

МЕТАЛУРГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.39.2021.1

УДК 669.184:669.141.245

Є.М. Сігарьов, д.т.н., професор

Г.Ю. Крячко, к.т.н., доцент

О.В. Довженко, аспірант

Ю.С. Лобанов, аспірант

А.А. Похвалітій, к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ХВИЛЬ ТА СПЛЕСКІВ НА ПОВЕРХНІ КОВШОВОЇ ВАННИ

У роботі вирішена актуальна наукова задача, яка полягає в науковому обґрунтуванні доцільності використання нових способів продувки ковшової ванни при введенні реагентів крізь заглибні фурми зі встановленням особливостей формування зони хвиль та сплесків, які призводять до втрат металу та погіршення техніко-економічних показників процесу. Метою роботи є дослідження впливу витрат газу-носія, товщини шлакового покриву на поверхні ванни та швидкості обертання заглибної фурми на висоту та площу утвореного за рахунок виходу газових об'ємів на поверхню ванни буруна. Отримані нові дані щодо особливостей впливу змін у товщині шару шлаку, що формується по ходу десульфурації розплаву на поверхні ванни, на профіль буруна, з поверхні якого здійснюється викидання крапель металу за межі ковша, та площу «ока». Запропоновані математичні вирази для опису залежності зміни висоти буруна від досліджених у роботі факторів впливу, придатні для застосування при удосконаленні конструкцій заглибних фурм для продувки ковшової ванни.

Ключові слова: *фурма, ківш, бурун, газ, металевий розплав, шлак.*

The actual scientific problem is solved, which consists in scientific substantiation of expediency use new methods bucket bath purge at introduction reagents through immersion lances with establishment features formation zone waves and splashes. The aim the work is to study the influence of carrier gas consumption, slag thickness on the bath surface and speed rotation the immersion lance on the height and area formed, due to the release of gas volumes on bath surface, the breaker. New data on the peculiarities influence changes in the thickness of the slag layer formed during desulfurization melt on the bath surface, on the profile breaker, from the surface of which metal droplets are ejected outside bucket, and area of the «eye». Mathematical expressions are proposed to describe dependence change in the height breaker on studied factors of influence, suitable for use in improving the design of submersible lances for blowing bucket bath.

Keywords: *lance, ladle, breaker, gas, metal melt, slag.*

Постановка проблеми

На основі досвіду випробування коінжекційної технології ковшової десульфурації в умовах конвертерного цеху ПАТ «ДМК» визначені умови раціонального дуттьового режиму для вдування реагентів углиб ванни, відхилення від яких сприяє викиданню шлакометалевої маси, утворенню «пробивного» режиму, призводить до збільшення амплітуди коливань ванни та висоти буруна на її поверхні.

Мінімізація втрат заліза при ковшовій десульфурації переробного чавуну перед сталеплавильним переділом залишається актуальним завданням [1]. Механізми втрат при застосуванні різних реагентів та технологій їх вводу у ковшову ванну мають як подібності так і відмінності [2–4]. Але у всіх технологічних варіантах з використанням заглибних фурм для вдування десульфураторів углиб ванни частина заліза безповоротно втрачається за рахунок вильоту крапель залізовуглецевого розплаву за межі ковша по ходу обробки.

У промислових умовах на поверхні ковшової ванни формується шар шлаку, товщина та фізико-хімічні властивості якого суттєво змінюються по ходу вдування реагентів у ванну [5]. При продуванні газом та при вдуванні порошкоподібних реагентів у потоці газу-носію вглиб ванни на поверхні останньої утворюється відкрита, незахищена шлаком, зона (так зване «око»). При виході у атмосферу в межах цієї області спливаючі газові бульбашки, покриті плівкою металевого розплаву, розриваються з викиданням плівки у оточуючий простір. Рідкий метал внаслідок дії сил поверхневого натягу стягується у краплі, що рухаються за різними траєкторіями. Частина крапель попадає на поверхню шлаку та має можливість повернутися у ванну як по ходу обробки, так і під час транспортування ковшу до установки скачування шлаку, інша призводить до втрат заліза за рахунок формування корольків у шлаку. Виліт крапель здійснюється, у більшості випадків, із зони утворення хвиль та сплесків металевого розплаву на поверхні ванни, вільної від шлаку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

З погляду якісної оцінки продувки металу в ковші в ряді робіт встановлено [5–7], що в квазістаціонарному стані на поверхні моделюючої рідини утворюються декілька характерних зон локального підвищення її рівня (так звані «буруни»).

