

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>

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

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

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>

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

Високотемпературне дослідження особливостей верхньої продувки конвертерної ванни з використанням фурм, що забезпечують генерацію озону високовольтним електричним розрядом

В сучасних умовах киснево-конвертерний спосіб виробництва сталі лишається одним з найпоширеніших методів отримання металу конструкційного призначення. При цьому його продуктивність визначається швидкістю перебігу окислювальних хімічних процесів, що включають видалення надлишкового вмісту таких домішок, як кремній, сірка, фосфор та вуглець. При використанні класичної технології киснево-конвертерної плавки у якості окислювача використовується технічно чистий кисень. З метою збільшення швидкості протікання окислювальних хімічних перетворень в шлако-металевій ванні кисневого конвертера авторами проведено високотемпературне дослідження з визначення особливостей впливу додаткового введення у окислювальний газ озону на особливості перебігу параметрів процесу конвертування. Особливістю зазначеного дослідження було використання методу генерації озону безпосередньо на виході з сопла за рахунок впливу високовольтного електричного розряду (високовольтна активізація). Для генерації озону були розроблені фурми спеціальної конструкції: з щільним соплом й з щільним соплом та трьома циліндричними соплами. В ході виконання досліджень було встановлено, що продувка крізь щільне сопло характеризується жорсткою взаємодією зі шлако-металевою фазою, що відображається у низькому рівні підйому ванни протягом продувки, однак шлак характеризується достатньою рідко рухомістю завдяки підвищеному вмісту оксидів заліза й забезпечує достатні показники видалення фосфору й сірки. Використання фурми, оснащеної щільним соплом з високовольтною активізацією кисневого потоку, сприяє підвищенню ефективності окислювальних процесів і, як наслідок, викликає підвищення вмісту оксидів заліза III в шлаку. Однак високовольтна активізація у зазначеному випадку супроводжується значним підвищенням жорсткості продувки. Гідродинамічний режим плавки нормалізується завдяки введенню до конструкції наконечника трьох додаткових циліндричних сопел (при збереженні загальної пропускної здатності). Це сприяє пришвидшенню «запалювання плавки», активізації всіх окислювальних процесів у шлако-металевій фазі з високою ефективністю засвоєння вапна та шлакоутворення.

Ключові слова: киснева продувка у конвертері, киснева фурма зі щільним соплом, озон, високовольтна електрична активація, окислювальні процеси.

Вступ. В Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України протягом тривалого часу проводилися розробки нетрадиційних способів впливу на технологічні, якісні та екологічні показники процесів виплавки сталі під керівництвом старшого наукового співробітника відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі Семикіна С.І. За результатами проведених ним досліджень природних електричних потенціалів, які утворюються на межі розділу фаз під час взаємодії кисневого газового струменя з розплавленою шлако-металевою ванною за високих температур киснево-конвертерного процесу [1, 2], він створив та дослідив разом із колегами у лабораторно-промислових умовах низку способів електрофізичного впливу на обмінні процеси у системі газ-метал-шлак на різних етапах виробництва сталі від обробки чавуну у ковші, кисневого конвертування з продувкою як зверху, так і комбінованим способом, так і до позапічної обробки сталі у ковші. Це способи накладання низьковольтного потенціалу [3–6], використання сумісного низьковольтного електричного та електромагнітного впливу [7, 8], дія яких зосереджена у своїй більшості на рідкій шлако-металевій ванні, а також спосіб електричної активізації газового потоку під час верхньої продувки за рахунок високовольтного кистьового електричного розряду [9]. Завдяки такій високовольтній активізації у газовому кисневому потоці утворюється озон, який має більшу хімічну активність, ніж кисень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій та постановка проблеми. За два з половиною століття з часів відкриття озону [10] завдяки своїм неймовірним окислювальним здібностям [11, 12] він набув достатньо широкого загалу щодо використання у різних галузях промисловості: очищенні води та знезараженні повітря й речей, озонуванні кислот та олій, виробництві фармацевтичних препаратів, а також промислового виробництва [13, 14, 15, 16, 17]. У металургійній галузі озон активно застосовується для полегшення екстракції цінних металів з руд, що містять сульфідні мінерали, з подальшим утворенням сульфатів та гідроксидів побічних металів та підвищенням у 1,5–1,8 рази ступеня вилучення основного компонента [18, 19, 20]. Ще одним напрямом використання озону є пасивація металів від корозії за рахунок швидкого утворення оксидної плівки на поверхні, яка виявляє підвищені міцнісні властивості у порівнянні зі звичайним природним оксидом [21, 22], або утворення оксидів з поліпшеними електричними характеристиками [23, 24].

Також привабливою ідеєю є використання озону у металургійній галузі, де основою виробництва сталей є окислювальна продувка. Спроби додавання озону до кисневого потоку під час верхньої продувки чавуну у лабораторних дослідженнях [25] вказують на можливість підвищення ступеня окислення вуглецю. Однак головною проблемою цього напрямку є низька стійкість озону, особливо в умовах контакту з металевими поверхнями та підвищеної температури, і нетривалий час існування озону. Основни-

ми способами утворення озону є ультрафіолетове випромінювання, електрохімічна реакція чи електричний розряд [13, 26]. Стосовно складних умов сталеплавильного виробництва найближчим щодо продукування озону є спосіб утворення електричного розряду. Відповідно до цього для вирішення задачі підвищення ефективності методу генерації та використання озону щодо продувки розплавленого чавуну при розташуванні продувної фурми на відстанях, зумовлених технологічними особливостями процесу, Семикіним С.І. було розроблено метод створення озону на виході з продувної фурми за рахунок створення високовольтного електричного розряду у продувній фурмі, який формує кистьовий розряд безпосередньо на виході з продувного сопла [27]. У такому випадку відстань, яку потрібно подолати озону до контакту з металевою фазою, мінімальна, й час його потенційного руху теж невеликий, що збільшує вірогідність доставки до металевого розплаву максимальної кількості виробленого озону.

З використанням розробленого способу були проведені лабораторні дослідження на дослідній базі кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова Дніпровського державного технологічного університету (ДДТУ). **Мета дослідження:** лабораторна оцінка ефективності методу створення озону високовольтним електричним розрядом (високовольтна активізація) на виході з продувної фурми та його вплив на окислювальні процеси під час кисневого конвертування з верхньою продувкою.

