

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.184.244

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300057

© Юшкевич П.О.*

**АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ РЕАКЦІЙНОЇ ЗОНИ ВЗАЄМОДІЇ У РОЗПЛАВІ
КОНВЕРТЕРУ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ РІВНЯНЬ З ВИЗНАЧЕННЯ
ГЛИБИНИ ЇЇ ПРОНИКНЕННЯ**

Важливим аспектом у ході експлуатації конвертерів за технологією верхньої продувки є можливість впливу високотемпературної реакційної зони взаємодії на поверхню футерівки конвертеру. За умови утворення нераціональної глибини проникнення реакційної зони взаємодії, відбувається суттєва інтенсифікація зносу футерівки днища конвертера. Подібне призводить до передчасного її виходу з ладу або може викликати явище прогару днища футерівки та сталевого кожуху конвертеру з непередбачуваним зливом розплаву. Наведене є небезпечною аварійною ситуацією для умов металургійного виробництва. Одним з шляхів уникнення такого явища є передчасна прогнозна оцінка особливостей утворення реакційної зони взаємодії та глибини її проникнення у шари об'єму розплаву металу. Співставлення її розмірів з відповідними розмірами робочого простору конвертерної ванни. На сьогодні існує багато свідчень та рівнянь, що стосуються реакційної зони взаємодії для різних способів та режимів продувки конвертерної ванни. Однак потрібне сучасне представлення основних типів геометричного утворення реакційної зони взаємодії у кисневому конвертері за умови продувки через верхню фурму, незалежно від конструкції багатосоплового наконечника та режиму продувки. Відповідно до мети та завдань роботи за особливостями геометричного формування запропоновано три основні характерні типи утворення реакційної зони взаємодії у кисневому конвертері за умови продувки через верхню фурму з багатосопловим наконечником різної конструкції та режимом продувки: роздільне утворення окремих незалежних реакційних зон взаємодії певних геометричних розмірів, кількість яких дорівнює кількості кисневих струменів, що безпосередньо діють на поверхню розплаву та проникають у глиб його шарів; згруповане утворення декількох об'єднаних незалежних реакційних зон взаємодії, що утворюються за рахунок об'єднання разом двох та більше одиночних реакційних зон, створених незалежними кисневими струменями; об'єднане утворення однієї суцільної реакційної зони взаємодії за рахунок злиття зовнішніх контурів усіх одиночних реакційних зон взаємодії, що сформовані незалежними кисневими струменями у єдину об'єднану реакційну зону взаємодії. Окрім цього сформовано добірки рівнянь для визначення $L_{гзв}$ – глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у розплав металу, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертеру. Розділення рівнянь на добірки виконано відповідно до типу фізичного моделювання, що було виконано для їх отримання. Перша добірка рівнянь, що були отримані на підставі обробки результатів експериментів низькотемпературного фізичного моделювання, складається з 13 рівнянь. Друга добірка рівнянь, котрі отримані за рахунок обробки результатів експериментів з високотемпературного фізичного моделювання, складається з 7 рівнянь.

Ключові слова: конвертер, верхня фурма, верхня продувка, продувка розплаву, фізичне моделювання, реакційна зона взаємодії, глибина проникнення, рівняння.

* канд. техн. наук., ст. наук. співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-2675-0737, isi.dps.r@gmail.com

P.O. Yushkevych. Analysis of the formation of the reactionary zone of interaction into the melt in converter aggregate and systematization of equations to determine the depth of its penetration. An important aspect in the operation of converters aggregates with top blowing technology is the influence high-temperature reactionary area of interaction on the thermal bricks in the converter aggregate. Provided the formation of irrational depth of penetration of the reactionary zone of interaction, there is a significant intensification of the wear of the thermal bricks on the bottom of the converter. One way to avoid such a phenomenon is a premature prognosis of the peculiarities of the formation of the reactionary zone of interaction and the depth of its penetration into the layers of the volume of metal melt. Today, there are much information about reactionary zone of interaction and equations for calculate it depth of penetration for different methods top and combine blowing technology in the converter. However, to date we need modern representation of the main types of geometric formation of the reactionary zone of interaction in the oxygen converter with top blowing from tuyere. Regardless of the design the multi-nozzles tip and the blowing modes. According to the purpose and tasks of the work, was offered three main types of the geometric formation of the reaction zone of interaction, in the oxygen converter with top blowing technology, regardless of the design of the multi-nozzles tip and the blowing mode: the separate formation of independent reactionary zones of interaction of certain geometric dimensions, the quantity of which is equal to the quantity of oxygen jets that directly act on the surface of the melt and penetrate its layers; the grouped formation of several united independent reactionary zone of interaction formed by the combination of two or more single reactionary zones created by independent oxygen jets; the united formation of one continuous reactionary zone of interaction due to the fusion of the external contours of all single reactionary areas of interaction, formed by independent oxygen jets. Into the single united reactionary zone of the interaction. In addition, was formed collection of equations to determine L_{rzv} – the depth of penetration of the reactionary zone of interaction of gas (oxygenes) jets into the melt of metal located in the working space of the converter bath. The separation of equations into collections was made according to the type of physical modeling what was used to obtain them. The first selection of equations obtained on the basis of processing the results of experiments with low temperature physical modeling consists of 13 equations. The second selection includes of equations obtained by processing the results with high temperature physical modeling experiments and consists of 7 equations.

Key words: converter, top tuyere, top blowing, blowing of melt, physical modeling, reactionary zone of interaction, the depth of penetration, equations.

