

С.І. Семикін, к.т.н., с.н.с.; ORCID 0000-0002-7365-2259

Т.С. Голуб, к.т.н., с.н.с.; ORCID 0000-0001-9269-2953

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

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ФІЗИЧНІЙ МОДЕЛІ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВЕРХНЬОЇ ПРОДУВКИ ЧЕРЕЗ НАКОНЕЧНИК ЗІ СКЛАДЕНИМ СОПЛОМ ПРИ ПРОДУВАННІ ОДНОФАЗНОЇ РІДИНИ

Анотація. Метою роботи було вивчення характеру і особливостей взаємодії струменів фурми конвертера, що витікають зі складених сопел, з рідкою ванною однофазної рідини. Дослідження проведено на базі фізичної моделі конвертера з верхньою продувкою. Досліджено конструкцію складеного сопла, що складається з центрального циліндричного сопла та розташованого навколо нього щілинного кільцевого сопла. Проведено візуальне та за допомогою відео зйомки порівняльне дослідження у зіставних умовах роботи складеного сопла з різними конструктивними особливостями, зокрема, з додатково заглибленим центральним соплом у складеному соплі та виступаючим центральним соплом; з роботою одного циліндричного сопла, чотирьох сопел однакового перетину а кільцевого щілинного сопла. Встановлено, що струмінь, який витікає зі складеного сопла, відрізняється можливістю більш активної взаємодії з рідкою ванною ніж одно циліндричне сопло та чотири сопла еквівалентної площини. Досліджувалося глибина проникнення струменя у рідину ванни, параметри формуючої лунки проникнення струменя, коливання ванни. Встановлено, що особливості формування кратеру у рідині, характерні при використанні складеного сопла, обумовлені використанням щілинної кільцевої частини сопла. Більш широкий кратер обумовлений використанням щілинної кільцевої частини сопла. Показано, що конструктивні варіанти складеного сопла із заглибленим або з виступаючим центральним соплом не сприяють збільшенню ні глибини, ні ширини формованого кратеру. Також встановлено, що особливості формування кратеру у рідині при використанні складеного сопла обумовлені використанням щілинної кільцевої частини сопла. Для формування кращих умов продувки зріз щілинної кільцевої частини повинен бути на одному рівні зі зрізом центрального сопла. При такій конструкції імпульс струменя зберігається на більшому протязі у порівнянні з використанням тільки одного центрального сопла, ймовірно як за рахунок захисту центрального струменя, так і завдяки своїм властивостям глибокого проникнення.

Ключові слова: кисневе конвертування, фізичне моделювання, верхня продувка, складене сопло, газовий струмінь, однофазна рідина

Посилання для цитування: *Семикін С.І., Голуб Т.С.* Порівняльне дослідження на фізичній моделі особливостей верхньої продувки через наконечник зі складеним соплом при продуванні однофазної рідини..

Стан питання. Для розширення можливостей управління конвертерною плавкою в киснево-конвертерному процесі необхідно «збалансувати» суперечливі вимоги до дуттьових режимів, які полягають в необхідності одночасного забезпечення «жорсткої» продувки (для швидкого запалювання плавки, інтенсивного перемішування ванни, підвищення ступеня засвоєння кисню та ін.) і «м'якої» продувки ванни (для прискореного та сталого шлакоутворення, збільшення ступеня окислення вуглецю до CO_2 та ін.). У характерних для більшості конвертерних цехів умовах, коли в ході кампанії зазнають суттєвих змін вихідні параметри початку плавки (температура футеровки і розміри робочого простору агрегату, якість заваленого металевих брухту, температура і склад чавуну), а продувка ванни здійснюється з прийнятою витратою кисню через звичайну багато соплову фурму, забезпечену наконечником з круговим розташуванням 4-6 сопел Лавалля [1-4], не завжди вдається забезпечити:

- прискорений і стабільний процес шлакоутворення з наведенням з самого початку продувки рідкорухомого основного окисного шлаку;
- спокійний характер продувки конвертерної ванни в режимі «заглиблених» кисневих струменів при розташуванні рівня спіненого шлаку вище зрізу наконечника фурми протягом переважної частини часу операції;
- достатньо інтенсивне перемішування конвертерної ванни для активного перебігу обмінних процесів.