До вказаних зон відносять барботажну зону, зону зустрічних хвиль і сплесків, які змінюють свої геометричні розміри або цілком зникають при відповідних режимах продувки і в залежності від конструкційних особливостей наконечника заглибної фурми. Найбільш суттєво на геометричні параметри буруна на поверхні ванни впливає витрата газу на продувку. У зоні барботажу існує високий ступінь турбулізації потоку, що забезпечує високі швидкості масопеносу в цій зоні.

Як встановлено у роботах [2, 3, 5, 8], реакція десульфурації розплаву при ковшовій обробці вдуванням реагентів-десульфураторів вглиб ванни протікає на границі розділу «метал-шлак» і лімітується дифузією, тобто швидкість реакції обмежена масовіддачею сірки в об'ємі шлаку або металу. Зрозуміло, що найбільш ефективним способом підвищення швидкості реакції видалення сірки є збільшення площі міжфазової поверхні. Проходження бульбашок газу-носію, що крім того в нашому випадку містить пару магнію, крізь міжфазову границю «метал-шлак» супроводжується емульгуванням крапель металу шлаком. Ці металеві краплі мають малі розміри і велику питому поверхню, в результаті чого величина поверхні розділу «метал-шлак» істотно збільшується.

У свою чергу, формування буруну, з висотою, що перевищує поточну товщину шлакового покриву, здатне призвести до окиснення поверхні металу у цій зоні, втрат реагента-десульфуратора (магнію) та інтенсифікації викидання крапель чавуну за межі ковшової ванни і втрат заліза зі шлаком, який скачують з поверхні ванни після обробки.

Раніше, для умов роботи установки «ківш-піч», експериментальним шляхом було встановлено [6], що висота буруна (ΔH) над поверхнею металеві ванни може бути визначена за виразом (при витратах газу-носію (Q) на продувку у межах 40-60 м³/год.), см :

$$\Delta H = 4,25 \cdot \ln Q + 1,35. \quad (1)$$

Спеціалістами міжнародного дослідного центру м.Гамільтон (Канада) [7] запропоновані удосконалені вирази для визначення ΔH у ванні глибиною H :

– з врахуванням товщини покривного шлаку

$$\Delta H = 2,58 \cdot Q^{0,63} \cdot H^{0,57}, \quad (2)$$

– без врахування наявності шлаку

$$\Delta H = 5,03 \cdot Q^{0,62} \cdot H^{0,55} \cdot g^{-1,24}. \quad (3)$$

Формулювання мети дослідження

Втім, запропоновані вирази (1–3) призначені для попередньої оцінки умов формування буруна при продуванні ванни крізь донні пробки на установці «ківш-піч» (УКП). Умови обробки розплаву чавуну на установці десульфурації чавуну (УДЧ) відрізняються від умов УКП, крім того у виразах (1–3) не враховано вплив товщини шару покривного шлаку на профіль буруна та газонасиченість ванни при використанні обертових заглибних фурм [3, 8]. Метою дослідження є встановлення особливостей формування зони хвиль і сплесків при ковшовій десуль-

фурації чавуну в умовах використання обертових заглибних фурм та зміні товщини шлакового шару.

Виклад основного матеріалу

З використанням установки на базі індукційної печі ІСТ-0,16 лабораторії «Металургії сталі» кафедри металургії чорних металів та обробки металів тиском ім. проф. В.І. Логінова на першому етапі досліджень виконали високотемпературне моделювання процесу продувки розплаву переробного чавуну нейтральним газом. Продували розплав чавуну як вільного від шлаку на поверхні ванни, так і з наведенням шару шлаку різної товщини (від 30 до 80 мм) з відеофіксацією особливостей утворення зони хвиль і сплесків металу.

У серії проведених експериментів у якості газу для продувки ванни масою 96—104 кг використовували аргон, який подавали з витратою 0,04—0,08 м³/хв. Газ вдували крізь заглибні фурми з одним або двома боковими соплами за методикою, що описана у роботах [2, 3]. Глибина металеві ванни, розміщеної у тиглі індукційної печі глибиною 0,67 м, складала 0,38—0,43 м. Діаметр поверхні ванни металевого розплаву складав, у середньому, 0,245 м.

