

Моделювання нанесення шлакового гарнісажу з метою оптимізації процесів гарячого ремонту футерівки конвертера

СІГАРЬОВ Є.М., ЧЕРНЯТЕВИЧ А.Г., СОКОЛ А.М.

Дніпродзержинський державний технічний університет

В роботі пропонується подальший розвиток у нових напрямках математичної моделі, яка описує процес нанесення на футерівку конвертера шлакового гарнісажу.

В работе предлагается дальнейшее развитие в новых направлениях математической модели, которая описывает процесс нанесения на футеровку конвертера шлакового гарнисажа.

In the article got further development in new directions mathematical model which describes the process of causing of slag on the lining-up of converter.

Постановка проблеми. Інтенсифікація сталеплавильних процесів призводить до погіршення стану вогнетривкої футерівки та скорочення термінів її експлуатації в металургійних агрегатах. З метою вдосконалення та оптимізації процесів гарячого ремонту футерівки конвертера доцільним є використання методів математичного моделювання [1–3].

Актуальність. Експериментальне дослідження теплофізичних процесів, які перебігають в конвертері в промислових умовах пов'язано з великими матеріальними витратами і ускладнюється високими температурами, нестаціонарністю та багатопараметричністю перебігу процесів. У зв'язку з цим необхідне подальше вдосконалення існуючих та розробка нових варіантів подовження терміну служби конвертерів на базі технології нанесення шлакового гарнісажу шляхом роздування азотними струменями на футерівку. Під час розробки таких технологій ремонту футерівки визначальною є інформація про залежність тепло- та масопереносних процесів в конвертері від керуючих технологічних параметрів, таких, як витрата азоту, що подається на роздування, висота гарнісажної фурми над рівнем шлакової ванни, швидкість повздовжнього руху та частота обертання фурми, та т. і.

У ході фізичного моделювання процесів нанесення шлакового гарнісажу з використанням як прозорих середовищ, так і на гарячих моделях, накопичено значний обсяг експериментальних даних [4]. Проте фізичне моделювання може дати лише приблизне уявлення про якісні характеристики процесів через труднощі збереження критеріїв подібності та нелінійність законів, які їх описують. Цих недоліків позбавлене математичне моделювання, доступність використання якого обумовлена, крім усього іншого, сучасним розвитком обчислювальної техніки, що дозволяє достатньо повно враховувати в математичних моделях визначальні характеристики перебігу теплофізичних процесів, зокрема динаміку декількох взаємодіючих фаз [5].

Викладення основного матеріалу. Математичну модель, яка виступила в якості базової, запропоновано авторами робіт [1, 2]. На цій базі вже існують більш досконалі, зокрема математична модель, про яку йдеться в роботі [3]. Вдосконалення полягає в тому, що результати розрахунку двовимірної математичної моделі з деякими додатковими припущеннями переносяться у тривимірну геометрію конвертера. При цьому фурма вважається такою, що рухається із заданою швидкістю.

Таким чином можливо дослідити розподіл нанесеної шлакової фази на поверхні футерівки конвертера.

В основу математичної моделі покладені наступні основні припущення:

1. Під дією азотного струменя на поверхні розплаву шлаку утворюється лунка, з поверхні якої відривається потік крапель шлаку, що має форму конуса і рухається в напрямку внутрішньої стінки конвертера.

2. Задача прийнята циліндрично симетричною відносно осі потоку бризок шлаку, зокрема відхиляючою дією сили тяжіння на дисперсну фазу нехтуємо.

3. Сумарний об'ємний вміст шлакових крапель в газовій фазі при витратах, що вивчаються, невеликий, тому вона розглядається як дисперсна фаза.

4. Силою опору руху дисперсних частинок в газі знехтувано.

Друге припущення дозволяє при використанні циліндричної системи координат з віссю, що співпадає з віссю симетрії потоку, звести задачу до циліндрично двовимірної. Четверте припущення має місце внаслідок того, що дисперсна фаза рухається зі швидкістю газу, отже відносна швидкість газової фази і дисперсної фази дорівнює нулю.

