

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 33, 2025, № 3-4 (342-343), 43-52

<https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.043>

УДК 669.184.244.66:669.184.235.001.5

Л.С. Молчанов, канд. техн. наук, ст. дослідник, зав. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі,
e-mail: metall729321@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6139-5956>

Т.С. Голуб, канд. техн. наук, ст. дослідник, ст. наук. співр. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі,
e-mail: isinasu.golubts@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>

С.О. Дудченко, канд. техн. наук, ст. наук. співр. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі,
e-mail: s.dudchenko@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7319-9896>

С.І. Семикін, канд. техн. наук, ст. наук. співр., ст. наук. співр. відділу фізико-технічних проблем металургії сталі,
e-mail: isisemykin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7365-2259>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Оцінка прямих втрат металу при продувці в конвертері засобами низькотемпературного моделювання та її верифікація

Світове виробництво сталі в кисневих конвертерах має високі показники, підтримка яких здійснюється завдяки постійним вдосконаленням процесу. Найбільш простим з позиції впровадження є вдосконалення конструкції пристрою верхньої продувки — продувної фурми, та розробка технологій їх використання. Така особливість зумовлена ключовим впливом зазначеного пристрою на процес: створення високошвидкісних кисневих струменів, що чинять перемішувачий вплив на рідку металеву ванну та забезпечують протікання хімічних процесів. Важливим у процесі є фізичне дослідження характеристик нових пристроїв та перевірка ефективності їх роботи під час продувки за умов взаємодії з рідкою ванною. Найчастіше для перевірки обирають спосіб фізичного низькотемпературного моделювання через доступність матеріалів, простоту реалізації та високу наочність. У якості моделюючих рідких середовищ використовують воду та олію для імітації металевих та шлакових розплавів, а у якості газового середовища — повітря. Важливою умовою моделювання є дотримання критеріїв геометричної подоби та подоби фізичних процесів через критерії Фруда та Вебера. Однак навіть їх застосування не дає гарантії кількісної подоби отриманих результатів реальному процесу. У зв'язку із цим важливим є накопичення інформації щодо співвідношення результатів фізичних низькотемпературного та високотемпературного способів моделювання за умов використання однакових продувних пристроїв та технологічних особливостей продувки. В статті наведено результати щодо порівнювального аналізу низько- та високотемпературного моделювання верхньої продувки рідкої ванни крізь чотирьохсоплову фурму з метою оцінювання показника прямих втрат металу (розбризування металевих фаз під дією газового струменя). Встановлено, що за низькотемпературним моделюванням рівень втрат через розбризування значно вищий, ніж при продувці реального металевих розплавів через значно нижчі показники фізичних властивостей моделюючої рідини. Також відмічено, що найбільш відповідним періодом за умов двофазного моделювання щодо реальної продувки є початок або закінчення продувки, коли спінування залежить більшою мірою від дії газового струменя через важкість забезпечення умов на низькотемпературній моделі, подібних до додаткового впливу на спінування реакції окислення вуглецю у розплаві.

Ключові слова: киснево-конвертерне виробництво сталі, продувка зверху, низькотемпературне моделювання, високотемпературне моделювання, втрати металу із розбризуванням.

Вступ. Відповідно до даних світової металургійної статистики загальне виробництво конструкційного матеріалу — сталі за 2024 рік складало 1,885 мільярда тонн, а у першому півріччі 2025 р. — 934,3 млн тонн [1, 2]. Для України в цьому році є велика вірогідність повернутися на 21 позицію серед 71 країн-виробників сталі із результатом 3,68 млн т [2]. Слід зауважити,

що найбільша частина сталі у світі виробляється шляхом киснево-конвертерного способу отримання з верхньою продувкою (на 2024 рік 70,4 %), а в Україні зазначена частка складає 49,5 % (окрім цього, 12,3 % — електродуговий переплав та 38,2 % — інші способи виробництва, серед яких найбільша частка належить процесам, які базуються на принципі регенерації теплоти відхідних газів) [1]. Такий досить

високий потенціал киснево-конвертерного способу отримання рідкої сталі з верхньою продувкою в першу чергу пов'язаний з постійними його вдосконаленнями відповідно до світових тенденцій.

Кон'юнктура світового ринку металургійної шихти є різноманітною і варіанти киснево-конвертерного процесу по співвідношенню чавун — металобрухт визначаються саме вартістю зазначених матеріалів. Їх співвідношення переважно обирається, виходячи з найменшої собівартості отриманої сталі. В зазначеній ситуації найбільш ефективним методом впливу на технологію конвертерного процесу без суттєвої модернізації високовартісного устаткування є вдосконалення конструкції верхньої кисневої фурми [3—7]. Враховуючи сучасні аспекти ринку шихтових матеріалів (тенденція на переробку підвищеної частки металобрухту), найбільш актуальною конструкцією для верхньої продувки в конвертерах є киснева фурма, яка поєднує в собі основні сопла, виконані у формі типу сопел Лавалю, та додаткові переважно циліндричної конструкції [5, 6]. Однак найбільш поширеною конструкцією, що використовується у виробництві через її простоту виготовлення, є чотириохсоплова фурма з соплами Лавалю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та постановка проблеми. В умовах верхньої продувки в кисневому конвертері при тисках дуття та робочих положеннях звичайної чотириохсоплової фурми, що застосовуються у промисловій практиці, відзначаються високі втрати металу (порядку 1,5—2,5 % від маси металевих шихти) [6—13]. Фізичні втрати безпосередньо металевого розплаву — це прямі втрати. Всі інші — опосередковані.

Опосередковані втрати — угар домішок, який складає 5—6 % від маси чавуну, який є неминучим за умов продувки кисневим потоком. Вміст заліза в металевій шихті складає близько 94,5 %, а інше — домішки, які у своїй більшості окислюються під час продувки разом з часткою заліза [10, 13].

Прямі втрати — виноси, які представляють собою «фонтан» бризок-частинок металу, що вибиваються продувним струменем під час його взаємодії з рідиною і виносяться потоком відхідних газів. Такий вид втрат посилюється при інтенсифікації продувки, підвищенні швидкості руху газів в порожнині конвертера, при зменшенні кількості шлаку, особливо в зоні взаємодії струменів з ванною [13—16]. На початку плавки, коли присутня мала кількість шлаку, і в середині продувки, коли шлак згортається, маса частинок металу, що виносяться, — максимальна, а кількість викидів — мінімальна. Зі збільшенням товщини шару рідкого спіненого шлаку, маса виносів зменшується, а викидів зростає. Відтак викиди — це ще одна складова прямих втрат. Вони представляють собою розплескування або перелив шлако-металевої емульсії через горловину конвертера, зумовлений пізнім розплавленням великого обсягу чушкового чавуну, значними присадками добавок, що містять оксиди, прокатної окалини і залізовмісних брикетів або екстремально м'якою продувкою [18—24].