Вирішення перерахованих вище завдань можливо при одночасній продувці ванни двома типами струменів: надзвуковими для глибокого проникнення і дозвуковими для здійснення активного шлакоутворення, що можливо при використанні фурм з наконечниками зі складеними соплами [5]. Запропонована конструкція складеного сопла: центральне сопло для подачі основного газового потоку, що оточене щільним кільцевим соплом. В роботі відображено результати проведеного дослідження на фізичній моделі особливості використання такого типу сопел при верхньому продуванні однофазної рідини.

Метою роботи є вивчення характеру і особливостей взаємодії струменів фурми конвертера, що витікають зі складених сопел, з рідкою ванною однофазної рідини.

Створення моделі. Відомо, що для досягнення в моделі подібності процесів, що відбуваються в дослідному зразку (конвертері) в виробничих умовах, необхідно дотримання подоби величин основних факторів, що визначають ці процеси. Так, для опису руху рідин, газів і їх взаємодії

необхідні і достатні умови так званої механічної (геометричної і газодинамічної) подоби, яких слід дотримуватися. Також при моделюванні конвертерного процесу необхідно враховувати, що він складається з безлічі процесів, що мають складні взаємозв'язки. Так, крім гідромеханічних процесів, в яких бере участь безліч сил, в ванні відбувається часткове або повне розчинення дуття, теплообмін між фазами, що обумовлює збільшення обсягу дуття, і, в окремі періоди, - протікання хімічних реакцій, що супроводжуються виділенням газу і накопиченням шлакової фази. Слід зазначити, що облік всіх діючих сил в складному процесі моделювання надзвичайно складний, а вибір масштабів обмежений. У зв'язку з цим облік всіх або більшості умов призведе до того, що параметри моделі практично зрівняються з реальним зразком. У зв'язку з цим, набуло поширення якісне наближене моделювання окремих сторін процесу виплавки металу в конвертерах, при якому дослідники нехтують в тій чи іншій мірі іншими процесами. У таких моделях легше дотриматися подоби основних факторів і сил, що визначають конкретні явища. У зв'язку з цим багатьма авторами при проведенні «холодного» моделювання вважається достатньою для досягнення наближеної гідродинамічної подоби в конвертері і його моделі (при наявності геометричної подоби і подоби вихідних умов) необхідність забезпечення рівності наступних критеріїв:

Вебера:

$$We = \frac{\sigma}{\gamma \cdot l^2} = idem \quad (1)$$

де σ - поверхневий натяг.

Фруда:

$$Fr = \frac{W^2}{g \cdot l} = idem \quad (2)$$

де W – швидкість руху рідини в моделі.

Рейнольдса:

$$Re = \frac{W \cdot l}{\nu} = idem \quad (3)$$

Таким чином, вважається за необхідне враховувати дію сил: інерційних, поверхневого натягу, тяжкості і в'язкості рідини.

Однак не всі перераховані вище сили і величини, що входять в критерії, є визначальними. Взаємодія сил поверхневого натягу і сил тяжіння зазвичай істотна при повільній течії рідини і вторинних процесах в двофазних системах. Найважливіші сили, які беруть участь в процесі, є інерційні сили струменя і, з боку рідини - підйомні (Архімедові) сили.

Подоба взаємодії цих сил забезпечується постійністю критерію Архімеда (Ar).

$$Ar = \frac{\gamma_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma(0)}^2}{g \cdot (\gamma_p - \gamma_{\Gamma}) \cdot d} \approx \frac{\gamma_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma(0)}^2}{g \cdot \gamma_p \cdot d} idem \quad (4),$$

де d – діаметр сопла.

