

УДК 669.184.244.66

А. Г. Чернятевич¹, д.т.н., проф., г.н.с., ORCID 0000-0002-4552-4997**Л. С. Молчанов**^{1,*}, к.т.н., зав. відділу ФТПМС, ORCID 0000-0001-6139-5956¹ Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України* Автор для листування: metall729321@gmail.com

НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ В УМОВАХ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

Анотація. Обґрунтовані прогнози свідчать про те, що найближчі 20 – 30 років доменне та киснево-конвертерне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі по технологічному маршруту «доменна піч – кисневий конвертер» завдяки економічній вигідності з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90% і більше. Найбільш актуальним напрямком вдосконалення процесу виплавки сталі в кисневих конвертерах, в умовах найбільш поширеної у світовій практиці технології з комбінованою продувкою ванни киснем зверху через звичайну багатосоплову фурму та нейтральним перемішуючим газом (азот, аргон) через днище, є підвищення частки брухту, що переробляється, вище 25 %. Метою роботи є розробка та запропонування до впровадження в повосенний період в умовах конвертерного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» на 250-т конвертерах нових конструкцій паливно-кисневих фурм і енергоефективних способів для попереднього нагріву металевого брухту в порожнині конвертера, багатоцільової двоконтурної кисневої фурми, що забезпечує функції енергоефективної комбінованої продувки конвертерної ванни з допалюванням відхідних газів при подаванні зверху надзвукових і звукових кисневих і азотних струменів з одночасним вдуванням через днище агрегату нейтральних перемішуючих газів (азот, аргон) і отриманням кінцевого залізовуглецевого напівпродукту з підвищеною витратою металобрухту, а також нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера з метою подовження робочої кампанії конвертера. Розроблені та запропоновані на вибір до впровадження в повосенний період наступні нові енергоефективні фурмени пристрої та способи ведення конвертерної плавки з підвищеною часткою брухту в металошихті: паливно-киснева фурма для нагріву брухту в конвертері при вертикальному положенні з використанням пилувугільного палива або природного газу, що обладнана головкою з 6-ма кисневими соплами Лавалю з розміщенням в кожному із них циліндричних паливних сопел та технологія нагріву брухту з подаванням ПВП або ПГ в кільцевій кисневій оболонці; конструкція обертової паливно-кисневої фурми для нагріву брухту при горизонтальному положенні конвертера, що обладнана

© А. Г. Чернятевич, Л. С. Молчанов, 2025

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

головкою з 10-ма циліндричними соплами типу «труба в трубі», розміщеними в 5 рядів по довжині стовбура фурми та технологія нагріву брукхту з подаванням ПВП або ПГ в кільцевій кисневій оболонці; енергоефективна технологія комбінованої продувки конвертерної ванни киснем зверху і нейтральним перемішуючим газом (азот, аргон) через днище з використанням нової конструкції двоконтурної фурми, що містить дворядну 15-ти соплову головку (5 сопел Лаваля і 10 циліндричних).

Ключові слова: кисневий конвертер, паливно-киснева фурма, нагрів металевого брукхту, двоконтурна киснева фурма, комбінована продувка конвертерної ванни, допаловання відхідних газів, енергоефективність плавки.

Посилання для цитування: Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С. Напрямки підвищення енергоефективності конвертерної плавки в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 89-134. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-06>.

Вступ. За прогнозом Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА) до 2050 року доменне та киснево-конвертерне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі по технологічному маршруту «доменна піч – кисневий конвертер», оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90% і більше.

На сьогодні розробка технічних рішень і технологій, що направлені на зниження викидів CO₂ на металургійних підприємствах та економію сировинних і енергетичних ресурсів при виробництві високоякісної металопродукції набуває особливу важність у зв'язку з потребами ВПК та повоєнного відновлення України.

В умовах найбільш поширеної у світовій практиці технології киснево-конвертерної плавки з комбінованою продувкою ванни киснем зверху через звичайну багатосоплову фурму та нейтральним перемішуючим газом (азот, аргон) через днище максимальна кількість переробленого металобрукхту в шихті (металобрукхт + рідкий чавун) складає 25 % [1]. Незалежно від ціни металобрукхту і рідкого чавуну сучасні екологічні норми промислово розвинутих держав вимушують виробників чавуну скорочувати виробництво останнього як основного джерела викидів CO₂ в навколишнє середовище. З цієї причини закордонні виробники конвертерної сталі в напрямку декарбонізації процесу шукають способи зниження викидів CO₂ за рахунок підвищення частки металобрукхту в шихті конвертерної плавки понад 25 % [2].

Нині в Україні через війну значно зменшилась продуктивність доменних і конвертерних цехів у зв'язку з захопленням і руйнуванням

низки металургійних підприємств. Зараз основне виробництво сталі зосереджено в конвертерних цехах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» і ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Внаслідок знищення військової техніки та руйнування різних об'єктів інфраструктури зростає кількість металевого брухту, який використовується в якості охолоджувача конвертерної плавки. В умовах дефіциту рідкого чавуну та зростаючої кількості металевого брухту забезпечити належне виробництво якісної киснево-конвертерної сталі зі зниженням витрати чавуну можливо за рахунок поліпшення теплового балансу плавки шляхом розробки і впровадження нових багатоцільових паливно-кисневих і кисневих фурм, що пристосовані, відповідно, для попереднього нагріву металобрухту у порожнині конвертера, та комбінованої продувки конвертерної ванни з інтенсивним допалюванням відхідних газів без зниження стійкості футеровки агрегату [1].

Мета роботи. Розробити та запропонувати до впровадження в повоєнний період в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» нові фурмени пристрої і способи енергоефективного виробництва якісного залізовуглецевого напівпродукту в 250-т конвертерах з підвищеною витратою металобрухту.

Аналіз попередніх промислових досліджень. Конвертерний цех ДМК був першим в колишньому СРСР цехом (пуск в експлуатацію, грудень 1982 р.), в якому була передбачена робота 250-т конвертерів по технології Інституту чорної металургії (на сьогодні ІЧМ НАНУ, м. Дніпро) з витратою металевого брухту до 40 %. Проектна технологія передбачала такі елементи конвертерної плавки як попереднє нагрівання металобрухту в порожнині конвертера природним газом, який подається через фурму-пальник, комбіновану продувку конвертерної ванни кисневими струменями зверху і кисневими струменями в кільцевій оболонці природного газу через днище, у тому числі з вдуванням порошкоподібного вапна в потоці кисню. Однак цех було запущено за традиційною технологією верхньої продувки конвертерної ванни через 5-ти, 6-ти і 9-ти соплові фурми [3-5] киснем з інтенсивністю до 1350 м³/хв. при переробці уперше в колишньому СРСР низькомарганцевистого чавуну (0,08-0,14 % Mn) без комплексу обладнання, що забезпечував би реалізацію вказаних елементів проектної технології комбінованої продувки з підвищеною витратою металевого брухту. Введення в експлуатацію необхідного комплексу обладнання, зокрема газопроводу природного газу високого тиску і розведення його по цеху, реконструкції систем вдування порошкоподібного вапна і індивідуального регулювання витрати

природного газу через донні фурми [6,7], виготовлення фурми-пальника, розтягнулось до 1989 р., після чого тільки з'явилась можливість відпрацьовувати технологію конвертерної плавки з підвищеною до 40 % витратою металобрухту [8].