На втрати металу через викиди та виноси нама-

гаються активно впливати різними методами: оптимальним розташуванням продувної фурми, контролем спінювання ванни, контролем за температурою ванни та складом шихтових матеріалів [15—18, 20—24]. Також для пошуку більш раціональних варіантів впливу намагаються більш детально розібратися в механізмі та причино-наслідкових ланцюгах їх утворення. Для цього проводять фізичне моделювання з використанням низькотемпературних та високотемпературних моделей, а також чисельне моделювання. Проведення дослідів на високотемпературній моделі із використанням рідкого розплаву чавуну з наведеним шаром шлаку на поверхні та з продувкою технічно чистим киснем — достатньо складний та високовартісний процес. Тому втрати металу активно вивчаються на низькотемпературних моделях, на яких можливо змодельовати вплив газогідродинамічної дії продувного струменя на процес розбризкування, а також присутність другої фази, що імітує шлак [24—27]. Також можливий варіант чисельного дослідження розбризкування металу під час продувки, який, однак, все ж повинен валідуватися (найчастіше за допомогою низькотемпературного моделювання) [28—30]. Вплив «кипіння» ванни через протікання хімічної реакції компонентів металевого розплаву з продувним газом на розбризкування під час продувки змодельовати досить складно. Тому для моделювання обирають умови або початку продувки, коли ще практично немає шлакової фази, або останнього періоду продувки, коли шлакова фаза не дуже розвинута та процеси «кипіння» слабкі. Крім того, для розуміння адекватності результатів низькотемпературного моделювання проводять співставлення результатів оцінки розбризкування за умов низькотемпературного та високотемпературного моделювання. Так, наприклад, у роботах [31, 32] було виявлено невідповідність експериментальних даних низькотемпературної моделі у швидкості генерації крапель результатам реальних продувок розплавленого металу (зроблено висновок, що на реальному агрегаті виноси-розбризкування у 2—15 разів нижчі). Однак у роботах [32, 33] повідомляють про достатню близькість результатів оцінки щодо бризкоутворення при верхній продувці за результатами низькотемпературного та високотемпературного моделювання. Проте, наявних у публікаціях даних щодо співставлення цього процесу дуже мало через різні умови проведення тих чи інших досліджень (бо найчастіше порівняння проводять за результатами, що вже кимось опубліковані й отримані за зовсім відмінних умов).

Мета дослідження. Відповідно метою дослідження є актуальне порівняння та пошук спільних закономірностей для результатів низькотемпературного та високотемпературного моделювання щодо оцінки розбризкування ванни за умов верхньої продувки, проведених у умовах, що можуть бути співставлені (однакова продувна фурма, однаковий тиск продувного газу та положення фурми відносно рідкої ванни).

Матеріали та методи. Дослідження за допомо-

гою двох типів моделювання (низькотемпературне та високотемпературне) процесу розбризкування рідкої ванни проведені з використанням верхньої продувної фурми, обладнаної чотирма соплами Лавалля. Діаметр сопла — $1,7 \cdot 10^{-3}$ м, кут нахилу до вертикальної осі фурми — 14 град. На рис. 1—2 наведено схеми модельних установок.

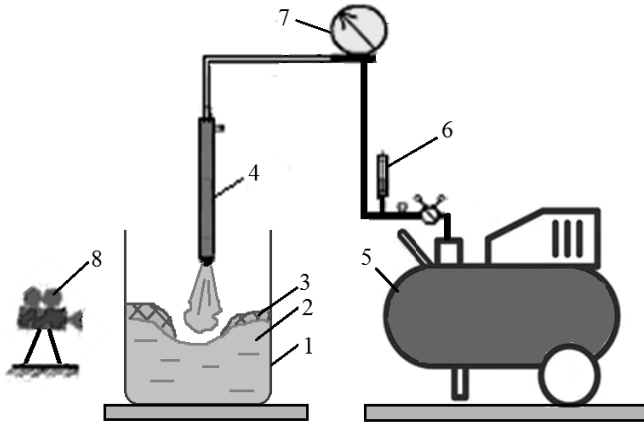


Рис. 1. Схематичне зображення лабораторної установки для низькотемпературного моделювання: 1 — прозора модельна ємність; 2 — підфарбована рідина (вода) — моделює металевий розплав; 3 — поліметилсиліконова олія — моделює шлакову емульсію; 4 — продувна фурма; 5 — компресор; 6 — ротаметр; 7 — манометр; 8 — відеокамера

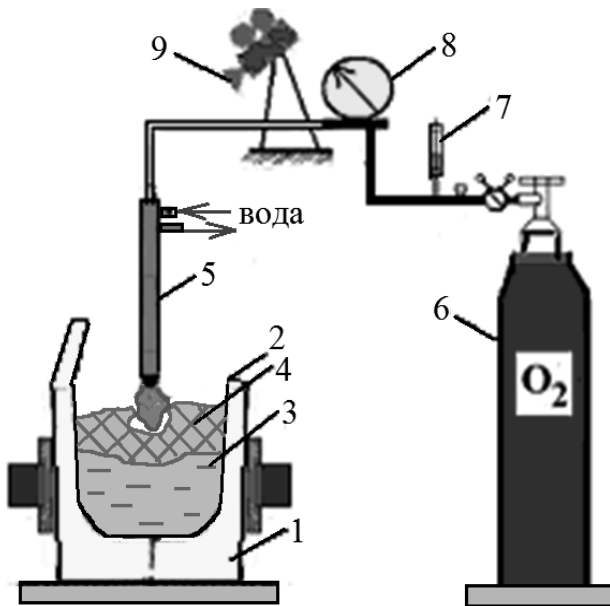


Рис. 2. Схематичне зображення лабораторної установки для високотемпературного моделювання: 1 — високотемпературна модель конвертера; 2 — вікно для спостереження за навколофурменною зоною; 3 — рідкий метал; 4 — шлак; 5 — верхня киснева фурма; 6 — кисневий балон; 7 — ротаметр; 8 — манометр; 9 — відеокамера

Високотемпературні дослідження були проведені на 60-кг моделі кисневого конвертера (обладнаного оглядовим вікном для проведення спостереження за навколофурменною областю ванни) в умовах лабораторної бази Дніпровського державного технічного університету. Верхню продувку

