

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ОЗОНУ ЗА КИСНЕВИМ СТРУМЕНЕМ, СТВОРЕНОГО ВИСОКОВОЛЬТНИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ РОЗРЯДОМ НА ВИХОДІ З ПРОДУВНОЇ ФУРМИ

Семикін С.І.	канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7365-2259 , e-mail: isisemykin@gmail.com ;
Голуб Т.С.	канд. техн. наук, ст. дослідник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9269-2953 , e-mail: isinasu.golubts@gmail.com ;
Дудченко С.О.	канд. техн. наук, ст. наук. співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7319-9896 , e-mail: s.dudchenko@meta.ua ;
Вакульчук В.В.	канд. техн. наук, наук. співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7887-2843 , e-mail: vvakulchuk@gmail.com ;
Прокопенко П.Г.	головний метролог, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7645-1740 , e-mail: ogm-ichm@ukr.net

Ключовою ланкою для киснево-конвертерного процесу є протікання окислювально-відновних обмінних процесів за участю кисню, які є гетерогенними та мають різний час перебігу в залежності від місця перебігу, «дійових осіб» окрім кисню, інтенсивності руху розплавлених мас та активності самого кисневого потоку (того, як і у якій кількості кисень проникає між межами розділу фаз, що взаємодіють, та реагує з іншими елементами). Відповідно для його інтенсифікації необхідно активізувати процеси окислення, що можливо завдяки активізації кисневого потоку, наприклад, при перетворенні частини кисню на озон. В роботі проведено дослідження генерації озону високовольтним електричним розрядом безпосередньо на виході з продувного сопла верхньої кисневої фурми та його розподілу за кисневим струменем. Встановлено, що максимальний рівень концентрації озону за довжиною струменя спостерігається на відстані 5-7 калібрів та у подальшому при розширенні струменя його концентрація зменшується в результаті розбавлення киснем. Відповідно до досліджень за перетином встановлено зосередження озону в центрі струменя впродовж усього потоку. За отриманими результатами було зроблено емпіричний коефіцієнт розширення кисневого струменя для оцінки продуктивності озону. Встановлено, що при локалізації розряду на виході з продувного сопла на відстані 40 калібрів (що є робочою висотою розміщення продувної фурми відносно рівня металевої ванни у кисневому конвертері у промислових умовах) за довжиною кисневого струменя продуктивність озону складатиме 15 мг/хв, що, на думку авторів, є достатнім для проведення активізації окислювальних обмінних процесів.

Ключові слова: озон, продуктивність генерації, киснева фурма, киснева продувка, газовий струмінь, високовольтний розряд.

Постановка проблеми

Світове виробництво сталі в сучасних умовах є єдиним надійним способом масового виробництва конструкційного матеріалу та підтримується на стало високому рівні [1]. Із загального виробництва сталі в 1,885 мільярда тон у 2024 році як на Європейських, так і в своїй більшості на світових металургійних заводах основний киснево-конвертерний процес відіграє переважну роль. Його частка 70,4% у загальному світовому масштабі, 55,6% у країнах Європейського союзу й 60,9% у країнах СНД [1]. Більшість використовуваних процесів відповідають кисневим конвертерам з верхнім дуттям. Тому продуктивність, економічність і якість сталі, виробленої за допомогою кисневих конвертерів, постійно знаходяться у фокусі уваги сталеливарної промисловості в усьому світі. Ці аспекти, з однієї сторони, визначаються якістю сировини (чавуну,

брухту), а з іншої – динамікою процесу. Конвертерний процес характеризується високою швидкістю реакції, проте, не дивлячись на досить невеликий часовий проміжок, процес постійно потребує інтенсифікації та відповідності швидкостям сучасності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Киснево-конвертерний процес – це складний процес, який відбувається протягом короткого проміжку часу, з дуже невеликою кількістю прямої зворотної інформації в ході процесу та з використанням різних теплоносіїв, основними з яких є рідкий чавун, брухт і залізна руда. Потенціальна теплота цих речовин вивільняється завдяки взаємодії з киснем (як газоподібним, так і розчиненим у об'ємі ванни), який доставляється в процесі плавки за рахунок дії надзвукових струменів з кисневої продувної фурми в обсяг ванни. Реакції

окислення є гетерогенними та мають різний час перебігу. Більша частина реакції відбувається в масштабі дрібної краплі чи газової бульбашки, які розподілені у фазах емульсія шлак/метал/газ. Різниця в геометричних масштабах, як наслідок, зумовлює різницю в масштабах часу: металева ванна може змінюватися протягом усього циклу продувки 12-15 хвилин, тоді як краплі можуть пройти повний цикл рафінування приблизно за хвилину [2-4]. Таким чином, інтенсифікація процесів окислення можлива через активізацію кисневого потоку та його розчинності у розплаві.

