

С. Є. Самохвалов¹, д.т.н., с.н.с., проф., ORCID 0000-0002-7362-213X
В. П. Піптюк¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-2915-1756
С. В. Греков¹, н.с., ORCID 0000-0002-2848-0999

¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ДОБАВКИ НА ГІДРОДИНАМІКУ МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ У КІВШІ

Анотація. Відомо що виробництво сталі передбачає застосування різних твердих матеріалів - добавок, які вводяться в рідку металеву ванну на етапах конвертування і позапічної обробки. Переважна більшість таких матеріалів подається у шматковому (кусковому) вигляді і в значній кількості. Об'єм добавки може змінюватись в межах від 0,05 до декількох десятків кілограмів на тону сталевого розплаву в залежності від технологічних умов виробництва та ін. вимог. До теперішнього часу різноманітні дослідження і розрахунки щодо ефективності використання матеріалів - добавок при виробництві сталі базувались на розгляді поведінки їх окремого куска в рідкій металевій ванні. При цьому теоретичний опис гідродинамічного стану металевій ванні не враховував впливу кількості добавки, що вводиться. В той же час саме вказаний фактор може впливати на точність розрахункових результатів і збільшувати похибку подальшої оцінки ефективності використання коштовних матеріалів, що здебільшого є імпортованими. В статті показана доцільність врахування у вдосконалених математичних моделях процесів плавлення (розчинення) та засвоєння металевим розплавом твердих матеріалів такого фактору, як кількість добавок, що вводяться, як одного зі значущих параметрів складних фізико-хімічних процесів. На прикладі кускового феромарганцю марки ФМп78 в якості матеріалу – добавки, який в різній (від 0,2 до 2 кг/т) кількості вводили у ванну ковша ємкістю 250 т при обробці металу на установці ківш – піч (УКП) з одночасною донною продувкою аргонном в межах 200 – 800 л/хв через кожну з двох фурм, показана залежність впливу кількості добавки на зміну гідродинаміки рідкої металевій ванні.

Ключові слова: кількість матеріалу-добавки, гідродинаміка рідкої металевій ванні.

Посилання для цитування: Самохвалов С. Є., Піптюк В. П., Греков С. В. Вплив кількості добавки на гідродинаміку металевій ванні у ківші. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 231-245. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-231-245>

Стан питання. Найбільше використовувані при виробництві сталі феросплави (феромарганець, феросилікомарганець, феросиліцій) та шлакоутворюючі матеріали (вапно, вапняк, флюорит) вводяться у

шматковому (кусковому) вигляді у конвертер чи сталерозливний ківш на випуску плавки або при позапічній обробці металу. Технологія введення кускових матеріалів (добавок) в сучасних умовах виробництва сталі передбачає їх попереднє дроблення і подальше використання вже у фракціонованому вигляді. Технологічними інструкціями на вітчизняних металургійних підприємствах перелічені феросплави, які на етапі позапічної обробки сталі повинні застосовуватись у кусках фракцією не більше 100мм у перетині. Такі обмеження викликані вимогою забезпечення вільної та швидкої подачі матеріалів через тракти та течки технологічного обладнання, які виключають їх застрявання чи кастрацію на шляху до міста введення.

Процеси плавлення (розчинення) і засвоєння продуктів з твердих матеріалів – добавок рідким металевим розплавом, як представляється, пов'язані з гідродинамікою ванни. На сьогоднішній час встановлено вплив на гідродинамічні умови рідкої металевої ванни при обробці на УКП місця розташування донного продувального вузла у ківші [1, 4], ємності і конфігурації ванни ківша [2, 3], виду току, що застосовується на УКП, і потужності електромагнітних зусиль, що виникають, [5, 6], витрат аргону на перемішування ванни [7] та ін. В той же час результати сучасних теоретичних досліджень стосовно гідродинамічного стану металевого розплаву на випуску плавки в ківш або при його обробці в ковші на УКП під час введення твердих кускових добавок у вітчизняних [8-15] і в закордонних [16- 20] публікаціях свідчать про однаковість і обмеженість підходу авторів до розгляду цього питання на прикладі поведінки лише окремого куска, який знаходиться у металевій ванні. Слід відмітити що до цього часу вплив кількісного фактору на гідродинаміку металевих ванн не розглядався імовірно у зв'язку з відсутністю математичного опису оцінки впливу цього фактору і можливості теоретичного його врахування. Тому приймалися такі умови що останній не розглядався. Раніше також не мала успіху чергова спроба авторів цієї статті по врахуванню кількісного фактору [21].

Розуміння реальних умов виробництва сталі, що пов'язані з вводом в рідку металеву ванну різних матеріалів – добавок і переважно в значній кількості, розгляд питання доцільності оцінки саме кількісного фактору в останній час набув певної актуальності і потребує додаткового дослідження.

Метою роботи є створення математичної моделі гідродинамічних процесів у ковші під час введення матеріалів – добавок, яка враховує динамічний вплив матеріалів, що вводяться, та комп'ютерна реалізація даної моделі, а також виконання за її допомогою розрахунків з метою оцінки впливу кількості матеріалів, що вводяться, на гідродинаміку розплаву в ковші.

Основні матеріали При створенні математичної моделі було застосовано розроблений нами метод колективного опису динаміки твердих дисперсних фаз в середовищі [22]. Запропонована модель враховує взаємний рух і взаємодію кількох фаз, а саме розплаву сталі, газу, що вдувається через фурми, та твердої дисперсної фази матеріалу – добавки.