Розробку конструкцій кисневих фурм для умов верхньої (рис. 1, а-д) і комбінованої (рис. 1, е) продувки ванни 250-т конвертерів з переробкою низькомарганцевистого чавуну здійснили співробітники Дніпродзержинського індустріального інституту, ДІІ (на сьогодні Дніпровського державного технічного університету, ДДТУ) і ДМК [3-5,7,9]. Було запропоновано та впроваджено наступний комплекс нових технічних рішень.

1. Центральний підвід охолоджуючої води в міжсопловий простір головки кисневої фурми та блочний варіант розташування сопел [9], що сприяло поліпшенню охолодження головки, спрощенню її зварної конструкції та підвищенню стійкості завдяки зменшенню числа зварних швів. Протягом 5 років (1983-1987 рр.) після пуску конвертерного цеха були розроблені, виготовлені і випробувані в роботі нові конструкції стовбура і головок кисневих фурм [3-5,7] з однорядним варіантом розміщення 5-ти сопел (рис. 1, а-в) та блочним 6-ти, 9-ти і 12-ти сопел (рис. 1, г-е) з урахуванням витрати охолоджуючої води 350 м³/год. та зміни витрати кисню у межах 600-1350 м³/хв. при відведенні конвертерних газів у режимах повного і часткового допалювання.

Із розроблених конструкцій головок фурм виробництва ДМК після виявлених під час випробування недоліків остаточне впровадження з тривалим терміном застосування отримали:

- 5-ти соплова головка фурми (рис. 1, а-в), спроектована на витрату кисню 600-1200 м³/хв., з соплами Лаваля критичного діаметра ($d_{кр}$) 39 мм, що розташовані рівномірно по колу під кутом (α) 17 град до вертикальної осі фурми;

- 6-ти соплова (рис. 1, г) для продувки конвертерної ванни з витратою кисню 600-1200 м³/хв., обладнана трьома сопловими блоками з соплами Лаваля ($d_{кр}$ =37 мм). Кути нахилу осі сопел до осі блоку і осі блоків до вертикалі фурми дорівнюють відповідно 9 і 15 град. Між соплами в блоці виконана циліндрична проточка для проходу охолоджуючої води;

- 9-ти соплова (рис. 1, д), спроектована на витрату кисню до 1350 м³/хв., обладнана трьома сопловими блоками, вісь яких по відношенню до вертикальної вісі фурми розташована під кутом (α) 15 град. В блоці розміщені рівномірно по колу одно сопло Лаваля ($d_{кр}$ =39 мм) і два циліндричних сопла ($d_{д}$ =39 мм) під кутом 9 град до

вісі блоку. Фіксація блоків в головці фурми забезпечує дворядне кругове розташування сопел на торцевій поверхні головки із суміщенням «жорсткого» (внутрішній ряд сопел Лаваля) і «м'якого» (зовнішній ряд циліндричних сопел) дуття при одному підводі кисню. В міжсопловому просторі блоків виконані проточки для проходу охолоджуючої води в радіальному напрямку відносно центра блоку;

- 12-ти соплова головка (рис. 1, е) на витрату кисню 600-800 м³/хв. обладнана чотирма сопловими блоками, що містять по три циліндричних сопла ($d_{\text{ц}}=26$ мм) з проточками між ними для проходження води. Кут нахилу соплового блоку до вертикалі фурми складає 24 град при куті нахилу сопел до вісі блоку 6 град.

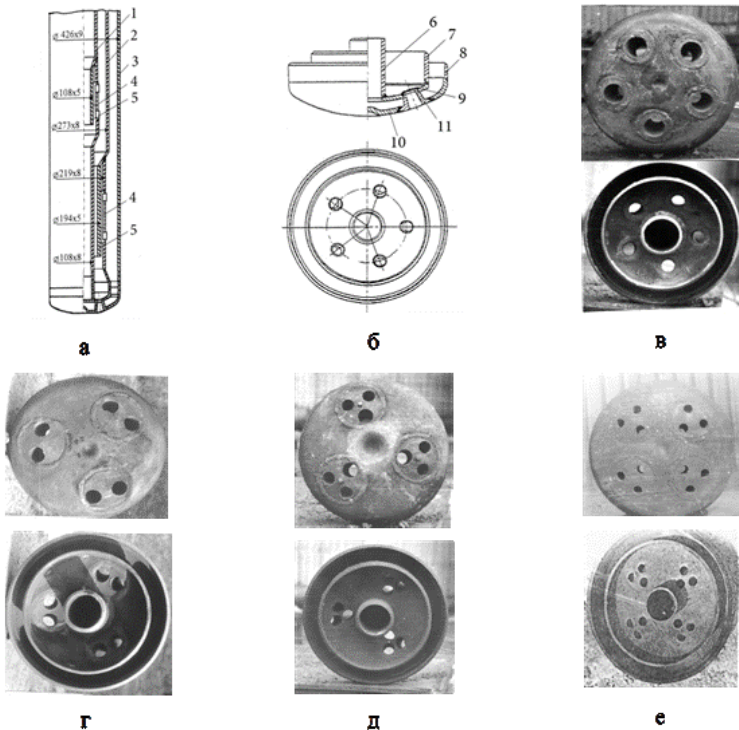


Рисунок 1 - Конструкція стовбура кисневої фурми (а) з 5-ти сопловою головкою (б), вид 5-ти (б,в), 6-ти (г), 9-ти (д) та 12-ти (е) соплових зварних головок: 1, 2, 3 – внутрішня труба підведення води, проміжна труба підведення кисню, зовнішня труба відведення води відповідно; 4 – захисні труби; 5 – металошлангові рукава; 6,7,8 – сполучні стакани; 9, 10 – верхня і нижня чаші головки відповідно; 11 – сопло Лаваля.

Вимушене різноманіття багатосоплових головок фурм (рис. 1) було обумовлено їх застосуванням як для верхньої кисневої продувки [3-5], так і при відпрацюванні комбінованої продувки конвертерної ванни киснем через донні і верхню фурми по технологіям ІЧМ НАНУ [6] та ДДТУ [7,10].

2. Використання нової конструкції [11] двоконтурної кисневої фурми (рис. 2), обладнаної в 1986 р. модернізованою системою підведення до неї двох незалежно регульованих потоків основного (до 1350 м³/хв.) і додаткового (до 200 м³/хв.) кисню з можливістю заміщення додаткового кисню азотом з витратою до 200 м³/хв., що забезпечує верхню продувку конвертерної ванни групами основних надзвукових кисневих струменів та додаткових звукових кисневих і азотних струменів, які формуються відповідно соплами Лавалю і циліндричними, щоб більш ефективно управляти процесами шлакоутворення, видалення фосфору і сірки, допалювання СО до СО₂ у порожнині конвертера з поліпшенням теплового балансу плавки.

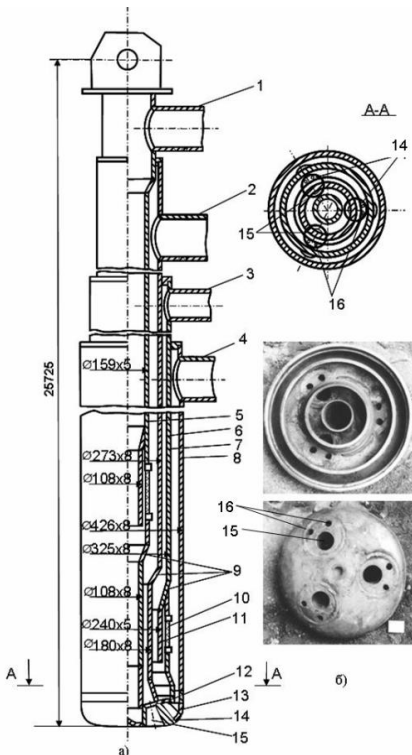


Рисунок 2 - Конструкція стовбура двоконтурної кисневої фурми (а) і вид 9-ти соплової зварної головки (б): 1 – патрубок підведення води; 2, 3 – патрубки підведення основного і додаткового кисню відповідно; 4 – патрубок відведення води; 5, 6, 7, 8 – труба підведення води, проміжна труба підведення кисню, проміжна труба підведення основного кисню, проміжна труба підведення додаткового кисню зовнішня труба відведення води відповідно; 9 – перехідники; 10 – металошлангові рукава; 11 – захисні труби; 12 – верхня чаша головки; 13 – нижня чаша головки; 14 – сопловий блок; 15 – сопла Лавалю, 16 – циліндричні сопла.

