

Математична модель гідродинаміки процесу продувки шлакової ванни у порожнині конвертера

А.Г. ЧЕРНЯТЕВИЧ, О.С. САМОХВАЛОВ, Є.М. СІГАРЬОВ, О.А. ЧУБІНА

Дніпродзержинський Державний Технічний Університет

Побудовано математичну модель гідродинаміки процесів продувки шлакової ванни у порожнині конвертера

Построена математическая модель гидродинамики процессов продувки шлаковой ванны в полости конвертера

We constructed the mathematical model of hydrodynamics processes of a purge slag bath in a cavity of the converter

Вступ

Останнім часом у металургійній практиці широке поширення набуває ресурсо- та енергозберігаюча технологія продовження терміну служби футерівки конвертерів шляхом розбризкування підготовленого кінцевого шлаку (з вмістом 8–14 % MgO) азотними струменями з нанесенням гарнісажу на футерівку (схематично процес ремонту зображений на рис. 1).

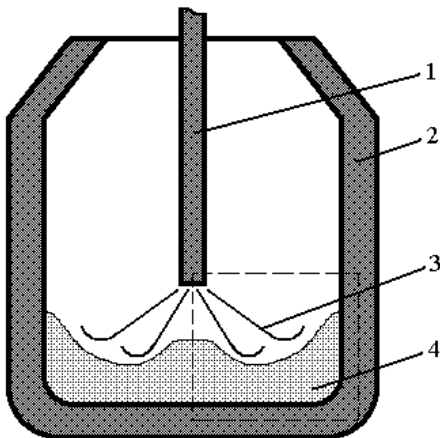


Рис. 1. Схема ремонту футерівки конвертера: 1 – фурма, що забезпечує роздув шлаку; 2 – футерівка конвертера; 3 – азотні струмені; 4 – шлакова ванна

За останньою інформацією металурги Китаю [1], використовуючи передовий досвід США [2], досягли стійкості футерівки кисневих конвертерів до 20–23 тис. плавок і на деяких агрегатах виконується тільки одна перефутерівка на рік.

Впроваджена в Україні і Росії технологія виплавки сталі з нанесенням шлакового гарнісажу і додатковим факельним торкретуванням дозволила досягти стійкості футерівки конвертерів тільки до 2500–4500 тис. плавок [3]. Це свідчить про необхідність удосконалення існуючих та пошук нових варіантів підвищення стійкості футерівки конвертерів, щоб отримані показники відповідали досягненням зарубіжної металургійної практики.

Одним із перспективних напрямків продовження терміну служби футерівки конвертерів є використання для роздувки кінцевого шлаку спеціально пристосованих для цієї операції фурм. Для розробки конструкцій

таких фурм та дугтьового режиму нанесення шлакового гарнісажу край необхідна вірогідна інформація про гідрогазодинамічні особливості взаємодії багатоструменевого азотного дугтя із шлаковою ванною. Важливо установити оптимальні варіанти організації реакційних зон зі спрямованим бризковиносом із них об'ємів шлаку на внутрішню поверхню робочого простору конвертера.

Але експериментальне дослідження таких процесів наштовхується на певні труднощі: велика коштовність дослідних процесів на промислових агрегатах; великі температури, які спостерігаються в порожнині конвертера. Тому виникає необхідність залучення математичного моделювання для дослідження таких процесів.

Постановка задачі

Математична модель при описі середовища газ – шлаковий розплав ґрунтується на концепції взаємодіючих і взаємопроникаючих континуумів з використанням загального підходу до опису теплофізичних процесів у багатофазних середовищах, описаного в роботі [4]. В основу математичної моделі були покладені наступні основні припущення:

1. Осьова симетрія задачі.
2. Нестисливість газу в розглянутих режимах продувки.
3. Відношення дійсних густин газовой ρ_g^0 і рідкошлакової ρ_s^0 фаз мале.

З урахуванням зроблених припущень математична модель будується наступним чином.

Рівняння масопереносу для γ (об'ємна густина рідкошлакової фази) записується у вигляді:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\gamma \bar{v}_s) = 0, \quad (1)$$

де \bar{v}_s - швидкість рідкошлакової фази.