Відомо, що озон є більш активним окисником ніж кисень [5, 6]. Найчастіше його використовують у медичних цілях [7-9]. Проте були ідеї його використання у чорній металургії [10, 11]. Головною думкою в цьому випадку є те, що окисні реакції за участі озону повинні відбуватися швидше, ніж при використанні для продувки кисню. Проте ці ідеї не знайшли широкого загалу через той факт, що озон планували створювати поза межами металургійних агрегатів та подавати по трубах. А через низьку стабільність молекул озону, фактична кількість активної речовини, що може дійти до металургійної ванни, була вкрай низька.

Авторами запропонований інший спосіб створення озону високовольтним розрядом безпосередньо на виході з продувної фурми, що повинно вирішити питання швидкого розпаду його молекул під час руху по комунікаціях. Проведене високотемпературне дослідження на 60-кг моделі кисневого конвертера з продувкою зверху (в лабораторних умовах ДДТУ) можливості та ефективності використання електричного розряду для інтенсифікації киснево-конвертерних процесів показало доцільність цього способу. Відмічено підвищення рівня теплоти ванни (в середньому на 250-400°C) та пришвидшення реакції окислення вуглецю (в середньому на 30-40 %) зі скороченням тривалості продувки на 10% та зниженням рівня виділення пилу на 40% в початковий період та 60% в основний період продувки [12]. Для цих досліджень була створена фурма з наконечником спеціальної конструкції, який мав щільне кільцеве сопло з розміщенням всередині електродом для створення іскрового розряду на виході з сопла. Попередні дослідження на високотемпературній 60-кг моделі щодо використання щільного сопла такого типу для верхньої продувки також показали значні відмінності процесу конвертування у порівнянні зі стандартним варіантом продувки крізь чотирисоплову фурму. Відмічено приріст температури вихідних газів (в середньому на 150-200°C), температури у підфурмній області (на 300-400°C), підвищення швидкості окислення вуглецю (на 10-30%) та зниження рівня виділення пилу у початковий період на величину до 6% та у основний період на величину порядку 40% [13, 14]. Тобто під час продувки активізованим іскровим електричним розрядом кисневим потоком металева ванна зазнавала подвійного впливу: як струменів, що витікають з кільцевого щільного сопла, так і впливу сформованого розрядом озону. При цьому, відповідно до

отриманих результатів, ймовірно, приріст тепловмісту ванни у більшій мірі зумовлений використанням кільцевого щільного сопла. Відповідно, необхідно з'ясувати, чи може бути зареєстроване значне підвищення швидкості окислення вуглецю та зниження виділення пилу пов'язане з формуванням озону.

Мета статті

Метою даного дослідження було вивчення розподілу озону за довжиною та шириною кисневого струменя за умов безпосередньої активізації на виході з продувного сопла задля оцінки частки впливу озону в отриманих результатах високотемпературного експерименту.

Виклад основного матеріалу

Для проведення досліджень було створено стенд для фізичного моделювання активізації високовольтним іскровим розрядом (з напругою 25-30 кВ на джерелі струму) кисневого струменя під час продувки крізь кисневу фурму. Функціональна схема установки наведена на рис. 1.

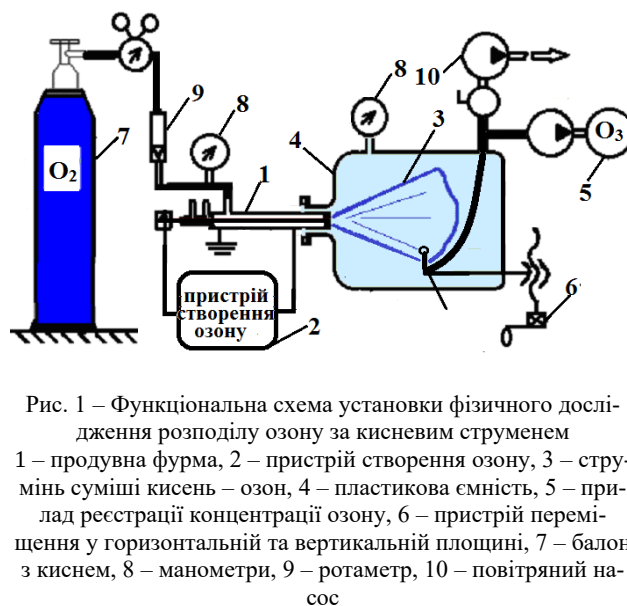


Рис. 1 – Функціональна схема установки фізичного дослідження розподілу озону за кисневим струменем

1 – продувна фурма, 2 – пристрій створення озону, 3 – струмінь суміші кисень – озон, 4 – пластикова ємність, 5 – прилад реєстрації концентрації озону, 6 – пристрій переміщення у горизонтальній та вертикальній площині, 7 – балон з киснем, 8 – манометри, 9 – ротаметр, 10 – повітряний насос

Озон формувався на виході з кільцевого сопла з зовнішнім діаметром $6 \cdot 10^{-3}$ м та внутрішнім $5 \cdot 10^{-3}$ м кисневої продувної фурми за допомогою пристрою створення озону, який створював високовольтний кистьовий розряд (використовувалася та ж фурма, що й у високотемпературних дослідках). Дослідження проводили при фіксованих за допомогою електронного цифрового манометру ДМ5002 рівнях тиску 0,05; 0,1; 0,2 МПа. Вимірювання концентрації озону проводили за допомогою приладу вимірювання озону Циклон 5-21 шляхом відбору порції газової суміші в різних послідовних ділянках газового струменя за довжиною від 2,5 калібрів до 40 калібрів відносно зрізу сопла фурми

в двох напрямках: наближення до сопла та віддалення від сопла. Також вимірювання проведені по перетину уявного контуру кисневого струменя. Кожен вимір повторювали тричі.