Постановка проблеми. Киснево-конвертерний переділ є одним з головних промислових способів виробництва сталі як в Україні, так і світі [1-28]. В Україні у киснево-конвертерному виробництві переважно використовується технологія верхньої продувки конвертерної ванни, що передбачає продувку розплаву через одноярусну багатосоплову фурму надзвуковими кисневими струменями [2-5, 4, 28]. Верхня продувка з використанням багатосоплової фурми ґрунтується на утворенні кожним струменем газу (кисню), що витікає з сопла наконечника фурми, високотемпературної реакційної зони взаємодії [2-27]. Реакційна зона взаємодії формується у результаті проникнення та заглиблення газового (кисневого) струменя у шари розплаву, котрі знаходяться у робочому просторі ванни конвертера [2-5, 12, 14, 20, 28, 4]. У просторі та об'ємі реакційної зони взаємодії розвиваються основні гідрогазодинамічні, тепломасообмінні та екзотермічні процеси [2-17]. Переважне окислення (Si) – кремнію, (Mn) – марганцю, (C) – вуглецю, (Fe) – заліза також відбувається у межах реакційної зони взаємодії [2-21]. У реакційній зоні взаємодії локально досягається найвища температура під час продувки та конвертування розплаву [2-21]. Від неї відбувається інтенсифікація та розповсюдження усіх вище перелічених процесів та забезпечується передання тепла до периферійних та глибинних шарів розплаву у робочому просторі ванни конвертеру [2-21], завдяки чому досягається необхідні склад за вмістом хімічних елементів та температура в усьому об'ємі розплаву, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертеру.

Важливим аспектом у ході експлуатації конвертерів за технологією верхньої продувки є можливість впливу високотемпературної реакційної зони взаємодії на поверхню футерівки конвертеру. За умови утворення нераціональної глибини проникнення реакційної зони взаємодії, відбувається суттєва інтенсифікація зносу футерівки днища конвертеру. Подібне призводить до передчасного її виходу з ладу або може викликати явище прогару днища футерівки та сталевого кожуху конвертеру з непередбачуваним зливом розплаву. Наведене є небезпечною аварійною ситуацією для умов металургійного виробництва.

Одним з шляхів уникнення такого явища є передчасна прогнозна оцінка особливостей геометричного формування реакційної зони взаємодії та глибини її проникнення у об'єми розплаву металу та співставлення її з відповідними розмірами робочого простору конвертерної ванни. На сьогодні існує багато інформації з питання утворення реакційної зони взаємодії за різних конструкцій верхніх фурм, конвертерів та способів, режимів продувки конвертерної ванни, але потрібно виділити основні типи її утворення. Окрім цього запропоновано багато рівнянь для розрахунку глибини проникнення реакційної зони взаємодії у розплав металу конвертеру. Однак відсутня систематизація та зведення цих рівнянь. Наявність такої сучасної інформації буде сприяти розвитку цього напрямку досліджень. Зведення та систематизація рівнянь поліпшить доступ до них для розробки відповідних методик

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За рахунок аналітичного узагальнення наукової інформації [1-28] встановлено, що одним з головних геометричних розмірів для реакційної зони взаємодії є L_{tzv} – глибина проникнення газового (кисневого) струменя, що витікає з сопла накопичника верхньої фурми до розплаву металу, котрий знаходиться у робочому просторі ванни конвертеру [2-19].

Від цього геометричного параметра у певній мірі залежить стабільність, ресурсо- та енергоефективність режиму продувки та глибина, до якої досягається найбільший нагрів залучених у цей процес шарів розплаву металу, температура яких може досягати кількох тисяч °С, що підтверджується у роботах [1-26].

Перші дослідження зі встановлення L_{tzv} проводились з використанням низькотемпературного фізичного моделювання, а вже з розвитком цього напрямку перейшли до високотемпературного фізичного моделювання. Вперше визначення глибини проникнення газового струменя в рідину було проведено І.Г. Казанцевим. У подальшому це питання у киснево-конвертерному виробництві опрацьовувалось рядом інших вчених-дослідників [2-6, 10, 12, 17, 18 20 22 25 26 27].

За даними проаналізованих матеріалів [1-27] для дослідження L_{tzv} взагалі переважно використовувалось низькотемпературне фізичне моделювання. Така тенденція зберігалася навіть із появою та розвитком у цьому напрямку високотемпературного фізичного моделювання. Пояснюється це тим, що проведення низькотемпературного фізичного моделювання набагато простіше у підготовці і реалізації. Відповідно до свідчень робіт [4, 11, 14, 17, 25, 27] для нього застосовували повітря у якості продувочного газу, що діяв на моделююче середовище (рідини звичайної й високої густини). Температура середовища здебільшого відповідала нормальним умовам, тобто від 20 до 30°C.

Високотемпературне фізичне моделювання набагато складніше за низькотемпературне для вивчення та дослідження L_{tzv} . Нажаль за ним представлено меншу кількість робіт з розглянутих [1-28]. Треба відзначити, що за високотемпературним фізичним моделюванням можливо досягти максимальної відповідності усіх умов до реального промислового процесу продувки розплаву у конвертерній ванні. Для цього переважно потрібно [2-27]:

1. Застосовувати масштабовані аналоги моделей, зроблених з промислових конвертерів та верхніх фурм із пропорційним збереженням усіх їх основних розмірів;
2. У якості середовища для моделювання використовувати розплави металу і шлаку з температурою до 1600°C;
3. Дотримуватись відповідності за складом хімічних елементів у всіх фазах розплаву, що використовується для моделювання, до промислових умов;
4. Для продувки використовувати технічно чистий кисень або інший передбачений промисловим технологічним режимом газ із дотриманням умов необхідного тиску, питомої інтенсивності продувки та загальної витрати.

