

**ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДГРІВУ
МЕТАЛОБРУХТУ В КИСНЕВОМУ КОНВЕРТЕРІ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КУСКОВОГО ТА
ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА**

Чернятевич А.Г.	д-р техн. наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4552-4997 , e-mail: agchern@ua.fm ;
Сігарьов Є.М.	д-р техн. наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8229-7877 , e-mail: siharovyevgen@gmail.com ;
Похвалітий А.А.	канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7887-2843 , e-mail: ArtemMSLP@gmail.com ;
Кондращенко Д.С.	здобувач третього (освітньо-наукового) ступеню, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6643-417X , e-mail: notfeilordima@gmail.com ;
Вовк А.О.	здобувач третього (освітньо-наукового) ступеню, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, e-mail: alyonkamaxvovk@gmail.com

Стаття присвячена дослідженню сучасних підходів до інтенсифікації теплової роботи кисневого конвертера шляхом використання альтернативних джерел енергії для попереднього підігріву металевих брухту. Проведено аналіз існуючих технологічних рішень нагрівання металеві завалки в порожнині конвертера та розглянуто можливість підвищення ефективності цього процесу за рахунок використання твердих вуглецевмісних палив. У роботі виконано порівняльний аналіз теплотехнічних параметрів процесу нагрівання брухту при застосуванні традиційного кускового вугілля та пиловугільного палива. На основі теплотехнічних розрахунків визначено енергетичні витрати, необхідні для підвищення температури металеві завалки до значень, що забезпечують інтенсифікацію плавлення брухту під час конвертерної плавки. Показано, що попередній підігрів металобрухту дає змогу підвищити частку брухту в металевій шихті та знизити витрати рідкого чавуну, що покращує енергоефективність сталеплавильного процесу та сприяє більш раціональному використанню енергетичних ресурсів. Досліджено вплив способу подачі палива на ефективність використання теплоти та повноту згоряння вуглецю. Проаналізовано зміну механізму нагрівання при переході від спалювання кускового вугілля до вдування пиловугільного палива через верхню паливно-фурму. Встановлено, що при використанні кускового вугілля процес горіння характеризується обмеженою площею реакційної поверхні та нерівномірним розподілом теплових потоків у шарі металобрухту. У свою чергу застосування пиловугільного палива забезпечує інтенсивніше згоряння завдяки високій дисперсності частинок палива, кращому змішуванню з окисником і більш рівномірному розподілу теплової енергії в робочому просторі конвертера. Отримані результати свідчать, що використання пиловугільного палива створює більш сприятливі умови для ефективного нагрівання металобрухту, забезпечує більш повне використання теплоти та сприяє підвищенню енергетичної ефективності процесу конвертерного виробництва сталі. Практична значущість роботи полягає у можливості використання отриманих результатів при розробленні та впровадженні енергозберігаючих технологій попереднього підігріву металеві завалки в промислових кисневих конвертерах.

Ключові слова: конвертер; кисень; кускове вугілля; пиловугільне паливо; паливно-киснева фурма; підігрів брухту; оксид вуглецю; високотемпературне моделювання.

Постановка проблеми

Підвищення частки металобрухту в шихті кисневих конвертерів є одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності та зниження вуглецевого сліду конвертерного виробництва сталі [1, 2]. Однак у традиційній технології кисневого продування вміст брухту обмежується тепловим балансом процесу, оскільки надлишкова кількість холодного металобрухту може призводити до заморозування металу, утворення твердих наростів на футерівці та порушення стабільності плавки.

Одним із шляхів розширення допустимої частки брухту є його попередній підігрів безпосередньо в порожнині конвертера перед заливкою рідкого чавуну. Такий підхід дозволяє підвищити теплонасиченість шихти та зменшити потребу в рідкому чавуні, проте супроводжується низкою технологічних обмежень. Існуючі методи попереднього підігріву металобрухту досліджуються, зокрема, із застосуванням чисельного моделювання процесів теплопередачі та горіння [3]. Разом із тим такі способи, як спалювання кускового вугілля на поверхні шихти або використання паливно-кисневих фурм, характеризуються нерівномірністю

нагрівання, підвищеними тепловими втратами та ризиком локального перегріву брухту і футерівки.

Нерозкритою проблемою є низька ефективність використання хімічної енергії палива при традиційному спалюванні кускового вугілля. Неповне згоряння, утворення значної кількості оксиду вуглецю та відведення теплоти з газовою фазою зумовлюють підвищену витрату палива і кисню для досягнення заданого рівня нагріву. Це обмежує практичну доцільність широкого застосування такого способу в умовах сучасних конвертерів.

У зв'язку з цим актуальною є задача пошуку більш ефективних способів попереднього підігріву металобрухту, які забезпечували б інтенсивне і рівномірне теплопідведення за мінімальних витрат палива та кисню і без негативного впливу на футерівку. Перспективним напрямом є використання пиловугільного палива, що вдувається у кисневому струмені через верхню фурму, оскільки дрібнодисперсне паливо здатне швидко і повно згоряти з утворенням високотемпературного факела безпосередньо над поверхнею брухту.

Таким чином, науково-технічна проблема полягає у встановленні закономірностей теплової ефективності та механізму нагрівання металобрухту при різних способах підведення хімічної енергії палива в порожнині кисневого конвертера, а також у визначенні умов, за яких попередній підігрів забезпечує підвищення частки брухту без погіршення технологічної надійності процесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблемі підвищення частки металобрухту в шихті кисневих конвертерів присвячено значну кількість наукових досліджень і технологічних розробок, а також дослідження складу металобрухту та його впливу на перебіг процесу плавки [4]. У більшості робіт зазначається, що традиційна технологія базисного кисневого продування обмежує вміст брухту на рівні ~20–25% через теплові обмеження процесу та ризик заморожування металу [5]. Для подолання цих обмежень було запропоновано як конструктивні, так і технологічні рішення.

Одним із перших напрямів стало вдосконалення конвертерних процесів за рахунок введення додаткових джерел теплоти. Зокрема, процеси типу К-ОВМ та КМС передбачали використання багатоярусних кисневих фурм, допалювання оксиду вуглецю над ванною або вдування твердого палива через донні пристрої [5]. Ці підходи дозволяли підвищити частку брухту до 35–40% [6], однак супроводжувалися зростанням тривалості плавки, витрат кисню та прискореним зносом футерівки, що обмежило їх подальше поширення.

Іншим напрямом стало попереднє підігрівання металобрухту безпосередньо в порожнині конвертера перед заливкою рідкого чавуну. Найпростішим рішенням є спалювання кускового твердого палива, розташованого на поверхні брухту, з подачею кисню через

верхню фурму [6]. Дослідження показали, що такий спосіб дозволяє скоротити дефіцит теплоти на початковій стадії плавки, проте характеризується нерівномірним нагріванням шихти, значними втратами теплоти з відхідними газами та високою ймовірністю локального перегріву верхніх шарів брухту.

Для підвищення рівномірності нагрівання були запропоновані паливно-кисневі пальники, встановлені у верхній частині конвертера або через сталевипускний отвір [8]. Такі рішення забезпечують більш стабільне теплопідведення, однак потребують тривалого часу нагрівання та призводять до інтенсивного теплового навантаження на футерівку. Крім того, при факельному нагріванні спостерігається значна частка теплоти, що витрачається на нагрів газової фази, а не металобрухту [7].

