

DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.9

УДК 669.184.244

Чубіна О.А.¹, к.т.н., доцент., ORCID: 0000-0003-2213-5013, e-mail: ms.chubina@ukr.net
Похвалітий А.А.¹, к.т.н., доцент., ORCID: 0000-0002-9652-767X, e-mail: artemmslp@gmail.com
Руденко М.Р.¹, к.т.н., доцент., ORCID: 0000-0002-8016-5221, e-mail: 18rudenko@gmail.com
Кисляков В.Г.², к.т.н., ORCID: 0000-0002-1775-5050, e-mail: ovoch-isi@outlook.com
Кондрашенко Д.С.¹, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти, ORCID: 0009-0006-6643-417X, e-mail: notfeilordima@gmail.com

¹Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

²Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро

Chubina Olena¹, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy

Pokhvalityy Artem¹, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy

Rudenko Mykola¹, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy

Kislyakov Volodymyr², Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Out-of-Furnace Cast Iron Processing

Kondrashenkov Dmytro¹, Postgraduate Student

¹Dniprovsky State Technical University, Kamianske

²Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro

ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТИ ЧАВУНУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ У КОНВЕРТЕРНИХ ЦЕХАХ: СУЧАСНІ ПІДХОДИ І РІШЕННЯ

Мета дослідження полягає в обґрунтуванні ефективних методів зниження витрати чавуну при виробництві сталі в діючих конвертерних цехах, спрямованих на оптимізацію виробничого процесу, зниження витрат на сировину та підвищення якості кінцевої продукції, з урахуванням сучасних технологічних рішень та екологічних вимог.

Ключові слова: виробництво сталі; конвертерні цехи; витрата чавуну; металобрухт; оптимізація процесу; модернізація обладнання; продування киснем; технологічні добавки; економічна ефективність.

The aim of the study is to develop and substantiate effective methods for reducing pig iron consumption in steel production in existing converter shops, aimed at optimizing the production process, reducing raw material costs and improving the quality of the final product, taking into account modern technological solutions and environmental requirements.

Keywords: steel production; converter shops; consumption of cast iron; scrap metal; process optimization; modernization of equipment; blowing with oxygen; technological additives; economic efficiency.

Постановка проблеми

Процес виробництва сталі, особливо в конвертерних цехах, вимагає значних витрат, серед яких основну частку займає витрата чавуну. В умовах підвищення конкуренції на ринку металургії та зростання цін на сировину виникає необхідність в оптимізації виробничих процесів. Одним з ключових аспектів такої оптимізації є зниження витрати чавуну та підвищення ефективності виробництва без шкоди для якості кінцевого продукту.

Для цього можна використати декілька підходів:

1. Поліпшення якості вихідної сировини

Одним з ефективних способів зниження витрати чавуну є підвищення якості сировини, що використовується. Це передбачає більш ретельний відбір металобрухту та його попередню обробку з метою зменшення вмісту шкідливих домішок, таких як фосфор та сірка. Використан-

ня більш чистого металобрухту дозволяє зменшити частку чавуну в шихті, зберігаючи при цьому необхідні характеристики сталі.

Сучасні технології обробки металобрухту включають попереднє сортування, видалення неметалевих включень, а також термічне та хімічне очищення. Ці заходи дозволяють як поліпшити якість готової сталі, так і знизити енергетичні витрати на переробку.

2. Модернізація обладнання

Оновлення та модернізація конвертерних агрегатів, впровадження нових систем подачі дуття та автоматизації процесу продувки сприяє більш повному окисленню вуглецю та інших домішок у сталі, що знижує необхідність використання додаткових матеріалів.

Сучасні системи управління і контролю температурного режиму всередині конвертера допомагають підтримувати оптимальні умови для процесу, що в свою чергу знижує необхідність додавання чавуну для отримання необхідних характеристик металу. Крім того, використання сучасних технологій дозволяє краще регулювати склад шлаку і зменшити втрати металу за рахунок поліпшення системи зливу шлаку та його переробки.

3. Вибір та оптимізація режимів продувки

Правильна організація процесу продувки є важливим фактором у зниженні витрати чавуну. У конвертерному виробництві продувка киснем дозволяє видаляти з металу вуглець та інші домішки. Однак ефективність цього процесу залежить від багатьох факторів, таких як температура в конвертері, час продування, концентрація кисню і т.д.

Сучасні дослідження показали, що скорочення часу продувки і точний контроль подачі кисню можуть значно поліпшити якість сталі і знизити витрати на чавун. Це досягається за рахунок більш рівномірного розподілу температурних полів та прискореного окислення домішок.

4. Використання технології вторинної переробки

Одним із перспективних напрямів зниження витрати чавуну є максимальне включення до шихти металобрухту. На сьогоднішній день частка металобрухту в конвертерній шихті може досягати 25—30 %, що дозволяє суттєво скоротити використання чавуну. Це не тільки заощаджує ресурси, а й сприяє зниженню викидів вуглекислого газу.

Використання вторинної сировини потребує впровадження спеціалізованих технологій, таких як індукційне нагрівання або електродугова плавка. Ці методи дозволяють плавити метал з мінімальними витратами енергії, забезпечуючи високу якість готової сталі.

5. Застосування технологічних добавок

Одним із важливих факторів зниження витрати чавуну є використання шлакоутворювальних та легуючих добавок, які сприяють більш ефективному управлінню хімічним складом сталі. Шлакоутворюючі добавки покращують окислення домішок, тим самим знижуючи необхідність додавання додаткового чавуну до плавки.

Легуючі елементи, такі як марганець, хром та нікель, дозволяють покращити механічні властивості сталі без збільшення частки чавуну в шихті. Це дозволяє виробляти високоякісну сталь із мінімальними витратами на сировину.