Тому передбачається, що процес перемішування газового струменя рідини, у всякому разі, в тій зоні, де швидкість струменя велика, визначається в значній мірі боротьбою двох інерційних сил: струменя, що викликає рух, і рідини, яка протидіє руху.

Під час продування зверху режим взаємодії струменя газу з рідиною може бути різним у залежності від величини динамічного напору в осевій частині струменя на кордоні газ - ванна, який визначається діаметром сопла, тиском дуття, висотою підйому фурми над ванною та іншими факторами.

При постановці і проведенні фізичного моделювання використовують модифікований критерій Фруда, що забезпечує газо-гідро-динамічну подобу процесів, що відбуваються в моделі і в конвертері:

$$Fr' = \frac{u^2}{gD} \times \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_p - \rho_{\Gamma}} \quad (5)$$

$$Fr'_M = Fr'_H \quad (6)$$

$$\frac{u_M^2}{gD_M} \times \frac{\rho'_{\Gamma}}{\rho'_p - \rho'_{\Gamma}} = \frac{u_H^2}{gD_H} \times \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_p - \rho_{\Gamma}} \quad (7)$$

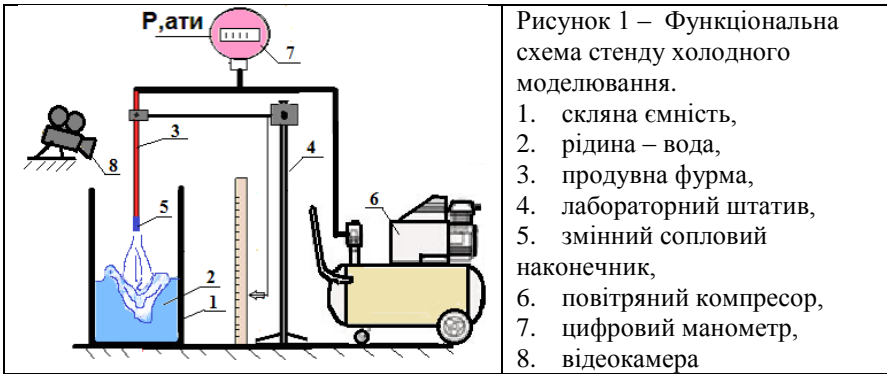
де Fr'_M , Fr'_H - модифікований критерій Фруда для моделі (м) і природи (н); u_M , u_H - швидкість витікання газу на моделі (м) і природі (н), (м/с); ρ'_p , ρ'_{Γ} , ρ_p , ρ_{Γ} - щільність рідини і газу, (кг/м³); D_M , D_H - характерний розмір для моделі (м) і природи (н), (м); g - прискорення вільного падіння, (м/с²)

Витрата газу, що вдувається при проведенні фізичного моделювання визначається, виходячи з масштабування і критерію подібності Фруда, за такою формулою:

$$Q_M = \sqrt{\left(\frac{D_M}{D_H}\right)^5 \times \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho'_{\Gamma}} \times \frac{\rho'_p - \rho'_{\Gamma}}{\rho_p - \rho_{\Gamma}}} \times Q_H \quad (8)$$

де Q_M и Q_H - витрата газу для моделі і зразка природи (конвертера) відповідно (м³/мин).

Для досліджень впливу конструкції сопел на характерні ознаки взаємодії газового струменя з рідиною (глибину занурення струменя, ширину формуємої лунки) розроблений стенд для холодного моделювання, який передбачає продувку стисненим повітрям зверху води, що імітує металевий розплав. Фізичну модель виконали в масштабі 1:30 до 160-т кисневого конвертера з дотриманням геометричної подоби основних параметрів агрегату і критеріїв подоби. Функціональна схема стенду наведена на рис. 1, базові параметри моделі наведено у таблиці 1.