З аналізу робіт [1-27] визначено, що для встановлення L_{rzv} – глибини проникнення реакційної зони взаємодії газового (кисневого) струменя у розплав, котрий знаходиться у робочому просторі ванни конвертера, у цих наукових літературних джерелах запропоновано велику кількість рівнянь. Треба відзначити, що переважна більшість рівнянь, наведених у цих роботах для розрахунку L_{rzv} , отримана за результатами обробки низькотемпературного фізичного моделювання, менша кількість рівнянь – на підставі результатів обробки високотемпературного фізичного моделювання.

Мета статті. Надати сучасне представлення основних типів геометричного формування реакційної зони взаємодії кисневих струменів з розплавом у кисневому конвертері. Створити систематизовані добірки рівнянь для визначення глибини проникнення цієї реакційної зони взаємодії до розплаву металу за способом фізичного моделювання, виконаного для їх отримання.

Постановка задач:

1. Провести аналітичне узагальнення наукової інформації з напрямку досліджень з утворення реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у об'ємі розплаву, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертера.

2. Охарактеризувати основні особливості типів геометричного формування реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів з розплавом у кисневому конвертері.

3. Систематизувати знайдені рівняння для визначення та розрахунку глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у об'ємі розплаву металу, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертера, відповідно до способу фізичного моделювання, що був використаний для їх отримання.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до наукових робіт [1-28] для продувки конвертерної ванни, навіть за традиційним LD-процесом, зазвичай на кожному виробництві застосовують свої конструкції багатосоплових верхніх фурм та дуттьові режими для їх роботи. Переважно ці фурми конструктивно відрізняються конфігурацією та будовою багатосоплового наконечника. Наконечник верхньої фурми головним чином відрізняється один від одного [28]: різною кількістю сопел; типом сопел; геометричними розмірами сопел та їх співвідношенням; кутом нахилу сопел до вертикальної осі фурми; взаємним розташуванням та групуванням сопел. За типом у наконечнику багатосоплової верхньої фурми можуть бути використані тільки надзвуківі (Лавалю), звукові (циліндричні, щілинні та ін.) та поєднання різних типів сопел.

Не зважаючи на велику кількість вище переліченого різноманіття конструктивних параметрів наконечника фурми та з урахування ще і варіацій можливих режимів роботи багатосоплової верхньої фурми, у будь-якому разі кожен газовий (кисневий) струмінь, що спрямований з сопла багатосоплового наконечника верхньої фурми та досягає поверхні розплаву, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертера, діє на неї та викликає певний вплив. Цей вплив виражається у формуванні заглиблених ділянок у поверхню розплаву, що мають вхідну форму кратероподібних утворень, котрі характеризуються певними геометричними параметрами проникнення у шари об'єму розплаву. Основними параметрами формування реакційної зони взаємодії з розплавом є діаметр – D_{rzv} та глибина проникнення у розплав металу – L_{rzv} , це підтверджується і у роботах [2-6, 10, 12, 17, 18 20 22 25 26 27].

Відповідно до проведених наукових досліджень, досвіду високотемпературного моделювання та аналізу свідчень робіт [1-28] запропоновано, для сучасного представлення за типом геометричного формування, всього три основні характери утворення реакційної зони взаємодії (рис. 1) у кисневому конвертері за продувки через верхню фурму, навіть за різної конструкції багатосоплового наконечника та варіантів режиму продувки та роботи кисневого конвертера:

1. Роздільне утворення окремих незалежних реакційних зон взаємодії певних геометричних розмірів, кількість яких дорівнює кількості кисневих струменів, що безпосередньо діють на поверхню розплаву та проникають у глиб його шарів;

2. Згруповане утворення декількох об'єднаних незалежних реакційних зон взаємодії, що утворюються за рахунок об'єднання разом двох та більше одиночних реакційних зон, створених незалежними кисневими струменями;

3. Об'єднане утворення однієї суцільної реакційної зони взаємодії за рахунок злиття зовнішніх контурів усіх одиночних реакційних зон взаємодії, що сформовані незалежними кисневими струменями у єдину об'єднану реакційну зону взаємодії.

У третьому випадку, з утворенням єдиної об'єднаної реакційної зони взаємодії, загальний діаметр такої зони взаємодії – D_{rzv} враховується за зовнішньою межею спільного контуру цієї єдиної об'єднаної реакційної зони взаємодії. Більш детально про особливості формування D_{rzv} буде наведено у наступних роботах. Не зважаючи на три наведені різні типи особливостей утворення, формування та конфігурації реакційної зони взаємодії, у кожному з них одним з головних геометричних параметрів є глибина проникнення – L_{rzv} реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у розплав металу. Зазвичай у багатосоплової фурми передбачене рівномірне розподілення газу (кисню) між кожним соплом наконечника, що відносяться до одного типу. Окрім цього, найбільше проникнення у шари розплаву забезпечується надзвуковими кисневими струменями, що витікають із сопел типу Лавалю наконечнику багатосоплової фурми. У зв'язку з рівномірним розподіленням дуття та за однакового типу сопел, їх геометричних розмірів та конфігурації у наконечнику, глибина проникнення реакційної зони взаємодії – L_{rzv} може розглядатися приблизно відповідною як у випадку дії одного кисневого струменя, так і декількох однакових струменів. Вищенаведене потрібно враховувати у випадку використання рівнянь розрахунку глибини проникнення – L_{rzv} реакційної зони взаємодії, наведених у таблиці 1 та таблиці 2, що отримані на підставі аналізу наукових літературних джерел, у тому числі і [2-27].