Двоконтурна фурма мала центральне охолодження головки при розміщенні в останній трьох соплових блоків з утворенням центральної групи із трьох сопель Лавалля ($d_{кр}=46$ мм), розташованих під кутом нахилу (α_1) 15 град до вертикалі та периферійної групи із шести циліндричних сопель ($d_{кр}=27$ мм) з кутом нахилу $\alpha_2 = 23$ град. Фурма розрахована на витрату основного кисню 900-1200 м³/хв. на продувку ванни через сопла Лавалля і додаткового кисню 50-250 м³/хв. на шлакоутворення і допалювання відхідних газів через циліндричні сопла з можливістю заміщення додаткового кисню на азот до 200 м³/хв. в потрібні періоди операції.

Співробітниками ІЧМ і ДМК для реалізації комбінованої продувки ванни 250-т конвертерів киснем зверху з використанням фурм з 5-ма, 6-ма, 9-ма та 12-ма сопловими головками (рис. 1) і кисневими струменями в кільцевій оболонці природного газу за допомогою фурм типу «труба в трубі», розміщених в днищі, одночасно з вдуванням порошкоподібного вапна в потоці кисню, була підготовлена технічна і технологічна документація, практично було завершено монтаж необхідного обладнання, однак в установлені терміни (І квартал 1983 р.) не було завершено налагодження і випробування обладнання і систем для помелу та вдування порошкоподібних матеріалів в конвертер.

Справа в тому, що система подавання порошкоподібних матеріалів (вапно, плавиковий шпат) була закуплена у фірми АРБЕД (Люксембург) для умов донної продувки металу в конвертері з витратою кисню через днище 550-1300 м³/хв. У зв'язку з переходом на технологію комбінованої продувки витрати кисню через днище повинні бути зменшені з 550-1300 до 150-300 м³/хв. Випробування в березні 1985 р. обладнання подавання порошкоподібних матеріалів при витратах кисню 350-450 м³/хв. з системою заміщення кисню азотом показало нестабільну роботу системи вдування порошків і неможливість роботи системи заміщення технологічних газів при подаванні тільки кисню через донні фурми (без порошку). Тому було прийнято рішення про модернізацію системи вдування порошкоподібних матеріалів.

Для вирішення поставлених задач з розробки та освоєння технології плавки, що забезпечує переробку до 40 % брухту в металозавалці, співробітниками ІЧМ було виконано наступний комплекс робіт та досліджень:

3. Розроблена методика розрахунку кількості донних паливно-кисневих фурм типу «труба в трубі» та розміщення їх у днищі конвертера.

Згідно з виконаними розрахунками для 250-т конвертера ДМК, що

має глибину ванни $\sim 1,5$ м, при подачі через донні фурми 150-300 м³/хв. кисню, максимальної масової концентрації порошкоподібного вапна 6 кг/кг кисню і загальній кількості вапна за плавку 12 т, у днищі конвертера (рис. 3) має бути встановлено 8 донних фурм типу «труба в трубі» з діаметром кисневого сопла 27 мм на виході із сопла.

Розмір кільцевої щілини для подачі природного газу, виходячи з необхідності його подачі $\sim 15\%$ від витрати кисню та його тиску в магістралі 0,8 МПа, становить 2 мм, що забезпечує витікання природного газу з критичними швидкостями в режимі недорозширення.

Розміщення фурм в днищі визначалося виходячи з розміру вставного днища діаметром 4300 мм, внутрішнього діаметра циліндричної частини конвертера ~ 6000 мм, діаметра відцентрового розподільника газопорошкової суміші ~ 600 мм, встановленого в центрі днища, розмірів вогнетривкої цегли 150 x 90 мм для футерівки днища та глибини ванни конвертера. З метою зменшення «видування» при нахилі конвертера фурми розташовані в максимально можливому наближенні до осі днища в площині цапф.

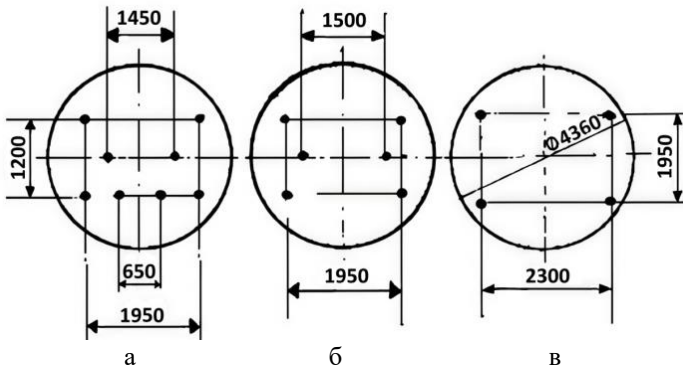


Рисунок 3 – Схема розміщення 8-ми фурм типу «труба в трубі» в днищі конвертера при вдуванні порошкоподібного вапна в потоці кисню (а), 6-ти (б) та 4-х (в) фурм при вдуванні чистого кисню.

4. Виконано експериментальні дослідження щодо визначення режимів роботи та освоєння системи подачі порошкоподібного вапна через донні фурми з індивідуальним регулюванням витрати природного газу через кожну фурму.

Експлуатація модернізованої системи вдування порошкоподібного

вапна при подачі через днище $150-300 \text{ м}^3/\text{хв.}$ кисню показала її працездатність та відповідність до розрахункових (заданих параметрів). При встановленні в днищі 8-ми фурм (рис. 3) з діаметром кисневого сопла 27 мм і витраті кисню $150 - 180 \text{ м}^3/\text{хв.}$ максимальна витрата порошку становила $800 - 950$ і $1000 - 1100 \text{ кг/хв.}$ відповідно.

5. Розроблено та в дослідно-промисловому масштабі перевірено технологію комбінованої продувки конвертерної ванни киснем зверху та киснем через днище з вдуванням порошкоподібного вапна в кільцевій оболонці природного газу.

6. Після спорудження та введення в експлуатацію у грудні 1989 р. газопроводу природного газу високого тиску ($1,0 - 1,2 \text{ МПа}$), виконання внутрішньощекового розведення природного газу до фурм-пальників з системами КВП та автоматики розроблено та в дослідно-промисловому масштабі перевірено технологію попереднього нагрівання брукху фурмою-пальником.