За результатами обробки отриманих даних визначені особливості профілю та площини бурунів, утворених на поверхні ванни, в залежності від витрат газу на продувку та товщини покривного шлаку.

Для уточнення ступеня впливу різних факторів на формування та геометричні параметри (висоту та площу) буруна над поверхнею ванни на наступному етапі провели серію ізотермічних експериментів з використанням моделі ковша із плексигласу у масштабі 1:11 до 230-т ковша конвертерного цеху ПАТ «ДМК». У якості моделюючої чавун рідини використовували воду (20 °С), газу-носію — компресорне повітря ($X_3 = 1,0—2,2$ л/хв.), шару покривного шлаку (товщиною $X_1 = 6—30$ мм) — синтетичне моторне масло. Використовували одно- та двосоплові наконечники заглибних фурм з соплами діаметром 0,0013 та 0,001 мм відповідно. Визначали особливості формування буруна при використанні нерухомих фурм та фурм, що обертали навколо власної вісі. Швидкість обертання фурм (X_2) змінювали в межах від 0 до 240 об/хв. Фурми зі змінними наконечниками розташовували на відстані 50—60 мм від днища у ванні глибиною 300—320 мм. Для відеофіксації формування буруна використовували методику високошвидкісної зйомки (120—240 кадрів/сек.).

Масштаб моделі у відповідності з теорією подібності визначали за застосуванням критерію Вебера $We = \frac{\sigma}{\rho_{ж}} \cdot l \cdot v_m$ (де σ — поверхневий натяг; $\rho_{ж}$ — густина; l — характерний розмір; v_m — швидкість руху рідини на моделі) та числа Лапласа $La = \frac{\sigma}{\rho_{ж}} \cdot l^2 \cdot g$, де g — прискорення вільного падіння.

У відповідності до плану повного факторного експерименту виконали три серії низькотемпературного моделювання.

На першому етапі досліджень встановлено характер формування барботажної зони [8] в об'ємі ванни під шлаком та виникнення буруна на її поверхні при використанні нерухомої та обертової заглибних фурм (рис.1). Визначений ступінь впливу витрат газу на продувку на діаметр зони спливання пузирів, газонасиченість ванни та характер формування зони хвиль та сплесків на її поверхні.

При цьому використання односоплового наконечника нерухомої заглибної фурми для вдування газу супроводжується утворенням макропузирів (рис. 1, а) та локальним підніманням поверхні ванни відносно рівня спокійної ванни у зоні виходу пузирів. Пропорційно збільшенню інтенсивності продування газу з 1,0 л/хв. до 2,2 л/хв. підсилюється хвилеутворення з появою сплесків та бризок. При використанні двосоплового наконечника фурми в об'ємі ванни утворюються два симетричних відносно вісі фурми газорідинні контури, що замкнені між потоками спливаючих пузирів та стінами ковша. Бурун на поверхні ванни має форму, наближену до еліптичної при одночасному зменшенні висоти хвиль та інтенсивності сплесків.