Результати та їх обговорення

Результати дослідів вимірювання концентрації озону за довжиною кисневого струменя при різних тисках продувального газу узагальнені на рис. 2. Аналіз отриманих результатів показав, що концентрація озону при віддаленні від сопла знижувалася в результаті розведення його в суміші та за рахунок розширення кисневого струменя із залученням навколишнього середовища. Зіставлення розподілу за довжиною струменя концентрації озону при різних тисках показало, що більш високі концентрації впродовж всього струменя досягалися при невисокому рівні тиску (при 0,05 МПа).

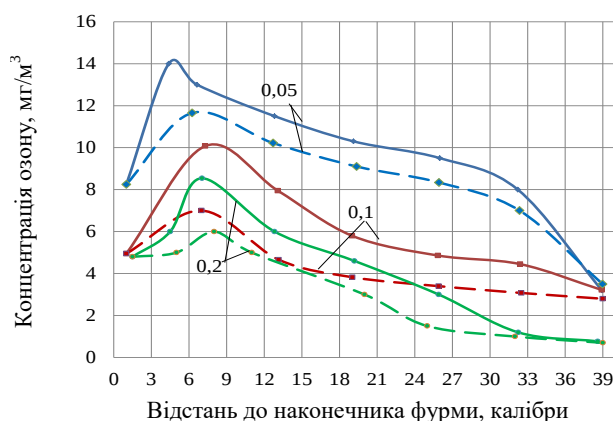


Рис. 2 – Зміна концентрації озону за довжиною струменя при трьох тисках кисню (цифри біля кривих відповідають тиску в МПа; суцільна лінія – переміщення до сопла фурми, пунктирна – від сопла)

Цей ефект пояснюється тим, що при збільшенні тиску кисню збільшувалася швидкість витікання струменя при інших рівних умовах (діаметрі сопла, точці виміру), що призводило до збільшення щосекундної порцій кисню та більшого «розведення» кисневим струменем утвореного озону (оскільки конкретна потужність розряду здатна утворити певну кількість озону з заданого обсягу кисню, що знаходиться в конкретному місці). На рівні 40 калібрів, що відповідає висоті розташування продувної фурми у промислових агрегатах, концентрація озону за дослідних умов складала 1,5-2,0 мг/м³ при тиску продувального газу 0,2 МПа та 3,0-3,5 мг/м³ при тиску 0,1 МПа. Однак слід враховувати те, що під час реальної продувки сталеплавильна ванна знаходиться в постійному русі, і протягом більшого проміжку часу продувки наконечник фурми занурений в шлако-металеву емульсію в результаті підйому ванни. Тому слід брати до уваги концентрацію озону на відстані вже від 5-8 калібрів, рівень якої

вищий й складав 5,00-8,54 мг/м³ при 0,2 МПа та 7-10 при тиску 0,1 МПа (дослідження на високотемпературній моделі проводили при тиску продувального газу 0,1-0,12 МПа).

Також слід відзначити встановлений ефект, який полягає в тому, що при переміщенні датчика у напрямку до сопла, рівень значень озону був вище, ніж при русі від сопла. Це пояснюється складанням концентраційних газових потоків в області пробовідбірника при русі його в сторону зрізу сопла, оскільки відбувається ущільнення газу перед ним. І навпаки, при зворотному русі вхідного отвору пробовідбірника відбувається розрідження газових потоків й середовища перед пробовідбірником.

Результати вимірювання концентрації озону по перетину уявних контурів кисневого струменя наведені на рис. 3 для тиску продувального газу 0,05 МПа (обрано цей варіант через найвищий рівень концентрації озону, що дозволяє найбільш показово проілюструвати відмінність у різних точках. Для інших досліджених тисків продувального газу спостерігалися аналогічні тенденції).

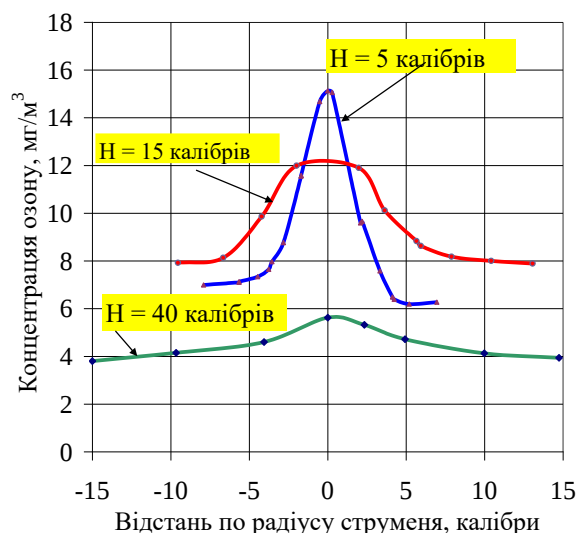


Рис. 3 – Розподіл озону по перетину струменя на відстанях: 5, 15 і 40 калібрів (відмічено біля кривих), при тиску 0,05 МПа