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені вдуванню газоподібного або твердого палива через донні продувні пристрої [8]. Хоча такий підхід дозволяє підводити теплоту безпосередньо в глибину шару брухту, його ефективність обмежується пропускнуою здатністю донних елементів і складністю забезпечення стабільного горіння, що знижує практичну реалізованість методу.

У більш нових роботах все більше уваги приділяється використанню пиловугільного палива, яке вдувається у струмені кисню через спеціальні фурми. Чисельні та експериментальні дослідження показують, що дрібнодисперсне паливо характеризується високою швидкістю займання і повнотою згоряння, що сприяє інтенсивному випромінювальному теплообміну з металобрухтом [9,10]. Повідомляється також про зменшення питомої витрати палива та кисню порівняно зі спалюванням кускового вугілля [10, 11]. Водночас більшість публікацій зосереджені на загальних енергетичних показниках і не приділяють достатньої уваги порівняльному аналізу механізмів нагрівання брухту при різних способах підведення палива в порожнині конвертера.

Таким чином, аналіз літературних і патентних джерел свідчить, що попри наявність численних рішень для підігріву металобрухту, питання ефективності використання хімічної енергії палива та впливу режимів подачі кисню на механізм нагрівання залишаються недостатньо вивченими. Це зумовлює доцільність проведення порівняльного дослідження традиційного спалювання кускового вугілля та вдування пиловугільного палива (ПВП) через верхню фурму в умовах кисневого конвертера.

Мета статті

Метою роботи є узагальнення, аналіз та порівняльна оцінка сучасних рішень попереднього підігріву металобрухту в порожнині кисневого конвертера, зокрема ефективності традиційного способу зі спалюванням кускового вугілля та перспективного способу з вдуванням пиловугільного палива через верхню фурму

з урахуванням особливостей теплопередачі й використання хімічної енергії палива.

Матеріали та методи

Об'єктом дослідження є процес попереднього підігріву металобрухту в порожнині кисневого конвертера перед заливкою рідкого чавуну. Дослідження виконано для умов типового базисного кисневого конвертера великої місткості, що працює за класичною схемою верхнього кисневого продування.

У роботі розглянуто два способи підведення хімічної енергії палива до шару металобрухту:

- спалювання кускового вугілля, розташованого на поверхні брухту, з подачею кисню через верхню фурму;

- вдування пиловугільного палива у струмені кисню через верхню фурму з формуванням високотемпературного факела над поверхнею шихти.

Порівняльна оцінка ефективності зазначених способів здійснювалася на основі теплового балансу процесу попереднього підігріву. Як основний критерій ефективності приймалася частка хімічної енергії палива, що передається металобрухту у вигляді корисної теплоти. При цьому враховувалися теплові потоки, пов'язані з конвективним та променевим теплообміном між факелом горіння, газовою фазою та поверхнею металобрухту.

Розрахунок теплового ефекту від згорання палива проводився з використанням нижчої теплоти згорання відповідних видів вуглецевого палива. При аналізі процесу горіння приймалося допущення про квазістаціонарний характер теплових процесів у період підігріву, а також про повне згорання пиловугільного палива у струмені кисню. Для кускового вугілля враховувалася можливість неповного згорання та відведення частини хімічної енергії з газовою фазою.

Теплові втрати з відхідними газами, а також теплове навантаження на футерівку оцінювалися за спрощеними інженерними залежностями, що дозволяє порівнювати відносну ефективність розглянутих способів без детального моделювання газодинаміки. Такий підхід є доцільним для встановлення загальних закономірностей підведення тепла до металобрухту та визначення напрямів підвищення ефективності попереднього підігріву в порожнині кисневого конвертера.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети використано комплексний підхід, що поєднує теоретичні розрахунки, аналіз літературних даних і узагальнення результатів лабораторних і дослідних випробувань.

Теоретичний розрахунок теплоспоживання. Вихідною задачею є оцінка кількості теплоти, необхідної для нагрівання металобрухту заданої маси з початкової до цільової температури за певний час. В якості модельного прикладу розглянуто нагрів 10 кг сталевого брухту від 20°C до 800°C за 5 хв (300 с).

Розрахунок проводиться за формулою теплового балансу:

$$Q = m \cdot c_{cp} \cdot (T_2 - T_1), \quad (1)$$

де m – маса брухту, c_{cp} – середня масова теплоємність сталі в заданому інтервалі температур, T_2 і T_1 – початкова і кінцева температура брухту відповідно. Для сталі приймаємо середню питому теплоємність в інтервалі 20–800°C приблизно 0,6 кДж/(кг·K) [10], враховуючи зростання теплоємності з температурою та ефект фазового перетворення Fe ($\alpha \rightarrow \gamma$) близько 727 °C. Підставляючи: $m = 10$ кг, $\Delta T = 780$ K, отримуємо:

$$Q \approx 10 \text{ кг} \cdot 0,6 \text{ кДж/(кг·K)} \cdot 780 \text{ K} \approx 4680 \text{ кДж.}$$

Отже, для нагрівання 10 кг брухту до 800°C необхідно близько 4,7 МДж теплоти. Цю енергію слід підвести за 5 хв, що відповідає середній тепловій потужності $\sim 15,6$ кВт. Такий рівень теплонадходження може бути забезпечений тільки інтенсивним екзотермічним реакційним джерелом тепла, зокрема, швидким згоранням вуглецевмісного палива безпосередньо в конвертері.

Розрахунок витрати палива та кисню. Як паливо розглядається енергетичне вугілля або інший вуглецевмісний матеріал, що здатен згоряти з киснем. Теоретична теплотворна здатність вуглецю при повному окисненні до CO₂ становить $\sim 33,8$ МДж/кг (реакція C+O₂=CO₂). В ідеальному випадку для отримання 4,68 МДж теплоти достатньо згоріти $\sim 0,14$ кг чистого С. Однак в реальних умовах частина вуглецю може згоряти не повністю (утворюючи СО замість CO₂ або залишаючись у вигляді недопалу), а частина виділеної теплової енергії не поглинається брухтом (йде на нагрівання газів, футерівки тощо). Для обліку цих втрат вводимо:

- Коефіцієнт повноти згорання $\eta_{згор}$: частка палива, що повністю вигорає до CO₂ (значення < 1 через утворення СО та втрати незгорілого коксу).

- Коефіцієнт використання теплоти $\eta_{тепл}$: частка теплової енергії згорання, що передається брухту (решта розсіюється).

Ефективна частка теплоти, яка йде на нагрів брухту, оцінюється як $\eta_{згор} \cdot \eta_{тепл}$. За літературними даними, при традиційному способі з кусковим вугіллям ці коефіцієнти відносно невисокі. В реальних конвертерних плавках було зафіксовано, що фактична витрата O₂ на спалювання 1 кг вугілля становить 1,48–2,86 м³ при теоретично необхідних $\sim 1,34$ м³ і 2,67 м³ для СО та CO₂ відповідно [7]. Це означає, що значна частина кисню витрачається непродуктивно – або на неповне окиснення (до СО), або просто виходить із відхідними газами, не окислюючи паливо. Тобто коефіцієнт використання кисню і відповідно повноти згорання вугілля може опускатися до $\sim 0,47$ – $0,90$ (47–90%) у типових умовах спалювання кускового вугілля. Так само й теплота згорання витрачається не повністю на брухт: за оцінками, не більше ~ 50 – 60% від

загального тепла реакції поглинається металобрухтом при спалюванні кускового палива.