6. Підігрів брухту в конвертері

Використання технології підігріву брухту в конвертері є ключовим кроком для підвищення енергоефективності та покращення продуктивності у металургії. Приклади успішного впровадження цієї технології в таких компаніях, як ArcelorMittal, ThyssenKrupp, Voestalpine, Tata Steel, Metinvest, підтверджують її економічну та екологічну ефективність. Технологія не тільки знижує енерговитрати, а й покращує якість сталі, роблячи процес виробництва більш стійким та конкурентоспроможним.

Але слід зазначити, що кожен із цих методів вимагає комплексного підходу і ретельного аналізу їхнього успішного застосування, бо у довгостроковій перспективі такі заходи не лише знижують витрати на виробництво, а й роблять процес більш екологічно безпечним та стійким.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Процес додавання вуглецевмісних матеріалів у кусковій формі відрізняється простотою і не вимагає переобладнання конвертерів. Однак, використання таких матеріалів у процесі плавки викликає підвищення рівня сірки в сталі, оскільки більшість сірки, що міститься у вугіллі, потрапляє в метал.

У промислових умовах було протестовано ряд способів подачі вугілля в конвертер: під брут, на брут, на чавун, а також у процесі продування. Було встановлено, що якщо вугілля завантажується під брут, то воно може залишатися неактивним на певний час і раптово вступити в реакцію після розплавлення останнього, що супроводжується різким збільшенням газовиділення, сплесками полум'я з конвертера при заливці чавуну і опусканні кисневої фурми, спінюванням. Подача вугілля порціями в ході продування знижує його ефективність, тому оптимальним варіантом є одночасна подача вугілля з початком продування киснем.

Дослідження показали, що додавання вугілля у кількості 8—10 кг/т сталі збільшує час продування на 2—3 хвилини, а спалювання такого обсягу вугілля призводить до збільшення витрати кисню на 5—7 м³/т сталі [1].

Технологію присадки вугілля впроваджено на низці підприємств, де його витрата становить від 3,0 до 15,0 кг на тонну сталі (наприклад, на металургійному комбінаті ПрАТ «КА-МЕТ-СТАЛЬ» за варіантом з верхньою продувкою).

Роботи з впровадження вуглецевмісних матеріалів в конвертерний процес з метою збільшення частки брухту в металошихті проводилися і за кордоном, але їх промислове застосування виявилось обмеженим.

На заводі в Еймені, Нідерланди, в 100-тонний конвертер з комбінованою продувкою (нейтральний газ подається через днище, кисень — зверху через спеціальну фурму, оптимізовану для збільшення ступеня допалювання оксиду вуглецю) додавали антрацит з вмістом 3% у кількості 10 кг/т сталі через 4 хвилини після заливання чавуну. Це дозволило знизити витрати чавуну на 3 кг на кожний кілограм доданого антрациту.

У конвертерних цехах компанії «LTV Steel» у США на установках обсягом 185—260 тонн проводилися експерименти щодо зниження витрати чавуну з використанням різних теплоносіїв, включаючи антрацити різного складу [3]. Антрацит додавали після заливання чавуну або початку плавки в чистому вигляді, в суміші з вапном або в брикетах. Коефіцієнт заміщення чавуну (КЗЧ) становив 2,0—4,0 кг на кожний кілограм вугілля залежно від способу додавання та складу антрациту.

Додавання дрібного коксу до 190-тонних конвертерів заводу компанії «Inland Steel», США, дозволило скоротити витрати чавуну на 2,5 кг на кожен кілограм коксу.

У деяких цехах Японії дрібний кокс додавався до 80-тонних конвертерів компанії «Кобе сейкосе» для збільшення частки брухту. У 120-тонні та 170-тонні конвертери компанії «Сін ніппон сейтецу», які працюють із подачею нейтральних газів через днище, також вводили дрібний кокс. У 85-тонні та 230-тонні конвертери компанії «Кавасакі сейтецу», що працюють за комбінованим процесом з подачею кисню через днище, зниження витрати чавуну становило 2,5—3,5 кг на кожен кілограм коксу [2].

На відміну від використання кускових матеріалів, застосування вуглецевмісних матеріалів у порошковому вигляді пов'язане з додатковими витратами, зумовленими необхідністю організації процесу помелу вугілля, транспортування та вдування порошку. Введення вуглецевмісних порошоків у рідку сталь було випробувано на ряді металургійних заводів, де витрата таких матеріалів становила 11—15 кг на тонну сталі [3].

Як і у випадку з кусковими вуглецевими матеріалами, ефективність застосування порошоків залежить від їх складу, включаючи вміст летких компонентів і вологи. У ході розробки технології вдалося знизити витрату чавуну на 2—4 кг на кожен кілограм порошку, що використовується. Подібну залежність було підтверджено на дослідному конвертері Інституту чорної металургії (ІЧМ).

Нижче наведено дані щодо зниження витрати рідкого чавуну при вдуванні порошкоподібного вугілля в 300-тонний конвертер (чисельник) та дослідний конвертер (знаменник): При витраті порошку в діапазоні 1—15 кг/т тривалість продувки в 300-тонному конвертері збільшується на 3—4 хвилини. При вмісті сірки у вугіллі на рівні 0,5 % концентрація сірки в сталі на випуску підвищується до 0,003—0,004 %.

Використання технології вдування порошоків пов'язане з необхідністю вирішення проблем, пов'язаних з абразивним впливом порошоків на обладнання. Це стосується фурм, призначених для спільного введення кисню та твердого палива у ванну, оскільки їхня зносостійкість

знижується. Згідно з даними [4], ефект від вдування дрібнодисперсного вугілля сприяє зниженню витрати рідкого чавуну на 5,5 кг на кожен кілограм матеріалу, що вдується, а для термоантрациту цей показник трохи вище — 6,8 кг/т [5].