В основу математичної моделі покладені наступні основні припущення:

- 1) припущення суцільності (гетерогенності) багатофазного середовища [23];
- 2) несолоноїдальністю руху середовища знехтувано скрізь, за винятком прифурмених зон формування барботажного режиму руху;
- 3) фазовими перетвореннями дисперсних фаз знехтувано;
- 4) прийнято, що градієнти густини середовища по об'єму ковша є малими;
- 5) режим руху середовища є турбулентним;
- 6) прийнято, що вздовж стінок і днища ковша середовище ковзається вільно.

Припущення 1 лежить в основі методу колективного опису динаміки твердої дисперсної фази, який ми застосовуємо, і чинне при досить великій кількості кускових матеріалів, що вводяться одночасно.

Для багатофазних середовищ характерною є несолоноїдальність руху, яка обумовлюється трьома основними факторами. Це, по-перше, наявність джерел окремих фаз середовища. По-друге, стисливість окремих фаз. По-третє, відносним рухом фаз, за умови їх різних істинних густин. У режимах, які мають місце в ковші при позапічній обробці сталі, як було показано у ряді попередніх робіт [24, 25], останні два фактори мало (в межах 10%) впливають на результати розрахунків, проте як перший є суттєвим саме у місці подачі газу: у прифурмених зонах формування барботажного режиму руху середовища. Тут ми його і вимушені враховувати (припущення 2), але через припущення 3 можемо нехтувати скрізь за межами цих зон.

Припущення 4 свідчить про обмеженість моделі невеликими об'ємними густинами (до 0,3) дисперсних фаз. Тому результати розрахунків можна вважати адекватними лише в зонах за межами зон подачі газу (прифурмених зон) чи твердих матеріалів. Це припущення дозволяє при розгляді повної системи диференціальних рівнянь, що описують динаміку багатофазного середовища, використовувати наближення Бусінеска [26].

Припущення 5 обумовлене досить малим значенням молекулярного коефіцієнта кінематичної в'язкості рідкої сталі ($\sim 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$), що призводить до великих чисел Рейнольдса і швидкого переходу у

нестійкий турбулентний режим руху. Врахування цього факту вимушує при створенні математичної моделі динаміки середовища виконувати параметризаційну корекцію різницевої схем [27] шляхом введення сіткового числа Рейнольдса і його аналогів для рівнянь переносу. В роботі застосовано досить ефективну двопараметричну алгебраїчну модель турбулентності [26].

І нарешті, з врахуванням характеристик в'язкості рідкої сталі, припущення 6 виконується досить точно, принаймні за межами невеликого пристінного та придонного шару розплаву у ковші.

З урахуванням цих припущень гідродинаміка середовища в цілому, а також перенос газової та твердої дисперсної фаз в нашому випадку визначається системою рівнянь [24]:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}\tilde{p} + \nu_e \Delta \vec{v} - [\alpha + (1-x)\beta] \vec{g} + \vec{f}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \psi_a + \psi_b, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\alpha (\vec{v} + \vec{w}_a^c)] = \vec{\nabla} \cdot (D_a \vec{\nabla} \alpha) + \psi_a, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\beta (\vec{v} + \vec{w}_b^c)] = \vec{\nabla} \cdot (D_b \vec{\nabla} \beta) + \psi_b, \quad (4)$$

де \vec{v} - барицентрична швидкість середовища; t - час процесу; α та β - коефіцієнт об'ємного газозміщення та об'ємна густина твердої фази (кускових матеріалів) в середовищі; x - відношення істинних густин твердої дисперсної фази та розплаву сталі; \tilde{p} - динамічна складова тиску, нормованого на істину густину розплаву; \vec{g} - прискорення вільного падіння; \vec{f} - об'ємна густина сил, що виникають внаслідок дії потоку добавок, які вводяться у ківш; ψ_a та ψ_b - об'ємні густини джерел газової та твердої дисперсних фаз, які виникають внаслідок подачі газу і домішкових матеріалів в об'єм ковша; \vec{w}_a^c та \vec{w}_b^c - колективні швидкості, а D_a та D_b - ефективні коефіцієнти турбулентної дифузії газової, та твердої дисперсних фаз відповідно; і нарешті

$$\nu_e = \nu + \Delta l |\nu| / \text{Re}_\Delta \quad (5)$$

- ефективний коефіцієнт турбулентної кінематичної в'язкості у двопараметричній моделі турбулентності з параметрами: ν - ізотропною ефективною в'язкістю і Re_Δ - сітковим числом Рейнольдса на сітці з характерним кроком Δl . В розрахунках прийнято:

$$D_a = D_b = v_e.$$

Основним фактором, який впливає на зміну гідродинамічної картини у ковші, що обумовлена колективним введенням добавок, є густина сили \vec{f} . Якщо інтенсивність подачі добавок є $\mu = \frac{dm}{dt}$ (це маса добавок, які подаються в одиницю часу) і їх швидкість введення в розплав є V_m , то величина \vec{f} може бути визначеною за формулою:

$$\vec{f} = \mu \vec{V}_m / \Omega_b, \quad (6)$$

де Ω_b - об'єм розплаву, в якому імпульс струменю добавок, що подаються, передається середовищу.