Матеріали та методи. Дослідження були проведені на 60 кг моделі кисневого конвертера. Загальну схему дослідної установки та приклад візуалізації створеного на виході з продувної фурми розряду наведено на рис. 1. Високовольтну активізацію проводили за умов підведення напруги 30 кВ до електрода, розміщеного у продувній фурмі (його розміщення та наявність були однаковими для всіх дослідних варіантів). Фурма для створення електричного розряду була оснащена кільцевим щільним соплом, у якому на торці наконечника утворювався високовольтний електричний розряд.

Було проведено декілька варіантів серій плавок: без високовольтної активізації, однак з використанням продувної фурми, оснащеної кільцевим щільним соплом діаметром 5,75 x 5,15 мм, (яке використовувалося для продувки з високовольтною активізацією); з високовольтною активізацією з використанням для верхньої продувної фурми щільного сопла діаметром 5,75 x 5,15 мм; та з високовольтною активізацією з використанням для верхньої продувної фурми щільного сопла діаметром 5,75 x 5,35 мм та додатково розташованих навколо трьох циліндричних сопел діаметром 1,0 мм (еквівалентне сопло складало 2,27 мм). Третій варіант продувного наконечника був зумовлений емпіричним висновком про високу жорсткість продувки крізь щільне сопло. Кількість озону, яка формувалася за умов продувки крізь щільне сопло, складала 18,7 мг/м³, а за умов продувки крізь щільне сопло з додатковими циліндричними соплами складала 12,6 мг/м³ (вимірювання проведе-

не до високотемпературного дослідження за допомогою приладу вимірювання озону Циклон 5-21). Зниження кількості озону у струмені за умов додавання додаткових циліндричних сопел було пов'язане із додатковим розбавляючим ефектом бічних струменів, які були розташовані на відстані від основного сопла та не брали участі у розряді та формуванні озону.

Продувки здійснювали за однакових технологічних

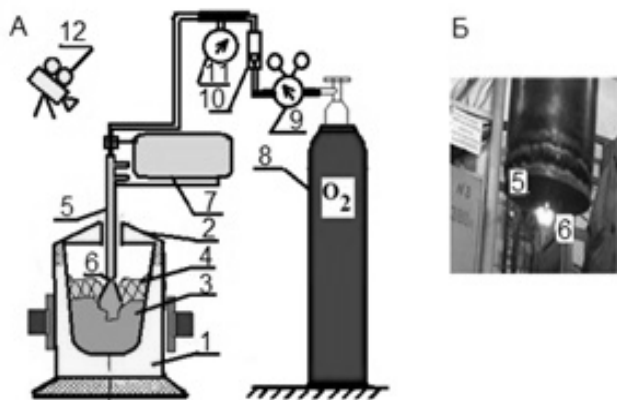


Рис. 1. Схема розміщення технологічного та електричного обладнання на моделі 60-кг конвертера при проведенні експериментів з продування металевого розплаву з високовольтною активізацією (А) та фото високовольтного розряду на кінці продувної фурми (Б): 1 — футерований ківш; 2 — знімна футерована горловина; 3 — метал; 4 — шлак; 5 — продувна фурма; 6 — наконечник з високовольтним розрядом; 7 — пристрій для створення розряду; 8 — балон з киснем; 9 — редуктор; 10 — ротаметр; 11 — цифровий манометр; 12 — відеокамера

умов: витрата продувного газу — $0,16 \text{ м}^3/\text{хв}$, вага розплавленого та розігрітого до температури 1340°C чавуну складала 60 кг, положення фурми відносно рідкої ванни складало 50 мм. Використовували чавун

складу, %мас.: С 3,8 — 4,0; Si 0,37 — 0,47; Mn 0,09 — 0,17; P 0,08 — 0,100; S 0,025 — 0,038. Для шлакоутворення додавали вапно у кількості 1,2 кг двічі за плавку (1-ша та 3-тя хвилини продувки). Продувку здійснювали до «падіння факелу». Проби металу відбирали кожні 2—3 хвилини для подальшого хімічного аналізу (для аналізу та співставлення будуть наведені результати плавок, на яких було відібрано максимальну кількість проб на 4-й, 6-й, 8-й, 10-й, 12-й та за наявності 14-й та 16-й хвилинах). Також паралельно проводили вимірювання рівня спінювання (підйому) ванни. Після деяких плавок були відібрані проби шлаку для подальшого аналізу. До та після продувки проводили вимірювання температури розплаву занурюваною термпарою ППР. Початкова температура розплаву була на рівні $1312\text{—}1320^\circ\text{C}$. Кінцева температура розплаву — на рівні $1550\text{—}1600^\circ\text{C}$. Поведінку ванни при продувці фіксували на швидкісну відеокамеру CASIO EXILIM EX F1 (300 кадрів за секунду).

Результати дослідження та їх обговорення.

На рис. 2 у якості прикладу наведено результати хімічного аналізу проб металу за ходом продувки на кожній з серії плавок у вигляді діаграм ступеня зміни компонентів у часі. Відмічено, що дія високовольтної активізації кисневого потоку проявляється у активізації процесів окислення всіх компонентів розплаву вже з початку продувки.

До моменту відбору першої проби металу (4-та хвилина продувки) у варіанті продувки з високовольтною активізацією у порівнянні з продувкою крізь щілинне сопло без високовольтної активізації ступінь окислення компонентів був вище: для вуглецю та кремнію у 1,6 та 1,5 разів, для фосфору у 1,2 та 1,7 рази, а для сірки замість ресульфурзації на 4-й хвилині, яка відмічена за умов продувки без високовольтної активізації, спостерігалася десульфурация на рівні 13,2 та 5,45 % відповідно для