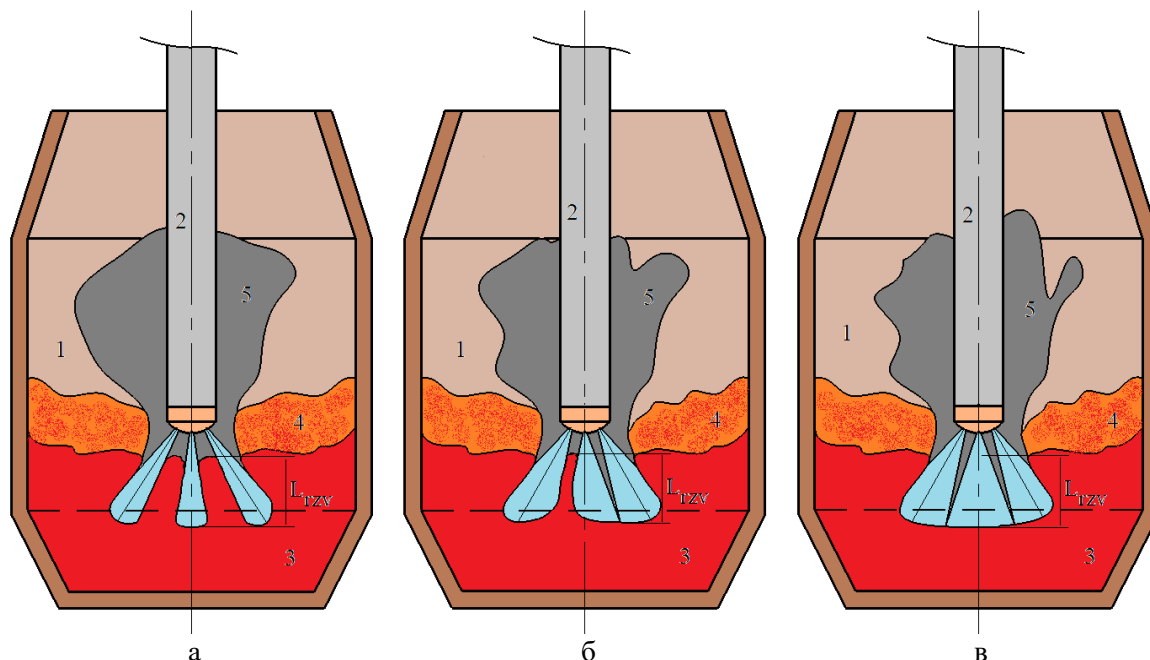


Рис. 1 – Схематичне зображення геометричного формування роздільної (а), згрупованої (б), об'єднаної (в) реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у розплав металу, котрий знаходиться у робочому просторі ванни конвертеру: 1 – конвертер; 2 – верхня фурма; 3 – розплав металу; 4 – розплав шлаку; 5 – вихідні газу

Представлені у роботі рівняння для визначення глибини проникнення – L_{rzv} реакційної зони взаємодії, що були знайдені під час обробки та аналізу результатів досліджень наукових літературних джерел [1-27], розділені на дві добірки відповідно до способу фізичного моделювання, що використовувалось для їх отримання. Таким чином у таблиці 1 наведено добірку рівнянь для визначення глибини проникнення L_{rzv} , котрі були отримані за рахунок обробки даних експериментів з низькотемпературного фізичного моделювання. У таблиці 2 – добірка рівнянь для визначення L_{rzv} , що отримані за рахунок обробки результатів високотемпературного фізичного моделювання. Наведені рівняння у таблиці 1 та таблиці 2 мають наступні основні умовні позначення: L_{rzv} – глибина проникнення газового (кисневого) струменя, що витікає з сопла наконечника верхньої фурми до розплаву, м; Ar – величина критерію Архімеда для критичного діаметра сопла (визначається за величиною імпульсу струменя); d_{vh} , d_{kr} , d – вихідний, критичний

та номінальний діаметр сопла Лавалю, m ; h_f, h_f^{rob} – висота та робоча висота фурми під час продувки розплаву, m ; β – стала, що характеризує процес інтенсивності змішування струміння з оточуючим середовищем вище та нижче рівня ванни; L_{rzv}^{max} – максимально можлива глибина проникнення струміння до розплаву, m ; i – імпульс одиночного кисневого струменю, $kg \cdot m / s^2$; ρ_r, ρ_m – щільність рідини, що використовувалась під час моделювання та щільність металу, kg/m^3 .

З аналізу рівнянь, наведених у таблиці 1 та таблиці 2, встановлено, що визначення глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових струменів у розплав металу L_{rzv} тісно пов'язано з показниками діаметрів сопла d_{vyh}, d_{kr}, d , i – імпульсом одиночного кисневого струменю та показником висоти розташування фурми у ході продувки h_f , що може змінюватися від початкової висоти розташування h_f^{poch} до робочої h_f^{rob} залежно від проведення технологічних операцій.

Таблиця 1

Добірка рівнянь, встановлених з обробки результатів фізичного низькотемпературного моделювання. Рівняння для визначення глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових струменів у розплав металу