Аналіз профілю і контурів ядра струменя, що містить озон, показав істотне розширення струменя на початковій відстані поблизу наконечника фурми. Як видно з рисунку 3, на початковій ділянці за умов дослідження генерується озон з максимальною концентрацією (аналогічні дані отримані при всіх вивчених значеннях тиску кисню). Рівень значень концентрації озону знижується в міру розширення кисневого струменя у міру віддалення від цієї відстані таким чином, що на відстані 40 калібрів вміст озону знижується в 3 рази.

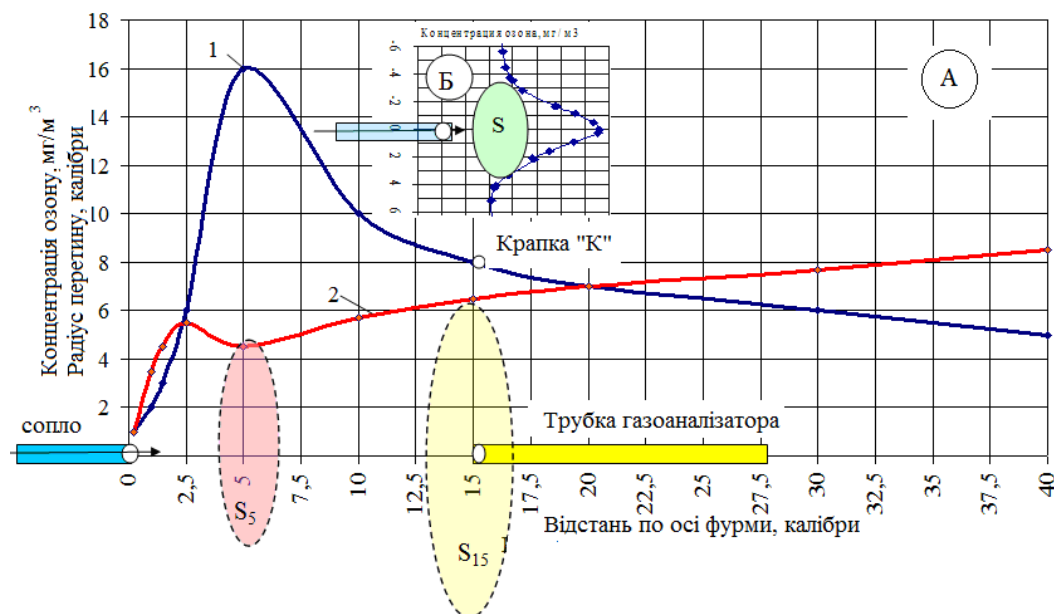


Рис. 4 – Діаграми А – зміни концентрації озону за довжиною вісі струменя (1) та межа струменя (2) (указані перетини на відстані 5-ти й 15-ти калібрів S_5 та S_{15}). Б – розподіл концентрації озону в поперечному перетині струменя для крапки «К»

На рис. 4 показані узагальнені за результатами проведених дослідів зміни концентрації озону за довжиною струменя у співставленні з лініями уявної межі кисневого струменя для тиску продувального газу 0,05 МПа. Видно, що на відстані від зрізу сопла рівному 5 калібрів відбувається формування озону завдяки наявному високовольтному розряду, про що свідчить максимальна кількість озону в цьому перерізі. Ця відстань, за умов формування розряду на виході між електродами на його стінках, зумовлена дією газового потоку на електричний розряд, що спричиняє його «витягування» вздовж центральної вісі [15, 16].

Також встановлено, що частина озону формується ще й всередині фурми в результаті «бар'єрного» ефекту між стінками фурми та пристроєм створення високовольтного розряду для продукування озону (не дивлячись на наявність ізоляції на частині електрода, що розміщено в середині фурми). Про це свідчить поява концентрації озону на ділянці на рівні 2,5 калібрів. Починаючи з даного перетину, струмінь кисню розширюється, що призводить до зниження концентрації озону за довжиною газового струменя пропорційно відношенню величин контрольованих перетинів струменя. Так, при переході від перетину 5 калібрів до перетину 15 калібрів концентрація озону знизилася в 2 рази за рахунок зміни розширення струменя в 2 рази (співвідношення площі перетину струменя на відстані 15 калібрів та 5 калібрів). Відповідно кисневий струмінь можна розділити на три принципово різні ділянки. Перша – найближча до наконечника фурми, до 4-5 калібрів, найскладніша з точки зору умов формування озону через розрив у цьому місці струменя й його вкрай стрімке розширення у порівнянні з умовами виходу з сопла.