залізо-вуглецевого розплаву здійснювали технічно чистим киснем. Наведення шлаку проводилося шляхом додавання 1,2 кг вапна. Низькотемпературне моделювання проведене у прозорій ємності з використанням модельних рідин: імітатор рідкої сталі — підфарбована вода у кількості 6 кг; імітатор шлакової фази — поліметилсиліконова олія, 600 г. Положення фурми було постійним і складало 26 калібрів відносно поверхні металеві ванни (як під час високотемпературного моделювання, так і під час низькотемпературного). Тиск газу перед фурмою складав 200 кПа, що відповідало інтенсивності продувки $3,0\text{—}3,2 \text{ м}^3/\text{т хв.}$ для промислового кисневого конвертера. Газо-гідродинамічні явища на поверхні ванни фіксували за допомогою відеозйомки. Продувку на високотемпературній моделі здійснювали технічно чистим киснем, а на низькотемпературній — стисненим осушеним повітрям від компресора. Час продувки в обох експериментах був однаковим і складав 9 хвилин.

Результати дослідження та їх обговорення.

Аналіз втрат рідкої ванни через розбризкування оцінювали двома способами:

— загальним зважуванням до та після продувки (у разі високотемпературного дослідження також враховували хімічну зміну кількості основних компонентів розплаву шляхом відбору та хімічного аналізу проб розплаву до й після продувки, та шлаку після продувки; цей показник віднімали від загальних втрат);

— аналізом результатів відеофіксації навколофурменої області протягом продувки.

Розрахунок втрат металу за високотемпературним моделюванням проводили відповідно до зміни вмісту основних компонентів розплаву (вуглецю, кремнію), та за кількістю окисленого заліза з формуванням оксидів у шлаку. Зміна вказаних компонентів для проаналізованих дослідів складала: $\Delta C = 2,9 \text{ \%мас.}$, $\Delta Si = 0,93 \text{ \%мас.}$; а вміст у шлаку $FeO = 27,32 \text{ \%мас.}$. Маса шлаку складала 10 % від маси металеві ванни. Вихід металу складав 88,7 %.

Маса елементів, що окислилася:

$$M_C = \frac{2,9}{100} 60 = 1,74 \text{ кг};$$

$$M_{Si} = \frac{0,93}{100} 60 = 0,558 \text{ кг};$$

$$M_{Fe} = \frac{27,32}{100} 60 \cdot 0,1 \frac{56}{72} = 1,275 \text{ кг}.$$

Відповідно, сумарна маса втрат:

$$M_{\text{сум.втрат}} = \frac{(100 - 88,7)}{100} 60 = 6,78 \text{ кг}.$$

Звідси втрати з розбризкуванням склали: $6,78 + (1,74 + 0,558 + 1,275) = 3,207 \text{ кг}.$

Відповідно **за першим варіантом оцінювання** (за зважуванням до та після продувки) встановлено втрати через розбризкування:

— для високотемпературного моделювання — 5,3 %;

— для низькотемпературного моделювання — 51,2 %.

Тобто за умов низькотемпературного моделювання верхньої продувки відмічено в 10 разів більші втрати рідкої ванни (рідини, що імітує сталь). Такий показник кореспондується із зазначеними вище результатами інших дослідників [31, 32]. Отримана різниця, в першу чергу, пов'язана зі значною відмінністю у поверхневому натягу та в'язкості рідин металевого розплаву та води (відповідно вказані значення для води менші приблизно у 19 та 5 разів). Це зумовлює значно більші коливання ванни та легше відривання крапель з гребня кратеру, який формується в поверхні рідини під дією газового струменя, що спричиняє втрати рідини. А менша, приблизно у 7 разів, густина також зумовлює легкість «вильоту» крапель за межі ванни. Тобто такий варіант оцінювання втрат надає більш якісні показники, якщо проводити порівняльні продувки крізь різні продувні пристрої в однакових умовах. Для розуміння кількісних значень необхідно зменшувати отримані дані приблизно у 10 разів.

За другим варіантом оцінювання. Відповідно до високотемпературного моделювання за ходом продувки металу в 60-кг моделі конвертера аналіз проводився за розкадрованою відеозйомкою. Для визначення кількості бризок, сформованих на кожній із зафіксованих хвилин продувки плавки, використовували фото фрагменти відеозапису. Об'єктом для підрахунку, у цьому випадку, була квадратна ділянка $80 \times 80 \cdot 10^{-3}$ м, розташована у підфурменій зоні. При 100 % збільшенні ділянки, площу довільно розділяли на сектори лініями і, збільшивши фото в 5 разів (масштаб 5:1), підраховували кількість бризок в полі зору кожного з цих секторів, а потім складали отримані за секторами кількості бризок. На рис. 3 показаний приклад поділу фото на сектори і збільшений в 5 разів сектор 1 для підрахунку кількості сформованих бризок на 4-й хвилині продувки металу. Щосекундний аналіз відеозаписів дозволив підраховувати кількість видимих в кадрі в секунду бризок на 2-й, 4-й, 6-й, 8-й і 9-й хвилинах продувки, які відрізнялися рівнем сформованого шлаку. Рівень спінювання шлаку та підйому ванни оцінювали на основі масштабування вимірних величин розташування рівня поверхні ванни на фрагментах відеозапису в перерахунку на розміри відомого діаметра фурми (0,05 м). Базовою величиною при розрахунках висоти ванни була висота розташування наконечника фурми над металом — 0,045 м, що відповідало відстані у 26 калібрів. ($H_{\text{фурми}} = 0,045$ м) від дзеркала спокійного металу, рівень наливу металу становив $H_{\text{металу}} = 0,175$ м (від наконечника фурми до днища моделі відстань дорівнювала $H_{\text{ванни } 0} = 0,22$ м), вікно спостереження прорізано від краю моделі перетином $0,25 \times 0,25$ м в горловині, діаметр корпусу фурми ($d_{\text{ф}}$) дорівнює 0,05 м. Алгоритм визначення висоти ванни був наступним. На початку продувки до появи шлакової фази виконувалася фіксація видимої довжини корпусу фурми, а також визначалася лінія (горизонт) знаходження зрізу наконечника, який є видимим в оглядове вікно. Потім встановлювався коефіцієнт масштабу-

вання величин на реальні розміри (L_i). Наприклад, використовуючи відомий розмір діаметра фурменної труби 0,05 м (на кадрі відеозапису він позначений $d_{\text{ф1}}$, м), визначаємо коефіцієнт масштабування результатів виміру — $K = d_{\text{ф1}}/d_{\text{ф}}$ (був визначений для кожного відео), на який згодом множили всі визначені параметри вимірів.