Дві зарубіжні технології вдування вуглецевмісних матеріалів у конвертер, які знайшли промислове застосування — це процеси KMS і KS, розроблені німецькою компанією «Klöckner-Werke», а також процес АЛКІ, створений люксембурзькою фірмою Arbed. Технології KMS і KS, призначені для переробки металошихти з вмістом брухту від 40 до 100 %, впроваджено на трьох 60-тонних та одному 125-тонному конвертерах на заводах компаній Maximilianshütte і Georgsmarienhütte в Німеччині. Ці процеси передбачають комбіновану подачу кисню через верхні та донні фурми, вдування вугільного порошку через донні фурми та допалювання газів у конвертері. [2, 6]. Економія чавуну з використанням вугільного порошку становить 3,0—3,5 кг на 1 кг порошку при вмісті летких речовин у вугіллі на рівні 5,0 %.

При збільшенні ступеня допалювання газу в конвертері спостерігається значне підвищення ефективності використання вугілля. Незважаючи на зниження відмінностей у використанні вугілля з різним вмістом летких речовин, різниця залишається помітною.

Процес АЛКІ, з можливістю переробки до 45 % брухту в конвертері при переділі фосфористого чавуну (приблизно 1,8 % P), було впроваджено на 180-тонних конвертерах в Еш-Бельвалі (Люксембург). Ці конвертери працювали за процесом ЛБЕ, який передбачає подачу нейтрального газу через донні фурми та допалювання газів у порожнині конвертера з використанням двопоточної кисневої фурми. У процесі також проводилося вдування порошкоподібного вугілля через спеціально сконструйовану кисневу фурму, яка передбачала двопотокове подання газу для допалювання оксиду вуглецю. [2, 6]. Було зазначено, що вдування 1 кг чистого вуглецю дозволяє переробити 7 кг брухту (антрацит містить 91 % вуглецю, 6 % летких та 3 % золи).

Завдяки цьому, процес АЛКІ призвів до зниження витрати чавуну на 44 кг/т при одночасному збільшенні частки брухту, що переробляється, на 4,5 % і витраті антрациту 10,4 кг/т.

Промислове випробування процесу АЛКІ було проведено компанією «Сін Ніппон Сей-Тецу» (Кіміцу, Японія) на 250-тонних конвертерах при переробці звичайних чавунів [6]. Дослідження показали, що вдування 1 кг чистого вуглецю збільшує витрату брухту на 6,1 кг (в рамках дослідження введення вуглецю становило 5—25 кг/т сталі). При перерахунку на антрацит, вміст вуглецю в якому не перевищував 85 % (вологість ≤ 4 %, вміст летких ≤ 8 %), витрата брухту зростала на 5,2 кг на кожний кілограм антрациту. Збільшення витрати брухту на 1,4 % було зв'язано з поліпшенням допалювання оксиду вуглецю під час використання спеціальної фурми, яка не застосовувалася у звичайному технологічному процесі.

Аналогічний комбінований процес було досліджено компанією «Сумітомо Кіндзоку Коре» (Японія) на експериментальному 15-тонному конвертері [6]. У даному процесі використовувалася двопотокова верхня киснева фурма для продування та допалювання оксиду вуглецю з центральним соплом для вдування порошкоподібних вуглецевмісних матеріалів. Нейтральний газ подавався через днище.

Основні параметри процесу були такими:

- інтенсивність подачі кисню: 2,2 м³/(хв/т);
- інтенсивність подачі через сопла для допалювання оксиду вуглецю (шість сопел під кутом 30°): до 0,88 м³/(хв/т);
- інтенсивність подачі нейтрального газу через днище: 0,09—0,15 м³/(хв/т).
- витрата вугільного порошку досягала 30 кг/т сталі;

Збільшення витрати брухту склало близько 10 % для порошку з напівкоксу (вміст летких 5 %, зольність 2 %) і 7 % для порошку з газового вугілля (вміст летких 35 %, зольність 9,5 %). Коефіцієнт заміщення чавуну (КЗЧ) становив близько 3,6 кг/кг для порошку з напівкоксу та 2,6 кг/кг для порошку з газового вугілля.

Аналіз зарубіжного промислового досвіду з вдування вуглецевмісних матеріалів в конвертерну ванну при комбінованому процесі, що включає подачу нейтрального газу або кисню через днище і допалювання оксиду вуглецю за допомогою двопотокових фурм, демонструє зниження витрати чавуну на 3,5—4,5 кг вугілля (при вмісті не більше 5 % летких речовин у

вугіллі). Це відбувається незалежно від методу подачі через донні або верхні фурми. Отримані у ході вітчизняних промислових досліджень значення коефіцієнта заміщення чавуну (КЗЧ) при вдуванні пилу УСТК в глуходонні конвертери з підвищеним ступенем допалювання оксиду вуглецю можна порівняти із зарубіжними показниками.

Вітчизняні дослідження показують, що при використанні порошкоподібних вуглецевмісних матеріалів (пил УСТК) коефіцієнт заміщення чавуну дещо вищий у порівнянні з кусковими матеріалами аналогічного складу (4,0 та 3,5 кг на кілограм вугілля відповідно). Ці тенденції вимагають додаткової перевірки на більшій кількості плавок із вдуванням порошкоподібного вугілля.

Зарубіжні дослідження, переважно в Японії, також порівнювали ефективність використання кускових і порошкоподібних вуглецевих матеріалів. Зокрема, на заводі компанії «Сін Ніппон Сейтецу» в Мурорані (Японія), при виробництві корозійно-стійкої сталі, проводили дослідження ефективності присадки кускового коксу через горловину та подачі порошкоподібного коксу через донні фурми у 120-тонних конвертерах, що працюють за комбінованим кисневим процесом (приблизно 10 % кисню подавалося через донні фурми) [2, 6]. При витраті коксу від 10 до 30 кг на тонну сталі не виявлено значних відмінностей у їх ефективності, а збільшення використання брукхту склало 3,0—3,5 кг на кожний кілограм коксу. Ці висновки також підтверджуються розрахунковими даними: при витраті коксу в 30 кг на тонну сталі частка брукхту в металошихті збільшилася на 10 %.