Друга – вузька зона перетворень молекул кисню в молекули озону, що локалізується на відстані 5 калібрів сопла. У цьому місці завдяки електричному високовольтному розряду, що «пробігає» крізь кисневий струмінь, формується озон. Далі за довжиною струменя розміщена найбільш довга третя ділянка, на якій відбувається в основному розбавлення концентрації озону в результаті розширення кисневого струменя та залучення до нього повітря й часткової рекомбінації озону під час зіткнення з молекулами повітря чи кисню. На цій ділянці утворюється суміш кисню, озону та повітря.

На базі отриманих результатів досліджень було введено встановлений емпірично коефіцієнт перерахунку максимального значення концентрації озону на усереднене значення в межах кожного з оцінюваних перетинів. Отримані результати у вигляді даних продуктивності генерації озону (продуктивність, мг/хв, як показник динамічний введено надалі замість показника концентрації, який вказував тільки на концентрацію у відібраній пробі газової суміші) після врахування коефіцієнту перерахунку наведені на рис. 5. З діаграм видно, що продуктивність по озону збільшується з підвищенням витрати газу й зменшується при віддаленні від сопла продувної фурми. Результати продуктивності після врахування емпіричного коефіцієнту перерахунку свідчать про те, що щохвилине утворення озону за довжиною струменя має невеликий відсоток зниження на рівні 0,5% через кожні 10 калібрів. Тобто можливо очікувати, що на робочій відстані фурми, що складає 40 калібрів, продуктивність озону складатиме на рівні 15 мг/хв. Це зумовлює додатковий приріст окислювального потенціалу кисневого струменя (й

відображатися на пришвидшенні окислення таких компонентів розплаву, як вуглець, та дією на пил шляхом надання додаткового заряду).

Виходячи з вищенаведеного було запропоновано для оцінювання виходу озону за плавку (г/т) наступну формулу:

$$GO_3 = 0,001 \cdot CO_3 \cdot QO_2 \cdot Kp \cdot \tau / G_{\text{металу}}, \quad (1)$$

де: GO_3 – питома кількість сформованого за плавку озону, г/т; CO_3 – концентрація O_3 на відстані 40 калібрів, мг/м³; QO_2 – витрата кисню, м³/хв; Kp – коефіцієнт розбавлення озону в струмені; τ – час продувки, хв, $G_{\text{металу}}$ – вага металу (т).

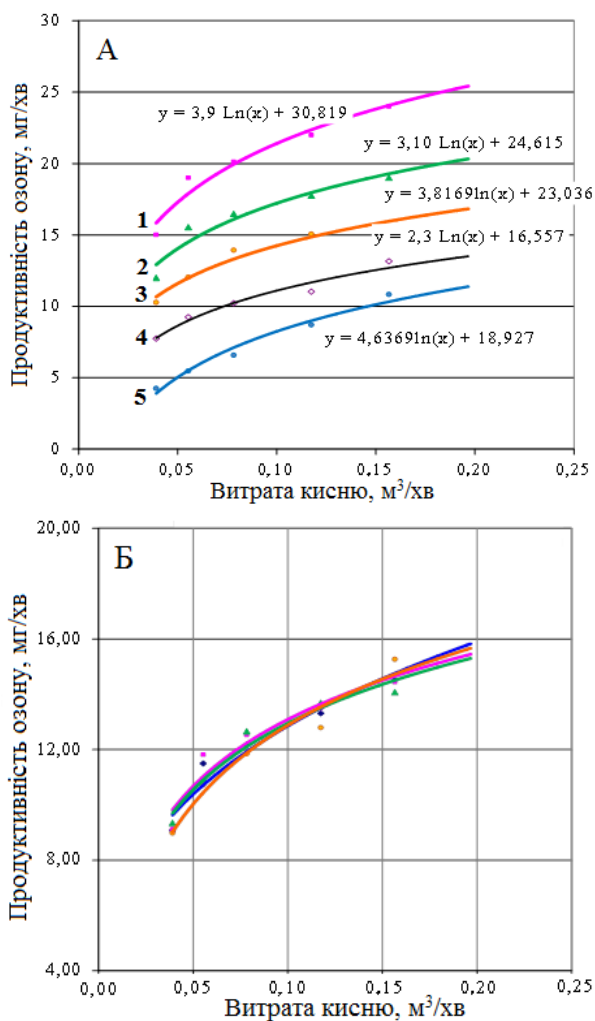


Рис. 5 – Продуктивність генерації озону при різній витраті кисню без урахування емпіричного коефіцієнту (А) та з урахуванням емпіричного коефіцієнту (Б) на відстанях від продувального сопла: 1 – 5 калібрів, 2 – 10 калібрів, 3 – 15 калібрів, 4 – 20 калібрів, 5 – 40 калібрів

Ще одним, окрім відмічених вище, підтвердженням дії озону на окислювальні процеси під час продувки металевого розплаву може бути встановлена під час додаткового аналізу відеозаписів проведення високотемпературних досліджень різниця у швидкості