Експериментальна база. Для аналізу особливостей процесу підігріву металобрухту були використані результати експериментальних досліджень, виконаних на багатофункціональній лабораторній високотемпературній установці (рис. 1а) [7, 12]. Макет конвертера (ємністю 80 кг металу) дозволяв відтворювати процес попереднього підігріву брухту перед заливкою чавуну. Внутрішній простір моделі футерувався вогнетривом та оснащувався змінними фурмами. Перед кожним дослідом футерівку моделі розігрівали до $\sim 800\text{--}850^\circ\text{C}$ згорянням малого завантаження коксу з повітродувкою через верхню фурму (імітація розігрітого промислового конвертера). Потім завантажували металобрухт (у різних дослідках використовували суміші легкого та важкого брухту, зменшені пропорційно до масштабу моделі шматки). Брухт займав частку об'єму, еквівалентну $\sim 30\%$ металофракції в промисловому 250-т конвертері.

Для моделювання способу з кусковим вугіллям певна кількість газового вугілля фракції 15–25 мм завантажувалася зверху на брухт (близько 70–80% усієї маси вугілля – на поверхню шару брухту, решта – частково в проміжки між брухтом і біля футерівки). Потім через верхню стандартну чотирисоплову кисневу фурму подавали технічно чистий O_2 з витратою, аналогічною до промислової інтенсивності, перерахованої на масштаб моделі (до $0,4 \text{ м}^3/\text{хв}$ в перерахунку на умови моделі). Процес займання і горіння кускового вугілля фіксувався високошвидкісною відеокамерою, також проводився контроль температури поверхні брухту і футерівки пірометром [13].

Для реалізації способу з пиловугільним паливом використовувалася спеціальна паливно-киснева фурма «труба в трубі» (трьохсоплова) власної конструкції (рис. 1б). Центральними трубками-форсунками подавалося пиловугільне паливо, а кільцевим зазором навколо них – кисень [14]. ПВП вдували у потоці інертного газу або азоту (в різних дослідках використовували стиснене повітря або азот) для стабільного транспортування дрібного пилу. Витрата пилу становила $\sim 0,4\text{--}0,5 \text{ кг}/\text{хв}$, носій ($\text{N}_2/\text{повітря}$) – $\sim 0,15\text{--}0,20 \text{ м}^3/\text{хв}$, витрата O_2 – $\sim 0,25\text{--}0,39 \text{ м}^3/\text{хв}$. Ці параметри підбирали таким чином, щоб забезпечити стехіометричне або дещо надстехіометричне співвідношення кисню і палива ($\approx 1\text{--}1,3$ від теорії). Займання пилу відбувалося безпосередньо у струмені: при виході факела з фурми суміш пилу з киснем самозаймалася від контакту з розігрітим середовищем, утворюючи яскраве полум'я над поверхнею брухту. Хід процесу також реєструвався відеокамерою та пірометрами.



Рис. 1 – Багатофункціональна установка високотемпературного моделювання процесу підігріву металобрухту перед заливанням рідкого чавуну (а) з використанням паливно-кисневої фурми (б): 1 – модель конвертера; 2 – верхня киснева (або паливно-киснева) фурма; 3 – паливні сопла; 4 – кисневі сопла; 5 – паливний живильник [7]

Розрахунок показав, що для нагріву 10 кг металобрухту на 780°C потрібно близько 4,7 МДж теплоти, тобто $\sim 0,14 \text{ кг}$ умовного вуглецю при ідеальному згорянні. Однак з урахуванням реальних умов кількість палива повинна бути більшою. В таблиці 1 узагальнено оцінки витрат палива і кисню для кускового та пиловугільного палива за розрахунковим прикладом, виходячи з коефіцієнтів $\eta_{\text{згор}}$ та $\eta_{\text{тепл}}$, що отримані з використанням експериментальних даних.

Таблиця 1
Оцінка витрат палива і кисню для нагріву 10 кг брухту ($20\text{--}800^\circ\text{C}$, 5 хв)

Показник	Кускове вугілля	Пиловугільне паливо (ПВП)
Потрібна теплота для нагріву брухту, МДж	4,7	4,7
Коефіцієнт повноти згорання, $\eta_{\text{згор}}$	0,70–0,90	0,97–0,995
	0,80	0,99
Коефіцієнт використання теплоти, $\eta_{\text{тепл}}$	0,30–0,50	0,60–0,80
	0,40	0,70
Ефективна частка теплоти, $\eta_{\text{згор}} \cdot \eta_{\text{тепл}}$	0,21–0,45	0,58–0,80
	0,32	0,69
Необхідна теплота згорання палива, МДж	10,5–13,0	5,9–8,1
	11,7	6,8
Маса палива, кг/10 кг брухту	0,30–0,4	0,18–0,24
	0,35	0,2
Теоретична потреба O_2 , м^3	0,20–0,45	0,11–0,19
	0,28	0,15
Фактична витрата O_2 з урахуванням надлишку, м^3	0,37–0,70	0,14–0,20
	0,65	0,17

З наведених оцінок видно суттєву різницю у вимогах до палива і кисню між двома методами. Кускове вугілля потребує майже вдвічі більше палива та кисню для досягнення того ж ступеня нагріву, через неповне згорання і втрати тепла. Дані практичних витрат кисню підтверджують це: при спалюванні кускового вугілля фактично витрачається $\sim 1,5\text{--}2,0 \text{ м}^3$

O_2 на 1 кг вугілля [15], тобто $\sim 0,37\text{--}0,70\text{ м}^3 O_2$ на 0,35 кг (потрібних для 10 кг брукхту), тоді як для ПВП достатньо $\sim 1,35\text{--}1,5\text{ м}^3 O_2$ на 1 кг палива ($\approx 0,18\text{--}0,24\text{ м}^3$ на 0,2 кг).

Наведені дані є результатом порівняння лабораторних випробувань і свідчать про принципову перевагу способу з використанням ПВП. Останній дозволяє значно ефективніше використовувати хімічну енергію палива для нагріву брукхту. Відповідно при масштабуванні на промислові умови можна очікувати зниження питомої витрати палива. Якщо для традиційного способу літературні джерела наводять витрати твердого палива $\sim 11\text{--}21\text{ кг}$ на тону брукхту [16], то при переході на пиловугільний спосіб цей показник може знизитися до $\sim 8\text{--}15\text{ кг/т}$ брукхту при тих самих умовах досягнення $\sim 800^\circ\text{C}$. У відносних величинах це $\sim 1\text{--}1,5\%$ маси брукхту. Необхідно відзначити, що фактична витрата кускового вугілля на деяких підприємствах України досягає 26–46 кг/т брукхту. Орієнтовна витрата палива на нагрівання брукхту до заданої температури представлена на рис. 2.

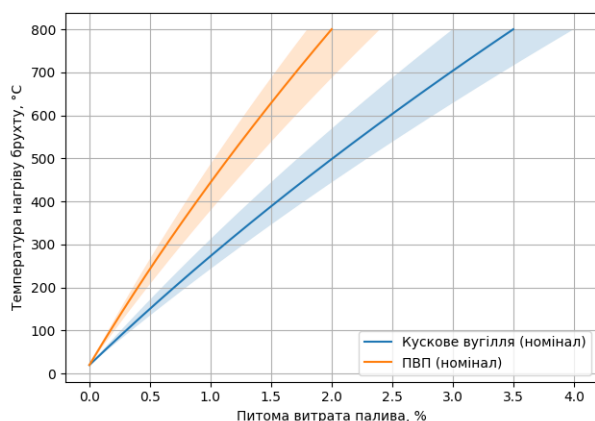


Рис. 2 – Графік орієнтовної витрати палива на нагрівання палива до заданої температури.