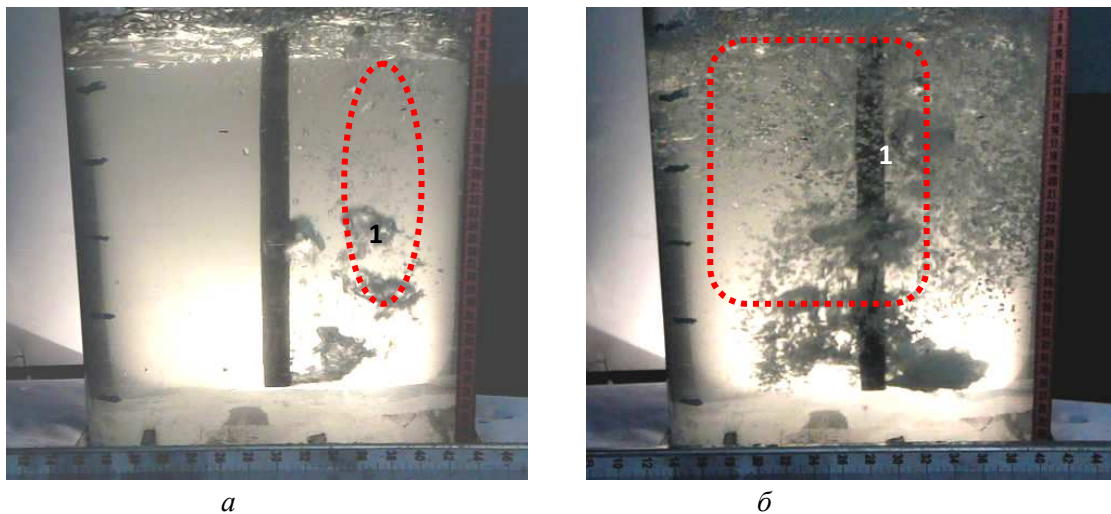


Рис. 1. Характерна картина витoku струменів газу із сопел нерухомої (а) та обертової фурми (50 об/хв.) (б), та газонасиченість ванни

При використанні обертової заглибної фурми вже зі збільшенням швидкості її обертання понад 10 об/хв. забезпечується подрібнення газових пазирів з суттєвим розширенням (пропорційно швидкості обертання) діаметру барботаژної зони і газонасиченості ванни (рис. 1, б). За відсутності шлакового покриву на поверхні ванни утворюється бурун зменшеної висоти та більшої площі у порівнянні з нерухомою фурмою. Пропорційно збільшенню швидкості обертання фурми на поверхні ванни підвищується рівень піноподібного газорідного шару але внаслідок інтенсифікації гідродинамічних процесів одночасно посилюється і хвилеутворення.

З метою порівняння відповідності геометричних параметрів буруна з розмірами барботажних зон довжину струменів, що витікають із сопел наконечників заглибної фурми, визначали за виразом [8]. У повній відповідності до теоретичного обґрунтування встановлені залежності між довжиною струменя (струменів) та параметрами буруна.

Обробкою результатів експериментів з наведенням шлаку на поверхні ванни встановлено наступне. Уточнені основні залежності між довжиною газового струменя на виході з сопла (сопел) фурми, площею вільної від шлаку зони («ока») на поверхні ванни та геометричними параметрами буруна. Зміна умов вводу газу для продувки ванни (кількість сопел у наконечнику, обертання фурми, витрата газу) суттєво впливає на відношення площі «ока» до загальної площі ванни ($S_{\text{вільн}}$), яке змінюється не тільки за величиною, але й за знаком.

Так, максимізація величини $S_{\text{вільн}} = 49,36\%$ забезпечується при швидкості обертання односоплової фурми у діапазоні 120–240 об/хв. при товщині шару шлаку 6 мм (мінімальна товщина у проведених дослідженнях), а практичне зникнення «ока» ($S_{\text{вільн}} = 6,03\%$) — при 120–240 об/хв. та найбільшому шарі шлаку (30 мм у проведених дослідженнях) відповідно [9]. Зменшення товщини шлаку призводить до збільшення площі «ока» більш ніж у 8 разів. У діапазонах зі швидкістю обертання фурми 10–120 об/хв. вплив товщини шару шлаку на площу «ока» менш суттєвий (2,5–4,5).

Результати визначення впливу витрат газу на продувку, швидкості обертання фурми та товщини шлаку на висоту буруна (h_n у % відносно до товщини шлаку) (рис. 2) при використанні односоплового наконечника фурми наведені у табл. 1.

Як і очікувалось, геометричні параметри буруна змінюються пропорційно витратам газу на продувку ванни. В той же час, вплив швидкості обертання фурми на профіль буруна має нелінійний характер (табл. 1).

Так, зокрема, при продуванні ванни з використанням фурми з 1 соплом при 240 об/хв. і витраті газу 2,2 л/хв. спостерігається підняття буруна на висоту, що на 33 % перевищує товщину шлаку. При цьому, вочевидь, висота буруна по площі змінюється відповідно до коливань ванни та сплесків. При зменшенні витрат газу до 1,0 л/хв. за інших незмінних параметрах, ви-

сота буруна не перевищує $2/3$ товщини шлаку, при досягненні мінімальної (у даних експериментах) товщини шлаку — зменшується приблизно до $1/3$ вказаного параметра. Найменша зафіксована у експериментах відносна висота буруна (для односплового наконечника фурми) склала $33,3\%$ від товщини шлаку при швидкості обертання фурми у діапазоні $90\text{—}120$ об/хв.

Встановлено, що при мінімальних витратах газу вплив швидкості обертання заглибної фурми на геометричні параметри буруна суттєвий.