Об'ємні джерела газової фази визначаються об'ємною інтенсивністю продування q , об'ємом Ω_a зони формування барботажного режиму, а також коефіцієнтом $k = T_f / T_g$ розширення газу через нагрівання при потраплянні в об'єм розплаву, де T_f - температура розплаву, а T_g - температура газу, що подається, $\psi_a = qk / \Omega_a$. Об'ємне джерело твердої дисперсної фази визначається так: $\psi_b = \mu / (\Omega_b \rho_b^0)$, де ρ_b^0 - істинна густина добавки.

Рівняння (1) – (4) розв'язуються чисельно. При цьому використовується метод розщеплення за фізичними факторами для несоленоїдального руху багатофазних середовищ, запропонований в роботі [24], який внаслідок прийнятих припущень (через що в нашому випадку джерела фаз ψ_a та ψ_b є константами) зводиться до триетапної розрахункової схеми:

$$\text{I етап} \quad \vec{v} \approx \vec{v}^n + \tau \{ v_e \Delta \vec{v} - [\alpha + (1-x)\beta] \vec{g} + \vec{f} \}^n,$$

$$\text{II етап} \quad \Delta \vec{p} = (\vec{\nabla} \cdot \vec{v} - \psi_a - \psi_b) / \tau,$$

$$\text{III етап} \quad \vec{v}^{n+1} = \vec{v} - \tau \vec{\nabla} \vec{p},$$

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n - \tau \{ \vec{\nabla} \cdot [\alpha (\vec{v} + \vec{w}_a^c)] - \vec{\nabla} \cdot (D_a \vec{\nabla} \alpha) + \psi_a \}^n,$$

$$\beta^{n+1} = \beta^n - \tau \{ \vec{\nabla} \cdot [\beta (\vec{v} + \vec{w}_b^c)] - \vec{\nabla} \cdot (D_b \vec{\nabla} \beta) + \psi_b \}^n.$$

Тут τ - крок за часом, n - номер часового шару, а \vec{v} - проміжна швидкість, яка розраховується без врахування поля тиску.

Дана схема реалізована у тривимірному просторі у циліндричних координатах. Просторові похідні апроксимуються кінцевими різницями на рівномірній шаховій сітці [26]. На першому і третьому етапах

виконуються явні розрахунки. На другому етапі поле тиску знаходиться за неявною розрахунковою схемою методом ітерацій.

Граничні умови для величин, що розраховуються, на твердих поверхнях ковша, осі симетрії та дзеркалі металу задаються стандартним чином притаманним методу розщепленню за фізичними факторами при використанні шахової сітки [26].

Місце на поверхні дзеркала металу, куди вводяться добавки, потребує особливого розгляду, бо саме через нього відбувається динамічний вплив струменю добавок, що вводяться колективно, на динаміку розплаву у ковші. Хай площа поверхні розплаву, куди подаються добавки, є S_m і вони туди потрапляють рівномірно розподіленими по площі зі швидкостями \vec{V}_m перпендикулярними до поверхні. Тоді в одиницю часу, згідно (6), струмінь добавок буде передавати в об'єм розплаву імпульс $\mu \vec{V}_m$, що призведе до зміни барицентричної швидкості поверхні розплаву \vec{v}_m , величину якої можна знайти з закону збереження імпульсу $\mu V_m = (v_m S_m \rho) v_m$, звідки слідує:

$$v_m = \sqrt{\mu V_m / (S_m \rho)}. \quad (7)$$

Тут ρ - густина середовища, а в дужки у попередній формулі виділено потік маси середовища через поверхню S_m . Задаючи на поверхні S_m швидкість \vec{v}_m у якості граничної, ми тим самим враховуємо силовий фактор \vec{f} впливу струменя добавок на гідродинаміку розплаву в ковші, який фігурує в рівнянні (1).

Граничні умови для об'ємної густини β твердої дисперсної фази на поверхні S_m , через яку вводяться добавки, задаються виходячи з закону збереження маси: $\mu = \beta_m \rho_b^0 v_m S_m$, де β_m - значення β на поверхні S_m , отже:

$$\beta_m = \mu / (\rho_b^0 v_m S_m). \quad (8)$$

Такий спосіб завдання граничних умов для β забезпечує врахування об'ємного джерела твердої дисперсної фази ψ_b , яке фігурує у рівняннях (2) та (4).

Результати дослідження та їх обговорення. З використанням розробленої математичної моделі проводили чисельні розрахунки. В якості об'єкта дослідження розглядалась рідка металева ванна ківша циліндричної форми радіусом 1,7 м (середня величина радіусу дна і

«дзеркала» - верхньої поверхні рідкого металу) та висотою 4 м. Донні продувні фурми розташовані на радіусі 1,1 м від вертикальної вісі ківша і мали азимутальні координати 49^0 і 311^0 . Початок азимутальних координат розташований там де знаходиться кантувач і рахується проти годинникової стрілки. Для зручності показу розрізів місце вводу добавки (феромарганець ФМн78) на поверхню рідкого металу помістили на тому ж радіусі, що і фурми, але азимутальна координата дорівнювала 228^0 . Введення добавки здійснювали з висоти 3 м. Маса добавки дорівнювала 0,2; 1 і 2 кг/т (кожна окремо).