Таблиця 1 – Базові параметри промислового конвертера і моделі

№	Найменування параметру	160-т конвертер	Фізична модель
1	Геометричні параметри:		
	-діаметр за футеровкою, м	5,650	0,190
	- глибина ванни, м	1,50	0,05
2	Діаметр сопла фурми, м	0,032	$3,8 \cdot 10^{-3}$; $2 \cdot 10^{-3}$; кільцеве $5,75 \times 5 \cdot 10^{-3}$ +центральне $2,5 \cdot 10^{-3}$
3	Кількість сопел, шт	5	1,4, складене
4	Витрата газу, м ³ /хв	300-450-600	0,098
5	Щільність газу, кг/м ³	1,42	1,29
6	Щільність металу та води, кг/м ³	7100- 7600	1000
7	Кінематична в'язкість металу (1600°C) та води (20°C), мм ² /с	$0,9 \cdot 10^{-3}$	$0,99 \cdot 10^{-3}$
8	Динамічна в'язкість металу (1600°C) і води (20°C), Па*с	0,003-0,006	0,004
9	Модифікований критерій Фруда	0,5- 2,0	0,5-2,0

Методика проведення експериментів: в прозору ємність (1) заливали фіксовану кількість води (близько 6 літрів), потім встановлювали продувну фурму (3) на задану висоту з встановленим одним з дослідних сопел над рівнем ванни (досліджено розташування фурми над ванною на висоті 20, 40 $\cdot 10^{-3}$ м). Фурма фіксувалася за допомогою штатива (4). Експерименти було проведено за різними варіантами дуття (тиск повітря 0,4 та 0,6 аті). Було проведено візуальне та за допомогою відео зйомки зіставлення продувки через наконечник з одним соплом (варіант 1), чотирма соплами (варіант 2), складеним соплом (варіант 3), з додатково заглибленим центральним соплом у складеному соплі (варіант 4) та виступаючим центральним соплом (варіант 5). Дослідне складене сопло складається з центрального сопла діаметром $2,6 \cdot 10^{-3}$ м і організованого навколо нього кільцевого сопла з параметрами: зовнішній діаметр $5,75 \cdot 10^{-3}$ м і внутрішній $5,25 \cdot 10^{-3}$ м (еквівалентний діаметр близько $3,8 \cdot 10^{-3}$ м). Для зіставлення були проведені продувки з наконечником з одним соплом діаметром $3,8 \cdot 10^{-3}$ м і чотирма соплами діаметром $2 \cdot 10^{-3}$ м, кут нахилу сопел до осі фурми 9 град. Параметри сопел обрані виходячи з дотримання відповідності площі їх перетину. Також для порівняння і розуміння особливостей впливу конструкції сопла на газовий потік і його взаємодію з рідиною була проведена продувка через тільки кільцеве сопло зазначеного вище параметру (варіант 6). Висота розташування сопел обрана однаковою для всіх варіантів сопел.

Результати дослідів. Виявлено, що струмінь від дослідного складеного сопла візуально був щільнішим, ширшим, ніж від одного циліндричного сопла. При цьому, як і очікували, найширша зона взаємодії формувалася від чотирьох сопел. На рисунку 2 наведені характерні фотокадри дослідних продувок при положенні фурми 10 калібрів.

Вимірювані параметри, що якісно характеризують можливості формуємого сопловим наконечником струменя щодо взаємодії з рідкою ванною (глибина формуємої лунки, її діаметр та коливання ванни) при продувці через дослідні наконечники наведені на діаграмах на рис. 3.

Аналіз отриманих діаграм та відеозаписів свідчить про те, що чим вище тиск дуття, окрім логічного збільшення глибини формуємої лунки взаємодії струменя з рідиною, тим краще проявляються відмінності в особливостях взаємодії струменів, що витікають з різних дослідних сопел. По-перше, відмічене, що найбільш широка лунка взаємодії формується при використанні чотирьох соплового наконечника, тому, що складається з чотирьох зон взаємодії, проте їх глибина занурення найменша (в середньому у два рази у порівнянні з іншими дослідними варіантами). При цьому відмічене менше звуження кратеру взаємодії газового

струменя у варіанті 3 при його заглиблені у рідину у порівнянні з продувкою через одне сопло на величину близько 38 %.