| № п/ф | Формули |
|-------|---|
| I | II |
| 1 | $L_{rzv} (h_f + L_{rzv})^2 = \frac{2 \cdot m \cdot k}{\pi \cdot \rho_r} \cdot \frac{1,79 \cdot Q}{n} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{kr}}{Q}\right)^{0,286}}$ |
| 2 | $L_{rzv} = 40 \cdot \frac{P^{0,5} \cdot d^{0,6}}{\rho_r^{0,4} \left(1 + \frac{1}{40} \cdot \frac{h_f}{d}\right)}$ |
| 3 | $L_{rzv} = Ar^{1/2} \cdot d \cdot \left(\frac{\beta \cdot d_0}{h_f}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{T_s}{T_0}\right)^{0,30} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_0}\right)^{0,25}$ |
| 4 | $L_{rzv} = 1,87 \cdot (Ar)^{0,36} \cdot (w / w_{kr})^{0,28} \cdot d$ |
| 5 | $L_{rzv} = 1,87 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_r \cdot g}\right)^{0,36} \cdot \frac{1}{0,28} \cdot w \cdot d^{0,64}$ |
| 6 | $L_{rzv} = 1,32 \cdot d \cdot Ar^{0,36} \cdot \left(1,715 - 1,353 \cdot \frac{P_0}{P_1}\right)^{0,26}$ |
| 7 | $L_{rzv} = 3,5 \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g}\right)^{1/3} \cdot e \cdot \left[-0,21 \cdot h_f \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g}\right)^{-1/3}\right]$ |
| 8 | $L_{rzv} = \frac{d_x}{2} \cdot Ar_x, \text{ коли } Ar_x < 0,43; L_{rzv} = \frac{d_x}{2,86} \cdot Ar_x^{0,6}, \text{ коли } Ar_x > 0,43$ |
| 9 | $L_{rzv} (L_{rzv} + h_f)^2 = 26,1 \cdot \frac{i}{\rho_r \cdot g}$ |
| 10 | $L_{rzv} = 4,3 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{Q}{d}\right)^{2/3} \cdot e \cdot \left(-\frac{1,77 \cdot h_f}{4,3 \cdot 10^{-2} \cdot (Q \cdot d^{-1})^{2/3}}\right)$ |
| 11 | $\frac{L_{rzv}}{h_f} = 4,8 \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g \cdot h_f^3}\right)^{0,6}$ |
| 12 | $L_{rzv} = 0,81 \cdot d \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g \cdot d^3}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h_f}{d}\right)^{-0,18}, \text{ коли } \frac{h_f}{d} < 30$ |
| 13 | $L_{rzv} = 2,7 \cdot d \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g \cdot d^3}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h_f}{d}\right)^{-0,54}, \text{ коли } \frac{h_f}{d} > 30$ |

Таблиця 2

Добірка рівнянь, встановлених з обробки результатів фізичного високотемпературного моделювання. Рівняння для визначення глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових струменів у розплав металу

| № п/ф | Формули |
|-------|--|
| I | II |
| 1 | $L_{rzv} = 15 \cdot (q_1^{O_2})^{0,4}$; |
| 2 | $L_{rzv} \left[L_{rzv} + (h_f^{rob} - l_{st}) \right]^2 = 48,85 \cdot \left(\frac{i^1}{\rho_r \cdot g} \right)$ |
| 3 | $L_{rzv}^{max} \left[L_{rzv}^{max} + (h_f^{rob} - l_{st}) \right]^2 = 83 \cdot (i^1 / \rho_r \cdot g)$ |
| 4 | $L_{rzv} = 0,8 \cdot H_v$ |
| 5 | $L_{rzv} = 0,99 \cdot (i)^{0,43}$, коли $h_{rob}^f = 0$ |
| 6 | $L_{rzv} = Ar^{0,5} \cdot d_{kr} \cdot \left(\frac{\beta \cdot d_{kr}}{h_f^{rob}} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{T_{otoch}}{T_{vyh}} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_0} \right)^{0,25}$ |
| 7 | $L_{rzv} = 34,2 \cdot (P \cdot d_{kr}) / \sqrt{h_f^{rob}} + 3,81$ |

Наведені рівняння у таблиці 1 та таблиці 2 можуть рівноцінно використовуватись для визначення L_{rzv} – глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у розплав металу, що знаходиться у робочому просторі ванни кисневого конвертера. Однак обрання певного рівняння з наведених для розрахунку L_{rzv} необхідно виконувати у відповідності до вихідних технологічних умов, для яких розглядається рівняння. Обране рівняння повинно максимально відповідати умовам, що дотримувались для його одержання, до вихідних технологічних умов, для яких воно розглядається. Загалом треба відзначити, що потрібно проведення подальших розрахункових та аналітичних досліджень у цьому напрямку для встановлення відповідності та доцільності наведених у таблиці 1 та таблиці 2 рівнянь до сучасних технологічних умов роботи кисневих конвертерів металургійних підприємств України.

Висновки

В Україні у киснево-конвертерному виробництві переважно використовується технологія верхньої продувки конвертерної ванни. Важливим явищем під час верхньої продувки конвертерної ванни є утворення реакційної зони взаємодії. Реакційна зона взаємодії формується у результаті проникнення та заглиблення газового (кисневого) струменя у шари розплаву, котрі знаходяться у робочому просторі ванни конвертера. У просторі та об'ємі реакційної зони взаємодії розвиваються основні гідрогазодинамічні, тепломасообмінні, екзотермічні процеси та досягається найвища температура розплаву.

Для сучасного представлення за особливостями геометричного формування у роботі запропоновано три основні характерні типи утворення реакційної зони взаємодії у кисневому конвертері за умови продувки через верхню фурму з багатосопловим наконечником різної конструкції та режимом продувки:

1. Роздільне утворення окремих незалежних реакційних зон взаємодії певних геометричних розмірів, кількість яких дорівнює кількості кисневих струменів, що безпосередньо діють на поверхню розплаву та проникають у глиб його шарів;

2. Згруповане утворення декількох об'єднаних незалежних реакційних зон взаємодії, що утворюються за рахунок об'єднання разом двох та більше одиночних реакційних зон, створених незалежними кисневими струменями;

3. Об'єднане утворення однієї суцільної реакційної зони взаємодії за рахунок злиття зовнішніх контурів усіх одиночних реакційних зон взаємодії, що сформовані незалежними кисневими струменями у єдину об'єднану реакційну зону взаємодії.