Математична модель, з урахуванням зроблених припущень, має наступний вигляд. Крім несучої газової фази з об'ємною густиною α , враховуються ще дисперсна фаза: краплі шлаку з об'ємною густиною η . Рівняння її переносу записується у вигляді:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \vec{v} \cdot (\eta \vec{v}_h) = \vec{\nabla} \cdot (D_h \vec{\nabla} \eta), \quad (1)$$

де \vec{v}_h — швидкість фази η ; D_h — ефективний коефіцієнт дифузії, що враховує турбулентні складові.

Без сумніву $\alpha + \eta = 1$, тому рівняння переносу газової фази впливає з рівняння (1), ніякої додаткової інформації не несе і тут його розглядати не будемо.

Швидкості газової фази \vec{v}_g і дисперсної фази \vec{v}_l визначаються з рівнянь, записаних у наближенні малої об'ємної щільності дисперсної фази (припущення 3) і нестисливості газової фази:

$$\frac{d_g \vec{v}_g}{dt} = -\vec{\nabla} p' + \vec{\nabla} \cdot (\vec{v}^k v_g^k) - \vec{f}_D + \psi \vec{v}_g, \quad (2)$$

$$(\eta) \frac{d_l \vec{v}_l}{dt} = \chi \vec{f}_D. \quad (3)$$

Тут $\frac{d_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \vec{\nabla}$ — субстанціональна похідна i -ї фази (несучої газової при $i = g$, чи дисперсної при $i = t$), $p' = p / \rho_g^0$ — тиск, нормований на дійсну густину газу, $\vec{\bar{v}}$ — тензор ефективної кінематичної в'язкості, що враховує турбулентні ефекти; x — малий параметр і \vec{f}_D — об'ємна густина сили міжфазної взаємодії, яка (у відповідності з припущення, що сила міжфазної взаємодії газу і часток дисперсної фази пропорційна квадрату міжфазної швидкості) визначається виразом:

$$\vec{f}_D = -C_D \frac{|\vec{v}_{tg}|}{d} \vec{v}_{tg}, \quad (4)$$

в якому $\vec{v}_{tg} = \vec{v}_t - \vec{v}_g$ — швидкість дисперсної фази відносно газової, C_D — коефіцієнт опору і d — характерний розмір крапель шлаку, які є дисперсною фазою.

Рівняння (2)–(3) замикаються співвідношенням, що випливає з закону збереження маси, яке у розглянутому наближенні нестисливої газової фази записується у вигляді:

$$\vec{\nabla} [\alpha \vec{v}_g + \eta \vec{v}_t] = -(1-x) \psi. \quad (5)$$

При малому x (у нашому випадку воно має порядок 10^{-3}) правою частиною рівняння (3) можна знехтувати і скрізь, де присутня помітна кількість дисперсної фази ($\eta \neq 0$), замість (3) одержуємо:

$$\frac{d_t \vec{v}_t}{dt} = 0,$$

а замість (5)

$$\vec{\nabla} [\alpha \vec{v}_g + \eta \vec{v}_t] = -\psi.$$

Теплова сторона процесу, що розглядається, описується рівнянням, яке в нашому випадку записується у вигляді:

$$C_r \frac{dT}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda'_e \vec{\nabla} T),$$

де C_r і λ'_e — ефективні теплоємність і нормована на густину теплопровідність (враховуюча турбулентні ефекти) дисперсного середовища в цілому; $\frac{d}{dt}$ — баріцентрична похідна. Прийнято:

$$C_r = C_g(1-\beta)x_b + C_t\beta,$$

де C_t і C_g — теплоємності дисперсної фази і газу відповідно.

Система рівнянь математичної моделі розв'язується в циліндричних координатах в двовимірній постановці.

Поле швидкостей дисперсної фази \vec{v}_h і температури T знаходяться на $n+1$ -му часовому шарі за

явною схемою. Для розв'язання газодинамічних рівнянь моделі використано метод розщеплення за фізичними факторами [5], застосований для випадку несолоноїдалного поля швидкостей.