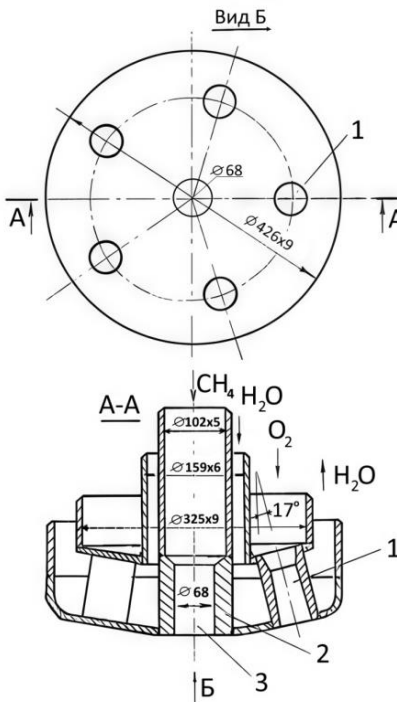


Рисунок 4 – Конструкція головки фурми-пальника: 1– кисневі сопла Лавалю; 2 – паливний сопловий блок; 3 – центральне циліндричне паливне сопло.

Головка фурми-пальника (рис. 4) була спроектована [8] з урахуванням конструкції 5-ти соплової головки кисневої фурми

(рис. 1. а-в), обладнана соплами Лавалля критичного діаметру 37 мм з кутом нахилу до вертикалі 17 град. З метою ефективного охолодження фурми водою діаметр труби для подавання природного газу до соплового блоку дорівнює 102x5 мм. Центральне паливне сопло виконано циліндричним (діаметром 68 мм), що дозволяє зменшити швидкість витікання природного газу у порівнянні зі швидкістю кисню із сопел Лавалля.

Нагрів брухту здійснюється фурмою-пальником при витратах 250 – 350 м³/хв. природного газу і 500-700 м³/хв. кисню. Проектна теплова потужність фурми-пальника з конструкцією головки (рис. 4) складає 190-250 МВт.

Протягом 1983-1992 рр. на 250-т конвертерах ДМК в умовах верхньої і комбінованої продувки ванни з метою підвищення частки металобрухту в шихті і відповідно зниження витрати рідкого чавуну пройшли перевірку наступні фурменні пристрої і технології плавки з введенням кускового вугілля в конвертерну ванну з одночасним частковим допалюванням відхідних газів, а також з попереднім нагрівом металевго брухту в порожнині конвертера із використанням вугілля і природного газу [3-8, 11-16] :

- введення кускового вугілля в конвертерну ванну для спалювання під час верхньої продувки з частковим допалюванням СО до СО₂ відхідних газів [3-5,13];
- введення кускового вугілля в конвертерну ванну під час комбінованої продувки киснем зверху і киснем через днище конвертера з частковим допалюванням відхідних газів у порожнині агрегату [6,7];
- попередній нагрів металевго брухту в порожнині конвертера кусковим вугіллям [12,14,15], в процесі факельного торкретування футеровки конвертера [16], а також нагрів з використанням природного газу [8].

Перш за все необхідно відзначити, що досягнуті впродовж 1983-1992 рр. показники підвищення частки металобрухту в шихті і зниження витрати рідкого чавуну при виробництві сталі в киснево-конвертерному цеху ДМК були забезпечені переважно за рахунок переведення конвертерів із авто- в алотермічні режими як верхньої [3-5,13], так і комбінованої [6,7,12] продувки конвертерної ванни з добавкою кускового вугілля з частковим допалюванням відхідних газів, попереднього нагріву металобрухту у порожнині конвертера кусковим вугіллям [14,15] і природним газом [8], а також завдяки передувки ванни зі зниженням вмісту вуглецю в кінцевому залізовуглецевому напівпродукті.

В умовах верхньої кисневої продувки [3-5,13] були відпрацьовані наступні способи введення кускового вугілля різних марок (антрациту АС, газового Г, пісного ТР) в конвертер: до завалки металобрухту, на металобрухт, перед заливанням чавуну, на залитий чавун, одночасно із запалюванням плавки, порціями за ходом продувки. Від присадок вугілля на днище конвертера до завалки металобрухту або на металобрухт до заливання чавуну прийшлося відмовитись через значне вибивання полум'я із горловини конвертера під час заливання чавуну, що спричиняло необхідність підвищення тривалості цієї операції. Присадка вугілля порціями за ходом продувки виявилась за тепловим балансом малоефективною.

Досвід роботи показав, що ефективність застосування вугілля з метою зниження витрат чавуну зростає і більш стабільні результати досягаються при організації спалювання вугілля в початковий період продувки, коли створюються умови для допалювання СО до СО₂ в результаті високого положення фурми і незначної швидкості окислення вуглецю. Тому була впроваджена технологія виплавки сталі з присадкою кускового вугілля після заливання чавуну перед продувкою киснем. Цей спосіб виявився найбільш раціональним як при верхній [3-5,12,13], так і комбінованій продувці киснем зверху і знизу [6, 7,12, 14 при використанні антрациту АС фракції 25 – 6 мм, що містив 76,5 - 94,4 % С, 5,6 - 13,2 % золи, 2,8 - 7,0 % вологи, 1,3 - 3,9 % летких і 0,62 - 1,28 % S.

Працездатність відпрацьованих конструкцій 5-ти, 6-ти і 9-ти соплових головок (рис. 1) була підтверджена 7-ми річним строком їх застосування з початку пуску цеха для верхньої продувки конвертерної ванни з переробкою чавуну (4,21-4,38 % С; 0,08 - 0,15 % Mn; 0,82 - 0,98 % Si; 0,028 - 0,049 % S; 0,044 - 0,057 % P), що мав температуру перед заливанням в конвертер 1280 - 1332 °С, з використанням в якості додаткового теплоносія антрациту АС 2,06-5,68 кг/т сталі. Кількість переробленого металобрухту в шихті конвертерної плавки змінювалась в цей період від 22,38 до 26,37 % (табл. 1).

При інтенсивності верхньої продувки киснем 1200 - 900 м³/хв., робочій висоті фурм над ванною з 5-ти, 6-ти та 9-ти сопловими головками 1,7 - 2,0 м; 1,5 - 1,7 м; 1,0 - 1,3 м стійкість останніх дорівнювала в середньому 96, 158 та 76 плавок відповідно при однаковій витраті води 350 м³/год на охолодження фурми.

Заметалювання зовнішньої труби фурми з 9-ти сопловою головкою не відбувалось. Фурми з 5-ти і 6-ти сопловими головками знімалися на обрізку металошлакових охолодів на 12 - 14 і 20 - 24 плавках відповідно.

Таблиця 1 - Усереднені показники роботи 250-т конвертерів ДМК з верхньою продувкою при використанні кисневих фурм з 5-ти, 6-ти і 9-ти сопловими головками [3, 13].