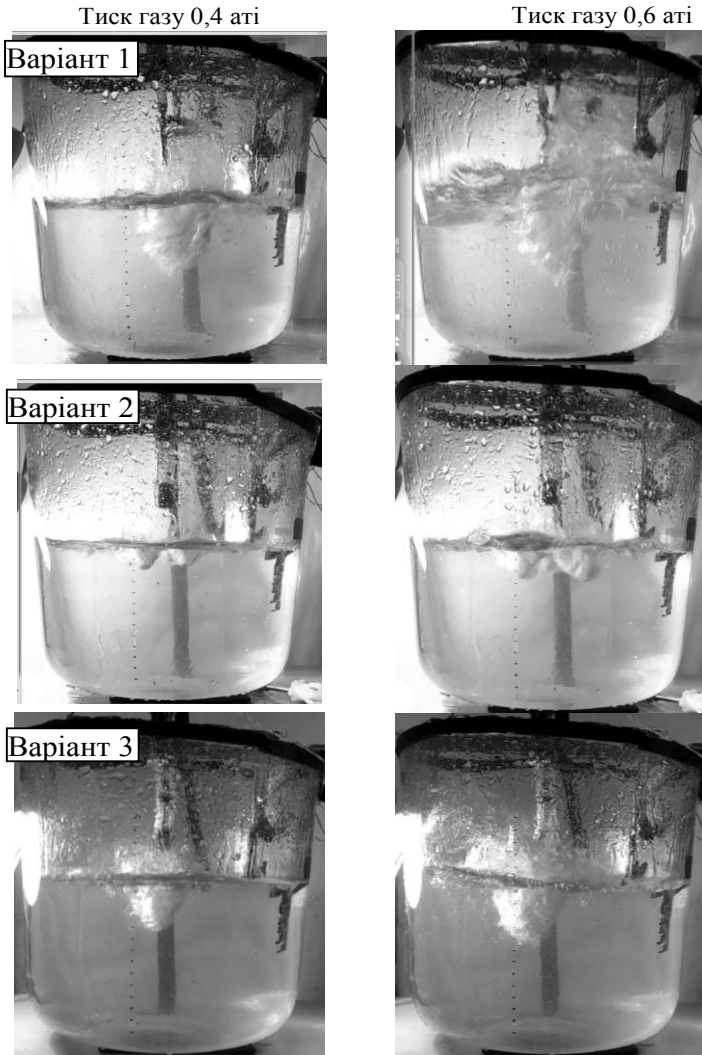


Рисунок 2 – Візуальне зіставлення особливостей продувки при положенні фурми 10 калібрів за варіантами