Отримана залежність демонструє системну перевагу ПВП над кусковим вугіллям за критерієм питомої витрати палива на заданий рівень нагріву брукхту. Це узгоджується з фізикою процесу, оскільки при вдуванні ПВП паливо має вищий ступінь дисперсності та інтенсивніше змішується з окисником, що забезпечує більш повне і стабільне згоряння у зоні, де тепловий потік максимально ефективно передається шихті. Для кускового вугілля характерне більш неоднорідне розташування палива у шарі, локалізація горіння та залежність від контакту з кисневими струменями; унаслідок цього зростає ймовірність неповного згоряння та відведення частини теплоти з газами, що зумовлює більшу витрату палива для досягнення тієї самої температури брукхту навіть у лабораторних умовах.

Кількісно графік підтверджує, що вже на помірних температурах різниця є суттєвою і

зберігається в усьому діапазоні. Для нагріву до 200°C питома витрата становить орієнтовно 0,60–0,80% для кускового вугілля (номіально 0,70%) і 0,36–0,48% для ПВП (номіально 0,40%). При 400°C витрата зміщується до 1,33–1,78% (номіально 1,55%) для кускового вугілля і 0,80–1,07% (номіально 0,89%) для ПВП. На рівні 600°C відповідно спостерігаються 2,13–2,83% (номіально 2,48%) і 1,28–1,70% (номіально 1,42%). У базовій точці 800°C інтервали складають 3,00–4,00% (номіально 3,50%) для кускового вугілля та 1,80–2,40% (номіально 2,00%) для ПВП. Отже, у межах $20\text{--}800^\circ\text{C}$ перехід від кускового палива до ПВП зменшує питому витрату палива приблизно у 1,6–1,8 раза залежно від режиму, що коректно інтерпретується як результат більшої сумарної ефективності «згоряння–теплопередача» при факельному спалюванні дрібнодисперсного палива.

Використання саме інтервальних коридорів є обґрунтованим для подання лабораторних результатів, оскільки навіть за однакових початкових умов повторюваність нагріву обмежується змінами фракційного складу палива, умов перемішування газового потоку, ступеня надлишку окисника та тепловтрат на стінки установки. Тому коридори на графіку слід розглядати як область імовірних значень питомої витрати, а номінальні криві — як репрезентативні траєкторії для узагальненого опису дослідних серій.

Аналіз впливу інтенсивності продувки киснем

Із розрахунків (див. вище) випливає, що існує мінімальний поріг подачі O_2 , необхідний для ефективного спалювання заданої кількості палива за обмежений час. Якщо кисню подається менше цього порогу (як у випадку $0,05\text{ м}^3/\text{хв}$ у нашому прикладі), процес горіння «задухається»: вугілля прогрівається і частково газифікується (виділяє леткі та CO), але значна його частка не встигає окиснитися до кінця. Це проявляється у *довгому індукційному періоді займання* та *неповному згоранні*. Експериментально при продувці киснем через 4-соплову фурму з помірною інтенсивністю ($\sim 0,2\text{ м}^3/\text{хв}$ у моделі) спостерігалось, що приблизно через 20–30 с від початку подачі O_2 тільки починається інтенсивне виділення летких газів із поверхневих шматків вугілля. Ці газові продукти (C_mH_n) частково захоплюються в кисневій струмені, утворюючи локальні факели над брукхтом. Первинне займання відбувається саме в зоні під фурмою, охоплюючи обмежену ділянку брукхту. Далі фронт горіння поширюється по шару, але це займає час; поки вугілля на периферії займається, центральні зони вже частково прогорають і кисень починає пролітати далі. У результаті значна частина O_2 витрачається на «допалювання» газів уже над шаром брукхту (відбившись від нього), фактично гріючи не метал, а газову фазу [17]. Отже, занадто низька інтенсивність продування O_2 призводить до розтягнутого у часі горіння з поетапним залученням палива; брукхт нагрівається повільно і нерівномірно, причому верхні

шматки можуть вигоряти (окиснюватися), тоді як нижні не прогріються.

З іншого боку, збільшення інтенсивності продувки пришвидшує займання і поширення полум'я. У наших дослідах використання вдосконаленої двоярусної фурми (тобто збільшення подачі O_2 через додаткові сопла верхнього ярусу) дозволило залучити до горіння більший об'єм газових продуктів від палива. Спостерігалось утворення яскравих факелів від допалювання CO в кисневих струменях верхнього ярусу. Це свідчить, що при високій загальній подачі кисню (близькій до $0,4 \text{ м}^3/\text{хв}$ у моделі) значна його частина витрачається на окиснення вже не вугілля, а проміжних продуктів (CO) і навіть Fe . Оскільки верхні струмені були далеко від брукхту, їх тепло майже не гріло метал, лише створювало гарячі гази (суміш CO_2/CO). Таким чином, надлишок O_2 також знижує ефективність – фактичний коефіцієнт використання кисню падає, частина енергії марнується. До того ж, при агресивних O_2 -струменях фіксувалися пошкодження і руйнування футерівки у точках, де струмінь відбивався від брукхту.

Оптimum, за експериментальними даними, лежить у такій області, де кисень подається з достатньою швидкістю для оперативного займання всіх часток палива, але не настільки надлишково, щоб значна його частина залишалась невикористаною. Для пиловугільного палива це досягається відносно легко, адже дрібні частки миттєво вступають в реакцію з O_2 . Вже на самому початку подачі ПВП спостерігалось утворення факела – суміш вугілля з киснем займалася одразу після виходу з сопла. При цьому, на відміну від кускового палива, леткі компоненти не встигають вивільнитися до займання частинки – вони згорають практично одночасно з твердим залишком. Це означає відсутність помітного індукційного періоду: пил горить у режимі близькому до кінетичного, відразу по всьому об'єму струменя. Візуально полум'я при горінні ПВП мало інтенсивно-світлий характер, порівняно з тьмяним червонуватим світлом від кускового вугілля. Яскравість факела свідчить про високу температуру і випромінювальну здатність – що важливо для теплообміну із металом. Було встановлено, що коефіцієнти використання O_2 і палива при застосуванні ПВП значно вищі, ніж при кусковому за будь-якої тривалості нагрівання. Практично весь кисень реагує з паливом в зоні факела, а не поза нею, тому втрата O_2 в газову фазу мінімізується. Це узгоджується з цифрами: $1,0\text{--}1,35 \text{ м}^3 \text{ O}_2/\text{кг}$ ПВП проти $1,5\text{--}2,8 \text{ м}^3/\text{кг}$ для кускового вугілля. Іншими словами, ефективність використання кисню зростає з $\sim 50\text{--}70\%$ до $\sim 90\text{--}100\%$. Паралельно зростає і частка теплоти, що переходить у брукхт: яскраве факельне горіння пилу інтенсивно нагріває поверхню брукхту випромінюванням і конвекцією, що скорочує час досягнення заданої температури поверхні. Експериментально підтверджено, що при використанні ПВП час, необхідний для прогрівання

брукхту до, скажімо, 800°C , скорочується настільки, що метал не встигає оплавитися. У випадку з кусковим паливом, навпаки, часто спостерігається плавлення верхніх шматків, бо для прогріву низів треба довше гріти верх – звідси локальний перегрів. При пиловому способі ж практично виключено утворення рідкої фази до заливки чавуну, адже прогрів проходить рівномірніше і швидше.