Також на 250-тонних конвертерах заводу в Кіміцу були проведені промислові дослідження процесу АЛКІ, в ході яких порівнювалася ефективність використання порошкоподібного антрациту і кускового коксу. Вдування порошкоподібного антрациту (5—25 кг вуглецю на 1 т сталі) в рідку ванну зверху в поєднанні з використанням спеціальної фурми для підвищення допалювання газів в конвертері призвело до збільшення частки брукхту на 5—14 %. Введення тієї ж кількості вуглецю у вигляді кускового коксу без застосування спеціальної фурми забезпечило приріст частки брукхту лише на 1,4—7,5 %. У пізніших публікаціях про роботи на тих же конвертерах різниця в ефективності між порошкоподібним антрацитом і кусковим коксом була вказана як 1,7-кратна [6]. З урахуванням допалювання оксиду вуглецю, яке відбувалося тільки при вдуванні порошкоподібного антрациту, різниця в ефективності склала близько 20 %.

Порівняльні дослідження використання кускового та порошкоподібного антрациту (вдування зверху) проводилися також на підприємстві «British Steel» у Великобританії при застосуванні стандартної кисневої фурми, без здійснення заходів щодо збільшення допалювання газів. Значна різниця в ефективності не була виявлена (не більше 5 %), а збільшення використання брукхту склало 4 кг на кожний кілограм антрациту [2].

Аналіз зарубіжних досліджень, в яких порівнювалася ефективність застосування порошкоподібних і кускових вуглецевмісних матеріалів для зниження частки чавуну в металошихті конвертерів, а також дані промислових експериментів, не дозволяють стверджувати, що використання порошкоподібних вуглецевмісних матеріалів істотно ефективніше для збільшення частки брукхту в порівнянні з кусковими матеріалами, особливо якщо при використанні кускових матеріалів застосовується двопоточна фурма для допалювання газів, а при порошкоподібних — ні.

Таким чином, зарубіжні промислові дослідження, проведені в Японії та Великобританії, показали, що значних відмінностей в ефективності використання порошкоподібних і кускових вуглецевмісних матеріалів немає, особливо якщо застосовується двопотокова фурма для допалювання газів у конвертері.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає в аналізі та обґрунтуванні сучасних технологічних методів зниження витрат чавуну при виробництві сталі в конвертерних цехах. Основна увага приділяється оптимізації процесів шляхом модернізації обладнання та впровадження ефективних режимів присадки вуглецевмісних матеріалів.

Виклад основного матеріалу

Для зменшення витрат чавуну при виробництві конвертерної сталі в Україні необхідно застосовувати технології, які не знижують обсяги виробництва та якість продукції, не вимага-

ють значних інвестицій і вже пройшли промислові випробування на підприємствах в Україні та за кордоном. Слід при цьому враховувати, що збільшення частки брухту в металошихті призводить до зниження продуктивності конвертера, збільшення витрат на переобладнання та обмеження масштабів промислових випробувань.

Якщо пріоритетом є підвищене використання брухту, його частка не має перевищувати 30—33 %. Технології, що передбачають збільшення частки брухту до 40—45 %, можна застосувати лише у спеціально спроектованих цехах.

На сьогодні в чинних цехах України успішно протестовано такі методи для зниження витрати чавуну:

- додавання вуглецевмісних матеріалів у твердому або порошковому вигляді;
- попередній підігрів брухту природним газом або вугіллям;
- комбінована продувка нейтральним газом знизу та киснем зверху для збільшення допалювання оксиду вуглецю.

Для подальшого вдосконалення технологій проведення конвертерної плавки зі збільшеною часткою лома назріла необхідність провести порівняльний аналіз технологічної ефективності додавання кускових та порошкоподібних вуглецевмісних матеріалів.

Для аналізу логічних залежностей та їх взаємозв'язку, за результатами зарубіжних та вітчизняних промислових досліджень, можна виділити декілька ключових факторів, які впливають на процеси плавки сталі з підвищеним вмістом брухту в шихті [7—11]. До таких факторів відносяться: тип вуглецевмісного матеріалу (кусковий чи порошкоподібний); спосіб подачі (через фурму, з брухтом, під час продування тощо); вплив на витрату чавуну (економія на кілограм доданого матеріалу); зміна вмісту сірки в сталі після додавання матеріалів; зміна витрати кисню; час продувки; збільшення частки брухту.

Всі типи вуглецевмісних матеріалів збільшують вміст сірки у сталі, що потребує додаткових заходів з десульфурації шлаком та позапічної обробки для зниження цього негативного ефекту. Збільшення вмісту сірки сталі, як правило викликається високим вмістом сірки в брухті (потрібно використання більш чистих руд або металобрухту) та у вугіллі (табл. 1).

Таблиця 1. Зміни хімічного складу сталі при використанні вуглецевмісних матеріалів

Тип матеріалу	Зміна вмісту сірки в сталі на випуску (%)	Вплив на тривалість продувки (хв.)
Кускове вугілля	Збільшує до 0,003—0,004	+2—3
Порошкове вугілля	Збільшує до 0,003—0,004	+3—4

Використання кускових вуглецевмісних матеріалів дає такі переваги як простоту додавання вуглецевмісних матеріалів, яка не вимагає переобладнання конвертерів. Різні підприємства по всьому світу використовують вугілля (антрацит, кокс) для зниження витрат чавуну та збільшення частки брухту у виробництві сталі, з досягненням економії 2,0—4,0 кг чавуну на кожен кілограм доданого вугілля.

Порошкові матеріали зазвичай забезпечують більшу економію чавуну на одиницю ваги порівняно з кусковими матеріалами, особливо при комбінованій подачі через днище і верхні фурми конвертера. Однак їх застосування пов'язане з додатковими витратами на помел, транспортування і вдування порошоків, що підвищує вартість процесу. Використання порошкових матеріалів також створює проблеми з абразивним впливом на обладнання, особливо на фурми для введення кисню та вугілля. Вдосконалені технології вдування вугілля забезпечують економію чавуну до 5,5—6,8 кг на кожен кілограм матеріалу.