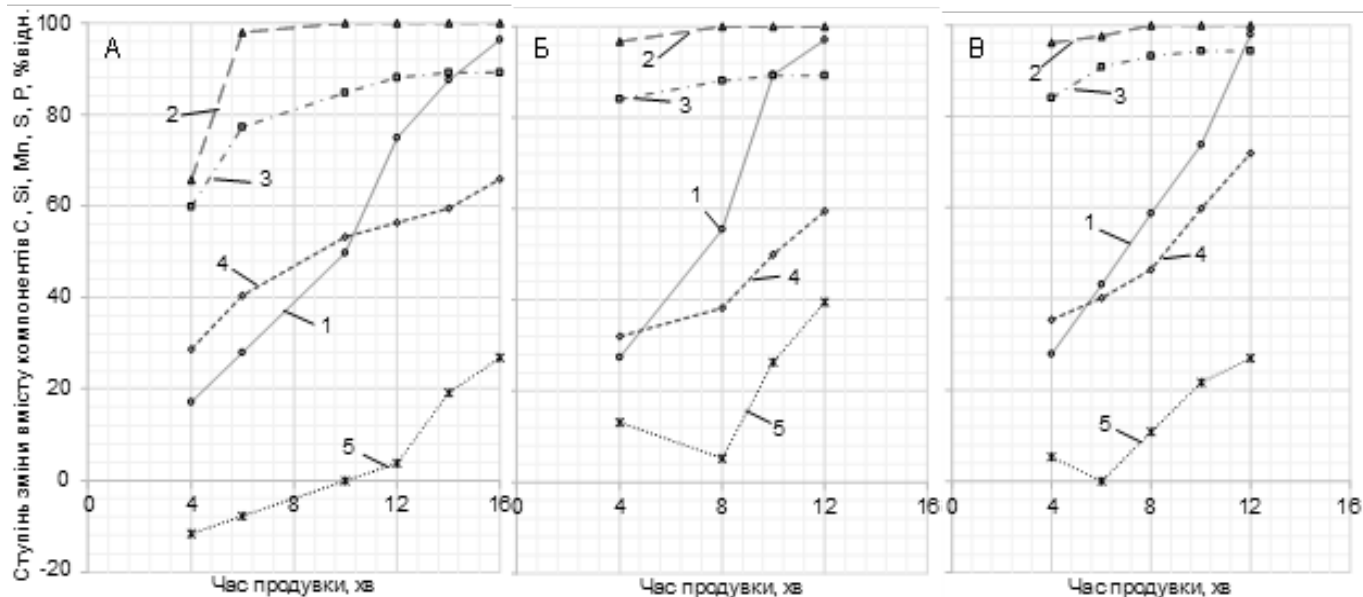


Рис. 2. Приклад зміни компонентів розплаву у часі за умов продувки киснем крізь кільцеве щілинне сопло без високовольтної активізації (А), кільцеве щілинне сопло з високовольтною активізацією (Б), наконечник з щілинним кільцевим та трьома циліндричними соплами з високовольтною активізацією (В). Зміна ступеня окислення компонентів розплаву: 1 — вуглецю; 2 — кремнію; 3 — марганцю; 4 — фосфору; 5 — сірки

умов продувки крізь щілинне сопло з високовольтною активізацією та щілинне сопло з додатковими трьома циліндричними соплами та активізацією. Цей результат кореспондується з висновками, отриманими за результатами аналізу відеоматеріалу продувок. Встановлено, що «запалювання плавки», яке обумовлене початком процесу окислення складових краплин металу, які потрапляють у потік кисню, за умов використання високовольтної активізації відбувалося швидше на 5—10 %. Швидкість асиміляції першої порції вапна, яка також пов'язана з процесом окислення компонентів розплаву з утворенням первинного шла-

ку з достатнім вмістом оксидів заліза, з наведенням відповідно рідкорухомого шлаку відбувалася на 10—15 % активніше за умов високовольтної активізації. Для порівняння, час до «запалювання плавки» та час асиміляції вапна для варіанту продувки крізь щілинне сопло без активізації у порівнянні з продувкою крізь звичайну чотирьохсоплову фурму був меншим в середньому на 20 % [9, 27]. Слід відзначити особливості процесу «запалювання плавки» за умов продувки крізь щілинне сопло з додатковими циліндричними соплами за умов високовольтної активізації (на рис. 3—4 наведено приклади поетапного розвитку процесу «запалювання» під час продувки з високовольтною активізацією крізь щілинне сопло та щілинне сопло з додатковими циліндричними соплами).

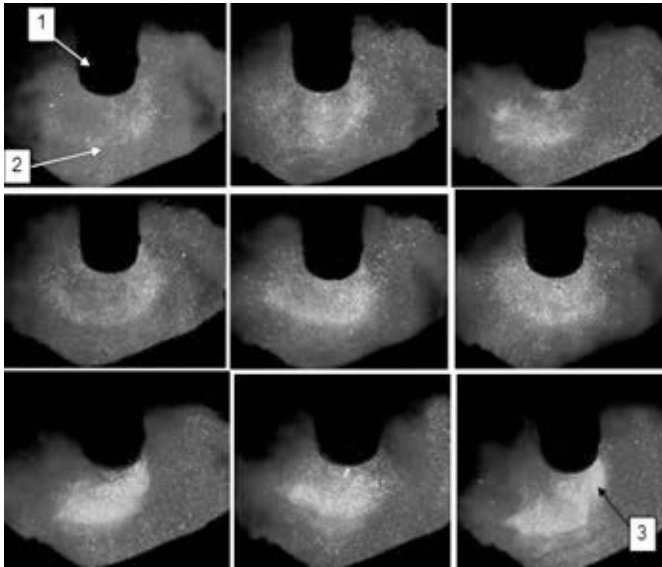


Рис. 3. Динаміка процесу «запалювання плавки» під час продувки крізь щілинне сопло з високовольтною активізацією: 1 — продувна фурма; 2 — колоподібна ділянка подрібнених під дією газового струменя крапель металу, які згоряють в потоці кисню; 3 — початкова високотемпературна зона горіння

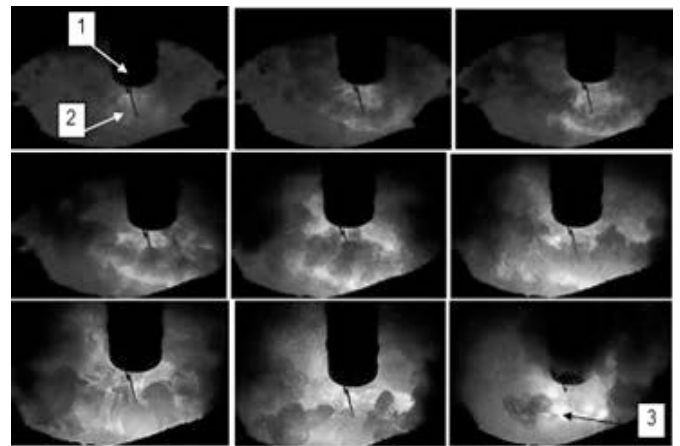


Рис. 4. Динаміка процесу «запалювання плавки» під час продувки крізь щілинне сопло з додатковими циліндричними соплами з високовольтною активізацією: 1 — продувна фурма; 2 — колоподібна ділянка подрібнених під дією газового струменя крапель металу, які згоряють в потоці кисню та розходяться ванною; 3 — початкова високотемпературна зона горіння