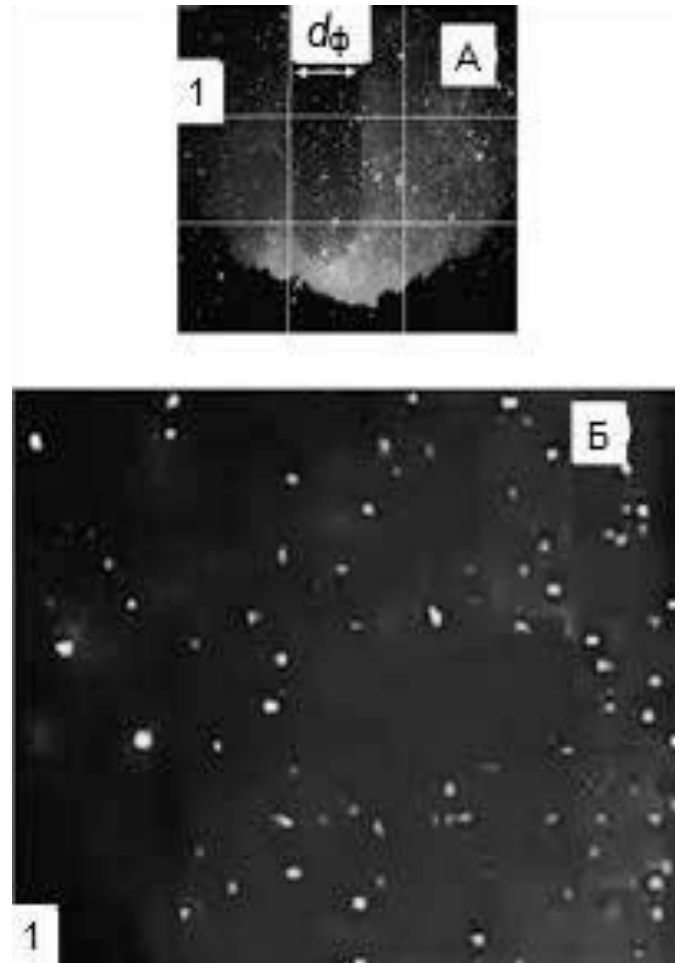


Рис. 3. Приклад розподілу фото на сектори (А) і збільшений в 5 разів (масштаб 5:1) сектор 1 — (Б) для підрахунку кількості бризок на 4-й хвилині продувки металу в моделі

Вимірювання виконували під час щокadroвого перегляду відеозапису через кожну хвилину продувки для плавок, тривалість яких становила 9 хв. Результати замірів масштабували в реальні умови. Потім, віднімаючи з L_i результати вимірів частини фурми, що підноситься над шлаком на кожній з хвилин продувки L_x і додаючи початкову висоту розташування фурми над дзеркалом спокійного металу (в нашому випадку 0,045 м), і отримували рівень підйому шлаку ($H_{\text{шлаку}} = L_i - L_x + 0,045$). Склавши отриманий результат з початковим рівнем наливу металу ($H_{\text{металу}}$), визначали рівень підйому ванни в цілому ($H_{\text{ванни}}$). Для прикладу на рис. 4 наведено фото і приклад розрахунку висоти підйому шлаку на 2-й, 4-й і 6-й хвилинах продувки.

Заміри на наведених на рис. 4 кадрах відеозапису: $d_{\text{ф1}} = 0,015$ м; $L_2 = 0,040$ м; $L_2 = L_{2-1} + L_{2-2} = 0,023$ м +

+ 0,017 м = 0,040 м; $L_4 = 0,032$ м; $L_6 = 0,018$ м. $K = d_{\phi}/d_{\phi 1} = 0,05/0,015 = 3,33$. Після масштабування виміряної на фото величини L_{2-1} отримуємо $0,023 \cdot 3,33 = 0,077$ м, тобто на 2-й хвилині фурма уже заглиблена в шлак на $\Delta L_{2-1} = 0,095 - 0,077 = 0,018$ м. Оскільки L_2 приймаємо за базу, то цю величину слід додавати при розрахунку $H_{\text{шлаку}}$ та $H_{\text{ванни}}$ на наступних хвилинах продувки, а на 2-й хв. продувки $H_{\text{шлаку}2} = 0,018 + 0,045 = 0,063$ м, а $H_{\text{ванни}2} = H_{\text{шлаку}2} + H_{\text{металу}} = 0,063 + 0,175 = 0,238$ м. $H_{\text{шлаку}4} = (L_2 - L_4) \cdot K +$

$+ \Delta L_{2-1} + H_{\text{фурми}} = (0,040 - 0,032) \cdot 3,33 + 0,018 + 0,045 = 0,090$ м; $H_{\text{шлаку}6} = (L_2 - L_6) \cdot K + \Delta L_{2-1} + H_{\text{фурми}} = (0,034 - 0,018) \cdot 3,33 + 0,018 + 0,045 = 0,116$ м; $H_{\text{ванни}4} = H_{\text{шлаку}4} + H_{\text{металу}} = 0,090 + 0,175 = 0,265$ м; $H_{\text{ванни}6} = H_{\text{шлаку}6} + H_{\text{металу}} = 0,116 + 0,175 = 0,291$ м, тобто на 2-й хвилині ванна піднялась на 0,063 м ($0,238 - 0,175$), на 4-й хвилині — на 0,090 м ($0,265 - 0,175$), а на 6-й хвилині — на 0,116 м ($0,291 - 0,175$).