Спочатку розрахували гідродинамічний стан металевої ванни до встановлення квазістаціонарного характеру (не змінюється протягом декількох секунд). Розрахунки вели при витратах аргону 200, 400, 600 і 800 л/хв на кожну фурму і застосовуються на практиці при обробці металу на УКП. Вплив маси добавки, що вводиться, на гідродинамічний стан ванни оцінювали по швидкостям потоків металу (зокрема вертикальної складової) у момент вводу останньої.

На рис. 1 показана картограма у розгортці поля швидкостей на радіусі розташування фурм з витратами аргону 200 і 800 л/хв на фурму. Над фурмами розташовані зони висхідних потоків до 1,4 м/с у межах витрат аргону, що вивчаються. У зоні падіння добавки, що вводиться, виникають низхідні потоки рідкого металу. Причому найбільші такі швидкості виникають на поверхні металу. При заглибленні ці швидкості зменшуються поки не досягнуть рівня швидкостей до введення добавки. Локалізація впливу обумовлена місцем падіння добавки.

На рис. 2 показані швидкості на радіальному розрізі металевої ванни, який проходить через вертикальну вісь ківша та місце падіння добавки. На рисунку можна побачити наступне: по-перше, чим більше інтенсивність продування металевої ванни, тим більша зона низхідних потоків у глибину ванни; по-друге, при збільшенні маси добавки, збільшується й глибина однакових низхідних швидкостей. Вертикальні складові швидкості на розгортці (рис. 1) і радіальних розрізах (рис. 2) збігаються, це свідчить про тривимірність зображення розрахункової області. Чим більша маса добавки, що вводиться, тим більші екстремальні (максимальні низхідні) швидкості.

На рис. 3 зображені екстремальні вертикальні складові швидкості у площині розгортки на різних азимутах. На розрізі 49 і 311^0 азимут видно ці швидкості при різних витратах аргону, а на розрізі 248^0 азимут спостерігається вплив маси добавки. Але ці низхідні швидкості не відрізняються одна від одної при різних витратах аргону: 74 см/с – 0,2 кг/т, 165 см/с – 1 кг/т, 233 см/с при масі добавки 2 кг/т (рис. 4). На інших азимутальних розрізах вертикальна складова швидкості збільшується з 4 см/с (при 200 л/хв) до 22 см/с (800 л/хв).

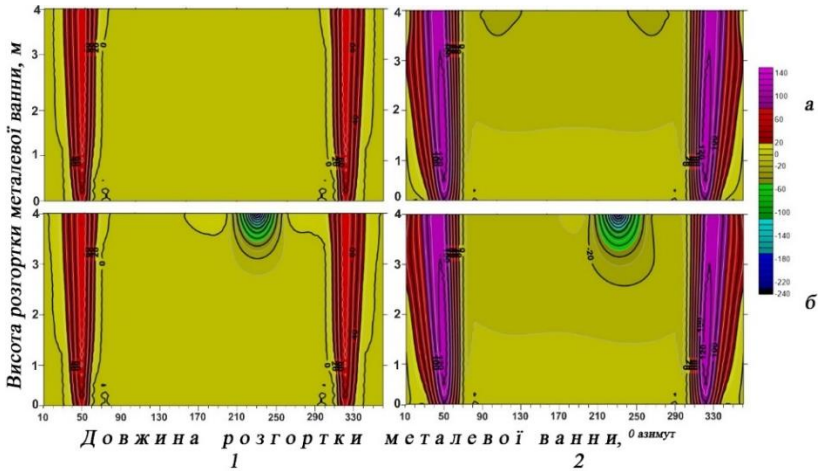


Рисунок 1 – Картограма вертикальної складової швидкості металевих потоків (см/с) у розгортці ванни ківша при обробці на УКП. Розгортка розташована на радіусі віддалення донних продувних фурм від вертикальної осі ківша. Витрати аргону 200 л/хв (1) і 800 л/хв (2). Маса добавки 0 (а) і 2 кг/т (б).

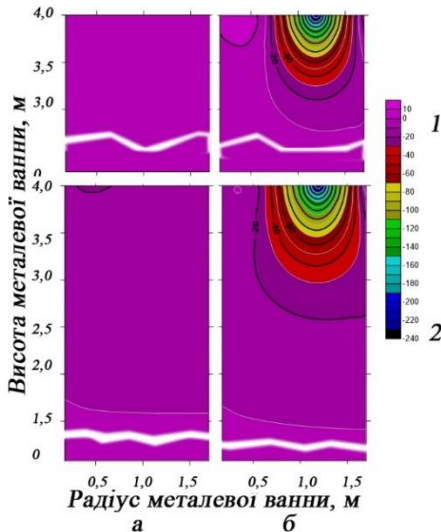


Рисунок 2 – Картограма вертикальної складової швидкостей потоків (см/с) при обробці на УКП у радіальному розрізі ковшової ванни, розташованому у місці введення добавки. Умови відповідно рис. 1.