По-перше, відзначимо, що за умов верхньої продувки саме тип продувочного пристрою чинить найбільший вплив на всі обмінні процеси завдяки особливостям гідродинамічної взаємодії газового струменя, що формується, з рідкою ванною. Тому за умов продувки крізь щілинне сопло з високовольтною активізацією за процес «запалювання» більшою мірою відповідає жорсткий газовий кільцевий струмінь, який при взаємодії з поверхнею ванни утворює дуже дрібні краплі в обмеженому полі дії струменя по колу взаємодії. Завдяки розвинутій поверхні цих дрібних крапель відбувається їх активна взаємодія з кисневим потоком, що зумовлює швидке окислення компонентів розплаву крапель (а саме: заліза, кремнію та вуглецю), яке супроводжується горінням. Це створює умови для процесу «запалювання плавки». Цей процес також обумовлює активне наведення первинного шлаку, що містить достатню кількість оксидів заліза. Однак, коли до щілинного сопла було додано три бічні циліндричні сопла (при збереженні однакової загальної прохідної площі сопел) було відмічено значне розширення площі дії струменя з утворенням яскраво палаючих концентричних хвиль, що розходилися поверхнею ванни. Візуальна поява

яскравої первинної ділянки горіння була відмічена швидше, ніж за умов продувки тільки крізь щілинне сопло з високовольтною активізацією. Це забезпечувало на початковому етапі продувки ініціювання процесу горіння вуглецю вже з самої поверхні ванни й відображалось у ще більш активнішому «запалюванні плавки».

Відповідно, підвищення ступеня окислення всіх компонентів розплаву вже на ранніх етапах продувки за умов високовольтної активізації можна пов'язати з комплексною дією гідродинамічних особливостей взаємодії щілинного кільцевого газового потоку з рідкою ванною та з дією більш активного газового окислювача — озону, який впливав також на процеси раннього шлакоутворення у порівнянні з продувкою крізь щілинне сопло без активізації, адже всі інші умови продувки були аналогічні продувці без високовольтної активізації.

В подальшому тенденція на більш активне окислення основних компонентів, таких як вуглець, кремній, марганець, за умов високовольтної активізації зберігалася до кінця продувки, що пояснюється як високою активністю озону, так і більш високою температурою у підфурменій області — у

реакційній зоні за умов високовольтної активізації [9, 27]. Відмічено, що до класичного вигляду діаграма зміни концентрації вуглецю за ходом продувки найбільше була схожа у варіанті використання тільки щільного сопла без високовольтної активізації [28]. Для умов продувки з високовольтною активізацією діаграма мала більш крутий кут нахилу відносно горизонталі, що свідчило про активніше окислення вуглецю. Також слід відзначити, що по відношенню до домішок сірки та фосфору за умов продувки з високовольтною активізацією видалення цих домішок і починалося раніше ніж за умов продувки без активізації (відмічено вище початковий приріст показника видалення на 4-й хвилині), та й основний процес видалення домішок відбувався раніше (з 8-ї та 6-ї хвилин проти 10—12-ї хвилин за умов продувки без активізації). При цьому найбільші показники ступеня видалення цих домішок були отримані за умов продувки з високовольтною активізацією крізь щільне сопло з додатковими циліндричними соплами: підвищення до кінця продувки показника видалення фосфору та сірки на 12,8 % відн. та 10,4 % відн. відповідно у порівнянні з продувкою без активізації. За умов продувки з активізацією крізь щільне сопло рівень дефосфорації до кінця продувки був нижчим, не дивлячись на кращі стартові позиції. Це було перш за все пов'язане з низьким рівнем та кількістю шлаку через високу жорсткість продувки крізь цей тип сопла. Причому жорсткість продувки за умов високовольтної активізації була вище, ніж при продувці без активізації, ймовірно, через підвищену динаміку окислення основних компонентів. Вимір рівня ванни за ходом продувки (на рис. 5 наведено у якості прикладу характерну зміну рівня ванни за ходом продувки для трьох розглянутих варіантів продувок) вказує, що за умов продувки крізь щільне сопло без високовольтної активізації складаються умови для шлакоутворення та спінювання ванни після двох присадок вапна (на 1-й та 3-й хвилинах продувки), які сприяли підйому ванни вище рівня розміщення фурми на 17 % відн. Однак через високу жорсткість дуття надалі ванна значно осідала, і її рівень майже протягом всієї продувки знаходився достатньо низько відносно продувної фурми. За умов продувки крізь щільне сопло з високовольтною активізацією також на початковому етапі продувки рівень ванни мав аналогічну попередньому варіантові тенденцію до зростання від початкового рівня до 12 % тривалості продувки (час для засвоєння першої порції вапна на 1-й хвилині продувки). У цей час відмічено близький рівень підйому ванни, що, ймовірно, перш за все зумовлено впливом щільного сопла на гідродинамічні показники продувки.

Однак подальший ріст ванни з другою порцією вапна був досить повільним і досягав максимуму пізніше, ніж за умов продувки тільки крізь щільне сопло без активізації до часу приблизно 30—35 % тривалості продувки з меншим на 6—10 % відн. ніж за попередніх умов максимальним рівнем підйому ванни. Й у подальшому спостерігався значний спад рівня ванни з оголенням реакційної високотемпературної