Для низькотемпературної моделі відеозйомка проводилася одночасно у горизонтальній та боковій

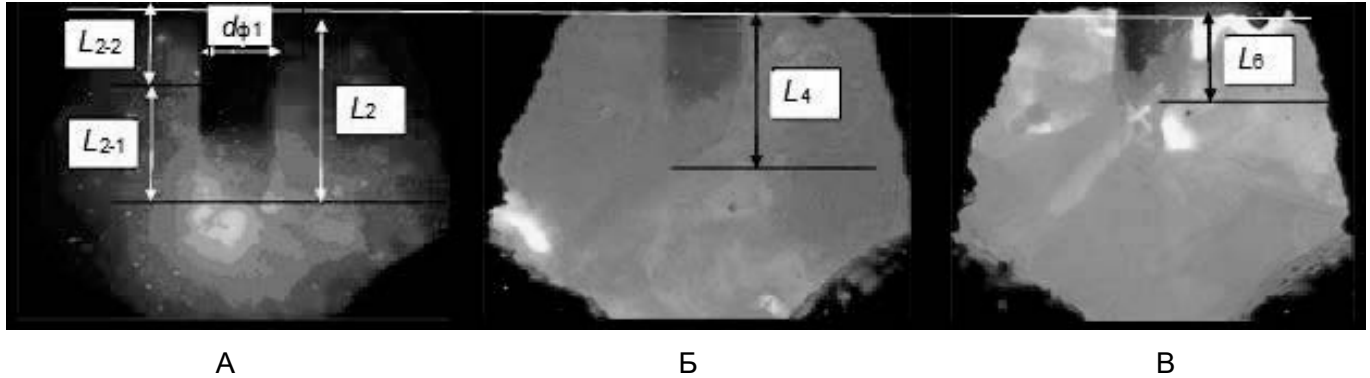


Рис. 4. Приклад визначення товщини шлаку і рівня підйому сталеплавильної ванни в цілому під час продувки плавки на 2-й (А), 4-й (Б) і 6-й (В) хвилинах (за базу в розрахунках прийнята 2-га хвилина)

проекціях моделі. За результатами розкадрування відеозйомки зверху було відмічено, що кількість бризок оцінювати досить складно через їх високу прозорість, навіть у випадку значного підфарбування рідини. Тому кількість бризок оцінювали за появою крапель на прозорій стінці модельної ємності (спочатку продувки стінки моделі ретельно протирали). Також через прозору ємність оцінювали висоту спінування другої фази (імітатор шлакового розплаву) під час продувки відносно початкової товщини шару олії. На рис. 5 наведено приклад відеокадру для оцінки кількості бризок на низькотемпературній моделі. Результати проведеного аналізу для двох типів моделювання наведено на рис. 6 відповідно до відносного показника рівня спінування ванни (бо інші показники, такі як час чи кількість кисню на продувку не є об'єктивними для низькотемпературного моделювання). Встановлено, що залежність кількості бризок від частки спіненої другої фази для двох типів моделі має спільний спадаючий характер (більш «плавний» для умов високотемпературного моделювання). Відмічено, що для умов спінування другої фази на рівні 10—18 % від висоти ванни кількість бризок, що утворюється за результатами низькотемпературного моделювання, вища на 12—36 % відн. за показники високотемпературного моделювання (високі показники відхилення відповідають невеликим показникам спінування другої фази).

Цей показник кореспондується з встановленою вище за першим типом оцінювання різницею втрат рідкої ванни за обома типами моделювання (особливо при наявності вже спіненої другої фази). Однак при збільшенні спінування другої фази (на рівні 20 %) показник кількості бризок ставав однаковим для двох типів моделювання й в подальшому —

меншим за показники, отримані за результатами високотемпературного моделювання. Отримані результати при низькому рівні спінування другої фази вказують на відмічену вже вище значну відмінність фізичних властивостей модельних рідких систем вода/поліметилсиліконова олія та металевий розплав/шлаковий розплав: менший поверхневий натяг води (у 19 разів), менша густина води (у 7 разів) та в'язкість води (у 5 разів) сприяють легкому відриву крапель під час продувки із «незахищеною» поверх-

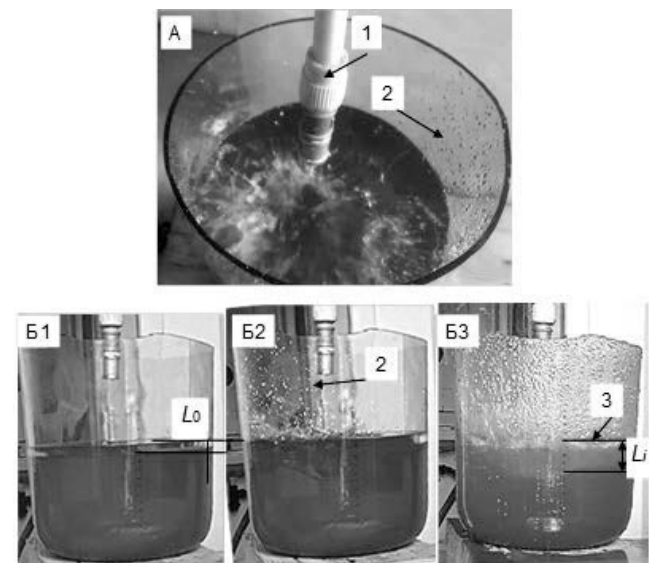


Рис. 5. Фото продувки на низькотемпературній моделі (А) — вид зверху; (Б1) — вид збоку до початку продувки (L_0 — початковий рівень другої фази); (Б2) — вид збоку з появою бризок; (Б3) — вид збоку з вказанням рівня спінування другої фази (L_1): 1 — продувна фурма; 2 — бризки на прозорій стінці моделі; 3 — спінена друга фаза

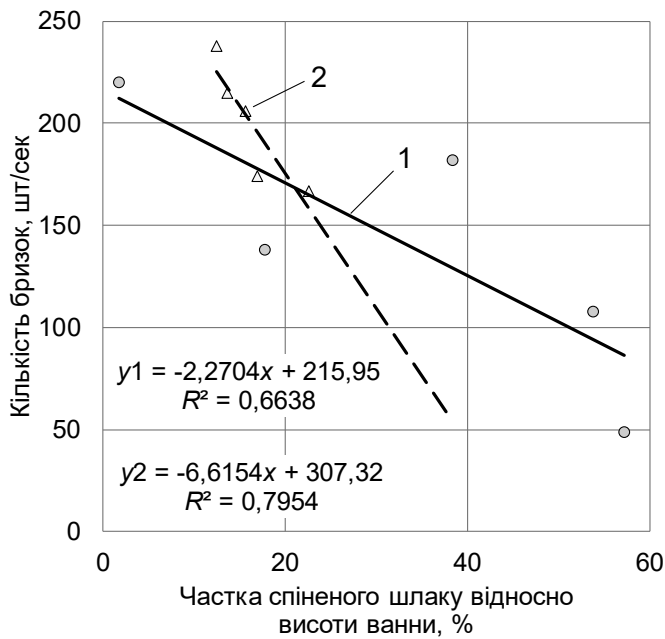


Рис. 6. Залежність кількості бризок, зафіксованих за результатами високотемпературного (1) та низькотемпературного (2) моделювання, за умов продувки крізь чотириохсоплову фурму з однаковими параметрами при однакових умовах продувки

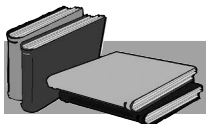
нею від краю кратера, що формується під дією газового струменя. Поліметилсиліконова олія до моменту спінювання легко «здувається» з поверхні й відступає із зони дії газового струменя до периферії. Олію легко здути з поверхні води, тому що вона легша за воду (має дещо меншу густину 969 кг/м^3 проти 1000 кг/м^3) і не змішується з нею, утворюючи тонку плівку на поверхні. Молекули олії та води не притягуються одна до одної через різну полярність, тому вода не може утримати молекули олії. Крім того, поверхневий натяг олії у 3,48 нижчий, ніж у води, що дозволяє йому розтікатися по поверхні води, а в'язкість у 200 разів вища, що зумовлює групування олії великої кількості під дією потоку повітря.