засвоєння вапна за умов продувки активізованим іскровим розрядом кисневим потоком з формуванням озону та продувки крізь щільне кільцеве сопло без розряду. Для активного засвоєння вапна необхідним процесом є надходження оксидів заліза до шлаку, які «розчиняють» шматочки вапна [17, 18]. Період знаходження шматочків вапна на шлаковій поверхні при аналізі відеокадрів і їх розігрів були повільніші при продуванні чистим киснем під час продувки крізь кільцеве сопло. Для першої порції вапна швидкість засвоєння за умов використання активізованого кисневого потоку була більшою на 15-20%, а для другої – на 10-15% відповідно (як додаткова інформація, у порівнянні з продувкою крізь чотирисопловий наконечник, який порівнювався з продувкою крізь кільцеве щільне сопло у [13, 14] така різниця у швидкості засвоєння вапна складе 30-40%). Для прикладу на рис. 6 наведено відеокадри продувки крізь кільцеве щільне сопло з активізацією електричним розрядом та без активізації у однаковий період продувки – 5 хвилин після присадки порції вапна. На відеокадрах видно значно меншу кількість шматочків вапна на поверхні ванни (чорні ділянки на яскравій поверхні ванни) за умов продувки активізованим іскровим розрядом кисневим потоком. Відповідно до встановленої різниці за умов однакового початкового складу металевого розплаву, можна зробити висновок, що у випадку продувки з активізацією іскровим розрядом та формуванням озону активніше утворюються оксиди заліза через високу реакційну здатність озону, які сприяють розчиненню вапна.

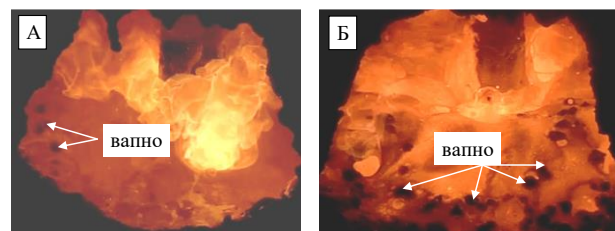


Рис. 6 – Фрагменти відеозапису високотемпературної продувки металеві ванни кисневим потоком крізь кільцеве щільне сопло з активізацією іскровим розрядом (А) та без активізації (Б) у однаковий час після додавання порції вапна

Висновки

За результатами проведеного фізичного дослідження характеру утворення та розповсюдження озону високовольтним електричним розрядом за довжиною та перетином кисневого струменя встановлено, що концентрація озону при віддаленні від сопла спочатку збільшується до максимального рівня на відстані 5-7 калібрів (відстань формування озону), а потім знижується в результаті розведення його в суміші за рахунок розширення газового струменя.

Щодо визначення озону за перетином струменя встановлено, що максимальна концентрація озону

зосереджується в центрі струменя – у його умовному ядрі.

Завдяки встановленому емпіричному коефіцієнту розширення кисневого струменя було встановлено, що продуктивність по озону зменшується на величину 0,5% за довжиною струменя до відстані 40 калібрів, що дає змогу передбачити, що достатня кількість озону дістається до металеві ванни у разі використання цього способу при верхній продувці в кисневому конвертері.

Таким чином можна підтвердити, що встановлений за результатами високотемпературних досліджень приріст показників швидкості окислення вуглецю та впливу на пил у порівнянні з продувкою крізь кільцеве щільне сопло, зумовлене достатньою кількістю озону, що формується на виході з продувочної фурми та доходить з потоком газу до металевого розплаву.

Фінансування та подяки

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.