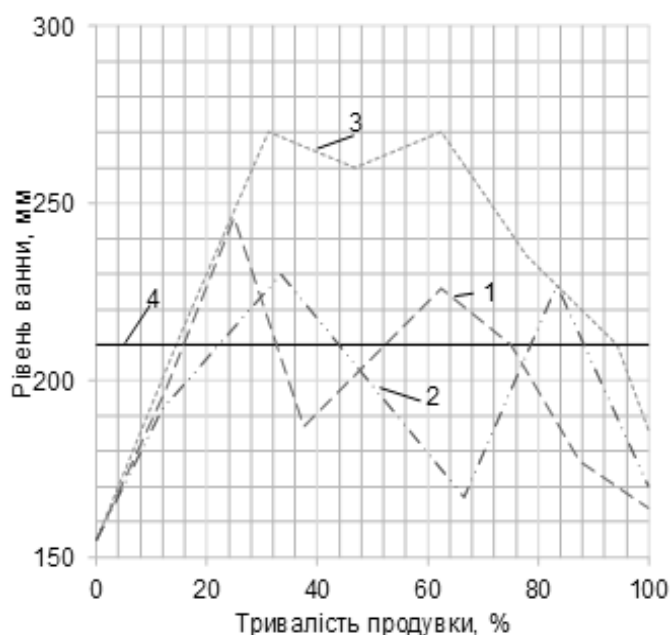


Рис. 5. Зміна рівня ванни за ходом плавки за умов продувки крізь: 1 — щільне сопло без високовольтної активізації; 2 — щільне сопло з високовольтною активізацією; 3 — щільне сопло з високовольтною активізацією з додатковими циліндричними соплами; 4 — висота розміщення продувної фурми

зони. Про це свідчать фото продувки у цей період (на рис. 6 наведено приклади фрагментів продувки в однаковий період після засвоєння другої порції вапна за умов продувки з високовольтною активізацією), на яких видно невелику кількість, проте достатньо рідкорухомого, шлаку (свідчення зроблене за візуальною легкістю утворення високих сплесків шлаку) та яскраву ділянку реакційної зони, яку шлак не покриває. Такий досить низький рівень шлаку у цьому варіанті спостерігався майже протягом всієї продувки

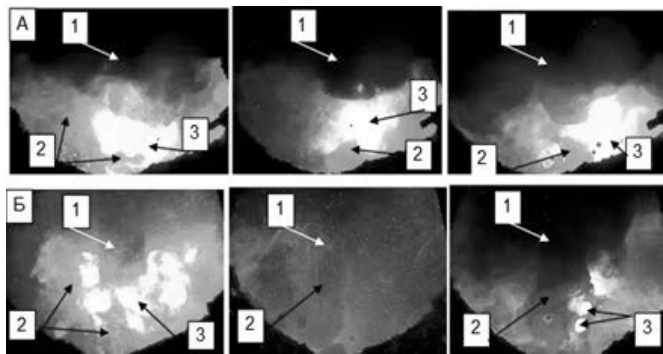


Рис. 6. Приклади характерних моментів верхньої продувки конвертерної ванни з використанням високовольтної активізації: А — продувка крізь щільне сопло; Б — продувка крізь щільне сопло з додатковими циліндричними соплами: 1 — продувна фурма; 2 — шлакова фаза; 3 — високотемпературна реакційна зона

плавки. Відповідно спостерігалася можливість згорання шлаку, про що свідчать результати хімічного аналізу кінцевих проб шлаку (рис. 7). Хімічний аналіз шлаку вказує, що найвищий рівень оксиду кальцію в шлаку та досить низький рівень оксидів заліза двовалентного відповідав варіанту продувки з високовольтною активізацією (відмінність складала приблизно

30—40 %відн. у порівнянні з іншими варіантами). Однак згорання не відбувалося через дуже високу температуру підфурменої області завдяки впливу високовольтної активізації на процеси окислення основних компонентів розплаву та невеликому обсягу лабораторного конвертера.

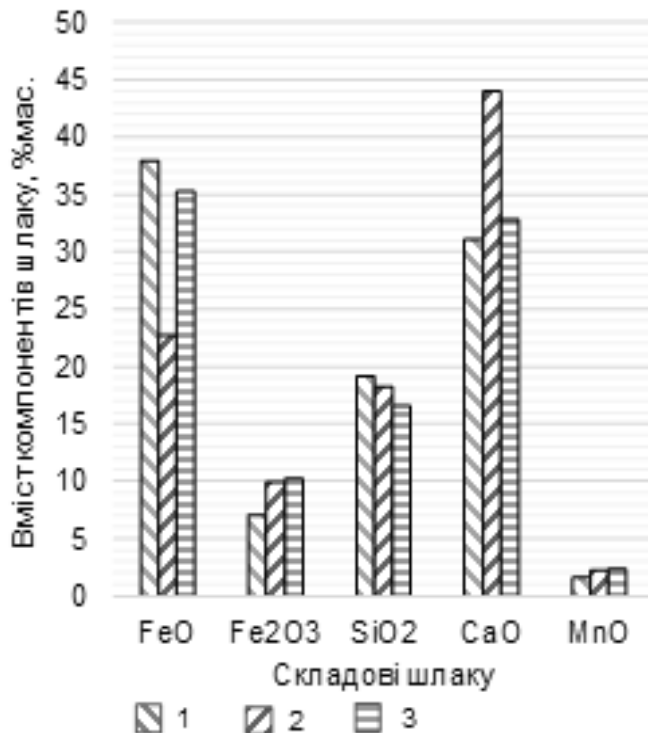


Рис. 7. Порівняння вмісту компонентів кінцевого шлаку на плавках за умов продувки крізь: 1 — щілинне сопло без високовольтної активізації; 2 — щілинне сопло з високовольтною активізацією; 3 — щілинне сопло з високовольтною активізацією з додатковими циліндричними соплами

Продувка ванни крізь щілинне сопло з додатковими циліндричними соплами з високовольтною активізацією значно відрізнялася більш рівномірним та м'яким ходом продувки: спостерігалася активне утворення та спінювання шлаку з активним підйомом ванни після засвоєння двох порцій вапна на рівень вище продувної фурми на 23—28 %відн.; швидке покриття поверхні металу шлаком й загалом вся продувка відбувалася під шлаком, що позитивно відбивалося в першу чергу на процесах видалення домішок сірки й фосфору (див. рис. 2). При цьому відмічено підвищення вмісту оксидів заліза у шлаку у півтора рази у порівнянні з варіантом продувки крізь щілинне сопло з активізацією, які й сприяли засвоєнню вапна та підйому ванни.

Додатково слід відзначити, що для обох варіантів конструкції наконечника фурми, на плавках з використанням високовольтної активізації, був відмічений

підвищений вміст оксидів заліза (III) (в середньому на 40—45 %відн. у порівнянні з продувкою без активізації, див. рис. 7). Цей факт також відображає підвищену окислювальну здатність озону, який формується під час активізації, та кореспондується з відміченою вище особливістю характеру отриманих діаграм зміни вмісту вуглецю у розплаві.