Середня економія витрати чавуну при додаванні різних типів вуглецевмісних матеріалів приведена у вигляді діаграми (рис. 1).

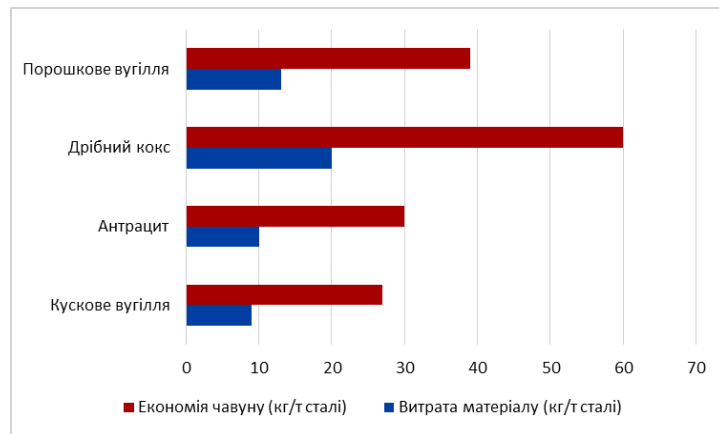


Рис. 1. Показники економії чавуну та витрати вуглецевмісних матеріалів

Позитивний вплив вуглецевмісних матеріалів на показники економії чавуну при застосуванні двопотокової фурми для допалювання газів у конвертері підвищується, але різниця в ефективності між кусковими та порошкоподібними вуглецевмісними матеріалами залишається незначною при використанні цієї фурми (табл. 2).

Таблиця 2. Вплив ключових параметрів технології на виробничі показники

Параметр	Значення	Вплив на процес
Витрата вугілля	3,5—4,5 кг/кг вугілля	Зниження витрати чавуну на 3,5—4,5 кг/кг вугілля
Вміст летких речовин у вугіллі	не більш 5 %	Незалежно від способу подачі вугілля (донні або верхні фурми)
Коефіцієнт заміщення чавуну (КЗЧ)	4,0 кг/кг (порошкоподібні матеріали)	Показники для порошкоподібних матеріалів
Коефіцієнт заміщення чавуну (КЗЧ)	3,5 кг/кг (кускові матеріали)	Показники для кускових матеріалів
Частка брукху при порошкоподібному антрациті	+5—14 %	При вдуванні порошкоподібного антрациту
Частка брукху при кусковому коксі	+1,4—7,5 %	При використанні кускового коксу
Застосування двопотокової фурми	застосовується для допалювання оксиду вуглецю	Підвищує ефективність використання вуглецевмісних матеріалів

Приріст частки брукху в металошихті безпосередньо залежить від способу подачі вуглецевмісних матеріалів та їх типу (табл. 3). Подача вугілля під час продувки або в процесі заливання чавуну показує різні особливості перебігу процесу. Найбільш оптимальним способом є подача вугілля одночасно з початком кисневої продувки, що забезпечує рівномірний хід реакції і попереджає різке виділення газів.

Таблиця 3. Вплив способу подачі вуглецевмісних матеріалів та їх типу на приріст частки брукху в металошихті

Тип матеріалу	Спосіб подачі	Економія чавуну (кг/кг матеріалу)	Збільшення частки брукху (%)
Кусковий кокс	Через горловину	3,0—3,5	3,0—3,5
Порошковий антрацит	Вдування через фурму	5,2	5—14

Залежність періоду подачі та кількості вуглецевмісних матеріалів на економію чавуну можна представити у вигляді таблиці (табл. 4).

Таблиця 4. Вплив різних періодів подачі та кількості вуглецевмісних матеріалів на витрати чавуну

Тип матеріалу	Період подачі	Витрата матеріалу (кг/т сталі)	Економія чавуну (кг/кг матеріалу)	Збільшення частки брухту (%)	Вплив на витрату кисню (м ³ /т сталі)
Кускове вугілля	Подача разом з брухтом	8—10	2—4	Н/Д	+5—7
Антрацит	Подача через 4 хв після заливки чавуну	10	3	Н/Д	Н/Д
Дрібний кокс	Подача під час плавки	10—30	2,5—3,5	1,4—7	Н/Д
Порошкове вугілля	Вдування під час продувки	11—15	2—4	5—14	Н/Д

Структурувати дані для подальшого аналізу і визначення оптимальних умов для підвищення ефективності плавки сталі допоможе створена таблиця залежностей (табл. 5), яка ілюструє вплив різних вуглецевмісних матеріалів (вугілля, антрациту, коксу) на виробничі параметри процесу, такі як тривалість продувки, витрата кисню та чавуну.

Таблиця 5. Вплив вуглецевмісних матеріалів на виробничі параметри процесу плавки

№	Фактор, що впливає	Параметр, на який впливає	Залежність
1	Додавання вуглецевмісних матеріалів	Вміст сірки у сталі	Збільшення вмісту сірки у сталі, т.к. сірка з вугілля переходить у метал
2	Додавання вугілля (8—10 кг/т сталі)	Тривалість продування	Збільшення часу продування на 2—3 хв.
3	Додавання вугілля (8—10 кг/т сталі)	Витрата кисню	Збільшення витрати кисню на 5—7 м ³ /т сталі
4	Додавання антрациту (10 кг/т сталі)	Витрата чавуну	Зниження витрати чавуну на 3 кг на кожний кілограм антрациту
5	Спосіб додавання та склад антрациту	Коефіцієнт заміщення чавуну (КЗЧ)	КЗЧ варіюється від 2,0 до 4,0 кг на кожний кілограм вугілля
6	Додавання дрібного коксу	Витрата чавуну	Зниження витрати чавуну на 2,5—3,5 кг на кожний кілограм коксу

Ключові фактори та їх вплив на продуктивність у сталеплавильних конвертерах при застосуванні технології додавання вуглецевмісних добавок для підвищення відсотка використання брухту представлені нижче (рис. 2, табл. 6).