Таким чином, оптимальний режим продувки киснем у випадку пиловугільного палива – це подача, близька до стехіометричної, з високою швидкістю виходу струменя (сопла малого діаметру, щоб створити реактивний факел). Наші дослідження показують, що витрати $O_2 \sim 0,25\text{--}0,4 \text{ м}^3/\text{хв}$ при подачі $\sim 0,4\text{--}0,5 \text{ кг}/\text{хв}$ ПВП є доцільними – при цьому досягається необхідна теплова потужність і повнота згорання без надлишку кисню. В перерахунку на тону брукхту, це відповідає витраті O_2 приблизно $18\text{--}24 \text{ м}^3/\text{т}$ і ПВП $14\text{--}20 \text{ кг}/\text{т}$ брукхту, що є прийнятними показниками. Звичайно, у промисловому процесі інтенсивність можна варіювати.

Процес горіння твердого палива відбувається у кілька стадій: (1) підігрів і сушіння палива, (2) піроліз (виділення летких C_mH_n і утворення коксового залишку), (3) згорання летких, (4) згорання коксового залишку. Для кускового вугілля ці стадії чітко розділені в часі і просторі. Спочатку полум'я прогріває поверхню шматків, випаровуючи вологу. Потім починається піроліз: з вугілля виходять газоподібні вуглеводні, які займаються в контакт з киснем – утворюються факели над частинками. На цьому етапі основне тепло дає горіння летких (полум'я над брукхтом). Далі вугілля переходить у коксовий залишок, який горить повільніше, переважно на поверхні контакту шматка з киснем. На завершальній стадії згорають останні порції коксу, даючи максимальне виділення тепла, але вже коли більшість летких вигорала. Внаслідок цього розподіл тепла нерівномірний: спочатку брукхт гріють факели летких – локально і короткочасно; потім довше горить розжарений кокс – він дає тепловипромінювання, але вже без сильного полум'я і лише в місцях розташування шматків вугілля. У наших дослідах з кусковим вугіллям було помітно, що горіння зосереджене спочатку під фурмою (де швидше нагрілося і запалилося паливо), а потім поширилося по шару брукхту, але осередками – навколо кожного шматка вугілля. Утворювались своєрідні «зони горіння», між якими метал залишався холоднішим. Локальна температура в зонах горіння могла перевищувати 1500°C , що призводило до оплавлення прилеглих шматків брукхту та інтенсивного інфрачервоного випромінювання (видимого як червоніння). Водночас ділянки брукхту, віддалені від палаючих шматків палива, нагрівалися лише за рахунок теплопровідності через метал і конвекції гарячих газів – тобто повільніше і на значно нижчу температуру. В результаті в кінці операції підігріву

спостерігався нерівномірний розподіл температур: верхні частини брухту місцями починали плавитися, тоді як глибинні шари могли лишатися нижче 400–500°C. Це підтверджували й промислові дані: в реальних конвертерах верхній шар брухту інколи оплавляється після 4–6 хв підігріву, а нижній нагрівається недостатньо, що змушує заливати чавун обережно, малими порціями, для уникнення викидів.

При переході до пиловугільного палива механізм змінюється докорінно. Дрібні частки (діаметр ~50–100 мкм) майже миттєво прогріваються до температури займання по всьому об'єму факела. Як зазначалося, піроліз і займання відбуваються практично одночасно, тому немає окремої фази вигорання летких – легкі компоненти згорають у міру виходу, одразу у полум'ї навколо частинки. Вуглецевий залишок (кокс) згорає паралельно з леткими, причому з близькою швидкістю, оскільки маленький розмір частинок забезпечує величезну питому поверхню реакції. Утворюється суцільний факел із суміші газоподібних продуктів і згораючих твердих часточок – високотемпературний і дуже яскравий. Цей факел охоплює весь проєкційний майданчик струменя на брухті. У наших експериментах камера зафіксувала, що факел від ПВП вкривав більшу площу поверхні брухту, ніж окремі факели від кускового палива. Це означає, що тепловий потік до металу розподіляється більш рівномірно. Випромінювання від факела з ПВП надзвичайно інтенсивне (температура полум'я оцінювалася >2000 °C), що сприяє швидкому підвищенню температури відкритої поверхні брухту. Конвективна передача тепла теж ефективна – дрібні гарячі продукти згорання проникають у проміжки між шматками брухту, прогріваючи глибші шари. Загальний механізм нагрівання стає ближчим до об'ємного: замість кількох локальних зон горіння маємо факел, що «накриває» увесь брухт зверху, плюс гарячі гази, що просочуються вниз. Тому брухт прогрівається відразу по всьому об'єму більш рівномірно. Пірометром було зафіксовано, що різниця температур між верхніми та нижніми фрагментами брухту при використанні ПВП значно менша, ніж при кусковому паливі (наприклад, 800°C зверху і ~600°C внизу проти 900°C і 300–400°C відповідно). Жоден із шматків брухту не досяг температури плавлення (понад ~1200°C) за час підігріву пилом – натомість усі вони нагрілися до проміжного рівня без фазових перетворень. Це підтвердило основну перевагу: пилове паливо прогріває металобрухт рівномірно, виключаючи локальний перегрів і передчасне плавлення.

Слід зазначити, що більш рівномірний нагрів брухту позитивно впливає і на збереження футерівки. При кусковому паливі спостерігалися випадки, коли перегріті струмені O₂ (особливо відбившись від холодного брухту) спрямовувалися на стінки конвертера, викликаючи часткове руйнування. У разі пилового факела кисень практично весь прореагував з пилом у факелі, тому до стінок доходять вже продукти

згорання (CO₂, N₂, H₂O) з помірною температурою, які не спричиняють інтенсивного окиснення вогнетриву. Тобто пиловугільна технологія потенційно менш агресивна для футерівки конвертера. До того ж, рівномірний підігрів усуває небезпечну ситуацію, коли при заливці чавуну частина брухту залишається переохолодженою – це знижує ризик «вибухових» викидів металу. Отже, перехід від кускового палива до пиловугільного не лише підвищує енергоефективність, а й покращує технологічну безпеку процесу.

Оптимальні режими подачі пиловугільного палива

На основі проведених досліджень та аналізу літератури можна рекомендувати наступні режими використання ПВП для попереднього підігріву металобрухту в конвертерах. По-перше, як вже вказано, співвідношення кисень : паливо повинно бути близьким до стехіометричного. Експерименти показали ефективність діапазону 1,0–1,35 м³ O₂ на 1 кг пилового вугілля – при цьому досягається повне вигорання без лишку кисню і факел має максимальну температуру без «холодних» зон. У практичному плані це означає: знаючи планову масу ПВП для підігріву, слід подавати кисень із розрахунку ~8–12 м³ O₂ на кожні 10 кг ПВП. Наприклад, якщо подається 100 кг пилу, то кисню потрібно ~80–120 м³ (н.у.) протягом операції підігріву.