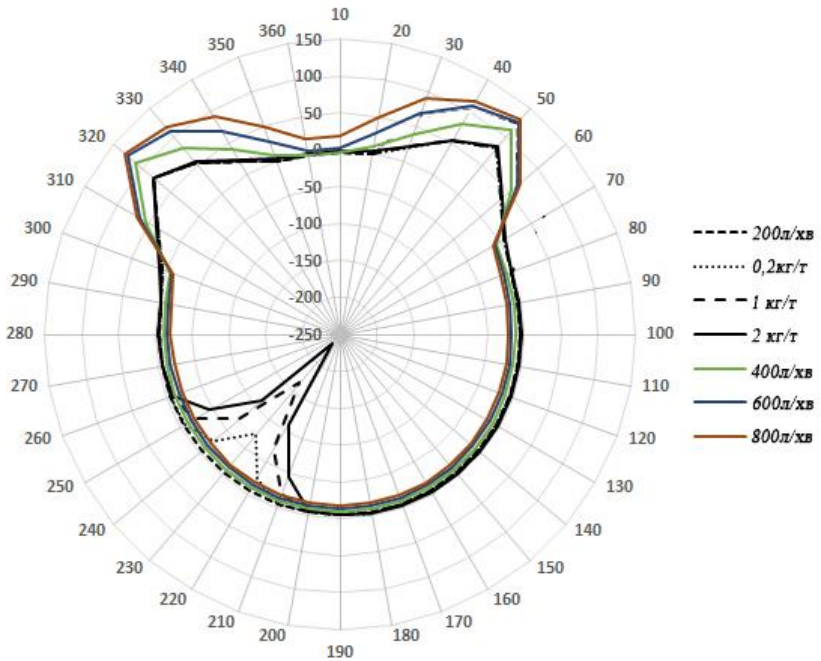


Рисунок 3 – Кругова діаграма екстремальної вертикальної складової швидкості потоків металу при обробці на УКП у розгортці, розташованій аналогічно рис 1.

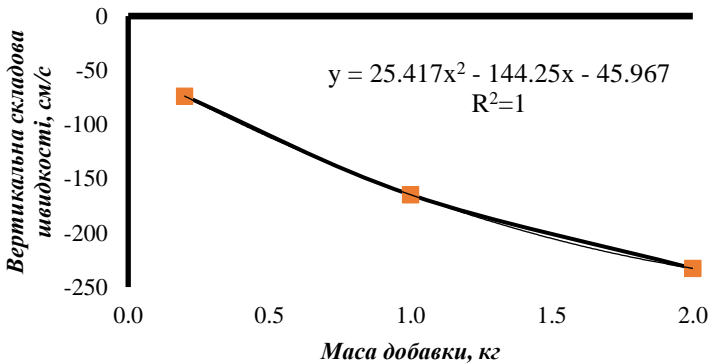


Рисунок 4 – Екстремальна вертикальна складова швидкості потоків металу при обробці на УКП в залежності від маси введеної добавки.

Висновки

1. На основі методу колективного опису динаміки твердих дисперсних фаз в середовищі розроблено математичну модель гідродинаміки розплаву в ківші на етапі позапічної обробки сталі, яка враховує динамічний вплив твердих добавок, що подаються, а також здійснено комп'ютерну реалізацію даної моделі.

2. З використанням розробленого програмного забезпечення проведено серію розрахунків процесу, що розглядається, які дозволили зробити оцінку впливу кількості матеріалів, що подаються, на гідродинаміку розплаву в ківші при різних режимах продування.

3. Встановлено, що хоча гідродинаміка у ківші в цілому (в середньому) не змінюється суттєво при подачі матеріалів, проте у місці їх введення вона змінюється суттєво на якісному рівні, в цьому місці змінюються напрямки і величини потоків середовища, що визначає розташування добавок в розплаві і їх подальшу динаміку після введення.

4. Оскільки з точки зору засвоєння твердих добавок важлива гідродинамічна картина саме в місці їх знаходження, врахування динамічного впливу матеріалів, що вводяться, є суттєвим для визначення раціональних режимів їх введення.

На основі даної моделі планується виконати дослідження масопереносних процесів в ківші для різноманітних матеріалів і технологічних параметрів їх введення.

Перелік посилань

1. Исследование влияния вариантов компоновки донного продувочного узла на перемешивание расплава аргоном на двухпозиционной установке ковш-печь мощностью 45 МВ·А / В. П. Пиптюк, С. Е. Самохвалов, А. Б. Ковура и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. №7. С. 213–215.

2. Пиптюк В. П., Логозинский И. Н., Греков С. В. Перемешивание расплава в сталеразливочном ковше с усилением футеровки в бойной части / *Материалы IX международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании»* 31 мая – 7 июня 2013 г. Технический университет, г. Варна, Болгария. Т. 2. С. 109-112.

3. Влияние усиления футеровки в бойной части сталеразливочного ковша на параметры перемешивания расплава / В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов, И.Н.Логозинский и др. // *Металург*. 2013. № 7. С.29-34.

4. Численное изучение влияния переменных факторов на перемешивание расплава на установке ковш-печь средней мощности/ В. П. Пиптюк, С. Е. Самохвалов, С. В. Греков и др. // Міждержавна науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання» (19-21 травня 2010 р., м. Дніпродзержинськ). Тези доповідей. Дніпродзержинськ, 2010. С. 81-83.

5. Оценка величины влияния электромагнитных сил на перемешивание ванны установки ковш-печь переменного тока / В. П. Пиптюк, И. В. Крикент, С.

Е. Самохвалов и др. // *Труди конференції «Зварювання та споріднені технології – теперішнє і майбутнє»*, Київ, 25-26 листопада 2013, С. 193.

6. Влияние электромагнитных сил на перемешивание ванны установки ковш-печь переменного тока/ В. П. Пиптюк, И. В. Крикент, С. Е. Самохвалов и др. // *Металл и литьё Украины*. 2014. № 8. С. 3-6.