Незалежно від типу геометричного формування одним з головних параметрів є глибина проникнення L_{rzv} реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у шари розплаву металу. Представлені у роботі рівняння, для визначення глибини проникнення L_{rzv} реакційної зони взаємодії, проаналізовані та розділені на дві добірки відповідно до способу фізичного моделювання, що використовували для їх отримання. Потрібно проведення подальших розрахункових та аналітичних досліджень у цьому напрямку для встановлення відповідності та доцільності наведених у добірках рівнянь до сучасних технологічних умов роботи кисневих конвертерів металургійних підприємств України.

Перелік використаних джерел:

1. A physical modelling study to determine the influence of slag on the fluid flow in the AOD converter process / P. Ternstedt, P. Ni, N. Lundqvist, A. Tilliander, P.G. Jönsson. *Ironmaking and Steelmaking*. 2018. Vol. 45. № 10. Pp. 944-950. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1415012>.
2. Physical modeling of mass transfer between slag and metal in combined blown converter and application / X.-J. Yang, Q.-L. Zhou, Q. Zhang, J.-Y. Sun, L.-C. Zhong, Q. Li. *Iron and Steel*. 2022. Vol. 57. № 12. Pp. 57-65. DOI: <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288>.
3. Physical modelling of the effect of slag and top-blowing on mixing in the AOD process / T. Haas, V.-V. Visuri, A. Kärnä, E. Isohookana, P. Sulasalmi, R. Hürman Eric, H. Pfeifer, T. Fabritius. *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016, Seattle, 22-25 May 2016*. Seattle, 2016. Pp. 999-1008. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_106.
4. Сталеплавильне виробництво: Навч. посібник / В.І. Баптизмаський та ін. Київ : ІЗМН, 1996. 400 с.
5. Physical simulation analysis of a 300 t duplex combined blown dephosphorization converter / C.-L. Zhao, C.-Y. Wang, Y.-H. Sun, Z. Wang, H.-J. Shen. *Journal of Iron and Steel Research*. 2015. Vol. 27. № 12. Pp. 42-47. DOI: <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20140412>.
6. Numerical and physical simulations of a combined top-bottom-side blown converter / Zhou X., Ersson M., Zhong L., Jönsson P.G. *Steel Research International*. 2015. Vol. 86. № 11. Pp. 1328-1338. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201400376>.
7. Kovář L. Main design characteristics of lances for steelmaking furnaces. *METAL 2017: 26th International Conference on Metallurgy and Materials: conference proceedings, Brno, 24-26 May 2017*. Vol. 2017-January. Pp. 176-181.
8. Zhu M., Lou W., Wang W. Research Progress of Numerical Simulation in Steelmaking and Continuous Casting Processes. *Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica*. 2018. Vol. 54. № 2. Pp. 131-150. DOI: <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2017.00430>.
9. Physical simulation of converter steelmaking with powder injection / Tang B., Wang X., Zou Z., Yu A. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2016. Vol. 55. № 1. Pp. 124-130. DOI: <https://doi.org/10.1080/00084433.2015.1122275>.
10. Physical simulation of bottom powder injection in combined blown converter / Tang B., He Y.-B., Zou Z.-S., Yu A.-B. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*. 2014. Vol. 35. № 2. Pp. 236-240. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3026.2014.02.019>.
11. Research on the flow properties and erosion characteristics in combined blown converter at steelmaking temperature / Hu S., Zhu R., Liu R., Dong K. *International Symposium on CFD Modeling and Simulation in Materials Processing: conference proceedings, Phoenix, 11-15 March 2018*. Phoenix, 2018. Pp. 159-171. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72059-3_16.
12. Physical modeling of mass transfer between slag and metal in combined blown converter and application / Zhao H., Wang J., Liu F., Sohn H.Y. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022. Vol. 29. № 1. Pp. 70-77. DOI: <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288>.
13. Fault diagnosis of small sample of oxygen top-blowing converter based on PGAT model / J. Cao, Z.-Y. Chen, J.-H. Wang, D.-N. Jiang, Y.-J. Li. *Kongzhi yu Juece/Control and Decision*. 2023. Vol. 38. № 10. Pp. 2943-2952.
14. Cheslak F.R., Nickolls J.A., Sichel M. Cavities formed on liquid surface by impinging gaseous jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 1969. Vol. 36. № 5. Pp. 55-63. DOI:

<https://doi.org/10.1017/S0022112069001509>.