Висновки

Відповідно до отриманих результатів аналізу проведених високотемпературних досліджень продувки металевого розплаву активізованим високовольтним електричним розрядом кисневим потоком за різних конструкцій продувочного наконечника можна зробити наступні висновки.

1) Продувка крізь лише щілинне сопло без активізації:

- має жорсткий характер взаємодії газового струменя з розплавом з низьким рівнем підйому ванни;

- сприяє активному «запалюванню плавки» через значне подрібнення поверхні ванни з утворенням достатньої кількості дрібних крапель металу, що згоряють у кисневому потоці;

- сприяє зростанню кількості оксидів заліза у шлаку також через значне подрібнення поверхні взаємодії з газовим потоком й активне окислення дрібних крапель металу.

2) Продувка крізь щілинне сопло з високовольтною активізацією:

- сприяє активному «запалюванню плавки»;

- сприяє активному окисленню всіх компонентів розплаву;

- характеризується підвищенням вмісту заліза III в шлаку;

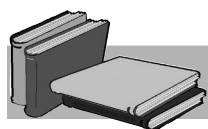
- має значно жорсткіший характер у порівнянні з варіантом без активізації;

- сприяє активнішому засвоєнню першої порції вапна, проте друга його порція засвоюється повільніше через високу жорсткість продувки;

- має низький рівень ванни;

- додавання трьох циліндричних сопел до щілинного нормалізує режим шлакоутворення за ходом продувки, що позитивно відбивається на всіх показниках продувки, у тому числі покращує видалення домішок сірки й фосфору.

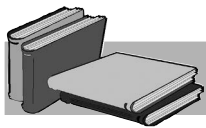
Автори висловлюють щиру подяку співробітникам кафедри металургії ім. проф. В.І. Логінова ДДТУ на чолі з завідувачем кафедри проф., д.т.н. Сігарьовим Є.М., за допомогу у організації та проведенні високотемпературних досліджень, результати яких є предметом статті.



ЛІТЕРАТУРА

1. Семикин С.И., Поляков В.Ф., Семикина Е.В. Исследование электрических характеристик, присущих процессу конвертирования железоуглеродистого расплава. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2006. Вып. 12. С. 133—140.
2. Semykin S.I., Golub T.S. Investigation of electric potential difference during the top oxygen blowing in converter. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2018. Vol. 88. No. 1. P. 35—40. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.5869>
3. Семикин С.И., Поляков В.Ф., Дудченко С.А., Голуб Т.С., Вакульчук В.В., Семикина Е.В. Экспериментальные исследования в лабораторных условиях ИЧМ эффективности влияния электрических воздействий на расплав чугуна при его внепечном рафинировании гранулированным магнием. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2013. Вып. 27. С. 111—116.
4. Семикин С.И., Поляков В.Ф., Семикина Е.В. Ресурс- и энергосберегающая технология конвертерной плавки с электрическими воздействиями. *Металл и литье Украины*. 2004. № 11. С. 46—48.
5. Semykin S.I., Golub T.S., Dudchenko S.A. Improving the Efficiency of the Low-Voltage Potential Application Method at Top Oxygen Blowing in Converter. *Sci. innov*. 2020. Vol. 16. No. 2. P. 72—79. <https://doi.org/10.15407/scine16.02.072>
6. Семикин С.И., Поляков В.Ф., Семикина Е.В., Кияшко Т.С., Семикина А.С. Сопоставление эффективности рафинирования металла в конвертере и сталеразливочном ковше при наложении электрического потенциала. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2009. Вып. 19. С. 134—139.
7. Семикин С.И., Поляков В.Ф., Семикина Е.В. Исследование совместного воздействия на жидкую железо-углеродистую ванну электрических и магнитных полей. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 1999. Вып. 3. С. 188—193.
8. Семикин С.И., Поляков В.Ф., Семикина Е.В. Комплексное использование низковольтной электрической энергии при конвертерной плавке. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2005. Вып. 11. С. 105—109.
9. Semykin S.I., Golub T.S., Molchanov L.S., Dudchenko S.O., Vakulchuk V.V. Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2025. Vol. 83. No. 2. P. 107—116. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.09>
10. McElroy C.T., Fogal P.F. Ozone: From discovery to protection. *Atmosphere-Ocean*. 2008. Vol. 46. Iss. 1. P. 1—13. <https://doi.org/10.3137/ao.460101>
11. Manley T.C., Niegowski S.J. Ozone encyclopedia of chemical technology. New York: John Wiley & Sons, 1967. 432 p.
12. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. за ред. В.С. Білецького. Д.: Донбас, 2007. т. 2: Л—Р. 670 с.
13. Wei L., Xu S., Sun S., Zhang Y. Research progress in ozone generation technology and applications: A review. *Process Safety and Environmental Protection*. 2026. Vol. 208. Art. 108460. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2026.108460>
14. Cook G.A. Industrial uses of ozone. *J. Chem. Educ.* 1982. Vol. 59. Iss. 5. Art. 392. <https://doi.org/10.1021/ed059p392>
15. Epelle E.I., Macfarlane A., Cusack M., Burns A., Okolie J.A., Mackay W., Rateb M., Yaseen M. Ozone application in different industries: A review of recent developments. *Chemical Engineering Journal*. 2023. Vol. 454. Part 2. Art. 140188. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140188>
16. Leontieff D.A., Ikehata K., Inanaga Y., Furukawa S. Ozone for Industrial Wastewater Treatment: Recent Advances and Sector Applications. *Processes*. 2025. Vol. 13. Iss. 8. Art. 2331. <https://doi.org/10.3390/pr13082331>
17. Epelle E.I., Macfarlane A., Cusack M., Burns A., Thissera B., Mackay W., Rateb M.E., Yaseen M. Bacterial and fungal disinfection via ozonation in air. *Journal of Microbiological Methods*. 2022. Vol. 194. Art. 106431. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2022.106431>
18. Viñals J., Juan E., Ruiz M., Ferrando E., Cruells M., Roca A., Casado J. Leaching of gold and palladium with aqueous ozone in dilute chloride media. *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 81. Iss. 2. P. 142—151. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.12.004>
19. Kholikulov D.B., Aripov A.R., Khujakulov N.B., Buronov A.B., Azimova A.B. Extraction of metals by using ozone from residue solutions of metallurgical production. Proceedings of the II International Conference “Integrated Innovative Development of the Zarafshan Region: Achievements, Problems and Prospects”: collection of articles. Navoi: Alisher Navoi Publishing House, 2019. P. 65—68.
20. Havlik T., Skrobjan M. Acid Leaching of Chalcopyrite in the Presence of Ozone. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1990. Vol. 29. Iss. 2. P. 133—139. <https://doi.org/10.1179/000844390795576102>
21. Kuznetsova A., Yates J.T., Zhou G., Yang J.C., Chen X. Making a Superior Oxide Corrosion Passivation Layer on Aluminum Using Ozone. *Langmuir*. 2001. Vol. 17. Iss. 7. P. 2146—2152. <https://doi.org/10.1021/la001300x>
22. Saidinik F., Behnejad H. Comparing oxidation of aluminum by oxygen and ozone using reactive force field molecular dynamics simulations. *J. Nanopart. Res.* 2023. Vol. 25. Art. 95. <https://doi.org/10.1007/s11051-023-05739-w>
23. Fink C.K., Nakamura K., Ichimura S., Jenkins S.J. Silicon oxidation by ozone. *Phys. Condens. Matter*. 2009. Vol. 21. No. 18. Art. 183001. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/18/183001>