Для знаходження швидкостей рідкошлакової та газовой фаз розв'язуємо рівняння:

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} = -(\bar{v}_i \bar{\nabla}) \bar{v}_i + \nu \Delta \bar{v}_i - \bar{\nabla} p' + \bar{g} + \bar{F}, \quad (2)$$

де i - індекс, який визначає для якої з фаз записується рівняння, \bar{v}_i - швидкість i -ої фази, ν - коефіцієнт кі-

нематичної в'язкості, p' - тиск, нормований на густину, \vec{g} - прискорення вільного падіння, \vec{F} - сила міжфазної взаємодії, яка записується у вигляді:

- для рідкошлакової фази: $\vec{F} = C|\vec{v}_s - \vec{v}_g|^2$;

- для газової фази: $\vec{F} = C|\vec{v}_g - \vec{v}_s|^2$.

Згідно припущенню о нестисливості газової та чисто шлакової фаз рівняння (2) доповнюється умовою соленоїдальності:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v}_i = 0, \quad (3)$$

Чисельний розрахунок поставленої задачі проводимо по наступній схемі. Область у якій ведеться розрахунок на рис. 1. Позначена пунктирною лінією. Часова вісь розбивається на проміжки з кроком τ : $t = n\tau$, де n - номер часового шару.

В усій розрахунковій області на кожному часовому кроці розв'язуємо рівняння масопереносу (1) рідкошлакової фази. При цьому застосовуємо описаний у роботі [1] метод із приглушенням сіткової дифузії – бездифузійний метод. По результату перебування на фіксованому часовому шарі поля об'ємної густини шлакової фази γ розрахункова область розбивається на газову (с $\gamma = 0$), рідкошлакову (с $\gamma = 1$) і газошлакову області (с $0 < \gamma < 1$).

Рівняння (2), (3), у випадку рідкошлакової фази, розв'язуємо в усій розрахунковій області. Для цього застосовуємо звичайний метод розщеплення за фізичними факторами, що застосовується для соленоїдального руху. У відповідності із цим методом рівняння руху (1) можна виразити у вигляді єдиної системи рівнянь:

$$I \quad \vec{v}_i = \vec{v}_i^n + \tau \left(-(\vec{v}_i^n \cdot \vec{\nabla}) \vec{v}_i^n + \nu \Delta \vec{v}_i + \vec{g} + \vec{F}^n \right), \quad (4)$$

$$II \quad \Delta p' = \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_i / \tau, \quad (5)$$

$$III \quad \vec{v}_i^{n+1} = \vec{v}_i - \tau \vec{\nabla} p', \quad (6)$$

причому, рівняння (4), (6) розв'язуються в газошлаковій зоні, а рівняння для тиску (5) – тільки в зоні, яка повністю заповнена шлаком. Таким чином рівняння (6) забезпечує бездивергентність руху середовища тільки в її рідкошлаковій частині.

Для знаходження швидкостей газової фази, розв'язок рівняння (2) здійснюється по аналогічній схемі. Але, згідно припущенню, газ нестисливий у всьому об'ємі, тому всі рівняння системи розв'язуються у газовій та газошлаковій області.

Крайові умови на гідродинамічні параметри, що розраховуються, задаються наступним чином. Для швидкостей: на соплах фурми і верхній границі – умовами вільного протікання, а на стінах конвертера – непротікання, на осі симетрії – умовами симетрії, на всіх інших границях – умовами вільного ковзання. На γ скрізь накладаються крайові умови $\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \gamma|_S = 0$, де \vec{n} - вектор, перпендикулярний до границі.

Запишемо скінченно-різницевий варіант схеми (4)-(6). Згідно до припущення 1), схему записуємо у циліндричних координатах:

$$I \quad \begin{aligned} \tilde{u} = u + \tau \left[-\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} r u^2 \right) - \frac{\partial (u w)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v^r}{r} \frac{\partial (r u)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v^z \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F \right], \end{aligned}$$

$$II \quad \begin{aligned} \tilde{w} = w + \tau \left[-\frac{\partial w^2}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(v^r r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v^z \frac{\partial w}{\partial z} \right) + g + F \right], \end{aligned}$$

$$III \quad \begin{aligned} \tilde{D} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tilde{w}) + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z}, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{p}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{p}}{\partial z^2} &= \frac{\tilde{D}}{\tau}, \end{aligned}$$

$$u^{n+1} = \tilde{u} - \tau \frac{\partial \tilde{p}}{\partial r},$$

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

При записі дифузійного доданка коефіцієнт кінематичної в'язкості ν вноситься під знак похідної і припускається, що він має векторний характер.

Результати роботи

Розглянемо гідродинамічну картину, яка має місце у порожнині конвертера під час процесу продувки шлакової ванни азотними струменями (рис.2). Темним кольором позначена рідко- та газошлакова область, білим – газова. У відповідності до свого розташування на розрахунковій області стрілки показують напрямки швидкостей газової або рідкошлакової фаз.