7. Experimental testing of the validity of mathematical models of hydrodynamics and transfer for the melt-processing conditions in ladle-furnace unit / V. P. Piptyuk, S. E. Samokhvalov, I. A. Pavlyuchenkov et al. // *Springer. Metallurgist*. July 2013, Vol. 57. Issue 3-4. P. 194–198.

8. Разработка модели и исследование процессов плавления тугоплавких добавок на границе раздела фаз / И. А. Павлюченков, В. П. Пиптюк, М. В. Бабенко и др. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2009. Вып. 20. С. 100-113.

9. Математическая модель плавления куска ферросплава при циркуляционном движении жидкого металла в ковше / А. С. Носков, А. В. Некрасов, В. И. Жучков и др. // *Расплавы*. 1990. № 5. С.113-120.

10. *Математическое моделирование процессов внеагрегатной обработки стали* / В. А. Вихлевщук, А. П. Огурцов, И. А. Павлюченков и др. Киев : ИСМО МО Украины, 1997. 151 с.

11. Вихлевщук В. А., Харахулах В. С., Бродский С. С. *Ковшечная доводка стали*. Днепропетровск : Системные технологии, 2000. 190 с.

12. Лозовая Е. Ю., Некрасов А. В., Жучков В. И. Изучение влияния технологических факторов на время плавления кремнистых ферросплавов в жидком металле. *Расплавы*. 2001. № 3. С. 10-17.

13. Охотский В. Б. Растворение ферросплавов при ковшевом легировании стали. *Процессы литья*. 2003. № 2. С. 3-6.

14. Заякин О. В., Жучков В. И., Лозовая Е. Ю. Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали. *Известия ВУЗов. Чёрная металлургия*. 2007. № 5. С. 13-16.

15. Лозовая Е. Ю., Жучков В. И., Шешуков О. Ю. Определение продолжительности плавления ферросплавов системы Fe-Al в железоуглеродистом расплаве. *Электрометаллургия*. 2007. № 1. С.13-15.

16. Iguchi M., Tanl J., Uemura T., Morita Z. Flow water phenomena and heat jet and bubbling jet transfer around a sphere submerged in. *ISIJ International*. 1989. Vol. 29. No. 8. P. 658-665.

17. Iguchi M., Takeuchi H., Kawabata H., Uemura T., Morita Z. The melting process of rectangular prisms immersed in bubbling jet in a cylindrical vessel. *ISIJ International*. 1991. Vol. 31. No. 1. P. 46-52.

18. Esaka H., Itoga Y., Shinozuka K., Tamura M. In-situ observation of growth and melting of a solid particle using transparent organic alloys. *ISIJ International*. 2006. Vol. 46. No. 6. P. 864–870.

19. González O. J. P., Ramírez-Argáez Marco A., Conejo A. N. Mathematical modeling of the melting rate of metallic particles in the electric arc furnace. *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. No. 1. P. 9–1.

20. Rodríguez-Avila Jafeth, Morales Rodolfo D., Nájera-Bastida Alfonso. Numerical study of multiphase flow dynamics of plunging jets of liquid steel and trajectories of ferroalloys additions in a ladle taping operations. *ISIJ*

International. 2012., Vol. 52, No. 5. P. 814–822.

21. Математичне моделювання введення і плавлення добавки у металевому розплаві з врахуванням її кількісного і фракційного складу / К. С. Красніков, С. Є. Самохвалов, В. П. Піптюк та ін // *Всеукраїнська науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання»*, м. Кам'янське, 27-28 травня 2020 р, ДДТУ, 2020. С. 65-67.

22. Самохвалов С. Є. *Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання*. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 1994. 172 с.

23. Нигматулин Р. И. *Основы механики гетерогенных сред*. М. : Наука, 1978. 336 с.

24. Самохвалов С. Е. Метод расщепления по физическим факторам для несолоноидального движения газожидкостных сред. *Изж.-физ.ж.* 1998. Т. 71. № 3. С. 454-459.

25. Кабаков Д. Ю., Самохвалов С. Є., Піптюк В. П. *Математичне моделювання переносних процесів в установці піч-ківш*. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2015. 124 с.

26. Огурцов А. П., Самохвалов С. Є. *Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах*. К. : Наукова думка, 2001. 412 с.

27. Белоцерковский О. М., Панарин А. И., Щенников В. В. Метод параметризационной коррекции разностных схем. *ЖВМ и МФ*. 1984. Т. 24. № 1. С. 65-74.

References

1. Piptyuk, V. P., Samokhvalov, S. E., Kovura, A. B., et al. (2010). Issledovaniye vliyaniya variantov komponovki donnogo produvochnogo uzla na peremeshvaniye rasplava argonom na dvukhpozitsionnoy ustanovke kovsh-pech moshchnostyu 45 MV·A. [Study of the influence of bottom blowing unit layout options on melt mixing with argon on a two-position ladle-furnace unit with a capacity of 45 MVA]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost [Metallurgical and Mining industry]*. 7, 213–215. [in Russian]

2. Piptyuk, V. P., Logozinsky, I. N., & Grekov, S. V. (2013). Peremeshvaniye rasplava v stalerazlivochnom kovshe s usileniyem futerovki v boynoy chasti [Mixing the melt in a steel-pouring ladle with reinforcement of the lining in the head part]. Proceedings of the IX international conference "Quality Strategy in Industry and Education" May 31 - June 7, 2013. Bulgaria - Technical University - Varna, 2, 109-112. [in Russian]