Показники	I – етап [3]		II – етап [3]		III – етап [13]	
	5-ти сопл.	9-ти сопл.	5-ти сопл.	6-ти сопл.	5-ти сопл.	5-ти сопл.
Частка металобрухту, %	22,4	23,6	26,1	26,4	25,0	31,3
Питомі витрати, кг/т сталі:						
чавуну	853,0	836,0	825,0	818,0	837,0	774,0
металобрухту	246,0	258,0	292,0	293,0	280,0	353,0
металошихти	1099,0	1094,0	1117,0	1111,0	1117,0	1127,0
вапна	80,2	72,2	84,3	76,1	84,0	101,6
плавикового шпату	5,33	1,76	3,91	2,43	5,04	5,73
обпаленого доломіту	4,21	4,90	5,64	6,28	3,21	2,91
антрациту АС	2,08	2,06	5,68	5,05	2,23	21,92
Витрати кисню, м ³ /т	62,1	61,4	64,6	63,7	65,7	82,7
Вміст в чавуні, %:						
Si	0,93	0,90	0,89	0,89	0,93	0,92
Mn	0,09	0,09	0,09	0,08	0,13	0,14
S	0,038	0,036	0,041	0,039	0,030	0,031
P	0,055	0,055	0,054	0,054	0,053	0,052
Температура чавуну, °C	1341	1341	1317	1323	1336	1339
Усереднена інтенсивність продувки ванни киснем, м ³ /хв	1018	1161	919	934	864	833
Тривалість продувки, хвил	13,3	11,8	15,2	14,9	15,8	20,6
Показник допалювання CO ₂ ·100/(CO+CO ₂), %	35,8	42,5	35,5	41,3	35,9	32,4
Вміст в сталі на повалці, %:						
C	0,08	0,08	0,06	0,06	0,048	0,043
Mn	0,08	0,08	0,06	0,06	0,055	0,055
S	0,045	0,037	0,0550	0,048	0,033	0,053
P	0,014	0,013	0,016	0,013	0,012	0,012
Температура сталі на повалці, °C	1620	1622	1615	1619	1622	1625
Вміст в шлаці на повалці, %:						
CaO	50,62	47,57	49,83	51,63	52,98	54,34
SiO ₂	18,90	17,10	17,60	17,40	17,10	16,77
MgO	9,03	11,18	8,42	8,75	7,04	6,53
(FeO) _{заг}	15,82	18,60	18,11	16,48	18,53	18,95
MnO	3,15	2,33	2,28	2,06	2,15	2,17
Основність шлаку (CaO+MgO)/SiO ₂	3,16	3,43	3,31	3,47	3,52	3,63
Вихід придатних зливків, %	90,97	91,40	89,50	90,00	89,74	88,85

Основними причинами виходу з ладу головок фурм є: розпал і утворення тріщин по зовнішніх зварних швах, що з'єднують сопла і соплові блоки з нижньою чашею головки; механічне пошкодження головки в результаті посадки на металевий брухт і при обрізуванні металошлакових охолодів. До недоліків конструкції стовбура фурми (рис. 1, а) також відноситься значна складність ремонтних робіт по заміні зношених зварних головок фурм та металошлангових рукавів, що забезпечують компенсацію температурного подовження зовнішньої труби фурми.

Застосування фурми з 9-ти сопловою головою у зрівнянні з 5-ти сопловою при однаковій витраті антрациту АС (2,07 кг/т) дозволило [3] знизити витрати чавуну, вапна і плавикового шпату з 853,0 до 836,0; з 80,2 до 72,2 і з 5,33 до 1,75 кг/т придатних зливків відповідно. Вихід придатних зливків зріс з 90,97 до 91,40 % і покращились умови видалення фосфору при виплавці рейкової сталі із зупинкою продувки на завданому вмісті вуглецю. Ця фурма забезпечувала покращення теплового балансу плавки за рахунок більш повного допалювання СО до СО₂ в порожнині конвертера. Разом із тим практикою роботи цеха було встановлено доцільним використовувати фурму з 9-ти сопловою головою тільки у випадку закінчення продувки при вмісті вуглецю в металі не нижче 0,15 %. У випадку подальшої продувки і особливо при вимушених додувках плавки зростає вміст FeO_{заг} в шлаку, що негативно позначається на виході придатного, витраті розкислювачів і стійкості футеровки конвертера.

В умовах роботи конвертерів при однаковій витраті антрациту АС (5,68 кг/т) і з передувкою плавки за вмістом вуглецю до 0,06 % і нижче [3] був розроблений дуттьовий і шлаковий режими з використанням фурми з 6-ти сопловою головою, який у порівнянні з 5-ти сопловою головою забезпечував зниження витрати чавуну з 825,0 до 818,0 кг/т, вапна з 84,3 до 76,1 кг/т, плавикового шпату 3,91 до 2,43 кг/т і підвищення виходу придатного з 89,5 до 90,0 %.

Поряд зі зменшенням витрати чавуну підвищення витрати антрациту АС до 5,68 кг/т супроводжувалось [3] зростанням використання вапна на 3,9-4,1 кг/т і кисню на 2,3-2,5 м³/т. Тривалість продувки зросла на 1,9-3,1 хв., вміст сірки в кінцевому залізобуглецевому розплаві підвищився на 0,010-0,011 % попри на більш високу основність шлаку.

Подальше підвищення витрати антрациту АС до 21,9 кг/т на плавку [13] супроводжувалось зниженням витрати чавуну до 774,0 кг/т з підвищенням частки переробленого металобрухту до 31,3 %. Було встановлено, що ефективність використання антрациту знижується з

підвищенням витрати останнього. Якщо при витраті АС 21,9 кг/т коефіцієнт ефективності використання складає 3,20 кг/кг антрациту, то при витраті 13,0 кг/т – 3,53 кг/кг. У випадку застосування кисневої фурми з 6-ти сопловою головою з блочним розташуванням сопел коефіцієнт ефективності використання антрациту в 1,13 рази вище у зрівнянні із 5-ти сопловою фурмою.

Підвищення витрати антрациту АС до 21,9 кг/т та «передувка» плавок по вуглецю до 0,06 % і нижче призвели до зменшення виходу придатних зливків до 88,5 %, збільшення $\text{FeO}_{\text{заг}}$ в шлаку до 18,95 % і загальної тривалості продувки на 5,15 хв. При цьому продуктивність конвертерів знизилась на 14,5 %.

Унаслідок більшої окислюваності на зливі кінцевого залізовуглецевого напівпродукту плавки з максимальною витратою антрациту АС (21,9 кг/т) характеризувались підвищеними витратами розкислювачів і навуглецювальника. Було встановлено, що використання максимальної кількості антрациту АС з вмістом 0,6 - 0,7% сірки можливо тільки при виробництві рядових марок сталі з вмістом до 0,050 % S.

В подальшій роботі [11,13] конвертерного цеха (1988-1992 рр.) унаслідок сталого підвищення частки металобрухту в шихті до 32 % при присадці 10 - 12 кг/т сталі антрациту АС, передувки плавок по вуглецю з 0,06 до 0,04 % прийшлося спочатку відмовитись від використання 9-ти соплових головок фурм, а потім в обмеженій кількості застосовувати 6-ти соплові, що забезпечували більш високу окислюваність кінцевого шлаку і металу, особливо при додувках, у зрівнянні з 5-ти сопловою головою.

Щоб уникнути цих негативних наслідків верхньої кисневої продувки ванни 250-т конвертерів з підвищеною переробкою металобрухту, коли економія чавуну, належний хімічний склад (перш за все, по сірці) і температура на випуску кінцевого залізовуглецевого напівпродукту забезпечується підвищеним спалюванням заліза в наслідок передувки и додувок плавок, в 1986 р. здійснили [11] перевірку працездатності нової конструкції двоконтурної кисневої фурми (рис. 2) з модернізованою системою підведення до неї технологічних газів.

Розроблена технологія дуттьового і шлакового режимів ведення плавок мала наступні особливості. Перша порція вапна (30 - 40 % від загальної кількості) завантажується на металобрухт перед заливкою чавуну. Вугілля в кількості 1 - 2 т присаджується в конвертер після заливання чавуну. При вході фурми в горловину конвертера витрата основного кисню через 3 сопла Лавалє двоконтурної головки (рис. 2) установлюється 800 - 900 м³/хв., а додаткового кисню через

6 циліндричних сопел – 100 - 120 м³/хв. Після стійкого «запалювання» плавки протягом перших 3 - 4 хв. продувки проводиться плавне опускання фурми з початкової 2,3 - 2,5 м до робочої висоти 1,3 - 1,5 м. Решта вапна присаджується з 2 по 5 хв. продувки. Добавки плавикового шпату вводяться в залежності від перебігу шлакоутворення і поведінки ванни при продувці.