По-друге, рекомендується плавно змінювати витрату ПВП протягом підігріву. Спочатку – менша витрата для надійного займання (бо занадто велика кількість пилу на старті може не встигнути згоріти і частково винестись незайнятою). Потім, коли факел стабілізувався, витрату збільшують для інтенсивного нагріву основної маси брухту. Під кінець підігріву, коли брухт вже гарячий, можна знову знизити подачу палива, щоб уникнути перегріву поверхні. Такий алгоритм добре узгоджується з даними патенту № 125045 UA: автори виділяють три стадії – перші 25% часу подача 0,4–0,5% маси брухту в хвилину, наступні 25% часу – 1,0–2,0% маси, решта 50% часу – ≥2,5% маси брухту. Іншими словами, якщо брухту 10 т, то в першу хвилину подають ~40–50 кг пилу, у другу – до 100 кг, а в останні кілька хвилин – по 125 кг/хв або більше. Така висока інтенсивність наприкінці дозволяє максимально швидко довести температуру брухту до цільової, коли він вже частково розігрітий і може поглинути більше тепла без ризику локального плавлення. На практиці надто високі витрати пилу обмежені лише пропускну здатністю фурм і можливістю видалення продуктів згорання – в конвертері об'ємом 250 т реальні витрати ПВП становлять, ймовірно, до 300–500 кг/хв, виходячи з аналогії з витратами природного газу (10–20 нм³/т або ~200–400 м³/хв загалом). Наш лабораторний режим 0,5 кг/хв на 80 кг модель відповідає ~150 кг/хв на 24 т брухту (30% від 80 т розплаву), або ~500 кг/хв на 250 т конвертер – цілком досяжна величина при застосуванні декількох фурм. Таким чином,

масштабування пилувугільного підігріву до промислових BOF є технічно реальним.

Щодо загальної витрати пилувугільного палива, орієнтовні оцінки наведені вище: близько 10–20 кг ПВП на 1 т підігріваного брукхту, щоб підняти його температуру на $\sim 700\text{--}800^\circ\text{C}$. Точна кількість залежатиме від початкової температури брукхту (взимку холодний брукхт потребує більше тепла), від складу брукхту (наявність оксидів, фарби – витрати теплоти на їх нагрів/розклад), а також від вимог до кінцевої температури. Якщо достатньо нагріти брукхт до $\sim 500\text{--}600^\circ\text{C}$, то витрати палива зменшуються приблизно вдвічі (недонагрів $\sim 200^\circ\text{C}$ економить $\sim 25\text{--}30\%$ енергії, плюс менше втрач тепла випромінюванням при нижчій температурі). У ряді випадків метою є не максимально можливий прогрів, а лише усунення вологості та полегшення початкового плавлення – тоді витрата ПВП може бути мінімальною (5–10 кг/т). З іншого боку, для досягнення близьких до плавлення температур ($\sim 1000^\circ\text{C}$ і більше) потрібно більше палива – можливо до 30 кг/т. Тож на практиці очікуваний діапазон витрат пилувугільного палива складає порядку 0,5–3% від маси брукхту, залежно від необхідної ступеня нагріву.

Важливо також забезпечити оптимальну дисперсність пилу: занадто грубий пил (наприклад $> 0,2$ мм) може встигати долітати до поверхні брукхту і там горіти як дрібні «куски», що трохи знижує рівномірність; надто дрібний пил ($< 0,01$ мм) може заноситися газовим потоком і частково вигорати уже над брукхтом, не додаючи тепла металу. Досвід показує, що фракція 0,05–0,1 мм є оптимальною для конвертерних умов – такий пил достатньо реакційноспроможний, але й досить інерційний, щоб проникати між шматками шихти.

Результати та їх обговорення

Отримані результати підтверджують, що технологія попереднього підігріву металобрукхту із вдуванням пилувугільного палива є ефективнішою за традиційну з кусковим паливом. Вона забезпечує повніше використання енергії палива, рівномірний нагрів без локального перегріву і менший знос футерівки. Очікується, що впровадження паливно-кисневих фурм у промислових конвертерах дозволить підвищити частку брукхту в шихті (потенційно до 30–40% і більше) без погіршення техніко-економічних показників плавки. Для повної реалізації технології потрібні додаткові дослідження на промислових агрегатах, зокрема оптимізація конструкції фурм (охолодження, захист від забивання пилом) та автоматизація керування подачею палива і кисню. Також слід приділити увагу екологічним аспектам – очищенню відхідних газів від дрібного недопалу та пилу, що потенційно може винестися з конвертера при інтенсивному дутті. Результати роботи свідчать про перспективність впровадження ПВП-технології для підігріву брукхту задля підвищення

ефективності та гнучкості конвертерного виробництва сталі.

Висновки

1. Сучасні технології підігріву металобрукхту зосереджені на компенсації дефіциту теплоти в конвертері при підвищених рівнях брукхту. Традиційний спосіб – спалювання кускового вугілля на брукхті – обмежує частку брукхту $\sim 25\text{--}30\%$ через нерівномірність нагріву та технологічні труднощі. Спеціальні процеси (K-OBM, KMS тощо) історично дозволили збільшити скрап-коефіцієнт до $\sim 40\%$ завдяки подачі додаткового палива і кисню, проте не набули широкого поширення через складність і знос обладнання.

2. Розрахунок енергетичних витрат показує, що для нагрівання 1 т брукхту на $\sim 800^\circ\text{C}$ потрібно $\sim (0,4\text{--}0,5) \cdot 10^8$ кДж теплоти (в залежності від теплоємності та втрат), що еквівалентно $\sim 12\text{--}15$ кг вугілля при повному згорянні. На практиці через неповне згорання палива та тепловтрати витрати вищі. При спалюванні кускового вугілля у конвертері витрата палива сягає 11–21 кг/т брукхту, а кисню – 36–48 $\text{нм}^3/\text{т}$ брукхту [16]. Це відповідає коефіцієнту використання теплоти на рівні $\sim 50\%$. Застосування пилувугільного палива підвищує ефективність: за рахунок повнішого вигорання і інтенсивнішого теплообміну очікувана витрата палива складає $\sim 8\text{--}15$ кг/т брукхту, кисню – 30–35 $\text{нм}^3/\text{т}$ (економія $\sim 20\text{--}30\%$).

3. Пилувугільне паливо має переваги у горінні. Дисперсні частки вугілля ($\sim 0,05$ мм) займаються в кисневому струмені практично миттєво, причому легкі компоненти згоряють одночасно з твердим залишком. Утворюється суцільний високотемпературний факел великої світимості, який рівномірно прогриває брукхт випромінюванням і гарячими продуктами згорання. На відміну від цього, кускове вугілля горить поетапно: спочатку виділяються і згоряють легкі з утворенням локальних факелів, потім тліє коксовий залишок. Це призводить до нерівномірного нагріву – лише навколо окремих шматків палива, з ризиком перегріву верхніх шарів брукхту та недостатнього прогріву нижніх.

4. Ефективність використання кисню і теплоти з застосуванням ПВП значно вища. Експериментально встановлено, що при питомій витраті $\text{O}_2 \sim 1,0\text{--}1,3$ $\text{м}^3/\text{кг}$ ПВП забезпечується повне згорання палива та рівномірний прогрів брукхту без оплавлення. Для кускового палива витрати кисню становлять 1,5–2,8 $\text{м}^3/\text{кг}$, тобто значна частина O_2 не використовується неефективно. Коефіцієнт використання кисню і палива при пилловому підігріві вищий на 20–30% порівняно з традиційним, що підтверджується яскравішим факелом і швидшим нагрівом брукхту.