Перелік використаних джерел

- [1] 2025 World Steel in Figures. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf> (дата звернення: 10.07.2025).
- [2] Ghosh S., Bharath B. N., Viswanathan N. N. BOF process dynamics. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018. Vol. 128 (1). Pp. 1-17. DOI: <http://doi.org/10.1080/25726641.2018.1544331>.
- [3] Alam M., Naser J., Brooks G. Computational fluid dynamics simulation of supersonic oxygen jet behavior at steelmaking temperature. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010. Vol. 41. Pp. 636-645. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9341-0>.
- [4] Coley K. S. Progress in the kinetics of slag-metal-gas reactions, past, present and future. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. 2013. Vol. 49(2). Pp. 191-199. DOI: <https://doi.org/10.2298/JMMB121220017C>.
- [5] Vosmaer F. Ozone: its manufacture, properties and uses. Leopold Classic Library, 2015. 232 p.
- [6] Extraction of metals by using ozone from residue solutions of metallurgical production / D. B. Kholikulov et al. *Integrated Innovative Development of the Zarafshan Region: Achievements, Problems and Prospects*: Proceedings of the II International Conference, Navoi, Uzbekistan, 27-28 November 2019. Pp. 65-68.
- [7] Ozone in water treatment: Application and engineering / ed. by B. Langlais, D. A. Reckhow, D. R. Brink. 1991. 592 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203744635>.
- [8] Wen L. H., Menon P. M., Choon N. K. Waste water treatment by micro air and ozone bubbles. *International Review of Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 3(3). Pp. 368-371.
- [9] Water and air ozone treatment as an alternative sanitizing technology / M. Martinelli et al. *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*. 2017. Vol. 58 (1). Pp. E48-E52. DOI: <https://doi.org/10.7203/jo3t.3.4.2019.15426>.
- [10] Способ выплавки стали: пат. 1354713 CPCP, C21 C5/28, 5/32. № 3979015/02; заявл. 22.11.85; опубл. 15.01.92, Бюл. № 2. 3 с.
- [11] Saidinik F., Behnejad H. Comparing oxidation of aluminum by oxygen and ozone using reactive force field molecular dynamics simulations. *Journal of Nanoparticle Research*. 2023. Vol. 25. Article 95. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11051-023-05739-w>.
- [12] Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters / S.I. Semykin et al. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. Vol. 83(2). Pp. 107-116. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.09>.
- [13] Високотемпературное исследование особенностей продувки металлической ванны в LD конвертере через кольцевое коаксиальное сопло / С.И. Семыкин и др. *Метал та лиття України*. 2019. Т. 27, № 7-9. С. 27-32. DOI: <https://doi.org/10.15407/steeltcast2019.07.027>.
- [14] Високотемпературное исследование особенностей продувки металла в конвертере через верхнюю кислородную фурму с кольцевым щелевым соплом / Семыкин С. И., Голуб Т. С., Дудченко С. А., Вакульчук В. В. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2018. Вып. 32. С. 229-237.
- [15] Nijdam S., Teunissen J., Ebert U. The physics of streamer discharge phenomena. *Plasma Sources Science and Technology*. 2020. Vol. 29. Article 103001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abaa05>.
- [16] Plasma-enhanced mixing and flameholding in supersonic flow / Firsov A., Savelkin K. V., Yarantsev D. A., Leonov S. B. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2015. Vol. 373. Article 20140337. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0337>.
- [17] Basic oxygen steelmaking slag: formation, reaction, and energy and material recovery / Li Z., Li J., Spooner S., Seetharaman S. *Steel research international*. 2022. Vol. 93. Iss. 3. Article 2100167. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.202100167>.
- [18] Dissolution of lime in BOS slag: from laboratory experiment to industrial converter / Li Z. S., Whitwood M., Millman S., van Boggelen J. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*. 2014. Vol. 41(2). Pp. 112-120. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743281213Y.0000000108>.

STUDY OF THE FEATURES OF OZONE PROPAGATION ALONG AN OXYGEN JET CREATED BY A HIGH-VOLTAGE ELECTRIC DISCHARGE AT THE OUTLET OF A BLOWING LANCE

Semykin S.I.	PhD (Engineering), senior researcher, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7365-2259 , e-mail: isisemykin@gmail.com ;
Golub T.S.	PhD (Engineering), senior researcher, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9269-2953 , e-mail: isinasu.golubts@gmail.com ;
Dudchenko S.O.	PhD (Engineering), senior researcher, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7319-9896 , e-mail: s.dudchenko@meta.ua ;
Vakulchuk V.V.	PhD (Engineering), researcher, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7887-2843 , e-mail: vvvakulchuk@gmail.com ;
Prokopenko P.H.	chief metrologist, Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-7645-1740 , e-mail: ogm-ichm@ukr.net

The oxygen converter process, which is currently the only competitive method of mass production of steel in world practice, is quite fast in terms of time and complex due to high temperatures and limited ability to influence the course of the processes accompanying it from the outside. It occurs due to the interaction of a supersonic oxygen flow with a molten metal bath containing liquid cast iron, molten scrap metal and other additional materials. That is, the key link for the converter process is the course of redox exchange processes with the participation of oxygen, which are heterogeneous and have different time of course depending on the place of flow, the "actors" other than oxygen, the intensity of the movement of molten masses and the activity of the oxygen flow itself (how and in what quantity oxygen penetrates between the interfaces of the phases that interact and react with other elements). Accordingly, to intensify the oxygen converter process, it is necessary to activate the oxidation processes, which is possible due to the activation of the oxygen flow, for example, when converting part of the oxygen into ozone. The work conducted a study of ozone generation by a high-voltage electric discharge directly at the outlet of the blow nozzle of the top oxygen lance and its distribution along the oxygen jet. It was established that the maximum level of ozone concentration along the length of the jet is observed at a distance of 5-7 calibers and further, as the jet expands, its concentration decreases as a result of dilution with oxygen. According to cross-sectional studies, the concentration of ozone in the center of the jet throughout the entire flow was established. Based on the results obtained, an empirical coefficient of expansion of the oxygen jet was developed to assess ozone productivity. It was established that when the discharge at the outlet of the blowing nozzle is at a distance of 40 calibers (which is the working height of the blowing lance relative to the level of the metal bath in the oxygen converter in industrial conditions), the ozone productivity along the length of the oxygen jet will be 15 mg/min, which, according to the authors, will be sufficient to activate oxidative processes in the converter bath.

Keywords: ozone, generation efficiency, oxygen blowing lance, oxygen blowing, gas jet, high-voltage discharge.