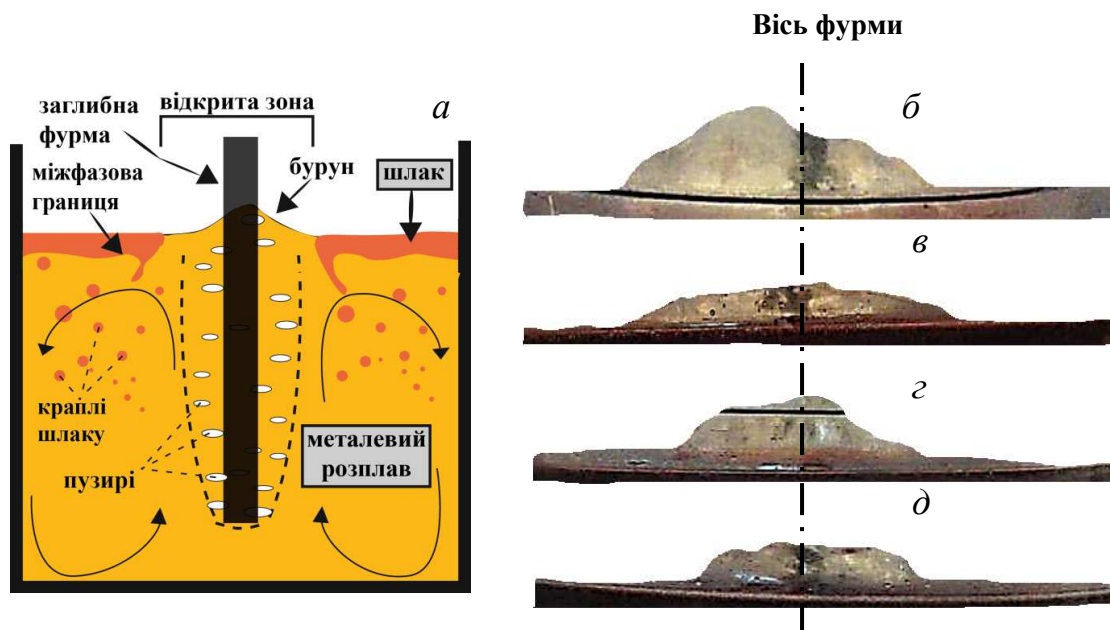


Рис. 2. Схема формування (а) та профіль буруна (б - д) на поверхні ковшової ванни при різних швидкостях обертання заглибної фурми з двоспловим наконечником при витраті газу на продувку $2,2$ л/хв. та товщині шлаку 30 мм : б — стаціонарна фурма; в — швидкість обертання фурми 90 об/хв.; з — 120 об/хв.; д — 240 об/хв

Таблиця 1. Значення відносної висоти буруна h_n та площі «ока» S_n на поверхні ковшової ванни, визначені за результатами експериментів згідно плану (для односплового наконечника фурми)

№ згідно плану експерименту	$h_{0-90},$ %	$h_{90-120},$ %	$h_{120-240},$ %	$S_{0-90},$ %	$S_{90-120},$ %	$S_{120-240},$ %
1	83,3	70,0	133,3	26,3	29,5	28,1
2	83,3	83,3	83,3	25,0	25,0	25,0
3	66,6	40,0	33,3	46,38	45,2	49,36
4	50,0	50,0	50,0	39,06	39,06	39,06
5	60,0	66,6	76,6	13,55	9,9	6,03
6	56,6	56,6	56,6	17,84	17,84	17,84
7	40,0	33,3	36,6	17,84	11,01	31,88
8	46,0	46,6	46,6	20,48	20,48	20,48

