{v} / \tau; \quad (4)$$

$$\text{III. } \frac{\tilde{v}^{n+1} - \tilde{v}}{\tau} = -\nabla \tilde{p}, \quad (5)$$

$$\frac{\alpha^{n+1} - \alpha^n}{\tau} = -(\tilde{v}^n \cdot \nabla) \tilde{\alpha}; \quad (6)$$

В циліндричних координатах вважаємо $\tilde{v} = v_r \tilde{e}_r + v_{\phi} \tilde{e}_{\phi} + v_z \tilde{e}_z$ і рівняння (2, 4, 5) приймають вигляд:

$$\text{I. } \tilde{v}_r = v_r + \tau \left[-(\tilde{v} \cdot \nabla) v_r + \frac{v_{\phi}^2}{r} + \nu \left(\Delta v_r - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_{\phi}}{\partial \phi} \right) + (1 - \alpha) g + F'_r \right],$$

$$\tilde{v}_{\phi} = \tilde{v}_{\phi} + \tau \left[-(\tilde{v} \cdot \nabla) v_{\phi} + \frac{v_{\phi} v_r}{r} + \nu \left(\Delta v_{\phi} - \frac{v_{\phi}}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} \right) + (1 - \alpha) g + F'_{\phi} \right],$$

$$\tilde{v}_z = v_z + \tau \left[-(\tilde{v} \cdot \nabla) v_z + \nu \Delta v_z + (1 - \alpha) g + F'_z \right],$$

де оператори $(\tilde{v} \cdot \nabla)$ і Δ визначаються формулами:

$$(\tilde{v} \cdot \nabla) f = v_r \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{v_{\phi}}{r} \frac{\partial f}{\partial \phi} + v_z \frac{\partial f}{\partial z};$$

$$\Delta f = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\text{II. } \tilde{D} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tilde{v}_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{v}_{\phi}}{\partial \phi} + \frac{\partial \tilde{v}_z}{\partial z},$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{p}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial z^2} = \frac{\tilde{D}}{\tau};$$

$$\text{III. } v_r^{n+1} = \tilde{v}_r - \tau \frac{\partial \tilde{p}}{\partial r},$$

$$v_{\phi}^{n+1} = \tilde{v}_{\phi} - \tau \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \phi},$$

$$v_z^{n+1} = \tilde{v}_z - \tau \frac{\partial \tilde{p}}{\partial z}.$$

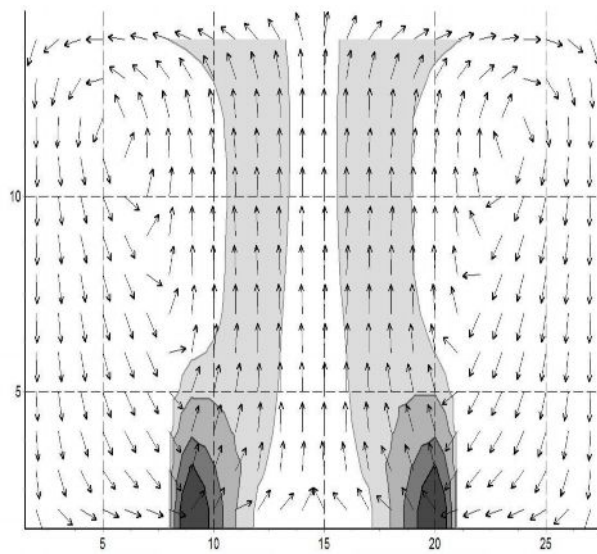


Рис. 1. Зображення поля швидкостей та концентрації азоту при вертикальному перерізі через вісь симетрії і сопла фурми.

Позначення області об'ємної концентрації азоту у відсотках зображеної на рис. (1):

від	3	8	25	50
до	8	25	50	100

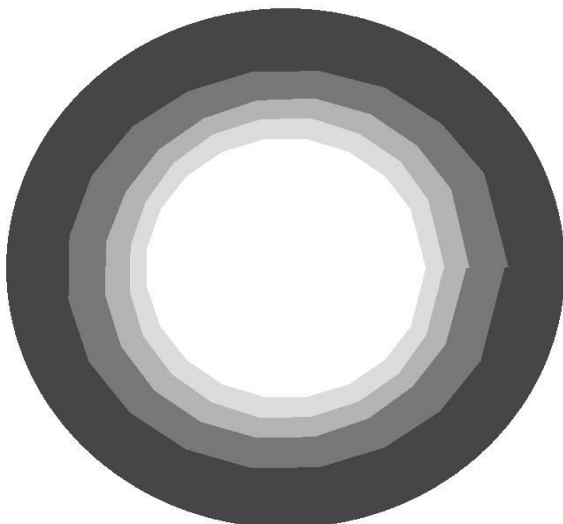


Рис. 2. Середня вертикальна складова швидкості у ковші при горизонтальному перерізі.