Відзначений вплив спіненої другої фази — поліметилсиліконової олії (у разі підвищення частки спінювання) на можливість відриву та виносу крапель води під час продувки зверху пов'язаний з утворенням шару суспензії на поверхні, яка має більшу в'язкість, ніж вода та покриває значну частину поверхні модельної ванни, захищаючи тим самим від розбризкування. Однак, відповідно до проведеного дослідження, досягти спінювання вище 22—25 % було досить складно без додавання додаткових ПАВ (через гідрофобність олії), що не розглядалося у даній роботі. Однак й вказана частка спінювання чинила значний вплив зі зменшення розбризкування у 1,5—1,8 раз (для порівняння за результатами високотемпературного моделювання збільшення спінювання шлакової фази до величини 25 % менше впливало на зменшення розбризкування — у 1,2 рази).

Висновки

Проведене співставлення способів оцінювання втрат розплаву під час верхньої продувки крізь чотириохсоплову фурму шляхом низько- та високотемпературного моделювання за однакових умов показало, що за низькотемпературним моделюванням рівень втрат через розбризкування значно вищий (у 10—12 разів), ніж при продувці реального металевого розплаву. Це, перш за все, пов'язано зі значною різницею у фізичних властивостях модельних рідин. Також відзначено значний вплив другої фази, яка моделює шлакову, на зменшення розбризкування основної рідини під час моделювання.

Отримані результати повинні враховуватися при екстраполяції результатів низькотемпературного моделювання щодо особливостей взаємодії газового струменя з рідкою ванною за умов продувки крізь різні продувні пристрої.



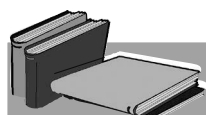
ЛІТЕРАТУРА

- 2025 World Steel in Figures. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf> (дата звернення: 29.10.2025).
- Україна знову серед 21 найбільшого виробника сталі у світі. URL: <https://agronews.ua/news/ukrayina-znovu-sered-21-najbilshogo-vyrobnika-stali-u-sviti/> (дата звернення: 29.10.2025).
- Sambasivam R., Lenka S.N., Durst F., Bock M., Chandra S., Ajmani S.K. A New Lance Design for BOF Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2007. Vol. 38. P. 45—53. <https://doi.org/10.1007/s11663-006-9004-3>
- Jalkanen H., Holappa L. 1.4.3.1 Oxygen lance and blowing practice. *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*. 2014. Vol. 3: Industrial Processes. P. 223—270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00014-6>

5. Чернятевич А.Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 4. С. 24—31.
6. Чернятевич А.Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 2. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 5. С. 10—18.
7. Cappel J., Ahrenhold F., Egger M. W., Hiebler H., Schenk J. 70 Years of LD-Steelmaking — Quo Vadis? *Metals*. 2022. Vol. 12. Iss. 6. P. 912—936. <https://doi.org/10.3390/met12060912>
8. Fritz E., Gebert W. Milestones and challenges in oxygen steelmaking. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2005. Vol. 44. Iss. 2. P. 249—260. <https://doi.org/10.1179/cmqr.2005.44.2.249>
9. Turkdogan E.T. Fluid dynamics of gas jets impinging on surface of liquids. *Chemical Engineering Science*. 1966. Vol. 21. Iss. 12. P. 1133—1144. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(66\)85034-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(66)85034-0)
10. Boom R. Mastering the heat in the Fe-C-O converter: Evolution of process control in fifty years of oxygen steelmaking. Proceedings of 4th European Oxygen Steelmaking Conf., Graz, Austria, 12—15 May 2003. Eisenhütte Österreich. P. 19—37.
11. Stubbles J. The basic oxygen steelmaking (BOS) process. Nupro Corporation. 05.10.2005.
12. Molloy N.A. Impinging Jet Flow in a Two Phase system: The Basic Flow Pattern. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1970. Vol. 208. P. 943—950.
13. Maia B.T., Imagawa R.K., Petrucelli A.C., Tavares R.P. Effect of blow parameters in the jet penetration by physical model of BOF converter. *Journal of Materials Research and Technology*. 2014. Vol. 3. Iss. 3. P.244—256. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.010>
14. Naito K.-I., Asahara N., Kaizawa A., Ogawa Y., Kitagawa I., Inomoto Y., Sasaki N., Matsuo M. Nippon steel plant report (internal report). *Nippon Steel Technical Report*. 2013. Vol. 104. P. 33—41.
15. Kumar S.D., Prasad G., Ghouri P.K., Ranjan M. Coolant strategies for BOF steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*. 2008. Vol. 35. Iss. 7. P. 539—544. <https://doi.org/10.1179/174328108X335159>
16. Higuchi Y., Tago Y. Effect of Lance Design on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process. *ISIJ International*. 2001. Vol. 41. Iss. 12. P. 1454—1459. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1454>
17. Luomala M.J., Fabritius T.M.J., Virtanen E.O., Siivola T.P., Härkki J.J. Splashing and Spitting Behavior in the Combined Blown Steelmaking Converter. *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. Iss. 9. P. 944—949. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.944>
18. Охотский В.Б. Механизм выбросов шлака из конвертера. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 3. С. 23—26.
19. Luomala M.J., Fabritius T.M.J., Virtanen E.O., Siivola T.P., Fabritius T.L.J., Tenkku H., Härkki J.J. Physical model study of selective slag splashing in the BOF. *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. Iss. 11. P. 1219—1224. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1219>
20. Evstedt M., Medvedev A. Model-based slopping warning in the LD steel converter process. *Journal of Process Control*. 2009. Vol. 19. Iss. 6. P. 1000—1010. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2009.01.002>
21. Deo B., Overbosch A., Snoeijer B., Das D., Srinivas K. Control of Slag Formation, Foaming, Slopping, and Chaos in BOF. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2013. Vol. 66. Iss. 5—6. P. 543—554. <https://doi.org/10.1007/s12666-013-0306-2>
22. Shakirov M., Boutchenkov A., Galperine G., Schrader B. Prediction and prevention of slopping in a BOF. *Iron & Steel Technology*. 2004. Vol. 1. Iss. 1. P. 38—44.
23. Chukwulebe B.O., Balajee S.R., Robertson K.J., Grattan J.G., Green M.J. Computer optimization of oxygen blowing practices to control BOF slopping. *Proc. AISTech*. 2004. Vol. 1. P. 751—762.
24. Rout B.K., Brooks G., Subagyo, Rhamdhani M.A., Li Z. Modeling of Droplet Generation in a Top Blowing Steelmaking Process. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. Vol. 47. P. 3350—3361. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0773-z>
25. Sabah S., Brooks G. Splashing in Oxygen Steelmaking. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54. Iss. 4. P. 836—844. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.836>
26. Wang H., Zhu R., Gu Y.L., Wang C.J. Behaviours of supersonic oxygen jet injected from four-hole lance during top-blown converter steelmaking process. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2014. Vol. 53. Iss. 3. P. 367—380. <https://doi.org/10.1179/1879139514Y.0000000128>
27. Asahara N., Naito K.I., Kitagawa I., Matsuo M., Kumakura M., Iwasaki M. Fundamental study on interaction between top blown jet and liquid bath. *Steel Research International*. 2011. Vol. 82. Iss. 5. P. 587—594. <https://doi.org/10.1002/srin.201100041>
28. Sun J., Zhang J., Jiang R., Feng X., Liu Q. Numerical Simulation of Droplet Splashing Behavior in Steelmaking Converter Based on VOF-to-DPM Hybrid Model and AMR Technique. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2024. Vol. 55. P. 1098—1116. <https://doi.org/10.1007/s11663-024-03024-2>
29. Golub T., Molchanov L., Minai O., Koveria A. Study of the influence of the composite-type nozzle design on the gas-dynamic characteristics of a gas jet. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2025. P. 1—15. <https://doi.org/10.1080/00084433.2025.2573538>
30. Sato S., Okada J., Ueda Y., Iguchi M. Visualization of Intermittent Splash with Gas Blowing from a Top Lance — Breakup of Cavity Surface Causing Intermittent Splash. *ISIJ International*. 2020. Vol. 60. Iss. 9. P. 2118—2120. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-788>