3. Piptyuk, V. P., Samokhvalov, S. E., Logozinsky, I. N. et al. (2013). Vliyaniye usileniya futerovki v boynoy chasti stalerazlivochnogo kovsha na parametry peremeshvaniya rasplava [The influence of strengthening the lining in the head of a steel-pouring ladle on the melt mixing parameters]. *Metalurg [Metallurg]*, 7, 29-34. [in Russian]

4. Piptyuk, V. P., Samokhvalov, S. E., Grekov, S. V. et al. (2010). Chislennoye izucheniye vliyaniya peremennykh faktorov na peremeshvaniye rasplava na ustanovke kovsh-pech' sredney moshchnosti [Numerical study of the influence of variable factors on melt mixing in a medium-power ladle-furnace unit]. *Interstate*

scientific and methodological conference “Problems of mathematical modeling” (May 19-21, 2010, Dniprodzerzhinsk). Theses of Confirmations. Dniprodzerzhinsk. P. 81-83. [in Russian]

5. Piptyuk, V. P., Krikent, I. V., Samokhvalov, S. E. et al. (2013). Otsenka velichiny vliyaniya elektromagnitnykh sil na peremeshivaniye vanny ustanovki kovsh-pech' peremennogo toka [Estimation of the influence of electromagnetic forces on the mixing of the bathtub of an AC ladle-furnace unit]. *Proceedings of the conference “Brewing and controversial technologies- current and future”*, Kiev, 25-26 November, 2013. P. 193. [in Russian]

6. Piptyuk, V. P., Krikent, I. V., Samokhvalov, S. E. et al. (2014). Vliyaniye elektromagnitnykh sil na peremeshivaniye vanny ustanovki kovsh-pech' peremennogo toka. [The influence of electromagnetic forces on the mixing of the bath of an AC ladle-furnace unit]. *Metall i lityo Ukrainy [Metal and Casting of Ukraine]*, 8, 3-6. [in Russian]

7. Piptyuk, V. P., Samokhvalov, S. E., Pavlyuchenkov, I. A. et al. (2013). Experimental testing of the validity of mathematical models of hydrodynamics and transfer for the melt-processing conditions in ladle-furnace unit. *Springer. Metallurgist*, 57(3-4), 194-198. [in English].

8. Pavlyuchenkov, I. A., Piptyuk, V. P., Babenko, M. V. et al. (2009). Razrabotka modeli i issledovaniye protsessov plavleniya tugoplavkikh dobavok na granitse razdela faz [Development of a model and study of melting processes of refractory additives at the interface]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 20, 100-113. [in Russian]

9. Noskov A. S., Nekrasov A. V., Zhuchkov V. I. et al. (1990). Matematicheskaya model plavleniya kuska ferrosplava pri tsirkulyatsionnom dvizhenii zhidkogo metalla v kovshe [Mathematical model of melting a piece of ferroalloy during the circulation movement of liquid metal in a ladle]. *Rasplavy*, 5, 113-120. [in Russian]

10. Vikhlevshchuk, V. A., Ogurtsov, A. P., Pavlyuchenkov, I. A. et al. (1997). *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov vneagregatnoy obrabotki stali* [Mathematical modeling of processes of extra-aggregate processing of steel]. ISMO MO. [in Russian]

11. Vikhlevshchuk, V. A., Kharakhulakh, V. S., & Brodsky, S. S. (2000). *Kovshevaya dovodka stali* [Bucket finishing of steel]. *Sistemnyye tekhnologii*. [in Russian]

12. Lozovaya, E. Yu., Nekrasov, A. V., & Zhuchkov, V. I. (2001). Izucheniye vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov na vremya plavleniya kremnistykh ferrosplavov v zhidkom metalle [Study of the influence of technological factors on the melting time of silicon ferroalloys in liquid metal]. *Rasplavy*, 3, 10-17. [in Russian]

13. Okhotsky V. B. (2003). Rastvoreniye ferrosplavov pri kovshevom legirovanii staliu [Dissolution of ferroalloys during ladle alloying of steel] *Protsessy litya* [Casting processes], 2, 3-6. [in Russian]

14. Zayakin, O. V., Zhuchkov, V. I., & Lozovaya, E. Yu. (2007). Vremya plavleniya nikel'soderzhashchikh ferrosplavov v stali. [Melting time of nickel-containing ferroalloys in steel]. *Izvestiya VUZov. Chornaya metallurgiya*, 5, 13-16. [in Russian]