24. Kazor A., Boyd I.W. Ozone-induced rapid low temperature oxidation of silicon. *Appl. Phys. Lett.* 1993. Vol. 63. Iss. 18. P. 2517—2519. <https://doi.org/10.1063/1.110467>
25. Пат. SU1354713, С 21 С 5/04. Липухин Ю.В., Щеголев А.П., Жаворонков Ю.И., Давыдов Ю.Н., Николаев Б.Н., Климов Л.П., Зинченко С.Д. Метод выплавки стали. Заявка 3979015/02 от 22.11.85. Оpubл. 15.01.92, Бюл. № 2.
26. Liu J., Peng X., Wang X., Zhong X., Wang J. Electrochemical ozone production: from fundamental mechanisms to advanced applications. *EES Catal.* 2025. Vol. 3. P. 170—204. <https://doi.org/10.1039/D4EY00204K>
27. Семикін С.І., Голуб Т.С., Дудченко С.О., Вакульчук В.В., Прокопенко П.Г. Дослідження особливостей розповсюдження озону за кисневим струменем, створеного високовольтним електричним розрядом на виході з продувочної фурми. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки.* 2025. Вип. 51. С. 86—93. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344661>
28. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология. Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2006. 454 с.



REFERENCES

1. Semykin, S. I., Poliakov, V. F., & Semykina, Ye. V. (2006). Issledovanie elektricheskikh harakteristik, prisushchih processu konvertirovaniya zelezo-uglerodistogo rasplava [A study of the electrical characteristics inherent in the process of converting of iron-carbon melts]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (12), 133-140 [in Russian].
2. Semykin, S. I., & Golub, T. S. (2018). Investigation of electric potential difference during the top oxygen blowing in converter. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 88(1), 35-40. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.5869>
3. Semykin, S. I., Poliakov, V. F., Dudchenko, S. A., Golub, T. S., Vakulchuk, V. V., & Semykina, Ye. V. (2013). Eksperimentalnye issledovaniya v laboratornykh usloviiah ICHM effektivnosti vliianiya elektricheskikh vozdeistviy na rasplav chuguna pri ego vnepechnom rafinirovani granulirovannym magniym [Experimental studies in laboratory conditions of ISI NASU of the effectiveness of the influence of electrical effects on the hot metal melt during its out-of-furnace refining with granulated magnesium]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (27), 111-116 [in Russian].
4. Semykin, S. I., Poliakov, V. F., & Semykina, Ye. V. (2004). Resurso- i energosberegashaia tehnologia konverternoi plavki s elektricheskimi vozdeistviyami [Resource- and energy-saving converter melting technology with electrical influences]. *Metal and Casting of Ukraine*, (11), 46-48 [in Russian].
5. Semykin, S. I., Golub, T. S., & Dudchenko, S. A. (2020). Improving the Efficiency of the Low-Voltage Potential Application Method at Top Oxygen Blowing in Converter. *Sci. innov.*, 16(2), 72-79. <https://doi.org/10.15407/scine16.02.072>
6. Semykin, S. I., Poliakov, V. F., Semykina, Ye. V., Kiiashko, T. S., & Semykina, A. S. (2009). Sopostavlenie effektivnosti rafinirovaniya metalla v konvertere i stalerazlivnochnom kovshe pri nalozenii elektricheskogo potentsiala [Comparison of the efficiency of metal refining in a converter and a steel-pouring ladle under the application of an electric potential]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (19), 134-139 [in Russian].
7. Semykin, S. I., Poliakov, V. F., & Semykina, Ye. V. (1999). Issledovanie sovmestnogo vozdeistvia na zidkuu zelezo-uglerodistuiu vannu elektricheskikh i magnitnykh polei [A study of the combined effects of electric and magnetic fields on a liquid iron-carbon bath]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (3), 188-193 [in Russian].
8. Semykin, S. I., Poliakov, V. F., & Semykina, Ye. V. (2005). Kompleksnoe ispolzovanie nizkovoltnoi elektricheskoi energii pri konverternoi plavke [Integrated use of low-voltage electrical energy in converter melting]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (11), 105-109 [in Russian].
9. Semykin, S. I., Golub, T. S., Molchanov, L. S., Dudchenko, S. O., & Vakulchuk, V. V. (2025). Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters. *Energy Technologies & Resource Saving*, 83(2), 107-116. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.09>
10. McElroy, C. T., & Fogal, P. F. (2008). Ozone: From discovery to protection. *Atmosphere-Ocean*, 46(1), 1-13. <https://doi.org/10.3137/ao.460101>
11. Manley, T. C., & Niegowski, S. J. (1967). Ozone encyclopedia of chemical technology. New York: John Wiley & Sons, 432 p.
12. Biletskii, V. S. (Ed.) (2007). Mala hirnycha entsiklopedia [Small Mining Encyclopedia]. Donbas, vol. 2, 670 p. [in Ukrainian].
13. Wei, L., Xu, S., Sun, S., & Zhang, Y. (2026). Research progress in ozone generation technology and applications: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 208, 108460. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2026.108460>
14. Cook, G. A. (1982). Industrial uses of ozone. *J. Chem. Educ.*, 59(5), 392. <https://doi.org/10.1021/ed059p392>
15. Epelle, E. I., Macfarlane, A., Cusack, M., Burns, A., Okolie, J. A., Mackay, W., Rateb, M., & Yaseen, M. (2023). Ozone application in different industries: A review of recent developments. *Chemical Engineering Journal*, 454, part 2, 140188. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140188>