Перед початком падіння факелу над горловиною конвертера, що відбувається при вмісті вуглецю в металі 0,12 - 0,15 %, проводиться заміщення додаткового кисню на азот з витратою 15 - 20 м³/хв. з метою запобігання переокислення металу і шлаку при глибокій передувці ванни. Одночасно підвищується витрата основного кисню на 100 - 120 м³/хв.

У порівнянні з використанням для продувки кисневої фурми з 5-ти сопловою головою застосування двоконтурної дозволило забезпечити економію чавуну (8,2 - 14,4 кг/т), вапна (6,0 - 6,8 кг/т) і плавикового шпату (0,4 - 1,9 кг/т), зменшення ступеня передувки плавов і підвищення виходу рідкої сталі. Завдяки більш ефективного допалювання відхідних газів (CO₂ більше на 8 - 15 %) при практично однакових витратах вугілля на плавку досягнуто підвищення температури металу на повалці на 13-27 °С при меншій окислюваності шлаку і температури заливного чавуну. Разом із тим була встановлена необхідність подальшої модернізації двоконтурної фурми (рис. 2) в напрямках спрощення конструкції стовбура фурми і системи компенсації температурного подовження зовнішньої труби, а також підвищення стійкості головок.

На жаль, не виправдалися надії на те, що комбінована продувка ванни 250-т конвертерів ДМК кисневими струменями зверху і кисневими струменями в кільцевій оболонці природного газу, в тому числі з подачею порошкоподібного вапна, через днище [6,7] буде значно ефективніше традиційної верхньої кисневої продувки з точки зору спокійного ходу рафінування та підвищеної переробки металевих брухту. Усього за період проведення дослідно-промислової кампанії плавов з комбінованою продувкою було проведено 672 плавки з присадкою в конвертер кускового вапна, а з здуванням порошкоподібного вапна - 68 плавов.

На першому етапі досліджень (табл. 2) у випробуваних варіантах комбінованої продувки [6] для верхньої подачі кисню з витратою 510 - 745 м³/хв. використовували кисневі фурми, що застосовуються в цеху для верхньої продувки, з 5-ти, 6-ти і 9-ти сопловими головками (рис. 1). Для подачі кисню без порошкоподібного вапна через днище з витратою 120 - 170 м³/хв. використовували шість фурм типу «труба в

трубі» (рис. 3, б), виготовлених з корозійностійкої сталі, з внутрішнім діаметром кисневого сопла 27 мм і кільцевим зазором для подачі природного газу, що дорівнює 2 мм. Витрата кисню на донне дуття становила 12 - 20% від загального. Частку газу змінювали не більше 9-12 % від витрати кисню через днище.

Таблиця 2 - Усереднені показники роботи 250-т конвертерів ДМК [6,7] з верхньою (А), звичайною комбінованою (Б) і комбінованою продувкою зустрічними струменями (В) при використанні верхніх кисневих фурм з 5-ти, 6-ти і 12-ти сопловими головками (рис.1).

Показники	І – етап [6]		ІІ – етап [7]		
	(А) 5-ти соплова	(Б) 5-ти соплова	(Б) 5-ти соплова	(Б) 6-ти соплова	(В) 12-ти соплова
Частка металобрухту, %	22,67	27,10	29,62	29,74	29,30
Питомі витрати, кг/т сталі:					
чавуну	848,91	797,05	811,60	824,60	797,40
металобрухт	248,84	296,80	341,70	349,00	330,40
металошихти	1097,8	1093,9	1153,3	1173,6	1127,8
вапна	74,69	69,30	85,00	65,00	65,00
плавикового шпату	3,67	2,76	2,60	2,10	1,10
обпаленого доломіту	2,12	6,32	8,50	-	-
антрациту АС	2,08	6,20	12,80	13,10	13,20
Витрати кисню на продувку ванни, м ³ /(м ³ /т)					
зверху	<u>13364</u>	<u>13857</u>	<u>12662</u>	<u>12585</u>	<u>11252</u>
	58,5	60,7	54,1	54,9	49,6
зверху +знизу	<u>13364</u>	<u>16219</u>	<u>15222</u>	<u>14835</u>	<u>13477</u>
	-	71,0	65,0	64,7	59,4
Витрати природного газу, м ³ /(м ³ /т)	-	<u>307</u>	<u>333</u>	<u>293</u>	<u>289</u>
	-	1,35	1,4	1,3	1,3
Вміст в чавуні, %					
Si	0,87	0,85	0,81	0,63	0,75
Mn	0,18	0,24	0,09	0,10	0,12
S	0,034	0,034	0,042	0,024	0,025
P	0,050	0,050	0,061	0,063	0,051
Температура чавуну, °С	1328	1330	1310	1325	1313
Усереднена інтенс. продувки киснем, м ³ /хв.,					
зверху	755	622	646	711	658
знизу	-	123	128	125	125
Тривалість продувки, хв.					
зверху	17,7	18,6	19,6	17,7	17,1
знизу	-	19,2	20,0	18,0	17,8

Продовження табл. 2.

Показники	I – етап [6]		II – етап [7]		
	(А) 5-ти соплова	(Б) 5-ти соплова	(Б) 5-ти соплова	(Б) 6-ти соплова	(Б) 12-ти соплова
Показник допалювання $\text{CO}_2 \cdot 100 / (\text{CO} + \text{CO}_2)$, %	35,8	42,5	35,5	41,3	44,7
Вміст в сталі на повалці, %:					
C	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
Mn	0,09	0,09	0,06	0,06	0,06
S	0,039	0,041	0,058	0,060	0,040
P	0,019	0,015	0,010	0,010	0,013
Температура сталі на повалці, °C	1624	1624	1608	1605	1635
Вміст в шлаку на повалці, %:					
(FeO) _{заг}	16,00	18,28	21,77	24,35	20,32
Основність шлаку (CaO+MgO) / SiO ₂	2,68	2,78	2,83	2,97	3,18
Вихід придатних зливків, %	91,08	91,40	86,70	85,2	88,70

У конвертерах переробляли низькомарганцевистий чавун, що містить 0,63 - 0,87 % Si, 0,09 - 0,13 % Mn, 0,024 - 0,045 % S та 0,040 - 0,063 % P. Температура чавуну перед заливкою в конвертер дорівнювала 1300 - 1330 °C. Загальна кількість кускового вапна і плавикового шпату на плавку 16 - 22 т і 0,2 - 0,8 т відповідно, причому 20 - 30 % вапна присаджували на днище, або на брукхт до заливки чавуну, а решту з початку і до 7 хв. продувки. Як додатковий теплоносії використовували антрацит АС фракції 13 - 6 мм, який вводили в кількості 6,2 кг/т перед подачею кисню через верхню фурму.

У порівнянні з верхньою продувкою при комбінованій питома витрата рідкого чавуну тільки в результаті допалювання CO до CO₂ скорочується при використанні фурм з 5-ти, 6-ти і 9-ти сопловими головками (рис. 1, б - д) відповідно на 32,0; 22,0 та 12,7 кг на 1 т придатних зливків. Найбільша економія чавуну досягається при подачі через донні фурми 12 - 14% загальної витрати кисню.

Збільшення кількості брукхту в металошавалці (табл. 2) при комбінованій продувці [6] до 27,10 % порівняно з верхньою 22,67 % при використанні 5-ти соплової фурми досягалося також за рахунок збільшення витрати вугілля з 2,08 до 6,2 кг/т, зниження вмісту вуглецю на повалці з 0,08 до 0,05 %, підвищення FeO_{заг.} у шлаку з 16,0 до 18,28%. Питома витрата чавуну знизилася з 848,91 до 797,05 кг/т, а брукхт підвищився з 248,84 до 296,8 кг/т.