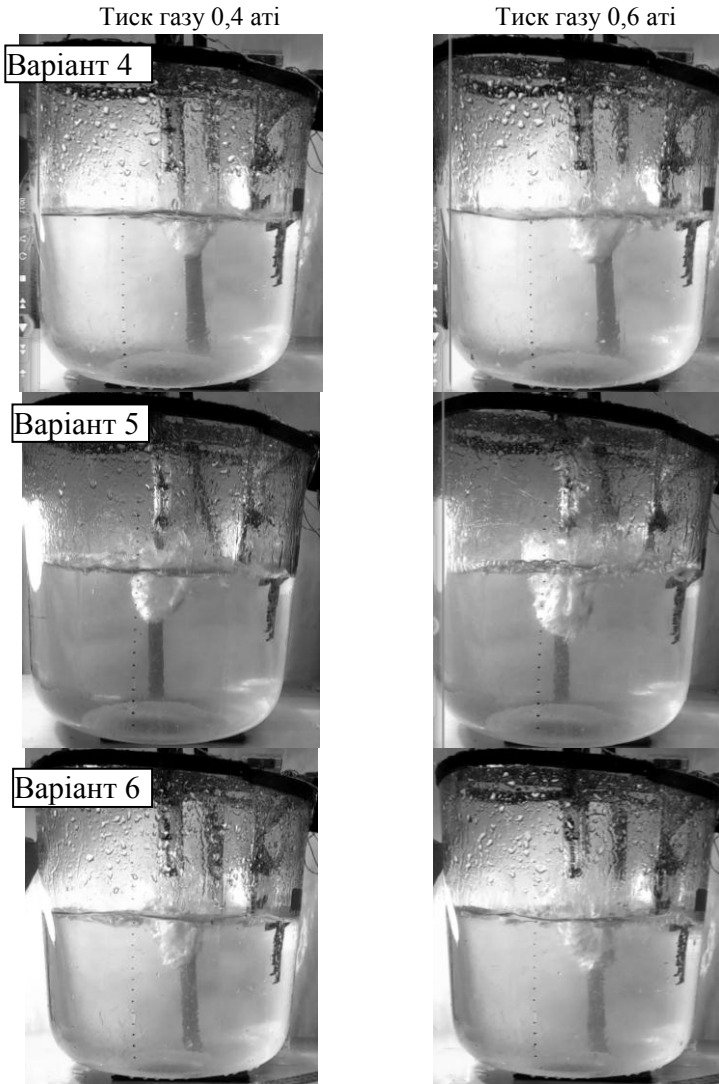


Рисунок 2 (продовження) – Візуальне зіставлення особливостей продукції при положенні фурми 10 калібрів за варіантами

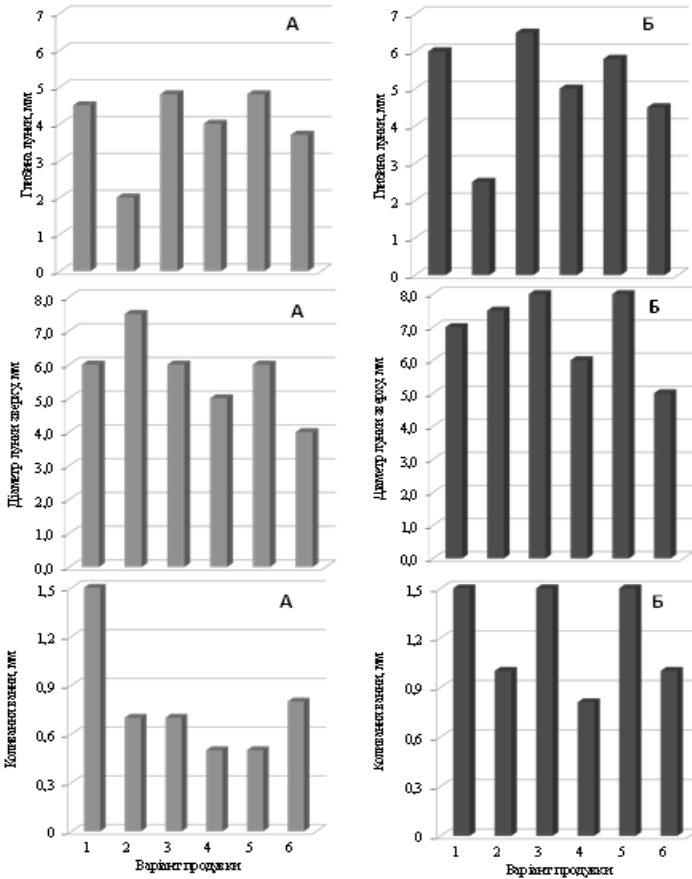


Рисунок 3 – Зіставлення вимірюваних параметрів при положенні фурми 10 калібрів при продувці з тиском газу 0,4 аті (А) та 0,6 аті (Б) за дослідними варіантами (позначення в тексті)