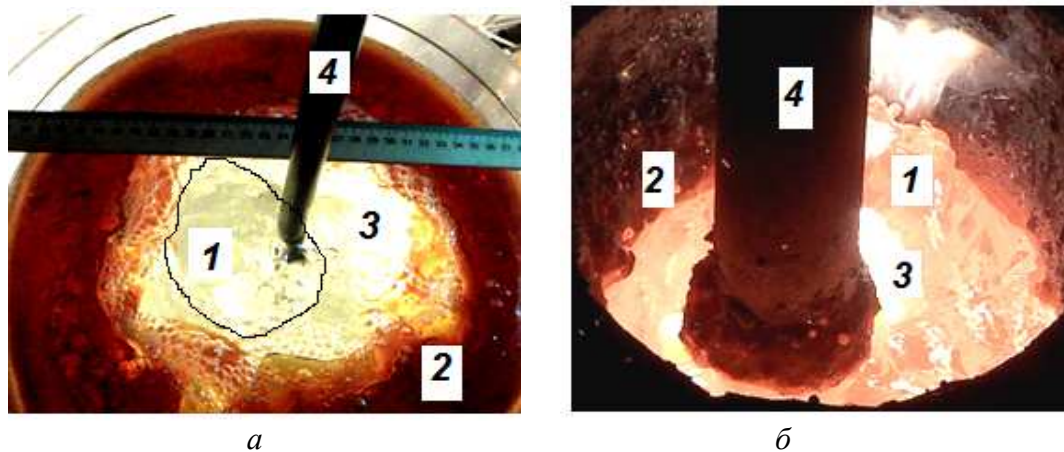


Рис. 3. Утворення буруна у зоні хвиль та сплесків при продуванні ковшової ванни крізь двосопловий наконечник обертової заглибної фурми у ізотермічному експерименті (а) та при високотемпературному моделюванні (б). Швидкість обертання фурми 90 об/хв., товщина шлаку 30 мм

Визначені закономірності стосовно впливу витрат газу відповідають відомим результатам інших дослідників [6, 7], та уточнюють відомості стосовно характеру впливу обертання фурми навколо вісі й витрат газу на геометричні параметри буруна і умови оголення поверхні ванни при зміні товщини шлакового покриву (рис. 3).

За результатами обробки отриманих емпіричних даних запропоновані моделі придатні для визначення висоти буруна при використанні нерухомої та обертових фурм з різними наконечниками.

Так, зокрема, для односоплової фурми у діапазоні швидкості її обертання 0—240 об/хв. висоту буруна можна визначити з використанням виразів:

– у діапазоні 0 — 90 об/хв.

$$H_{90}^n = 1.385 - 0.011 \cdot n - 0.118 \cdot Q - 0.063 \cdot \sigma + 0.0044 \cdot n \cdot Q + 0.0081 \cdot n \cdot \sigma + 0.245 \cdot Q \cdot \sigma - 0.003 \cdot n \cdot Q \cdot \sigma$$

– у діапазоні 90 — 120 об/хв.

$$H_{120}^n = 1.387 + 0.007 \cdot n - 0.118 \cdot Q - 0.063 \cdot \sigma + 0.0047 \cdot n \cdot Q + 0.0021 \cdot n \cdot \sigma + 0.2425 \cdot Q \cdot \sigma - 0.0023 \cdot n \cdot Q \cdot \sigma$$

– у діапазоні 120 — 240 об/хв.

$$H_{240}^n = 1.3888 - 0.00044 \cdot n - 0.1178 \cdot Q - 0.0628 \cdot \sigma + 0.00001 \cdot n \cdot Q + 0.00158 \cdot n \cdot \sigma + 0.2425 \cdot Q \cdot \sigma - 0.00148 \cdot n \cdot Q \cdot \sigma$$

Для визначення статистичної залежності коефіцієнтів регресії розраховували їх довірчий інтервал. Після оцінки значимості коефіцієнтів регресії проводили перевірку гіпотези щодо адекватності отриманих математичних моделей за критерієм Фішера (F -критерієм). Доведена адекватність отриманих виразів та можливість їх використання для пошуку напрямків до оптимального. Окремі результати чисельного моделювання з використанням отриманих математичних моделей наведені на рис. 4.