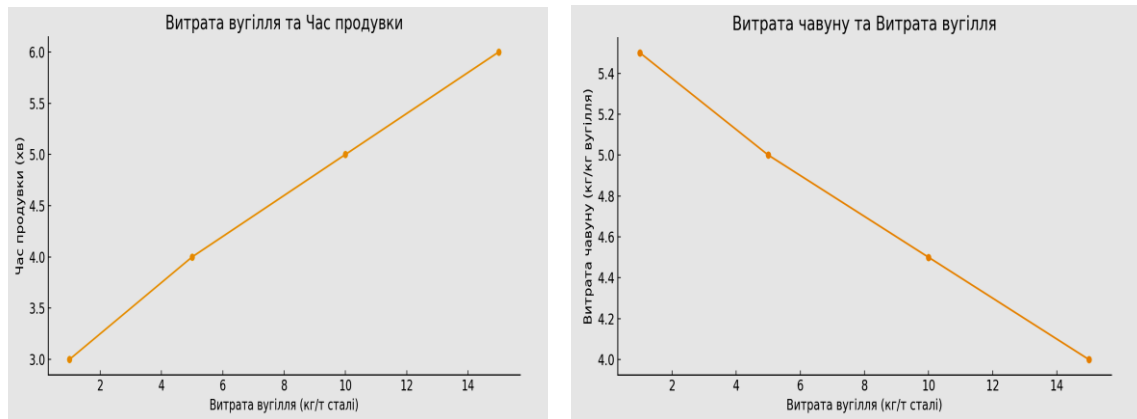


Рис. 2. Вплив кількості доданих вуглецевмісних матеріалів на показники витрати чавуну та час продувки

Таблиця 6. Ключові фактори використання вуглецевмісних матеріалів та їх вплив на технологічний процес виробництва сталі з описом залежності кожного елемента

Фактор/Технологія	Залежність/Результат
Застосування вуглецевмісних порошків	Додаткові витрати на помел, транспортування, вдування
Витрата вуглецевмісних порошків	11—15 кг на тонну сталі
Введення вуглецевмісних порошків	Зниження витрати чавуну на 2—4 кг на кожний кг порошку
Вплив легких компонентів	Негативний вплив при високому вмісті легких компонентів
Процес KMS та KS	Економія чавуну на 3,0—3,5 кг на 1 кг порошку
Процес АЛКІ	Зниження витрати чавуну на 44 кг/т при використанні антрациту
Збільшення вмісту брухту	Збільшення частки брухту на 4,5 %
Вдування 1 кг вуглецю	Збільшення переробки брухту на 7 кг для антрациту, 6,1 кг для чистого вуглецю
Вдування порошку з напівкоксу	Коефіцієнт заміщення чавуну (КЗЧ) — 3,6 кг чавуну на 1 кг порошку
Вдування порошку з газового вугілля	Коефіцієнт заміщення чавуну (КЗЧ) — 2,6 кг чавуну на 1 кг порошку
Вплив вмісту сірки у вугіллі	Збільшення вмісту сірки в сталі на випуску до 0,003—0,004 % при вмісті сірки 0,5 % у вугіллі
Збільшення витрати вугільного порошку	Збільшення тривалості продування 300-тонного конвертера на 3—4 хвилини
Допалювання газу	Підвищення ефективності використання вугілля, зниження впливу вмісту легких речовин
Абразивний вплив вугільних порошків	Підвищений знос обладнання (фурми)

Наведена нижче таблиця систематизує ключові залежності, виявлені в ході проведеного аналізу та допомагає краще зрозуміти вплив різних факторів на процес вдування вуглецевмісних матеріалів у конвертерну ванну (табл. 7).

Таблиця 7. Ключові фактори, які впливають на ефективність вдування вуглецевих матеріалів в конвертерну ванну, а також різні результати, пов'язані з цим процесом

Змінна	Пов'язана змінна	Тип залежності	Примітки
Вдування вуглецевмісних матеріалів	Витрата чавуну	Зворотна залежність (зниження витрати на 3,5—4,5 кг)	Незалежно від методу подання матеріалів
Тип вуглецевмісних матеріалів	Коефіцієнт заміщення чавуну (КЗЧ)	Порошкоподібні матеріали ефективніші за кускові	КЗЧ для порошку вище (4,0 кг) порівняно з кусковими (3,5 кг)
Метод подачі (донні або верхні фурми)	Зниження витрати чавуну	Незалежність	Незалежно від методу подачі через фурми
Допалювання оксиду вуглецю	Збільшення частки брукхту	Пряма залежність	Особливо ефективно при використанні порошкоподібних матеріалів
Присадка порошкоподібних матеріалів	Частка брукхту в металошихті	Пряма залежність	Приріст частки брукхту на 5—14 % при вдування антрациту
Присадка кускових матеріалів	Частка брукхту в металошихті	Пряма залежність	Приріст частки брукхту на 1,4—7,5 %
Застосування двопотокової фурми	Ефективність використання кускових матеріалів	Підвищення ефективності	До 20 % приросту ефективності за рахунок допалювання газів
Кількість вуглецю	Частка брукхту в металошихті	Пряма залежність	Приріст частки брукхту на 3,0—3,5 кг/кг коксу
Спосіб вдування (верхні/донні фурми)	Ефективність присадки кускових і порошкоподібних матеріалів	Незалежність від типу матеріалу	Порівняльна ефективність майже однакова

Висновки

Проведений аналіз останніх досліджень та існуючих технологій використання вуглецевмісних матеріалів в конвертерній плавці допоміг встановити декілька залежностей, які можна врахувати при визначенні оптимальних умов для підвищення ефективності плавки сталі в конвертері з підвищеною часткою металобрукхту.