Використання складеного сопла (варіант 3) при тиску дуття 0,6 аті сприяє формуванню глибшої на 15 % лунки взаємодії та з більшим на 12% вхідним (верхнім) діаметром, ніж при використанні одного сопла, з меншим рівнем коливання ванни (на 10%). Конструктивні варіанти складеного сопла із заглибленим або з виступаючим центральним соплом не сприяють збільшенню ні глибини, ні ширини формованого кратеру. Навпаки, при заглибленні центрального сопла (варіант 4) формується менша за глибиною лунка кратеру, проте з більшим діаметром лунки

знизу (на 52 %) і з меншим рівнем коливань ванни (на 35 %) у порівнянні з варіантом використання одного центрального сопла.

Дослідна продувка через кільцеве щілинне сопло з ідентичними з використаними в складеному соплі параметрами сприяє формуванню лунки меншого діаметру та меншої глибини у порівнянні з варіантом використання складеного сопла та з іншими дослідженими варіантами. Проте формований кратер, як було відмічено для складеного сопла, менше звужений у порівнянні з варіантом 1 (співвідношення верхнього та нижнього діаметрів у 1,3 рази менша: 1,7 проти 2,2 у варіанті 1)

Висновки. Проведене фізичне моделювання дозволило виявити, що струмінь, який витікає за складеного сопла, відрізняється можливістю активної взаємодії з рідкою ванною за площею формуемого кратеру порівняною з використанням чотирьох соплового наконечника, а за глибиною проникнення кращою, ніж під час продувки крізь одне центральне сопло. Також встановлено, що особливості формування кратеру у рідині, характерні при використанні складеного сопла, обумовлені наступним:

- більш широкий кратер обумовлений використанням щілинної кільцевої частини сопла. Причому для формування кращих умов продувки його зріз повинен бути на одному рівні зі зрізом центрального сопла;

- значна глибина кратеру – використанням центрального сопла, імпульс струменя якого зберігається на більшому протязі завдяки зовнішньому оточенню кільцевим струменем у порівнянні з використанням тільки одного центрального сопла

Перелік посилань

1. *Состояние и дальнейшее совершенствование конструкций кислородных фурм в конвертерных цехах Украины /А.Д. Зражевский, А.Г. Чернятевич, А.В. Сущенко, А.С. Гриценко // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2014. № 6. С. 20-30.*
2. *Сущенко А. В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров // Вісник Приазовського державного технічного університету. 2009. Вип. 19. С. 36-41.*
3. *Чернятевич А.Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1. // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2015. № 4. С. 24-31. ISSN 0543-5749*
4. *Чернятевич А.Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 2 // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2015. № 5. С. 10-18.*

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Выпуск 34
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34*

5. Чернятевич А.Г., Носов К.Г., Бродский А.С. Повышение эффективности комбинированной продувки ванны 250-т конвертеров // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. 1989. №7. С. 56-58.
6. Казанцев И.Г. Механика газовой струи в бессемеровской ванне // Сталь. 1940. № 1. С. 16-18.