16. Leontieff, D. A., Ikehata, K., Inanaga, Y., & Furukawa, S. (2025). Ozone for Industrial Wastewater Treatment: Recent Advances and Sector Applications. *Processes*, 13(8), 2331. <https://doi.org/10.3390/pr13082331>
17. Epelle, E. I., Macfarlane, A., Cusack, M., Burns, A., Thissera, B., Mackay, W., Rateb, M. E., & Yaseen, M. (2022). Bacterial and fungal disinfection via ozonation in air. *Journal of Microbiological Methods*, 194, 106431. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2022.106431>
18. Viñals, J., Juan, E., Ruiz, M., Ferrando, E., Cruells, M., Roca, A., & Casado, J. (2006). Leaching of gold and palladium with aqueous ozone in dilute chloride media. *Hydrometallurgy*, 81(2), 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.12.004>
19. Kholikulov, D. B., Aripov, A. R., Khujakulov, N. B., Buronov, A. B., & Azimova, A. B. (2019). Extraction of metals by using ozone from residue solutions of metallurgical production. Proceedings of the II International Conference "Integrated Innovative Development of the Zarafshan Region: Achievements, Problems and Prospects": collection of articles. Navoi: Alisher Navoi Publishing House, 65-68.
20. Havlik, T., & Skrobjan, M. (1990). Acid Leaching of Chalcopyrite in the Presence of Ozone. *Can. Metall. Q.*, 29(2), 133-139. <https://doi.org/10.1179/000844390795576102>
21. Kuznetsova, A., Yates, J. T., Zhou, G., Yang, J. C., & Chen, X. (2001). Making a Superior Oxide Corrosion Passivation Layer on Aluminum Using Ozone. *Langmuir*, 17(7), 2146-2152. <https://doi.org/10.1021/la001300x>
22. Saidinik, F., & Behnejad, H. (2023). Comparing oxidation of aluminum by oxygen and ozone using reactive force field molecular dynamics simulations. *J. Nanopart. Res.*, 25, 95. <https://doi.org/10.1007/s11051-023-05739-w>
23. Fink, C. K., Nakamura, K., Ichimura, S., & Jenkins, S. J. (2009). Silicon oxidation by ozone. *Phys. Condens. Matter.*, 21(18), 183001. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/18/183001>
24. Kazor, A., & Boyd, I. W. (1993). Ozone-induced rapid low temperature oxidation of silicon. *Appl. Phys. Lett.*, 63(18), 2517-2519. <https://doi.org/10.1063/1.110467>
25. Pat. SU1354713, C 21 C 5/04. Lipuhin, Yu. V., Shcheholev, A. P., Zhavoronkov, Yu. I., Davydov, Yu. N., Nikolaev, B. N., Klimov, L. P., Zinchenko, S. D. [Method of steelmaking]. App. 3979015/02 22.11.85; Publ. 15.01.92, Bull. 2 [in Russian].
26. Liu, J., Peng, X., Wang, X., Zhong, X., & Wang, J. (2025). Electrochemical ozone production: from fundamental mechanisms to advanced applications. *EES Catal.*, 3, 170-204. <https://doi.org/10.1039/D4EY00204K>
27. Semykin, S. I., Golub, T. S., Dudchenko, S. O., Vakulchuk, V. V., & Prokopenko, P. G. (2025). Research of the features of ozone propagation along an oxygen jet created by a high-voltage electric discharge at the outlet of a blowing lance. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Series: Technical Sciences*, (51), 86-93. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344661> [in Ukrainian].
28. Boichenko, B. M., Okhotskii, V. B., & Harlashin, P. S. (2006). Konvertornoe proizvodstvo stali: teoria, tehnologia, kachestvo stali, konstruksii agregatov, retsirkoliatsia materialov i ekologia [Converter steel production: theory, technology, steel quality, unit designs, material recycling and ecology]. Dnepr-VAL [in Russian].

Надійшла/Received 13.02.2026

Прийнята/Accepted 11.03.2026

Опублікована/Published 31.03.2026

Summary

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>
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>
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>
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>

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

High-Temperature Study of the Features of the Top Blowing of the Converter Bath using Lances that Provide Ozone Generation by High-Voltage Electrical Discharge

In modern conditions, the oxygen-converter method of steel production remains one of the most common methods of obtaining metal for structural purposes. At the same time, its productivity is determined by the speed of the course of oxidative chemical processes, which include the removal of excess impurities such as silicon, sulfur, phosphorus and carbon. When using the classical technology of oxygen-converter smelting, technically pure oxygen is used as an oxidant. In order to increase the speed of oxidative chemical transformations in the slag-metal bath of an oxygen converter, the authors conducted a high-temperature study to determine the features of the influence of additional introduction of ozone into the oxidizing gas on the features of the course of the parameters of the converter process. A feature of the specified study was the use of the method of ozone generation directly at the nozzle outlet due to the influence of a high-voltage electric discharge. For ozone generation, lances of a special design were developed: with a slot nozzle and with a slot nozzle and three cylindrical nozzles. During the research it was found that the blowing through the slot nozzle was characterized by a rigid interaction with the slag-metal phase, which is reflected in the low level of bath during blowing, however, the slag was characterized by sufficient fluid mobility due to the increased content of iron oxides and provides sufficient indicators of phosphorus and sulfur removal. The use of a lance equipped with a slot nozzle with high-voltage activation of the oxygen flow contributes to an increase in the efficiency of oxidation processes and, as a result, causes an increase in the content of iron III oxides in the slag. However, high-voltage activation in this case was accompanied by a significant increase in the rigidity of the blowing. The hydrodynamic mode of melting was normalized by introducing three additional cylindrical nozzles into the tip design (while maintaining the overall throughput). This contributed to the acceleration of the "melt ignition", the activation of all oxidation processes in the slag-metal phase with high efficiency of lime absorption and slag formation.

Keywords

Oxygen blowing in the converter, oxygen lance with a slot nozzle, ozone, high-voltage electrical activation, oxidation processes.