15. Singha P., Shukla A.K. Dynamic basic oxygen steelmaking process and its industry validation. *JOM*. 2023. Vol. 75. № 9. Pp. 3890-3899. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-023-06003-1>.
16. Ishikawa H., Mizaguchi S., Segawa K. Studying on a model of O₂ of jet and emissions in the LD-converter. *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*. 1972. № 1. Pp. 76-84.
17. Modelling the process of oxidising impurities in a metal bath using coherent nozzles / Golub T., Molchanov L., Semykin S., Koveria A. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2023. Vol. 29. № 2. Pp. 63-66. DOI: <https://doi.org/10.36547/ams.29.2.1733>.
18. Shimada M. The reactionary surface area of the partition during converter oxidation. *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*. 1971. № 12. Pp. 1764-1773.
19. Numerical study on interfacial structure and mixing characteristics in converter based on CLSVOF method / F. Qi, S. Zhou, L. Zhang, Z. Liu, Sh.C.P. Cheung, B. Li. *Metals*. 2023. Vol.13. № 5. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050880>.
20. Shimada M., Isibasi M., Ariessi T. About the features of the supersonic jet of oxygen in the LD-converter. *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*. 1966. № 9. Pp. 1499-1501.
21. Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter / G. Yang, B. Li, M. Sun, D. Qin, L. Zhong. *Metals*. 2023. Vol.13. № 5. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050940>.
22. Oxygen supply system based on oxygen lance nozzle wear in converter / M. Lü, S. Chen, Y. Hao, H. Guo, D. Li, Z. Zhang. *Kang T'ieh/Iron and Steel*. 2023. Vol. 58. № 8. Pp. 99-109. DOI: <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20230084>.
23. Development and application of converter COMI-B technology: a new way of CO₂ utilization / Feng C., Dong J., Zhu R., Yang H. *Metals*. 2023. Vol. 13. № 5. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050926>.
24. Numerical investigation of the enhanced stirring characteristics of a multi-lance top-blowing continuous converting furnace for lance arrangement and variable-velocity blowing / W. Li, Sh. Wang, J. Xu, J. Hu, H. Wang, Y. Zhai, Q. Xiao, G. Deng, D. Li. *Energies*. 2023. Vol. 16. № 5. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052412>.
25. Golub T.S., Molchanov L.S., Semykin S. Studying the possibility of using coherent type nozzles for bof blowing at the gas dynamic simulation stand. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. № 4. Pp. 79-92. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>.
26. Jet penetration and bath circulation in the basic oxygen furnace / Flinn R.A., Pehlke R.D., Glass D.R., Hays P.O. *Transactions Metallurg. Soc. AIME*. 1967. Vol. 239. № 11. Pp. 1776-1791.
27. Dong P.-Y., Zheng S.-G., Zhu M.-Y. Simulation and application of post-combustion oxygen lance in a top-blown converter. *Ironmaking and Steelmaking*. 2023. Vol. 50. № 1. Pp. 55-66. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2083928>.
28. Yushkevich P. Comparison of calculatings methods of the main parameters for single-tier tuyeres. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. Ternopil : TNTU, 2020. Vol. 99. № 3. Pp. 112-123. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.03.

References:

1. P. Ternstedt, P. Ni, N. Lundqvist, A. Tilliander, and P.G. Jönsson, «A physical modelling study to determine the influence of slag on the fluid flow in the AOD converter process», *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 45, № 10, pp. 944-950, 2018. doi: [10.1080/03019233.2017.1415012](https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1415012).
2. X.-J. Yang, Q.-L. Zhou, Q. Zhang, J.-Y. Sun, L.-C. Zhong, and Q. Li, «Physical modeling of mass transfer between slag and metal in combined blown converter and application», *Iron and Steel*, vol. 57, № 12, pp. 57-65, 2022. doi: [10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288](https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288).
3. T. Haas, V.-V. Visuri, A. Kärnä, E. Isohookana, P. Sulasalmi, R. Hürman Eriç, H. Pfeifer, and T. Fabritius, «Physical modelling of the effect of slag and top-blowing on mixing in the AOD process», in Proceedings of the 10th International Conference Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts, Seattle, 2016, pp. 999-1008. doi: [10.1007/978-3-319-48769-4_106](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_106).
4. V.I. Baptyzmanskyi et al., *Staleplavylne vyrobnytstvo: Navch. posibnyk* [Steelmaking: Study guide].

- Kyiv, Ukraine: IZMN Publ., 1996. (Ukr.)
5. C.-L. Zhao, C.-Y. Wang, Y.-H. Sun, Z. Wang, and H.-J. Shen, «Physical simulation analysis of a 300 t duplex combined blown dephosphorization converter», *Journal of Iron and Steel Research*, vol. 27, № 12, pp. 42-47, 2015. doi: **10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20140412**.
 6. X. Zhou, M. Ersson, L. Zhong, and P.G. Jönsson, «Numerical and physical simulations of a combined top-bottom-side blown converter», *Steel Research International*, vol. 86, № 11, pp. 1328-1338, 2015. doi: **10.1002/srin.201400376**.
 7. L. Kovář, «Main design characteristics of lances for steelmaking furnaces», in Proceedings 26th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2017, Brno, 2017, vol. 2017-January, pp. 176-181.
 8. M. Zhu, W. Lou, and W. Wang, «Research progress of numerical simulation in steelmaking and continuous casting processes», *Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica*, vol. 54, № 2, pp. 131-150, 2018. doi: **10.11900/0412.1961.2017.00430**.
 9. B. Tang, X. Wang, Z. Zou, and A. Yu, «Physical simulation of converter steelmaking with powder injection», *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 55, № 1, pp. 124-130, 2016. doi: **10.1080/00084433.2015.1122275**.
 10. B. Tang, Y.-B. He, Z.-S. Zou, and A.-B. Yu, «Physical simulation of bottom powder injection in combined blown converter», *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, vol. 35, № 2, pp. 236-240, 2014. doi: **10.3969/j.issn.1005-3026.2014.02.019**.
 11. S. Hu, R. Zhu, R. Liu, and K. Dong, «Research on the flow properties and erosion characteristics in combined blown converter at steelmaking temperature», in Proceedings International Symposium on CFD Modeling and Simulation in Materials Processing, Phoenix, 2018, pp. 159-171. doi: **10.1007/978-3-319-72059-3_16**.
 12. H. Zhao, J. Wang, F. Liu, and H.Y. Sohn, «Physical modeling of mass transfer between slag and metal in combined blown converter and application», *International Journal of Minerals. Metallurgy and Materials*, vol. 29, № 1, pp. 70-77, 2022. doi: **10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288**.
 13. J. Cao, Z.-Y. Chen, J.-H. Wang, D.-N. Jiang, and Y.-J. Li, «Fault diagnosis of small sample of oxygen top-blowing converter based on PGAT model», *Kongzhi yu Juece/Control and Decision*, vol. 38, № 10, pp. 2943-2952, 2023.
 14. F.R. Cheslak, J.A. Nickolls, and M. Sichel, «Cavities formed on liquid surface by impinging gaseous jets», *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 36, № 5, pp. 55-63, 1969. doi: **10.1017/S0022112069001509**.
 15. P. Singha, and A.K. Shukla, «Dynamic basic oxygen steelmaking process and its industry validation», *JOM*, vol. 75, № 9, pp. 3890-3899, 2023. doi: **10.1007/s11837-023-06003-1**.
 16. H. Ishikawa, S. Mizaguchi, K. Segawa, «Studying on a model of O₂ of jet and emissions in the LD-converter», *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*, № 1, pp. 76-84, 1972.
 17. T. Golub, L. Molchanov, S. Semykin, and A. Koveria, «Modelling the process of oxidising impurities in a metal bath using coherent nozzles», *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 29, № 2, pp. 63-66, 2023. doi: **10.36547/ams.29.2.1733**.
 18. M. Shimada, «The reactionary surface area of the partition during converter oxidation», *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*, № 12, pp. 1764-1773, 1971.
 19. F. Qi, S. Zhou, L. Zhang, Z. Liu, Sh.C.P. Cheung, and B. Li. «Numerical study on interfacial structure and mixing characteristics in converter based on CLSVOF method», *Metals*, vol. 13, № 5, pp. 1-15, 2023. doi: **10.3390/met13050880**.
 20. M. Shimada, M. Isibasi, and T. Ariessi, «About the features of the supersonic jet of oxygen in the LD-converter», *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*, № 9, pp. 1499-1501, 1966.
 21. G. Yang, B. Li, M. Sun, D. Qin, and L. Zhong, «Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter», *Metals*, vol. 13, № 5, pp. 1-20, 2023. doi: **10.3390/met13050940**.
 22. M. Lü, S. Chen, Y. Hao, H. Guo, D. Li, and Z. Zhang, «Oxygen supply system based on oxygen lance nozzle wear in converter», *Kang T'ieh/Iron and Steel*, vol. 58, № 8, pp. 99-109, 2023. doi: **10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20230084**.
 23. C. Feng, J. Dong, R. Zhu, and H. Yang, «Development and application of converter COMI-B technology: a new way of CO₂ utilization», *Metals*, vol. 13, № 5, pp. 1-17, 2023. doi: **10.3390/met13050117**.