На основі причинно-наслідкових зв'язків та впливу технологічних параметрів на кінцевий результат можна зробити певні висновки що взаємозалежність між методом додавання вуглецевмісних матеріалів і характеристиками процесу. Використання кускових матеріалів, таких як антрацит або кокс, призводить до зменшення витрат чавуну. Проте спосіб подачі (наприклад, під брукхт або під час продування) впливає на поведінку матеріалу та його реакцію з металом, що може викликати небажані ефекти (різке газовиділення, спинювання). Вдування порошкоподібних вуглецевмісних матеріалів (особливо пилу УСТК) дає кращий коефіцієнт заміщення чавуну в порівнянні з кусковими матеріалами, а використання двопотокових фурм для допалювання газів збільшує ефективність кускових матеріалів, що згладжує різницю в результатах між порошкоподібними та кусковими матеріалами.

В Україні необхідно приділяти увагу сучасним технологіям. Це дозволяє скоротити витрати чавуну в середньому на 5—10 % залежно від обраної технології та якості сировини. Доведено, що використання вуглецевмісних матеріалів у порошковій формі дозволяє економити до **6—8 кг чавуну** на кожен кілограм матеріалу. **Екологічний ефект** від застосування нових

технологій виражається в зменшенні викидів CO₂ на **8—12 %**, що значно покращує екологічні показники виробництва сталі а використання більш чистого металобрухту скорочує кількість шкідливих речовин, таких як фосфор та сірка. Це підтверджується в як вітчизняних, так і в закордонних дослідженнях.

При сучасному виробництві сталі окрему увагу необхідно приділяти модернізації обладнання конвертерних агрегатів та впровадженню автоматизованих систем подачі дуття, що дозволяє знизити необхідність використання додаткових матеріалів і підвищити енергоефективність процесу. Налаштування процесу продування киснем, включаючи скорочення тривалості та точний контроль подачі кисню, може покращити видалення домішок і знизити споживання чавуну. Це дасть змогу скоротити енергетичні витрати на **5—7 %** та підвищити продуктивність виробництва на **3—5 %**.

Дослідження показують, що використання спеціальних фурм для допалювання оксиду вуглецю дає додаткові переваги технології з використанням кускових матеріалів і підвищує ефективність процесу та знижує витрати чавуну особливо при введенні порошкоподібного антрациту. Наразі необхідно продовжувати роботи з розробки та тестування конструкцій двох'ярусних фурм, спеціальних фурм для підігріву брухту, відпрацювання технологічних режимів вдунання порошкоподібного вуглецевмісного матеріалу в конвертер, але при уточненні окремих параметрів.

За рахунок впровадження технологій підігріву брухту та використання шлакоутворюючих матеріалів і легуючих добавок, які допомагають ефективніше керувати хімічним складом сталі, підприємства можуть досягти економії на сировинних та енергетичних витратах на рівні **10—15 %** від загальних витрат виробництва [8, 9].

Список використаної літератури

1. Зубарев А.Г., Колганов Г.С., Костяной Б.М. Увеличение расхода лома при выплавке стали в конвертерах. *Кислородно-газовая интенсификация процесса выплавки стали: Материалы Всесоюзного семинара. Научная мысль*. 1982. С. 17—26.
2. Institute for Energy Economics and Financial Analysis. *The Global Potential for More Scrap Steel Recycling*. 2021. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ieefa.org/resources/global-potential-more-scrap-steel-recycling>
3. Boichenko V.M., Nizyaev K.G., Stoyanov A.N., Kuz'menko S.O., Pishchida V.I. Reducing batch consumption in converters when using scrap and cast iron. *Steel in Translation*. 2011. №41(6). С. 482—484. <https://doi.org/10.3103/S0967091211060039>
4. Чмирков, К. Ф. Бойченко, Б. М. Низяев К. Г. Состояние и перспективы снижения расхода жидкого чугуна в конвертерном производстве ПАО «ЕВРАЗ – ДМЗ им. Петровского». *Металл и литьё Украины*. 2015. №5(264). С. 22—27.
5. Steel Technology. *Basic Oxygen Furnace Steelmaking*. 2024. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.steel-technology.com/articles/basic-oxygen-furnace>
6. Columbia University SIPA. *Low-Carbon Production of Iron & Steel: Technology Options, Economic Assessment, and Policy*. 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.energypolicy.columbia.edu/research/report/low-carbon-production-iron-steel>
7. Сущенко А. В., Попов Е. С., Сидорчук Р. С. Модернизация соплового блока кислородной фурмы и совершенствование дутьевого режима плавки при изменении шихтовых и производственных условий в ККЦ ПАО «МК «Азовсталь». *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2013. №27. С. 29—39.
8. Пак Ю. А., Шахпазов Е. Х., Филиппов Г. А. Влияние додувок на себестоимость стали и эффективность конвертерного производства. *Металлург*. 2011. №8. С. 44—50.
9. Айзатулов Р. С., Пак Ю. А., Соколов Г. А. Воздействие корректирующих работ на показатели эффективности и себестоимость производства конвертерной стали. *Металлург*. 2000. №7. С. 47—48.
10. 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 ДДТУ (технічні науки)*, 2021. №1(38). С. 3—10.

11. Похвалітий А. А., Сігарьов Є. М., Чубін К. І., Лобанов Ю. С., Якунін, П. А. Особливості визначення конструкції наконечників кисневих фурм в нестационарних умовах конвертерної плавки з попереднім підігрівом металобрухту. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. 2021. №2(39). С. 9—14.