Позначення середньої по висоті вертикальної складової швидкості м/с у ковші зображеної на рис. (2):

$V(м/с)$	0	-0,025	-0,075	-0,250	-0,350

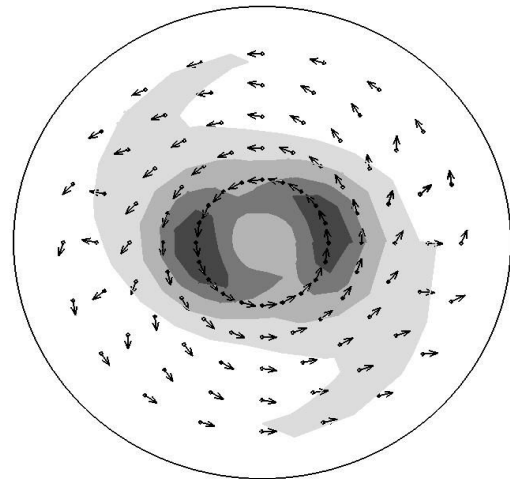


Рис.3 Зображення поля швидкостей та концентрації азоту при горизонтальному перерізі у ковші на висоті 3150 мм

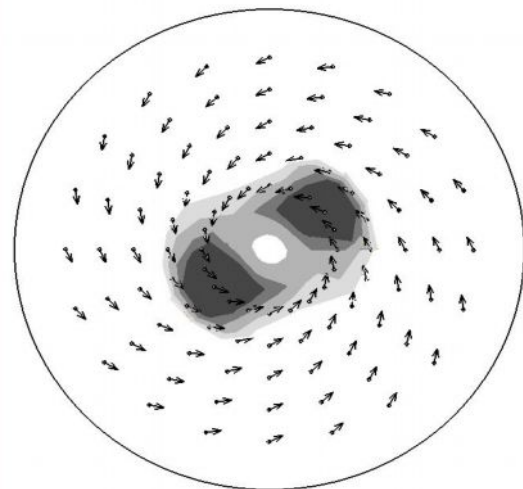


Рис. 4. Зображення поля швидкостей та концентрації азоту при горизонтальному перерізі у ковші на висоті 1696 мм

Позначення об'ємної концентрації азоту у відсотках при горизонтальному перерізі ковша зображених на рис. (3-4):

від	0	1	2,5	5	7,5
до	1	2,5	5	7,5	9

Висновки

1. Розроблено математичну модель гідродинамічних процесів під час десульфурзації чавуну у ковші шляхом вдування диспергованого магнію через заглибну обертову фурму.

2. Виконано чисельні дослідження якісної картини гідродинамічних процесів в об'ємі металеві ванни ковша при промислових параметрах вдування диспергованого магнію.

3. За наявності додаткових експериментальних даних розроблена модель здатна кількісно адекватно описувати гідродинамічні процеси і використовуватись для вивчення ефективних режимів вдування диспергованого магнію у ківш через заглибну обертову фурму.

ЛІТЕРАТУРА

1. Воронова Н. А. Десульфурация чугуна магнием. – М. : Металлургия, 1980. – 240 с.
2. Повышение эффективности десульфурации чугуна магнием с применением вращающейся фурмы / М. Микуни, К. Такахаси, Е. Уэдзима и др./ Дзайре то пурохэсу. – 1995. – т. 8. - №4. – С. 929
3. Исследование гидродинамики процесса обработки чугуна парообразным магнием / Е. Н. Сигарев, А.Г. Чернятевич, А. С. Вергун, К. М. Чубин/ Изв. ВУЗов. 4М. – 2004. - №3. – С. 14 – 17.
4. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Надрыгайло Т.Ж. Методы расщепления в задачах гидродинамики и тепломассопереноса. – Днепропетровск : Системные технологии, 2003. – 260 с.

пост. 19.05.08