31. Standish N., He Q. A model study of droplet generation in the BOF steelmaking. *ISIJ International*. 1989. Vol. 29(6). P. 455—461.
32. Subagyo, Brooks G.A., Coley K.S., Irons G.A. Generation of Droplets in Slag-Metal Emulsions through Top Gas Blowing. *ISIJ International*. 2003. Vol. 43. Iss. 7. P. 983—989. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.983>
33. Sabah S., Brooks G. Splash Distribution in Oxygen Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015. Vol. 46. P. 863—872. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0238-1>

Надійшла 31.10.2025



REFERENCES

1. 2025 World Steel in Figures. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf>
2. Ukraine is again among the 21 largest steel producers in the world. <https://agronews.ua/news/ukrayina-znovu-sered-21-najbilshogo-vyrobnika-stali-u-sviti/> [in Ukrainian].
3. Sambasivam, R., Lenka, S. N., Durst, F., Bock, M., Chandra, S., & Ajmani, S. K. (2007). A New Lance Design for BOF Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 38, 45-53. <https://doi.org/10.1007/s11663-006-9004-3>
4. Jalkanen, H., & Holappa, L. (2014). 1.4.3.1 Oxygen lance and blowing practice. *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*, 3, Industrial Processes, 223-270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00014-6>
5. Cherniatevych, A. H. (2015). Razrabotka dutevogo i shlakovogo rezhimov konverternoi plavki pri verkhnei kislородnoi produvke. Soobshchenie 1. [Development of blast and slag modes for converter melting with top oxygen blowing. Message 1]. *Metallurgical and mining industry*, (4), 24-31 [in Russian].
6. Cherniatevych, A. H. (2015). Razrabotka dutevogo i shlakovogo rezhimov konverternoi plavki pri verkhnei kislородnoi produvke. Soobshchenie 2. [Development of blast and slag modes for converter melting with top oxygen blowing. Message 2]. *Metallurgical and mining industry*, (5), 10-18 [in Russian].
7. Cappel, J., Ahrenhold, F., Egger, M. W., Hiebler, H., & Schenk, J. (2022). 70 Years of LD-Steelmaking – Quo Vadis? *Metals*, 12(6), 912-936. <https://doi.org/10.3390/met12060912>
8. Fritz, E., & Gebert, W. (2005). Milestones and challenges in oxygen steelmaking. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 44(2), 249-260. <https://doi.org/10.1179/cmqr.2005.44.2.249>
9. Turkdogan, E. T. (1966). Fluid dynamics of gas jets impinging on surface of liquids. *Chemical Engineering Science*, 21(12), 1133-1144. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(66\)85034-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(66)85034-0)
10. Boom, R. (2003). Mastering the heat in the Fe-C-O converter: Evolution of process control in fifty years of oxygen steelmaking. Proceedings of 4th European Oxygen Steelmaking Conf., Graz, Austria, 12–15 May. 2003. Eisenhütte Österreich, 19-37.
11. Stubbles, J. (05.10.2005). The basic oxygen steelmaking (BOS) process. *Nupro Corporation*.
12. Molloy, N. A. (1970). Impinging Jet Flow in a Two Phase system: The Basic Flow Pattern. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 208, 943-950.
13. Maia, B. T., Imagawa, R. K., Petrucelli, A. C., & Tavares, R. P. (2014). Effect of blow parameters in the jet penetration by physical model of BOF converter. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(3), 244-256. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.010>
14. Naito, K.-I., Asahara, N., Kaizawa, A., Ogawa, Y., Kitagawa, I., Inomoto, Y., Sasaki, N., & Matsuo, M. (2013). *Nippon steel plant report (internal report)*. *Nippon Steel Technical Report*, 104, 33-41.
15. Kumar, S. D., Prasad, G., Ghouri, P. K., & Ranjan, M. (2008). Coolant strategies for BOF steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, 35(7), 539-544. <https://doi.org/10.1179/174328108X335159>
16. Higuchi, Y., & Tago, Y. (2001). Effect of Lance Design on Jet Behavior and Spitting Rate in Top Blown Process. *ISIJ International*, 41(12), 1454-1459. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1454>
17. Luomala, M. J., Fabritius, T. M. J., Virtanen, E. O., Siivola, T. P., & Härkki, J. J. (2002). Splashing and Spitting Behavior in the Combined Blown Steelmaking Converter. *ISIJ International*, 42(9), 944-949. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.944>
18. Okhotskii, V. B. (2006). Mkhanizm vybrosov shlaka iz konvertera [Mechanism of slag ejection from a converter]. *Metallurgical and mining industry*, (3), 23-26 [in Russian].
19. Luomala, M. J., Fabritius, T. M. J., Virtanen, E. O., Siivola, T. P., Fabritius, T. L. J., Tenkku, H., & Härkki, J. J. (2002). Physical model study of selective slag splashing in the BOF. *ISIJ International*, 42(11), 1219-1224. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.1219>