Разом із тим, низька концентрація оксидів заліза в шлаку (4,1 - 8,3 % FeO_{заг.}) за ходом комбінованої продувки ускладнювала

дефосфорацію металу при роботі з кусковим вапном і плавиковим шпатом. Видалення фосфору до низької концентрації навіть за витрати кисню 6 - 10 % через донні фурми відбувалося, переважно у кінці продувки, коли основність шлаку становила понад 3,0. Це ускладнювало виплавку середньо-і високовуглецевої сталі із зупинкою продувки на заданому вмісті вуглецю.

Крім того, після окислення шлакоутворюючих домішок з витратою через верхню фурму 3500-5000 м³ кисню відзначалися інтенсивні викиди, що носять характер «поштовхоподібного» переливу через горловину конвертера шлако-металевої емульсії.

В даному випадку через інтенсивне перемішування ванни і, як наслідок, низького вмісту оксидів заліза в шлаку, не вдавалося прискорити розчинення кускового вапна і сформувати рідинний шлак на початковому етапі продувки.

У подальшому з метою підвищення ефективності комбінованої продувки ванни 250-т конвертерів ДМК була випробувана на другому етапі досліджень (табл. 2) технологія комбінованої продувки конвертерної ванни зустрічними струменями [7,10]. Ця технологія передбачає перекриття областей виділення оксиду вуглецю, що утворюються в реакційних зонах від взаємодії донних паливно-кисневих струменів з розплавом, спрямованих назустріч струменям кисню, що витікають з верхніх фурм, при суворій орієнтації донних фурм і сопел верхньої фурми.

При відповідному розташуванні чотирьох донних паливно-кисневих фурм у днищі конвертера (рис. 3, в) та верхньої фурми з 12-ти сопловою головкою (рис. 1, е) був реалізований спосіб комбінованої продувки конвертерної ванни зустрічними струменями [7,10]. На порівняльних плавках таке перекриття не забезпечувалося при розміщенні в днищі шести і чотирьох (рис. 3, б, в) фурм і подачі кисню зверху через 5-ти та 6-ти соплові фурми. Як додатковий теплоносіє використовували антрацит АС фракції 13 - 6 мм, який вводили в кількості 2,5 - 3,5 т перед подачею кисню через верхню фурму.

При комбінованій продувці конвертерної ванни в режимі зустрічної взаємодії кисневих струменів вдалося уникнути виникнення інтенсивних викидів внаслідок більш організованого виходу конвертерних газів зі створених «об'єднаних» реакційних зон грибоподібної конфігурації. Продування протікало спокійно з наявністю в конвертері рідкорухомого шлаку, який при використанні кускового вапна вдавалося сформувати в початковий період при вищому положенні (на 0,5 - 0,7 м) верхньої фурми і менших добавках плавикового шпату. Прискоренню розчинення вапна сприяла наявність

високотемпературних реакційних зон від допалювання CO до CO₂, що розташовуються біля поверхні ванни.

При порівнянні металу на повалці комбінована продувка ванни зустрічними струменями дозволила зменшити витрату чавуну на 7,0-27,2 кг/т, плавицевого шпату - на 0,8 - 1,5 кг/т сталі, а також підвищити вихід рідкої сталі на 0,3-3,2%.

Особливо слід зазначити (табл. 2), що збільшення кількості брухту в металозавалці при комбінованій продувці до 27,1 - 29,74 % порівняно з верхньою 22,67 % (табл. 2) досягалося за рахунок збільшення витрати вугілля з 2,08 до 6,2 - 13,2 кг/т, зниження вмісту вуглецю на повалці з 0,08 % до 0,05 %, підвищення FeO_{заг.} у шлаку з 16,0 % до 18,28 - 24,35 %, зниження виходу придатних зливків з 91,08 % до 85,20 % і до 88,70 %.

До введення в експлуатацію газопроводу природного газу було випробувано технологію підігріву брухту кусковим вугіллям у конвертері з комбінованою продувкою [12,14]. У процесі дослідних плавок у 250-т конвертерах (табл. 3) використовували вугілля - антрацит АС, пісний ТР і газовий Г.

У першій серії плавок разом із брухтом у конвертер завантажували газове вугілля, а потім трактом сипучих – вугілля АС. У другій серії плавок випробували пісне вугілля ТР. У період нагрівання брухту через шість донних фурм (рис. 3, б) і верхню з 5-ти сопловою головкою (рис. 1, в) подавали кисень відповідно 150 і 700 - 850 м³/хв. При опусканні верхньої фурми до 2,5 - 3,0 м забезпечувалася поява факела над горловиною через 1,0 - 2,0 хв. від початку нагрівання. Тривалість попереднього підігріву брухту становила 6 - 8 хв.

Дослідні плавки показали:

- найбільш складним є забезпечення нагрівання брухту без його надмірного переокислення та утворення рідкої складової;
- повністю забезпечити однаковий нагрів усієї маси брухту при використанні вугілля не вдалося;
- навіть при рівномірному розподілі вугілля в масі брухту, що практично дуже важко здійснити, нагрівання брухту через його неоднорідність (ваговитий, легковаговий, пакети) відбувається нерівномірно. Це викликає появу в результаті інтенсивного нагріву легковагового брухту, ділянок з утворенням рідкої складової та ділянок з неспаленим вугіллям. Тому на великій кількості плавок з попереднім нагріванням брухту вугіллям виникали труднощі при заливанні рідкого чавуну;
- технологія з попереднім нагріванням брухту супроводжується збільшенням зносу футеровки конвертера, насамперед вогнетривів

днища та нижньої циліндричної частини конвертера;

- питома витрата кисню з використанням вугілля в першій і другій серії плавок (табл. 3) склала 90,1 і 78,7 м³/т відповідно, що на 27,4 і 16,0 м³/т більше, ніж при верхньому продуванні з введенням вугілля після заливання чавуну у кількості 8,3 кг/т. При цьому тривалість продування та нагрівання брухту виявилася на 7,8 і 5,5 хв. вищою, ніж при верхньому продуванні без попереднього нагріву брухту.

- розрахунки показали, що присадка у конвертер 1 кг вугілля дозволяє переробляти 3,75 кг брухту; при попередньому нагріванні – 4,3 кг брухту, у разі присадки у другій половині продувки - 1,2 кг брухту.

На підставі результатів відпрацювання технології плавки (табл. 3) з попереднім нагріванням брухту природним газом [8] було встановлено наступний режим роботи фурми-пальника (рис. 4). Подача природного газу при невеликій витраті починалася при знаходженні фурми на зрізі горловини, потім після запалювання факела подавали кисень, фурма опускалася на відмітку 4,0 - 4,5 м і витрата природного газу і кисню доводили до робочих значень. У процесі підігріву в залежності від кількості брухту опускання фурми-пальника до робочого рівня (2,5 - 3,0 м) було ступінчастим. Співвідношення витрати природного газу та кисню підтримували на рівні 1:2, а останні 3 - 4 хв. нагріву 1:1,8.

Попереднє нагрівання брухту дозволяє відмовитися від «передувки» плавки. У цьому випадку при зупинці продувки на 0,11 - 0,12 % [C] вміст оксиду заліза в шлаку знижується на 5 - 7 %, вихід придатного в результаті менших втрат заліза зі шлаком зростає приблизно на 0,9 - 1,0 % [8].