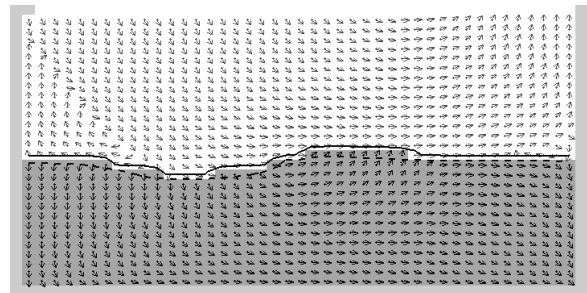


Рис. 2. Гідродинамічна картина в порожнині конвертера під час продувки шлакової ванни. Лініями позначена ізоконцентрація рідкошлакової фази: $\gamma = 0.5$ – суцільна лінія, $\gamma = 0.05$ - пунктир

На початку процесу продувки, біля осі симетрії конвертера, формується газовий струмінь, а у стінки конвертера над вільною поверхнею утворюється невеликий газовий вихор. На рис.3 видно, як з плином часу вихор збільшується у розмірах, та витягується вздовж стінки конвертера. Спостерігається процес утворення шлакової хвилі, яка з плином часу збільшується, та рухається до стінки конвертера. На рис.3 ми бачимо, як з гребня хвилі зриваються краплі шлаку, та продовжують рухатись до стінки конвертера.

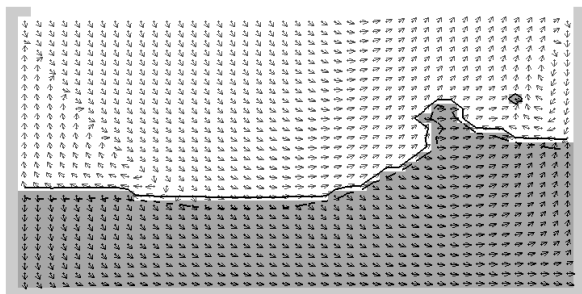


Рис. 3. Утворення хвилі в порожнині конвертера під час продувки шлакової ванни

Досягнувши стінки конвертера, шлакова хвиля піднімається вздовж неї на висоту приблизно рівну 3/4 висоти розрахункової області, але після цього, під дією сили тяжіння починає рухатись вниз (рис. 4).

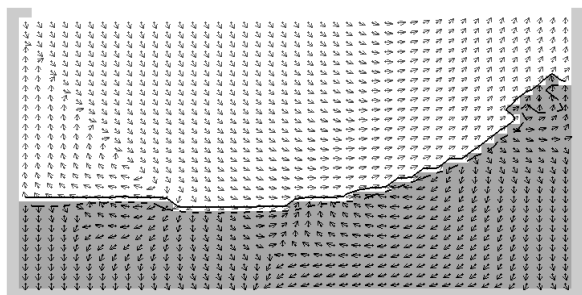


Рис. 4. Момент досягнення шлакової хвилі стінки конвертера

В поданій роботі нами розглядається початковий етап продувки шлакової ванни, тому робити аналіз подальшого перебігу процесу не будемо.

Висновки

Побудовано ефективну математичну модель гідродинамічних процесів у порожнині конвертера на початковому етапі продувки шлакової ванни і показана її якісна адекватність процесу, що описується. Розглянута модель претендує тільки на якісний опис гідродинаміки і масопереносу, і її адекватність ґрунтується на порівнянні з проведеними раніше розрахунками аналогічних процесів, якісна адекватність яких доведена, а також строгості й адекватності застосування використаного математичного апарата. Забезпечення кількісної адекватності моделі може бути досягнуте шляхом уточнення її вихідних чисельних параметрів при наявності додаткової експериментальної інформації про чисельні значення досліджуванних гідродинамічних характеристик процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Су Тянсен. Совершенствование производства стали в Китае в 2001 г. и перспективы на будущее // Черные металлы, 2003, май. С. 64-67.
2. Messina C.J. Slag splashing in the BOF-World wide status, practices and results // Iron and Steel Engineer, 1996, № 5. P. 17-19.
3. Перспективные направления продления срока службы футеровки конвертеров / А.В. Мокринский, А.Н. Лаврик, В.В. Соколов и др. // Сталь, 2004, №5. С. 40-44.
4. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах / А.П. Огурцов, С.Є. Самохвалов // Київ, "Наукова думка", 2001.

пост. 07.06.05