20. Evestedt, M., & Medvedev, A. (2009). Model-based slopping warning in the LD steel converter process. *Journal of Process Control*, 19(6), 1000-1010. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2009.01.002>
21. Deo, B., Overbosch, A., Snoeijer, B., Das, D., & Srinivas, K. (2013). Control of Slag Formation, Foaming, Slopping, and Chaos in BOF. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 66(5-6), 543-554. <https://doi.org/10.1007/s12666-013-0306-2>
22. Shakirov, M., Boutchenkov A., Galperine G., & Schrader B. (2004). Prediction and prevention of slopping in a BOF. *Iron & Steel Technology*, 1(1), 38-44.
23. Chukwulebe, B. O., Balajee, S. R., Robertson, K. J., Grattan, J. G., & Green, M. J. (2004). Computer optimization of oxygen blowing practices to control BOF slopping. *Proc. AISTech.*, 1, 751-762.
24. Rout, B. K., Brooks, G., Subagyo, Rhamdhani, M. A., & Li, Z. (2016). Modeling of Droplet Generation in a Top Blowing Steelmaking Process. *Metallurgical and Materials Transactions B.*, 47, 3350-3361. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0773-z>
25. Sabah, S., & Brooks, G. (2014). Splashing in Oxygen Steelmaking. *ISIJ International*, 54(4), 836-844. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.836>
26. Wang, H., Zhu, R., Gu, Y. L., & Wang, C. J. (2014). Behaviours of supersonic oxygen jet injected from four-hole lance during top-blown converter steelmaking process. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 53(3), 367-380. <https://doi.org/10.1179/1879139514Y.0000000128>
27. Asahara, N., Naito, K. I., Kitagawa, I., Matsuo, M., Kumakura, M., Iwasaki, M. (2011). Fundamental study on interaction between top blown jet and liquid bath. *Steel Research International*, 82(5), 587-594. <https://doi.org/10.1002/srin.201100041>
28. Sun, J., Zhang, J., Jiang, R., Feng, X., & Liu, Q. (2024). Numerical Simulation of Droplet Splashing Behavior in Steelmaking Converter Based on VOF-to-DPM Hybrid Model and AMR Technique. *Metallurgical and Materials Transactions B.*, 55, 1098-1116. <https://doi.org/10.1007/s11663-024-03024-2>
29. Golub, T., Molchanov, L., Minai, O., & Koveria, A. (2025). Study of the influence of the composite-type nozzle design on the gas-dynamic characteristics of a gas jet. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1-15. <https://doi.org/10.1080/00084433.2025.2573538>
30. Sato, S., Okada, J., Ueda, Y., & Iguchi, M. (2020). Visualization of Intermittent Splash with Gas Blowing from a Top Lance — Breakup of Cavity Surface Causing Intermittent Splash. *ISIJ international*, 60(9), 2118-2120. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-788>
31. Standish, N., & He, Q. (1989). A model study of droplet generation in the BOF steelmaking. *ISIJ International*, 29(6), 455-461.
32. Subagyo, Brooks, G. A., Coley, K. S., & Irons, G. A. (2003). Generation of Droplets in Slag-Metal Emulsions through Top Gas Blowing. *ISIJ International*, 43(7), P. 983-989. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.983>
33. Sabah, S., & Brooks, G. (2015). Splash Distribution in Oxygen Steelmaking. *Metallurgical and Materials Transactions B.*, 46, 863-872. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0238-1>

Received 31.10.2025

Summary

L.S. Molchanov, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy,

e-mail: metall729321@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6139-5956>

T.S. Golub, PhD (Engin.), Senior Researcher, Senior Researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy,

e-mail: isinasu.golubts@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>

S.O. Dudchenko, PhD (Engin.), Senior Researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy,

e-mail: s.dudchenko@meta.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7319-9896>

S.I. Semykin, PhD (Engin.), Senior Researcher, Senior Researcher of the Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy,

e-mail: isisemykin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7365-2259>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Estimation of Direct Metal Losses during Converter Blowing using Low-Temperature Modeling and Its Verification

World steel production in oxygen converters has high indicators, which are maintained due to constant process of improvements. The simplest from the point of view of implementation is to improve the design of the top blowing device – the blowing lance, and develop technology for its use. This feature is due to the key impact of the specified device on the process: the creation of high-speed oxygen jets that have a mixing effect on the liquid metal bath and ensure the flow of chemical processes. The physical study of the characteristics of new devices and verification of the efficiency of their operation during blowing under conditions of interaction with the liquid bath are important in this improvement process. Most often, the method of physical low-temperature modeling is chosen for verification due to the availability of materials, ease of implementation and high clarity. Water and oil are used as modeling liquid media to simulate metal and slag melts, and air as a gaseous medium. An important condition for modeling is compliance with the criteria of geometric similarity and similarity of physical processes through the Froude and Weber criteria. However, even their use does not guarantee the quantitative similarity of the obtained results to the real process. In this regard, it is important to accumulate information on the correlation of the results of physical low-temperature and high-temperature modeling methods under the conditions of using the same blowing devices and technological features of blowing. The article presents the results of a comparative analysis of low- and high-temperature modeling of the top blowing of a liquid bath through a four-nozzle lance in order to evaluate the indicator of direct metal losses (spatter of the metal phase under the action of a gas jet). It was established that in low-temperature modeling, the level of losses due to spatter is significantly higher than in the blowing of a real metal melt due to significantly lower indicators of the physical properties of the modeling fluid. It was also noted that the most appropriate period under two-phase modeling conditions for real blowing is the beginning or end of blowing, when foaming depends more on the action of the gas jet due to the difficulty of providing conditions on a low-temperature model similar to the additional effect on foaming of the carbon oxidation reaction in the melt.

Keywords

Oxygen-converter steelmaking, top blowing, low-temperature modeling, high-temperature modeling, metal losses with spattering.