Reference

1. Zrazhevskij A.D., Cherniatevych A.G., Sushenko A.V. & Gritsenko A.S. (2014). Sostojanie i dalnejshee sovershenstvovanie konstrukcij kislorodnyh furn v konverternyh tsehah Ukrainy [State and further improvement of oxygen tuyere structures in converter shops of Ukraine]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost [Metallurgical and mining industry]*, 2014, 6, 20-30. [In Russian].
2. Sushenko A.V. (2009). Sovershenstvovanie i optimizatsija dutevyh rezhimov i ustrojstv kislorodnyh konverterov [Improvement and optimization of blowing modes and devices for oxygen converters]. *Visnyk Pryazovskogo derzavnogo tehničnogo universytetu [Reporter of the Priazovskiy State Technical University]*, 2009, 19, 36-41. [In Russian].
3. Cherniatevych A.G. (2015). Razrabotka dutevogo i shlakovogo rezhimov konverternoj plavki pri verhnej kislorodnoj produvke. Soobshenie 1 [Development of blast and slag modes for converter smelting with overhead oxygen blowing. Report 1]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost [Metallurgical and mining industry]*, 2015, 4, 24-31. ISSN 0543-5749 [In Russian].
4. Cherniatevych A.G. (2015). Razrabotka dutevogo i shlakovogo rezhimov konverternoj plavki pri verhnej kislorodnoj produvke. Soobshenie 2 [Development of blast and slag modes for converter smelting with overhead oxygen blowing. Report 2]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost [Metallurgical and mining industry]*, 2015, 5, 10-18. [In Russian].
5. Cherniatevych A.G., Nosov K.G. & Brodskij A.S. (1989). Povyshenie effektivnosti kombinirovannoj produvki vannы 250-t konverterov [Increasing the efficiency of combined blowing of a bath of 250-ton converters]. *Chernaja metallurgija. Bulletin NTI [Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information]*, 1989, 7, 56-58. [In Russian].
6. Kazantsev I.G. (1940). Mehanika gazovoj strui v bessemerovskoj vanne [Mechanics of a gas jet in a Bessemer bath]. *Stal [Steel]*, 1940, 1, 16-18. [In Russian].

S.I. Semykin, PhD, senior researcher; ORCID 0000-0002-7365-2259

T.S. Golub, PhD, senior researcher; ORCID 0000-0001-9269-2953

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Comparative study on a physical model of specific features of top blowing through the tip with folded nozzles when blowing single-phase liquids

Summary. The aim of the work was to study the nature and peculiarities of the interaction of the lance of the converter lance flowing from the folded nozzles with a liquid bath of single-phase liquid. The study was conducted on the basis of a physical model of the converter with top purge. The design of a folded nozzle consisting of a central cylindrical nozzle and a slit annular nozzle located around it is investigated. A visual and video recording comparative study in comparable operating conditions of the folded nozzle with different design features, in particular, with an additionally deepened central nozzle in the folded nozzle and a protruding central nozzle; with operation of one cylindrical nozzle, four nozzles of identical section and an annular slot nozzle. It is established that the jet flowing from the folded nozzle differs in the possibility of more active interaction with the liquid bath than one cylindrical nozzle and four nozzles of equivalent plane. The depth of penetration of the jet into the bath liquid, the parameters of the formed hole of the jet penetration, the oscillations of the bath were studied. It is established that the peculiarities of crater formation in the liquid, characteristic when using a folded nozzle, are due to the use of a slotted annular part of the nozzle. The wider crater is due to the use of a slotted annular part of the nozzle. It is shown that the structural variants of the folded nozzle with a recessed or protruding central nozzle do not increase either the depth or the width of the formed crater. It is also established that the peculiarities of crater formation in the liquid when using a folded nozzle are due to the use of a slotted annular part of the nozzle. To form the best purge conditions, the slice of the slotted annular part should be flush with the slice of the central nozzle. With this design, the jet pulse is maintained for a longer period compared to the use of only one central nozzle, probably due to the protection of the central jet, and due to its deep penetration properties.

Keywords: oxygen conversion, physical modeling, upper purge, folded nozzle, gas jet, single-phase liquid

For citation: *Semykin S.I., Holub T.S. Porivnyal'ne doslidzhennya na fizychniy modeli osoblyvostey verkhnyoyi produvky cherez nakonechnykh zi skladyenyim soplom pry produvanni odnofaznoyi ridyny. [Comparative study on the physical model of the features of the upper purge through the tip with a folded nozzle when blowing a single-phase liquid.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy chornoj metallurgii».[Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy] 2020, 34. 117-128. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-117-128*

*Стаття надійшла до редакції збірника 29.10.2020 року,
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування.
(Протокол засідання редакційної колегії №3 від 22 грудня 2020 р.)*

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2020. – Випуск 34
«Fundamental'nye i prikladnye problemy chornoj metallurgii». – 2020. – Випуск 34
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34*