REDUCTION OF IRON CONSUMPTION IN STEEL PRODUCTION IN CONVERTER SHOPS: MODERN APPROACHES AND SOLUTIONS

Abstract

The article examines modern approaches and technological solutions aimed at reducing the cost of iron in the production of steel in converter shops. One of the key issues in the metallurgical industry is the optimization of raw material costs while simultaneously improving the quality of final products. In the conditions of growing competition on the market and increasing the cost of raw materials, the issue of reducing iron consumption in the steel production process becomes especially important. The purpose of the study is to substantiate effective technological methods of reducing the cost of cast iron while maintaining high technical and operational characteristics of steel. The work considers several directions for achieving this goal, in particular: improvement of the quality of raw materials through preliminary processing of scrap metal, modernization of converter equipment, optimization of oxygen purging modes, use of technologies of secondary processing of scrap metal, as well as the use of various technological additives and slag-forming materials. Special attention is paid to the possibilities of reducing energy consumption and increasing production efficiency through the use of scrap metal heating technologies. During the study, examples of the introduction of modern technologies at leading metallurgical enterprises, such as ArcelorMittal, ThyssenKrupp, Voestalpine and others, were considered. These technologies help to reduce the costs of raw materials and energy resources, which has a positive effect on the environmental indicators of production and the overall sustainability of metallurgical enterprises. An analysis of the use of carbon-containing materials, both in lump and powder forms, was also carried out to reduce the consumption of cast iron and increase the proportion of metal scrap in the metal charge. The question of the influence of such additives on the chemical composition of steel is considered. It was determined that the use of carbon-containing materials allows to significantly reduce the consumption of cast iron, however, it is necessary to take into account the influence of such factors as the composition of raw materials, the temperature in the converter and the parameters of adding carbon-containing materials during oxygen purging. The given results can be useful for enterprises of the metallurgical industry seeking to increase the efficiency of their production processes. The study demonstrates that the introduction of new technologies and approaches can provide a significant reduction in pig iron costs, increase the quality of steel and reduce the negative impact on the environment. The described methods have the potential for wide use in metallurgy, which will increase the competitiveness of Ukrainian enterprises on the international market.

References

- [1] Zubarev, A.G., Kolganov, G.S., & Kostyanov, B.M. (1982). Uvelichenie rashoda loma pri vyplavke stali v konverterah [Increased scrap consumption during steel smelting in converters]. *Kislородно-gazovaya intensivatsiya processa vyplavki stali: Materialy Vsesoyuznogo seminara. Nauchnaya mysl*, 17—26. [in Russian].
- [2] Institute for Energy Economics and Financial Analysis. (2021). *The Global Potential for More Scrap Steel Recycling* [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://ieefa.org/resources/global-potential-more-scrap-steel-recycling>
- [3] Boichenko, B.M., Nizyaev, K.G., Stoyanov, A.N., Kuz'menko, S.O., & Pishchida, V.I. (2011). Reducing batch consumption in converters when using scrap and cast iron. *Steel in Translation*, 41(6), 482—484. <https://doi.org/10.3103/S0967091211060039>
- [4] Chmyrkov, K. F., Boichenko, B. M., & Niziaiev, K. H. (2015). Sostoyanie i perspektivy snizheniya rashoda zhidkogo chuguna v konverternom proizvodstve PAO «EVRAZ – DMZ im. Petrovskogo» [Status and Prospects for Reducing Liquid Iron Consumption in Converter Production at PJSC EVRAZ-DMZ named after Petrovsky]. *Metall i lityo Ukrainy*, 5(264), 22—27. [in Russian].

- [5] Steel Technology. (2024). *Basic Oxygen Furnace Steelmaking* [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.steel-technology.com/articles/basic-oxygen-furnace>
- [6] Columbia University SIPA. (2020). *Low-Carbon Production of Iron & Steel: Technology Options, Economic Assessment, and Policy* [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <https://www.energypolicy.columbia.edu/research/report/low-carbon-production-iron-steel>
- [7] Sushenko, A. V., Popov, E. S., & Sidorchuk, R. S. (2013). Modernizaciya soploвого блока kislородnoj furny i sovershenstvovanie dutevogo rezhima plavki pri izmenenii shihtovyh i proizvodstvennyh uslovij v KKC PAO «МК «Azovstal» [Modernization of the oxygen tuyere nozzle block and improvement of the blast mode of smelting with changes in the charge and production conditions in the KCC of PJSC MK Azovstal]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Seriya: Tehnični nauki*, (27), 29—39. [in Russian].
- [8] Pak, Yu. A., Shahpazov, E. H., & Filippov, G. A. (2011). Vliyanie doduvok na sebestoimost stali i effektivnost konverternogo proizvodstva [The impact of additional blowing on the cost of steel and the efficiency of converter production]. *Metallurg*, (8), 44—50. [in Russian].
- [9] Ajzatulov, R. S., Pak, Yu. A., & Sokolov, G. A. (2000). Vozdejstvie korrekiruyushih rabot na pokazateli effektivnosti i sebestoimost proizvodstva konverternoj stali [Impact of corrective actions on the performance indicators and production costs of converter steel]. *Metallurg*, (7), 47—48. [in Russian].
- [10] Siharov, Ye. M., Lobanov, Yu. S., & Pokhvalityi, A. A. (2021). Doslidzhennia vplyvu konstruksii nakonechnyka furny na pokaznyky konverternoi plavky z poperednim pidihrivom metalobrukhtu [Study of the influence of the design of the nozzle tip on the indicators of converter melting with preheating of scrap metal]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU (tehnichni nauky)*, (1(38)), 3—10. [in Ukrainian].
- [11] Pokhvalityi, A. A., Siharov, Ye. M., Chubin, K. I., Lobanov, Yu. S., & Yakunin, P. A. (2021). Osoblyvosti vyznachennia konstruksii nakonechnykh kysnevykh furn v nestatsionarnykh umovakh konverternoi plavky z poperednim pidihrivom metalobrukhtu [Peculiarities of determining the design of tips of oxygen nozzles in non-stationary conditions of converter melting with preheating of scrap metal]. *Zbirnyk naukovykh prats DDTU (tehnichni nauky)*, (2(39)), 9—14. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 20.09.2024