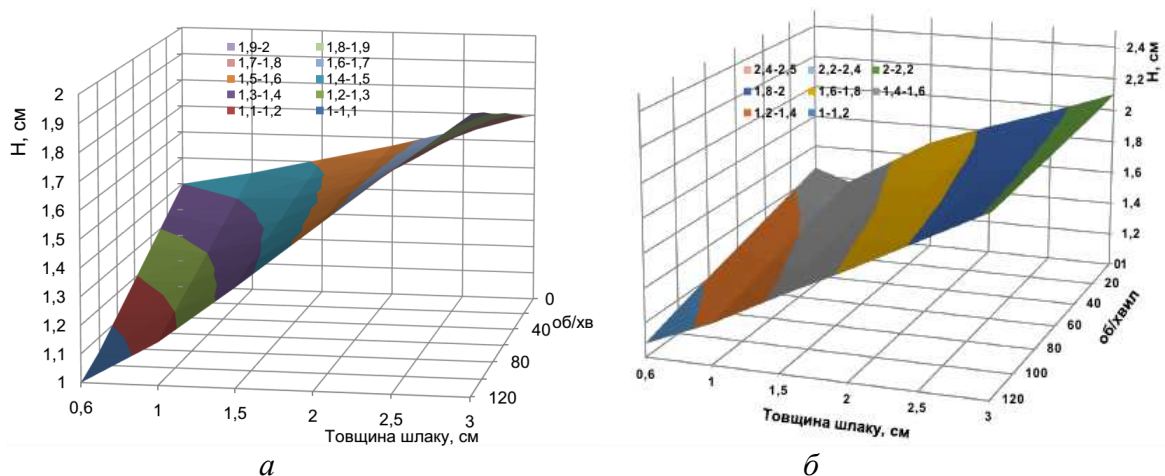


Рис. 4. Висота буруна на поверхні ванни при використанні 2-х соплової фурми, яка обертається зі швидкістю 90—120 об/хв. при витратах газу на продувку ванни у 1,6 л/хв. (а) та 2,2 л/хв. (б) відповідно

Висновки

На підставі аналізу результатів виконаного моделювання можна зробити висновки, що для забезпечення раціональних умов ковшової десульфурзації чавуну, зменшення втрат магнію, невикористаного на видалення сірки, зменшення площі буруна на поверхні ванни, пригнічення хвилеутворення та сплесків, які призводять до втрат металу, доцільними можна вважати наступні заходи. Збільшення газонасиченості ванни шляхом розосередження газових об'ємів при їхньому подрібненні в умовах використання багатосоплової обертової заглибної фурми. Забезпечення мінімально можливої за даних умов витрати реагентів-десульфураторів, товщини покривного шлаку та підтримання його рідкорухомості по ходу обробки розплаву. Забезпечення умов продувки ванни, за яких висота буруна не перевищує поточної товщини шару шлаку $\Delta H > H_{шл}$.

Список використаної літератури

1. Сигарев Е.Н. Технологические аспекты производства высококачественной стали. / *Металл и литье Украины*. 2005. №3–4. С. 93–95.
2. Sigarev E. N., Chernyatevich A. G., Chubin K. I. Desulfurization of cast iron during ladle magnesium treatment. *Steel in Translation*, 2001. Vol. 31, № 8. P. 7–9.
3. Sigarev E. N., Chernyatevich A. G., Chubin K. I., Zarandiya S.A. Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating. *Steel in Translation*, 2011. Vol. 41, № 6. P. 487–491.
4. Sigarev E.N. Power efficiency of intensive cast iron desulfurization in a ladle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. №2/1(74). P. 38–42. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40534>
5. Сігарьов Є.М., Кочмола Д.С., Чубін К.І. Вплив покривного шлаку на перебіг ковшової десульфурзації чавуну. *Теорія і практика металургії*. 2018. №1–2. С. 67–75.
6. Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Кочетов А.И. Энергосберегающая технология внепечной обработки стали в агрегате ковш-печь. *Тонкие наукоемкие технологии*, г. Старый Оскол, 2007. 223 с.
7. Krishnapisharody K., Irons G.A. Some Consideration in Process Design for Better Ladle Metallurgy Practice. *AISTech Proceedings*. 2009. Vol.1. P. 973–982.
8. Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Чубин К.И., Зарандия С.А. Гидрогазодинамика десульфурации чугуна диспергированным магнием с использованием стационарных и вращающихся фурм. *Металл и литье Украины*. 2012. № 8. С. 17–22.

9. Сігарьов Є.М., Кочмола Д.С., Сігарьов М.К. Формування відкритої зони на міжфазовій границі при ковшовому рафінуванні розплаву. *Збірник наукових праць Дніпровського технічного університету: (технічні науки)* Кам'янське: ДДТУ вип. 1(32). 2018. С. 3–9.

FEATURES FORMATION ZONE OF WAVES AND BURSTS ON THE SURFACE LADLE BATH

Sigarev E., Kryachko G., Dovzhenko A., Lobanov Yu., Pohvalitiy A.