5. Інтенсивність кисневої продувки критично впливає на процес. Надто мала витрата O_2 призводить до затримки займання і неповного вигорання палива, а занадто велика – до непродуктивного допалювання кисню поза зоною брукхту та підвищеного окиснення

футерівки. Оптимальний режим – близький до стехіометричного. Рекомендовано подавати кисень з витратою, що забезпечує повне окиснення палива протягом тривалості підігріву, але не більше. Для пилового палива це $\sim 0,25\text{--}0,40$ м³/хв на одну фурму (або $\sim 8\text{--}12$ нм³/кг палива).

6. Розроблено рекомендації щодо режиму подачі ПВП. Доцільно здійснювати подачу палива в три стадії: на початку – низька витрата ($\approx 0,4\text{--}0,5\%$ маси брукхту за перші $\sim 25\%$ часу) для забезпечення стабільного займання, в середині – підвищена ($\approx 1\text{--}2\%$ за наступні 25% часу) для інтенсивного прогріву, і на кінцевій стадії – максимальна ($\geq 2,5\%$ маси брукхту за другу половину часу) для доведення брукхту до потрібної температури. Такий режим забезпечує ефективне використання палива: паливо встигає повністю згоріти і віддати тепло, не викликаючи перевитрат кисню.

7. Огляд літературних і патентних джерел показав активний інтерес до тематики підігріву брукхту. Ряд патентів пропонує вдосконалення технології: перехресні потоки кисню і палива, додавання карбонатних сполук для зв'язування оксидів під час підігріву, використання відновлювальних біопалив з високим вмістом фіксованого вуглецю, імпульсний та поетапний режими введення палива тощо. Це підкреслює актуальність проблеми і підтверджує наші результати про переваги керованого, рівномірного теплонадходження. Наукові публікації останніх років фіксують успішні лабораторні і напівпромислові випробування паливно-кисневих фурм з ПВП, які продемонстрували скорочення часу підігріву та кращий тепловий стан брукхту.

8. Рівномірний попередній підігрів металобрукхту сприяє стабілізації температурного стану металеві ванни на початкових етапах плавки, що може впливати на формування окиснювального стану металу перед випуском та ефективність подальших операцій розкислення сталі.

Перелік використаних джерел

- [1] Sayir E., Egrican N. Optimization of energy consumption in integrated blast furnace and BOF steelmaking process. *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, Istanbul, Turkey, 12–14 July 2010. Pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1115/ESDA2010-24024>.
- [2] Contribution of CO₂ emissions from basic oxygen steelmaking process / Madhavan N., Brooks G., Rhamdhani M. A., Bordignon A. *Metals*. 2022. Vol. 12, № 5. Article 797. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12050797>.
- [3] Comparative study of heat transfer simulation and effects of different scrap steel preheating methods / P. Xiao et al. *Metals*. 2024. Vol. 14, № 8. Article 913. DOI: <https://doi.org/10.3390/met14080913>.
- [4] Zhou Y., Naert K., Nuyens D. Modeling scrap composition in electric arc and basic oxygen furnaces. arXiv preprint. arXiv:2504.09382. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.09382>.
- [5] Lytvyniuk Y., Van den Berg B., Skoriansz M. Increased scrap utilization in the converter steelmaking. *9th European Oxygen Steelmaking Conference (EOOSC)*, Aachen, Germany, 17–21 Oct. 2022.
- [6] Potential for increased scrap melting in a BOF / N. Madhavan et al. *AISTech, 2022: Proceedings of the Iron and Steel Technology Conference*, Pittsburgh, USA, 16–18 May 2022. Pp. 441–449. DOI: <https://doi.org/10.33313/386/050>.
- [7] Використання пиловугільного палива для попереднього підігріву металобрукхту / А. Г. Чернятевич та ін. // *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2024. С. 123–131. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.11>.
- [8] Deloche D., Brotzmann K. Method for an improved energy input into a scrap bulk: пат. US 6030431 А США. № US 08/973221; заявл. 11.06.1996; опубл. 29.02.2000.
- [9] Influence of oxy-fuel lance parameters on the scrap pre-heating temperature in the hot metal ladle / S. Zhuang et al. *Metals*. 2023. Vol. 13, № 5. Article 847. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050847>.
- [10] Kikuchi N. Development and prospects of refining techniques in steelmaking process. *ISIJ International*. 2020. Vol. 60, № 12. Pp. 2700–2712. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-186>.
- [11] Спосіб виплавки залізுவуглецевого напівпродукту в кисневому конвертері : пат. 125045 Україна. № а201910881 ; заявл. 04.11.2019 ; опубл. 27.05.2021.
- [12] High-temperature modeling of hot metal tapping from the converter with argon supply to the tap hole cavity / А. А. Pohvalityi et al. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. № 5. Pp. 46–50.
- [13] Відеофіксація фізико-хімічних процесів в порожнині конвертера під час нагріву металевого брукхту / А. Г. Чернятевич та ін. *Литво. Металургія*. 2024 : матеріали XX Міжнародної наук.-практ. конф., м. Дніпро, 28–30 травня 2024 р. С. 507–511.
- [14] Особливості визначення конструкції наконечників кисневих фурм в нестационарних умовах конвертерної плавки з попереднім підігрівом металобрукхту / А. А. Похвалітій та ін. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2021. Вип. 2(39). С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.39.2021.3>.
- [15] Modeling results for the preheating of scrap by means of coal pieces in a converter / R. F. Nagumanov et al. *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41, № 4. Pp. 301–306. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091211040176>.
- [16] Спосіб виплавки сталі в конвертері: пат. 2461 Україна: МПК C21C 5/28. № 4943628; заявл. 21.06.1991; опубл. 26.12.1994. 3 с.
- [17] Сігарьов Є. М., Лобанов Ю. С., Похвалітій А. А. Дослідження впливу конструкції наконечника

фурми на показники конвертерної плавки з попереднім підігрівом металобрухту. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного*

університету (технічні науки). 2021. Вип. 1(38). С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.38.2021.4>.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF SCRAP METAL PREHEATING IN AN OXYGEN CONVERTER USING LUMP COAL AND PULVERIZED COAL FUEL

Chernyatevych A.G.	<i>D.Sc. (Engineering), professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4552-4997, e-mail: agchern@ua.fm;</i>
Siharov E.M.	<i>D.Sc. (Engineering), professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8229-7877, e-mail: siharovyevgen@gmail.com;</i>
Pokvalitii A.A.	<i>PhD (Engineering), associate professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7887-2843, e-mail: ArtemMSLP@gmail.com;</i>
Kondrashenkov D.S.	<i>Postgraduate student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: https://orcid.org/0009-0006-6643-417X, e-mail: notfeilordima@gmail.com;</i>
Vovk A.O.	<i>Postgraduate student, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, e-mail: alyonkamaxvovk@gmail.com</i>

The article is devoted to the study of modern approaches to intensifying the thermal performance of an oxygen converter through the use of alternative energy sources for the preliminary heating of metal scrap. An analysis of existing technological solutions for heating the metallic charge in the converter cavity was carried out, and the possibilities of increasing the efficiency of this process through the use of solid carbon-containing fuels were considered. A comparative analysis of the thermal parameters of the scrap heating process when using traditional lump coal and pulverized coal fuel was performed. Based on thermotechnical calculations, the energy consumption required to increase the temperature of the metallic charge to values that ensure intensification of scrap melting during converter steelmaking was determined. It is shown that preliminary heating of scrap makes it possible to increase the share of scrap in the metallic charge and reduce the consumption of hot metal, which improves the energy efficiency of the steelmaking process and promotes more rational use of energy resources. The influence of the fuel supply method on heat utilization efficiency and the completeness of carbon combustion was also investigated. The change in the heating mechanism during the transition from burning lump coal to blowing pulverised coal fuel through the top oxy-fuel lance was analysed. It was established that when lump coal is used, the combustion process is characterized by a limited reaction surface area and an uneven distribution of heat flows within the scrap layer. In contrast, the use of pulverized coal fuel provides more intensive combustion due to the high dispersion of fuel particles, better mixing with the oxidizer, and a more uniform distribution of thermal energy in the working space of the converter. The obtained results indicate that the use of pulverized coal fuel creates more favorable conditions for efficient heating of scrap metal, ensures more complete utilization of heat, and contributes to increasing the overall energy efficiency of the converter steelmaking process. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the obtained results in the development and implementation of energy-saving technologies for preliminary heating of the metallic charge in industrial oxygen converters.