Вдосконалення описаної математичної моделі від [1, 2, 3] полягає в переносі її в тривимірний простір з врахуванням геометрії реального конвертера з можливістю задавати швидкість обертання навколо вертикальної вісі гарнісажної фурми, яка при контакті азотних струменів з шлаковою ванною формує потік дисперсної фази з шлакових крапель (так званий факел), та кут, який утворює факел з вертикальною віссю фурми. В процесі розрахунків відбувається перенос інформації про розподіл дисперсної фази в плямі факела, отриманої в розрахунках за допомогою базової осесиметричної моделі, на поверхню футерівки (внутрішньої стінки) конвертера.

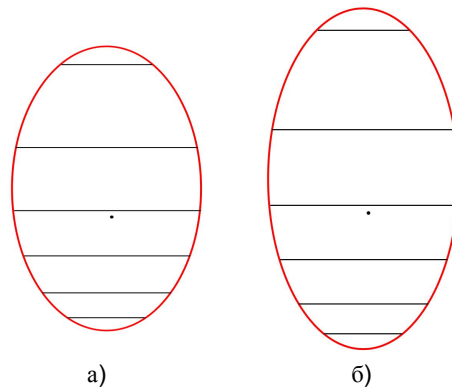


Рис. 1. Форма плями, що утворюється на внутрішній стінці конвертера

Оскільки потік крапель шлаку в реальній системі подається не під прямим кутом до циліндричної стінки конвертера, то пляма, що утворюється від цього потоку, є перерізом конуса стінкою конвертера. При цьому розподіл дисперсної фази в плямі нерівномірний по висоті, що проілюстровано на рис. 1 за допомогою горизонтальних ліній, розміщених з різною щільністю.

При зміні величини кута, який утворений віссю потоку шлакових крапель та додатнім напрямком висоти конвертера, змінюється відповідним чином і форма плями та щільність розподілу дисперсної фази в плямі. При зменшенні цього кута пляма деформується з форми, що наведено на рис. 1, а, до форми, що приведено на рис. 1, б.

Для проведення чисельних експериментів було створено відповідне програмне забезпечення. Воно є реалізацією базової математичної моделі та дозволяє переносити результати розрахунку, отримані з її допомогою, у тривимірний простір з врахуванням реальної геометрії конвертера. Враховано наявність обертового та повздовжнього руху гарнісажної фурми під час роздування шлакової ванни. Створене ПЗ є інструментом для комп'ютерного моделювання процесу нанесення шлакового гарнісажу з метою оптимізації параметрів цього процесу.

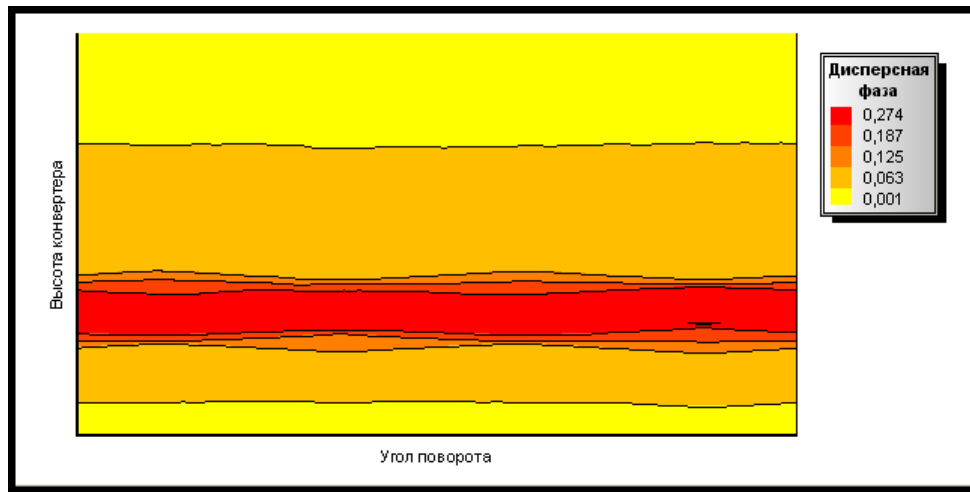


Рис. 2. Области рівної концентрації дисперсної фази на внутрішній стінці конвертера

Проведено серію чисельних експериментів для перевірки адекватності побудованої математичної моделі. На рис. 2 представлено розподіл дисперсної фази на внутрішній поверхні стінки конвертера після деякого проміжку часу, впродовж якого проводилось ошлакування. Кутову швидкість руху фурми прийнято рівною 0,25 об./с., а повздовжню рівною 0,1 м./с. Діапазон руху шлакової плями склав $\pm 0,5$ м. Кут вісі факела з вертикальною віссю конвертера вибраний рівним 55° .