10.3390/met13050926.

24. W. Li, Sh. Wang, J. Xu, J. Hu, H. Wang, Y. Zhai, Q. Xiao, G. Deng, and D. Li, «Numerical investigation of the enhanced stirring characteristics of a multi-lance top-blowing continuous converting furnace for lance arrangement and variable-velocity blowing», *Energies*, vol. 16, № 5, pp. 1-17, 2023. doi: 10.3390/en16052412.
25. T.S. Golub, L.S. Molchanov, and S. Semykin. «Studying the possibility of using coherent type nozzles for bof blowing at the gas dynamic simulation stand», *Science and Innovation*, vol. 19, № 4, pp. 79-92, 2023. doi: 10.15407/scine19.04.079.
26. R.A. Flinn, R.D. Pehlke, D.R. Glass, and P.O. Hays, «Jet penetration and bath circulation in the basic oxygen furnace», *Transactions Metallurg. Soc. AIME*, vol. 239, № 11, pp. 1776-1791, 1967.
27. P.-Y. Dong, S.-G. Zheng, and M.-Y. Zhu, «Simulation and application of post-combustion oxygen lance in a top-blown converter», *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 50, № 1, pp. 55-66, 2023. doi: 10.1080/03019233.2022.2083928.
28. P. Yushkevich, «Comparison of calculating methods of the main parameters for single-tier tuyeres», *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, vol. 99, № 3, pp. 112-123, 2020. doi: 10.33108/visnyk_tntu2020.03.

Рецензент: В.Г. Кисляков
канд. техн. наук, зав. відділу, ІЧМ НАН України

Стаття надійшла 18.08.2023

Стаття прийнята 15.09.2023

УДК 669.184:519.22

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300058

© Asseel Mohammed Kadhim¹, Тарасюк Л.І.², Козловцев С.В.³,
Синельников В.О.⁴

ВПЛИВ НАГРІВУ ГАЗУ НА РОЗРАХУНКОВІ НАДЗВУКОВІ ПАРАМЕТРИ СТРУМЕНЯ ГАЗОПОРОШКУ ПРИ ПРОДУВЦІ ШЛАКУ В КОНВЕРТЕРІ. ПОВІДОМЛЕННЯ 1

У статті показано, що одним із пріоритетніших завдань у технології виробництва сталі є підвищення довговічності футеровки кисневих конвертерів. Показано, що шлакоудувка є радикальним способом підвищення довговічності футеровки кисневих конвертерів. При продувці розплаву киснем вміст MgO в шлаку становить 6-8%. Для підвищення хімічної спорідненості шлаку та футеровки пропонується продувка конвертерного шлаку азотом або газопорошковими струменями. Для досягнення оптимальної хімічної спорідненості футеровки і шлаку останній рекомендовано модифікувати з метою збільшення в ньому оксиду магнію. Показано, що спроба підвищити ефективність моделювання дуже складних процесів взаємодії надзвучових струменів з конвертерним шлаком ще не вирішена. Зроблено критичний аналіз існуючих методів розробок математичної моделі, що базується на використанні відомих газодинамічних співвідношень взаємодії вільних турбулентних струменів з розплавом. Встановлено, що в шлаковий розплав завжди потрапляють лише надзвучові струмені з характерною для них ударно-хвильовою структурою. Наведено інтегральний метод розрахунку параметрів газопорошкового потоку в надзвучовому соплі з

¹ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, leonid.47.tarasiuk@gmail.com

³ директор з виробництва, Маріупольський металургійний завод №1 ім. Ілліча, м. Запоріжжя

⁴ Ph.D., senior specialist, Łukasiewicz Research Network - Institute of Ceramics and Building Materials, Polska, ORCID: 0000-0001-8794-7798