Keywords: converter; oxygen; lump coa; pulverized coal fuel; fuel-oxygen lance; scrap preheating; carbon monoxide; high-temperature modeling.

References

- [1] E. Cayir and N. Egrican, "Optimization of energy consumption in integrated blast furnace and BOF steelmaking process," in *Proc. ASME 10th Biennial Conf. Engineering Systems Design and Analysis*, Istanbul, Turkey, July 12–14, 2010. doi: [10.1115/ESDA2010-24024](https://doi.org/10.1115/ESDA2010-24024).
- [2] N. Madhavan, G. Brooks, M. A. Rhamdhani, and A. Bordignon, "Contribution of CO₂ emissions from basic oxygen steelmaking process," *Metals*, vol. 12, no. 5, article 797, 2022. doi: [10.3390/met12050797](https://doi.org/10.3390/met12050797).
- [3] P. Xiao, Y. Jin, L. Zhu, C. Wang, and R. Zhu, "Comparative study of heat transfer simulation and effects of different scrap steel preheating methods," *Metals*, vol. 14, no. 8, article 913, 2024. doi: [10.3390/met14080913](https://doi.org/10.3390/met14080913).
- [4] Y. Zhou, K. Naert, and D. Nuyens, "Modeling scrap composition in electric arc and basic oxygen furnaces," 2025, *arXiv:2504.09382*. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.09382>.
- [5] Y. Lytvyniuk, B. Van den Berg, and M. Skoranz, "Increased scrap utilization in the converter steelmaking,"

- in *Proc. 9th European Oxygen Steelmaking Conf. (EOCS)*, Aachen, Germany, Oct. 17–21, 2022.
- [6] N. Madhavan, G. A. Brooks, M. A. Rhamdhani, B. K. Rout, and A. Overbosch, "Potential for increased scrap melting in a BOF," in *Proc. AISTech 2022: Iron and Steel Technology Conf.*, Pittsburgh, PA, USA, May 16–18, 2022, pp. 441–449. doi: **10.33313/386/050**.
- [7] A. H. Cherniatevych, A. A. Pokhvalityi, Ye. M. Sihariov, O. A. Chubina, and D. S. Kondrashenkov, "Vykorystannia pylovuhilnogo palyva dlia poperednoho pidihrivu metalobrukhtu" ["Use of pulverized coal fuel for preheating metal scrap"], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, pp. 123–131, 2024. doi: **10.31319/2519-2884.tm.2024.11**. (Ukr.)
- [8] D. Deloche, and K. Brotzmann, "Method for an improved energy input into a scrap bulk," *U.S. Patent Appl. 6030431A*, Feb. 29, 2000.
- [9] S. Zhuang, D. Zhan, T. Wang, P. Li, and Y. Yang, "Influence of oxy-fuel lance parameters on the scrap pre-heating temperature in the hot metal ladle," *Metals*, vol. 13, no. 5, article 847, 2023. doi: **10.3390/met13050847**.
- [10] N. Kikuchi, "Development and prospects of refining techniques in steelmaking process," *ISIJ International*, vol. 60, no. 12, pp. 2700–2712, 2020. doi: **10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-186**.
- [11] L. S. Molchanov, A. S. Koveria, L. H. Kieush, Ye. V. Synehin, and M. M. Boiko, "Sposib vyplavky zalizovuhletsevoho napivproduktu v kysnevomu konverteri" ["Method of smelting iron-carbon semi-product in oxygen converter"], *UA Patent 125045 Appl. a201910881*, May 05, 2021. (Ukr.)
- [12] A. A. Pohvalityi, A. D. Kulik, E. N. Sigarev, K. I. Chubin, M. A. Kascheev, and A. N. Stoyanov, "High-temperature modeling of hot metal tapping from the converter with argon supply to the tap hole cavity," *Metallurgical and Mining Industry*, no. 5, pp. 46–50, 2017.
- [13] A. H. Cherniatevych, Ye. M. Sihariov, L. S. Molchanov, A. A. Pokhvalityi, D. S. Kondrashenkov, and O. A. Chubina, "Videofiksatsiia fizyko-khimichnykh protsesiv v porozhniyni konvertera pid chas nahrivu metalevoho brukhtu" ["Video recording of physico-chemical processes in the converter cavity during metal scrap heating"], in *Proc. XX Int. Sci.-Pract. Conf. Casting. Metallurgy*, Dnipro, Ukraine, May 28–30, 2024, pp. 507–511. doi: **10.15407/foundry-metallurgy-2024**. (Ukr.)
- [14] A. A. Pokhvalityi, Ye. M. Sihariov, K. I. Chubin, Yu. S. Lobanov, and P. A. Yakunin, "Osoblyvosti vyznachennia konstruktsii nakonechnykh kysnevnykh furn v nestatsionarnykh umovakh konverternoi plavky z poperednim pidihrivom metalobrukhtu" ["Features of determining the design of oxygen lance tips in non-stationary conditions of converter smelting with scrap preheating"], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, no. 2(39), pp. 27–32, 2021. doi: **10.31319/2519-2884.39.2021.3**. (Ukr.)
- [15] R. F. Nagumanov, E. V. Protopopov, A. G. Chernyatevich, and A. V. Feoktistov, "Modeling results for the preheating of scrap by means of coal pieces in a converter," *Steel in Translation*, vol. 41, no. 4, pp. 301–306, 2011. doi: **10.3103/S0967091211040176**.
- [16] Yu. M. Borysov, V. O. Makhnytskyi, V. I. Trubavin, V. O. Khilko, L. M. Uchytel, and S. S. Brodskyi, "Sposib vyplavky stali v konverteri" ["Method of steel smelting in a converter"], *UA Patent 2461 Appl. 4943628*, Dec. 26, 1994. (Ukr.)
- [17] Ye. M. Sihariov, Yu. S. Lobanov, and A. A. Pokhvalityi, "Doslidzhennia vplyvu konstruktsii nakonechnykh furn na pokaznyky konverternoi plavky z poperednim pidihrivom metalobrukhtu" ["Investigation of the influence of the lance tip design on the indicators of converter smelting with scrap preheating"], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, no. 1(38), pp. 33–38, 2021. doi: **10.31319/2519-2884.38.2021.4**. (Ukr.)

Стаття надійшла 11.02.2026

Стаття прийнята 08.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Порівняльна оцінка ефективності попереднього підігріву металобрукту в кисневому конвертері при використанні кускового та пиловугільного палива / А. Г. Чернятевич та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 258–268. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359814>.