15. Lozovaya, E. Yu., Zhuchkov, V. I., & Sheshukov, O. Yu. (2007). Opredeleniye prodolzhitel'nosti plavleniya ferrosplavov sistemy Fe-Al v zhelezouglerodistom rasplave [Determination of the duration of melting of ferroalloys of the Fe-Al system in an iron-carbon melt] *Elektrometallurgiya. [Electrometallurgy]*, 1, 13-15. [in Russian]
16. Iguchi, M., Tanl, J., Uemura, T. & Morita, Z. (1989) Flow water Phenomena and Heat Jet and Bubbling Jet Transfer around a Sphere Submerged in. *ISIJ International*, 29(8), 658-665
17. Iguchi, M., Takeuchi, H., Kawabata, H., Uemura, T., & Morita, Z. (1991). The Melting Process of Rectangular Prisms Immersed in Bubbling Jet in a Cylindrical Vessel. *ISIJ International*, 31(1), 46-52
18. Esaka, H., Itoga, Y., Shinozuka, K., & Tamura, M. (2006). In-situ Observation of Growth and Melting of a Solid Particle Using Transparent Organic Alloys. *ISIJ International*, 46(6), 864–870
19. González, O. J. P., Ramírez-Argáez Marco, A., & Conejo, A. N. (2010). Mathematical Modeling of the Melting Rate of Metallic Particles in the Electric Arc Furnace. *ISIJ International*, 50(1), 9-1
20. Rodríguez-Avila, J., Morales, R. D., & Nájera-Bastida, A. (2012). Numerical Study of Multiphase Flow Dynamics of Plunging Jets of Liquid Steel and Trajectories of Ferroalloys Additions in a Ladle Tapping Operations. *ISIJ International*, 52(5), 814–822
21. Krasnikov, K. S., Samokhvalov, S. E., Pityuk, V. P. et al. (2020). Matematichne modelyuvannya vvedennya i plavlennya dobavki u metalevomu rozplavi z vrakhuvannyam ii kíl'kisnogo i fraktsiyного skladu [Mathematical modeling of the introduction and melting of additives in metal melting from the liquid and fractional storage] All-Ukrainian scientific and methodological conference “Problems of mathematical modeling”, Kamyanske, May 27-28, 2020, DDTU, pp. 65- 67.
22. Samokhvalov, S. E. (1994). *Teplofizichni protsesi v bagatofaznykh seredovishchakh: teoretichni osnovi komp'yuternogo modelyuvannya*. [Thermophysical processes in rich-phase media: theoretical foundations of computer modeling]. DDTU. [in Ukrainian]
23. Nigmatulin, R. I. (1978). *Osnovy mekhaniki geterogennykh sred* [Fundamentals of mechanics of heterogeneous media]. Nauka. [in Russian]
24. Samokhvalov, S. E. (1998). Metod rassheplenyya po fizycheskym faktoram dlya nesolenoidal'nogo dvizhenyya hazozhydkostnykh sred [The splitting method by physical factors for the non-solenoid motion of gas-liquid media]. *Izzh.-Phys.Zh.* 71(93), 454-459. [in Russian]
25. Kabakov, D. Yu., Samokhvalov, S. E., & Pityuk, V. P. (2015). *Matematychnye modelyuvannya perenosnykh protsesiv v ustanovtsi pich-kivsh*. [Mathematical modeling of portable processes in the furnace-ladle unit]. DDTU. [in Ukrainian]
26. Ogurtsov, A. P., & Samokhvalov, S. E. (2001). *Matematychnye modelyuvannya teplofizychnykh protsesiv u bahatofaznykh seredovishchakh* [Mathematical modeling of thermophysical processes in multiphase environments]. Naukova dumka [in Ukrainian]
27. Belotserkovsky, O. M., Panaryn, A. I. Shchennikov, V. V. (1984). Metod parametryzatsyonnoy korrektsyy raznostnykh skhem. [The method of parameterization correction of difference schemes]. *ZHVM and MF*, 24(1), 65-74. [in Russian]

S. Ye. Samokhvalov¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, Professor, ORCID 0000-0002-7362-213X

V. P. Piptyuk¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-2915-1756

S. V. Grekov¹, Researcher, ORCID 0000-0002-2848-0999

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

INFLUENCE OF THE QUANTITY OF THE ADDITIVE ON THE HYDRODYNAMICS OF THE METAL BATH IN THE LADLE

Abstract. It is known that steel production involves the use of various solid additive materials, which are introduced into the liquid metal bath at the stages of converting and outfurnace processing. The vast majority of such materials are supplied in lump form and in significant quantities. The volume of the additive can vary from 0.05 to several tens of kilograms per ton of molten steel, depending on the technological production conditions and other requirements. Until now, various studies and calculations on the efficiency of using additive materials in steel production were based on considering the behavior of their separate piece in a liquid metal bath. At the same time, the theoretical description of the hydrodynamic state of the metal bath did not take into account the influence of the amount of added additive. At the same time, as it seems to the authors of the article, it is precisely this factor that can influence the accuracy of the calculated results and, most importantly, increase the error in further assessment of the effectiveness of using high-value and mainly imported materials. The article, as the first stage of theoretical consideration and assessment of the influence of variable factors on the degree of use of additive materials and in order to increase the efficiency of their use, presents a theoretical interpretation and shows the feasibility of taking into account in improved mathematical models the processes of melting (dissolution) and assimilation of solid materials by the metal melt introduced quantitative factor, as one of the significant parameters of complex physical and chemical processes. Using the example of lump ferromanganese grade FeMn78, as an additive material, which was introduced in different quantities (from 0,2 to 2 kg/t) into a ladle with a capacity of 250 tons during metal processing in a ladle-furnace unit (LF) with simultaneous bottom argon purging within the range of 200 – 800 l/min through each of the two tuyeres, the dependence of the influence of the amount of additive on the change in the hydrodynamics of the liquid metal bath is shown.

Key words: amount of additive material, hydrodynamics of a liquid metal bath.

For citation: Samokhvalov, S. Ye., Piptyuk, V. P., & Grekov, S. V. (2023). Influence of the quantity of the additive on the hydrodynamics of the metal bath in the ladle. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 231-245. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-231-245>

*Стаття надійшла до редакції збірника 12.09.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*