References

- [1] 2025 World Steel in Figures. [Online]. Available: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf>. Accessed on: July 10, 2025.
- [2] S. Ghosh, B.N. Bharath, and N.N. Viswanathan, "BOF process dynamics," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 128(1), pp. 1-17, 2018. doi: 10.1080/25726641.2018.1544331.
- [3] M. Alam, J. Naser, and G. Brooks, "Computational fluid dynamics simulation of supersonic oxygen jet behavior at steelmaking temperature," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 41, pp. 636-645, 2010. doi: 10.1007/s11663-010-9341-0.
- [4] K.S. Coley, "Progress in the kinetics of slag-metal-gas reactions, past, present and future," *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, vol. 49 (2), pp. 191-199, 2013. doi: 10.2298/JMMB121220017.
- [5] F. Vosmaer, *Ozone: its manufacture, properties and uses*, Leopold Classic Library, 2015.
- [6] D.B. Kholikulov, A.R. Aripov, N.B. Khujakulov, A.B. Buronov, and A.B. Azimova, "Extraction of metals by using ozone from residue solutions of metallurgical production," in *Proceedings of the II International Conference «Integrated Innovative Development of the Zarafshan Region: Achievements, Problems and Prospects»*, Navoi, Uzbekistan, Nov. 27-28, 2019, pp. 65-68.

- [7] B. Langlais, D.A. Reckhow, and D.R. Brink, Eds. *Ozone in water treatment: Application and engineering*. 1991. doi: **10.1201/9780203744635**.
- [8] L.H. Wen, P.M. Menon, and N.K. Choon, "Waste water treatment by micro air and ozone bubbles," *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 3(3), pp. 368-371, 2009.
- [9] M. Martinelli, F. Giovannangeli, S. Rotunno, C.M. Trombetta, and E. Montomoli, "Water and air ozone treatment as an alternative sanitizing technology," *Journal of Preventive Medicine and Hygiene*, vol. 58(1), pp. E48-E52, 2017. doi: **10.7203/jo3t.3.4.2019.15426**.
- [10] Yu.I. Zhavoronkov, Yu.N. Davydov, B.N. Nikolaev, L.P. Klimov, and S.D. Zinchenko, "Sposob vyplavki stali" ["Method of steelmaking"], USSR Patent SU135471, Jan. 15, 1992. (Rus.).
- [11] F. Saidinik, and H. Behnejad, "Comparing oxidation of aluminum by oxygen and ozone using reactive force field molecular dynamics simulations," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 25, article 95, 2023. doi: **10.1007/s11051-023-05739-w**.
- [12] S.I. Semykin, T.S. Golub, L.S. Molchanov, S.O. Dudchenko, and V.V. Vakulchuk, "Environmental aspects of using oxygen blowing with prior electrical activation in oxygen converters," *Enerhotekhnologii ta resursozberezhennia – Energy Technologies & Resource Saving*, vol. 83(2), pp. 107-116, 2025. doi: **10.33070/etars.2.2025.09**.
- [13] S.I. Semykin, T.S. Golub, S.A. Dudchenko, and V.V. Vakulchuk, "Vysokotemperaturnoe issledovanie osobennostei produvki metallicheskoj vannы v LD konvertere cherez koltsevoe koaksialnoe soplo" ["A high-temperature study of the characteristics of metal bath blowing in a LD converter through an annular coaxial nozzle"], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 27(7-9), pp. 27-32, 2019. doi: **10.15407/steelcast2019.07.027**. (Rus.)
- [14] S.I. Semykin, T.S. Golub, S.A. Dudchenko, and V.V. Vakulchuk, "Vysokotemperaturnoe issledovanie osobennostei produvki metalla v konvertere cherez verhnuu kislородnuu furmu s koltsevim schelevym soplom" ["A high-temperature study of metal blowing characteristics in a converter through the top oxygen lance with an annular slot nozzle"], *Fundamentalnie y prykladnie problemi chernoї metallurhyi – Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, iss. 32, pp. 229-237, 2018. (Rus.)
- [15] S. Nijdam, J. Teunissen, and U. Ebert "The physics of streamer discharge phenomena," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 29, article 103001, 2020. doi: **10.1088/1361-6595/abaa05**.
- [16] A. Firsov, K.V. Savelkin, D.A. Yarantsev, and S.B. Leonov, "Plasma-enhanced mixing and flameholding in supersonic flow," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 373, article 20140337, 2015. doi: **10.1098/rsta.2014.0337**.
- [17] Z. Li, J. Li, S. Spooner, and S. Seetharaman, "Basic oxygen steelmaking slag: formation, reaction, and energy and material recovery," *Steel research international*, vol. 93 (3), article 2100167, 2022. doi: **10.1002/srin.202100167**.
- [18] Z.S. Li, M. Whitwood, S. Millman, and J. van Boggelen, "Dissolution of lime in BOS slag: from laboratory experiment to industrial converter," *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, vol. 41(2), pp. 112-120, 2014. doi: **10.1179/1743281213Y.0000000108**.

Стаття надійшла 28.08.2025

Стаття прийнята 15.09.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Дослідження особливостей розповсюдження озону за кисневим струменем, створеного високовольтним електричним розрядом на виході з продувної фурми / С. І. Семикін та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 51. С. 86-93. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344661>.