На рис. 3 представлено тривимірне зображення конвертера, а також розподіл шлаку на футерівці у вигляді поверхонь рівної концентрації дисперсної фази.

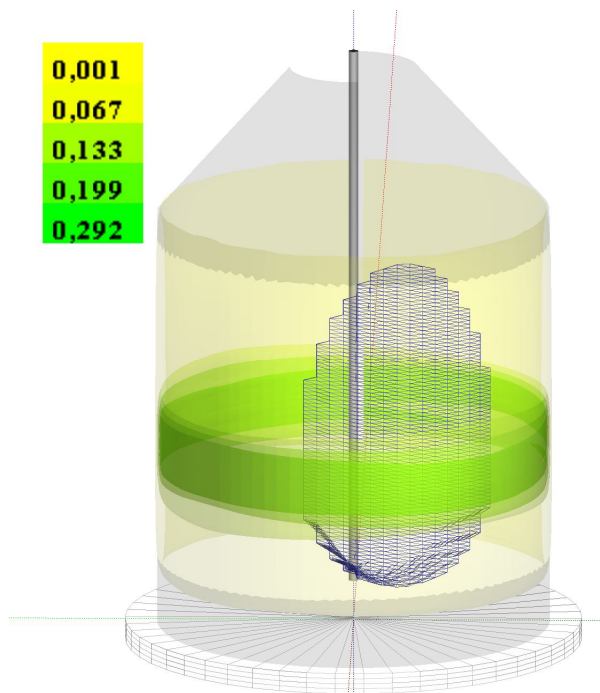


Рис. 3. Розподіл дисперсної фази на внутрішній стінці конвертера в тривимірному вигляді

Висновки

Вдосконалено раніше створену осесиметричну математичну модель, яка описує процес нанесення шлакового гарнісажу шляхом роздування газовими струменями шлакової ванни на стінки конвертера. Створено програмне забезпечення, яке реалізує математичну модель та дозволяє проводити обчислювальні експерименти для з різними значеннями визначальних параметрів, зокрема змінюючи швидкість руху фурми навколо вертикальної осі, її положення по висоті, інтенсивність потоку та кут спрямування дисперсної фази на стінки конвертера та ін. Розроблене ПЗ буде використовуватись в подальшому, як базове для більш досконалих математичних моделей, зокрема таких, чії рівняння розв'язуються в тривимірній постановці.

ЛІТЕРАТУРА

1. Протопопов Е. В. Математическая модель гидродинамических процессов в полости конвертера при продувке шлакового расплава газовыми струями / Е. В. Протопопов, Р. С. Айзатулов, А. Г. Чернятевич, С. Е. Самохвалов, Н. А. Чернышева, И. И. Багачева // Известия ВУЗов: Черная металлургия. — 1997. — № 2. — С. 5—9.
2. Протопопов Е. В. Процессы теплообмена в условиях нанесения шлакового гарнисажа и факельного торкретирования футеровки конвертеров. Математическая модель / Е. В. Протопопов, А. Г. Чернятевич, В. В. Соколов, О. С. Самохвалов, Е. А. Чубина // Известия ВУЗов: Черная металлургия, 2004. — № 10. — С. 8—13.
3. Математична модель гідродинамічних, тепло- та масопереносних процесів у порожнині конвертера під час факельного торкретування / А. М. Сокол // Тези доповідей міждержавної науково-методичної конференції „Проблеми математичного моделювання” (27–29 травня 2009 р., м. Дніпродзержинськ). — Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2009. — С. 119—120.

4. Чернятевич А. Г. Гидродинамические закономерности нанесения шлакового гарнісажа на футеровку конвертера / А. Г. Чернятевич, Е. А. Сигарев, Е. А. Чубина // *Металлы и литье Украины*. — 2005. — №3—4. — С. 45—47.
5. Огурцов А. П. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах / А. П. Огурцов, С. Є. Самохвалов — Київ : Наукова думка. — 2001. — 409 с.

пост. 26.12.2011