Abstract

The results studies influence physicochemical properties and thickness cover slag, formed during ladle desulfurization pig iron by blowing a mixture of lime and magnesium, features formation a breaker on the surface bath and the level of metal losses with emissions outside ladle from this zone are presented. The necessity creating conditions for ensuring height breaker, which would not exceed thickness slag layer on the surface bath, has been substantiated. Using results of the high-temperature simulation blowing the cast iron melt with a neutral gas supplied through the nozzles tips stationary and rotating submersible lances, features development of counter waves and metal splashes in the absence and during formation slag cover with thickness of 30–80 mm on the surface bath are determined. The features change in the height and area breakers are determined depending on the gas flow rate for blowing bath and thickness slag. Based on the analysis results low-temperature modeling bath blowing, scientific ideas about the combined effect of the bath blowing intensity, speed of rotation submerged lance and thickness slag layer on the diameter bubbling zone, gas saturation of the bath and features wave formation on its surface in the slag-free zone were further developed (so-called «eye»). The nature relationship between length of the gas jet from lance nozzle, diameter «eye», and geometric parameters breaker has been established. It is shown that dependence profile breaker on speed of rotation lance and thickness slag layer is nonlinear. So, blowing bath through tip of a rotating lance with one nozzle at 240 rpm. with a gas flow rate of 2.2 l/min. creates conditions for raising top breaker to a height that is 33 % higher than the current thickness slag layer and contributes to the intensification formation of waves and bursts on the surface bath. With a decrease in the gas flow rate to 1.0 l/min., Under other unchanged conditions, height breaker is already 2/3 of the height slag layer, and as thickness slag decreases proportionally decreases. The smallest, recorded in the experiments, relative height breaker was 33.3% of the slag thickness at a lance rotation speed in the range of 90–120 rpm. Mathematical models are proposed that are suitable for calculating height breakers depending on the thickness slag layer, speed of rotation lance and intensity of gas injection into the bath. Taking into account established mutually opposite effect thickness of the cover slag layer and speed of rotation submerged lance on the «eye» area and height of the breaker, it is advisable to continue search for ways to improve design tip submerged lance and slag mode of ladle desulfurization.

References

- [1] Sigarev E. N. Tekhnologicheskie aspekty proizvodstva vysokokachestvennoy stali. *Metall i lit'ye Ukrainy*. 2005. № 3–4. P. 93–95. [in Ukraine].
- [2] Sigarev E. N., Chernyatevich A. G., Chubin K. I. Desulfurization of cast iron during ladle magnesium treatment. *Steel in Translation*, 2001, Vol. 31, №8, P. 7–9. [in Russian].
- [3] Sigarev E. N., Chernyatevich A. G., Chubin K. I., Zarandiya S.A. Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating. *Steel in Translation*, 2011. Vol. 41, № 6. P. 487–491.
- [4] Sigarev E.N. Power efficiency of intensive cast iron desulfurization in a ladle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. №2/1(74). P. 38–42. Retrieved from <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40534> [in Ukraine]
- [5] Sigarev E. N., Kochmola D. S., Chubin K. I. Vpliv pokrivnogo shlaku na perebig kovshovoi desul'furatsii chavunu. *Teoriya i praktika metalurgii*. 2018. №1–2. P. 67–75. [in Ukraine].

- [6] Merker E. E., Harlamov D. A., Kochetov A. I. Energoberegaushaya tehnologiya vnepechnoi obrabotki stali v agregate kovsh-pech. *Tonkie naukoemkie tehnologii. Starii Oskol*, 2007. 223 p. [in Russian].
- [7] Krishnapisharody K., Irons G.A. Some Consideration in Process Design for Better Ladle Metallurgy Practice. *AISTech Proceedings*, 2009, Vol.1, P. 973–982. [in USA].
- [8] Sigarev E. N., Chernyatevich A. G., Chubin K. I., Zarandiya S. A. Gidrogazodinamika desul'furatsii chuguna dispergirovannim magniem s ispol'zovaniem statsionarnih i vrashaushihsvy furm. *Metall i lit'ye Ukrainy*. 2012. №8. P. 17–22. [in Ukraine].
- [9] Sigarev E. N., Kochmola D. S., Sigarev N. K. Formuvannya vidkritoї zoni na mizhfazoviy granitsi pri kovshovomu rafinuvanni rozplavu. *Zbirnik naukovykh prats' Dniprovs'kogo technichnogo universitetu: (tekhnichni nauky)*. Kam'yans'ke: DDTU, vip. 1(32). 2018. P. 3–9. [in Ukraine].