На дослідно-промислових плавках з нагрівом металевго брухту в порожнині конвертера були також виявлені наступні недоліки конструкції зварної головки фурми-пальника (рис.4):

- застосування в головці фурми тільки одного центрального паливного сопла не дозволяє забезпечити поліпшення організації спалювання палива, підвищення теплової потужності фурми та ефективності попереднього нагрівання металевго брухту в конвертері унаслідок недостатнього перемішування струменів кисню (500 – 700 м³/хв.) і природного газу (250 - 350 м³/хв.) на виході із торця головки. Це призводить до збільшення часу та температурної нерівномірності нагрівання брухту, його локального розплавлення у підфурменій зоні з утворенням високоокисленого шлако-металевго розплаву, що негативно впливає на продуктивність киснево-конвертерного процесу та створює суттєві труднощі із забезпеченням спокійного заливання чавуну в конвертер без викидів металу і шлаку;

Таблиця 3 - Усереднені показники роботи 250-т конвертерів ДМК із звичайною комбінованою (Б) продувкою при використанні для попереднього нагріву брухту кускового вугілля марок АС, Г, ТР [12,14], верхньою продувкою (А) з нагрівом брухту кусковим вугіллям АС та природним газом ПГ з подачею його через фурму-пальник з головкою (рис. 4) [8].

Показники	I – етап [12,14]		II – етап [8]		
	(Б) Г+АС	(Б) ТР	(А) АС	(А) ПГ	(А) ПГ
Частка металобрухту, %	32,7	31,9	30,7	38,0	40,2
Питомі витрати, кг/т сталі:					
чавуну	748,2	757,0	779,6	706,6	684,3
металобрухту	362,8	314,0	346,3	431,4	460,3
металошихти	1111,0	1071,0	1125,9	1138,0	1144,6
вапна	63,0	62,0	70,00	78,8	82,5
плавикового шпату	2,8	2,7	2,5	2,8	3,5
обпаленого доломіту	8,2	7,2	-	-	-
вугілля	19,6	21,0	8,3	8,4	9,7
в тому числі на нагрів брухту	15,8	21,0	-	-	-
Тривалість періодів, хвил:					
нагріву брухту	8,0	6,0	-	8,8	8,9
продувки ванни	16,3	15,8	16,5	15,1	16,6
Витрати кисню, м ³ /(м ³ /т):					
на нагрів брухту	<u>6800</u>	<u>5100</u>	-	<u>4902</u>	<u>5418</u>
	30,1	21,9		24,9	22,9
на нагрів брухту і продувку ванни	<u>20360</u>	<u>18370</u>	<u>14939</u>	<u>16835</u>	<u>17943</u>
	90,1	78,7	62,7	70,7	73,9
Витрати природного газу, м ³ /(м ³ /т):					
на нагрів брухту	<u>136</u>	<u>102</u>	-	<u>2511</u>	<u>2510</u>
	0,60	0,44		10,5	10,0
на нагрів брухту і продувку ванни	<u>413</u>	<u>371</u>	-	-	-
	1,83	1,59			
Вміст в чавуні, %:					
Si	0,85	0,58	0,91	0,88	0,91
Mn	0,10	0,12	0,35	0,29	0,25
S	0,035	0,038	0,036	0,035	0,042
P	0,046	0,048	0,048	0,047	0,048
Температура чавуну, °C	1320	1306	1333	1325	1321
Вміст в сталі на повалці, %:					
C	0,05	0,05	0,036	0,032	0,031
Mn	0,09	0,07	0,030	0,029	0,028
S	0,052	0,040	0,043	0,043	0,045
P	0,013	0,012	0,010	0,011	0,010
Температура сталі на повалці, °C	1635	1610	1624	1631	1644

Продовження табл. 3.

Показники	I – етап [12,14]		II – етап [8]		
	(Б) Г+АС	(Б) ТР	(А) АС	(А) ПГ	(А) ПГ
Вміст в шлаку на повалці, %:					
(FeO)заг, %	21,8	24,0	20,0	21,4	23,1
Основність шлаку (CaO) / SiO ₂)	3,41	3,39	2,7	3,2	3,3
Вихід придатних зливоків, %	90,0	90,6	88,8	88,0	87,4

- знижений термін експлуатації фурми та значна складність ремонтних робіт по заміні зношених зварних головок фурм та металошлагових компенсаторів температурного подовження зовнішньої труби фурми.

Особливо слід відзначити, що була випробувана [16] технологія попереднього нагріву металобрухту під час факельного торкретування футеровки агрегату з використанням машини наземного типу з обертовою торкрет-фурмою [17] з концентрично розташованими в корпусі головки фурми по довжині групами із двох протилежно направлених циліндричних сопел типу «труба в трубі» шляхом подавання через центральні циліндричні сопла в потоці повітря порошкової торкрет-маси (70 % MgO і 30 % коксу), а через кільцеві канали між соплами кисню при змінні напрямку обертання утворених високотемпературних факелів на протилежний після кожного оберту паливно-кисневої фурми на 180° навколо поздовжньої осі фурми.

Інтенсифікація і рівномірність нагрівання металобрухту в цьому випадку забезпечується завдяки переміщенню високотемпературних розосереджених струменів палаючої в потоках кисню торкрет-маси відносно поверхні металобрухту, а також завдяки зменшенню теплових втрат з відхідними газами, підвищенню теплосприймаючої поверхні металобрухту, особливо із-за горизонтального положення конвертера під час торкретування.

Найбільш раціональним виявилось застосування цієї технології при виплавці рейкових марок сталі з часткою металобрухту 19-20 %, що дозволяє без особливих ускладнень вести підварювання цапфених та розташованих над металобрухтом зон футеровки конвертера.

Досягнута економія чавуну до 12 кг/т сталі і підвищення виходу придатного на 0,3 % при зниженні витрати шлакоутворюючих матеріалів. Зниження стійкості футеровки конвертера не спостерігалось.

Недоліками даної технології є:

- підвищення часу нагрівання металевго брухту до оптимальної температури 800 °С завдяки почергової взаємодії торкрет-факелів як з

поверхнею металевого брукхту, так і з поверхнею футеровки конвертера над завантаженим брукхтом внаслідок змінні напрямку обертання факелів на протилежний після кожного оберту паливно-кисневої фурми на 180^0 навколо поздовжньої осі фурми, що удвоє зменшує тепловий потік на поверхню металевого брукхту;

- знижена теплова потужність факелів через витрати тепла на нагрів порошкової торкрет-маси, що супроводжується зменшенням температури факелів, підвищенням часу нагрівання металевого брукхту та зниженням продуктивності киснево-конвертерного процесу виробництва сталі;

- сповільнене запалювання торкрет-маси (70 % MgO і 30 % коксу), яка містить в якості палива кокс з відсутністю видалення летких, особливо в умовах зниження температури футеровки конвертера після завантаження металевого брукхту, що іноді супроводжується вибиванням полум'я з горловини агрегату.

Таким чином, у конвертерному цеху ДМК на кінець 1993 р. був відпрацьований в дослідно-промисловому масштабі комплекс технологічних варіантів плавки, спрямованих на підвищену до 40% частку металевого брукхту, що переробляється (табл. 3). Однак остаточне впровадження розробленої технології, у силу наступних політико-економічних подій, пов'язаних з розвалом СРСР, проголошенням незалежності України, переходом до ринкової економіки та зміною форми власності ДМК, так і не відбулося. Головне те, що за період 1993-2006 рр. роботи цеху фактично було виведено із ладу обладнання для нагріву металобрукхту в порожнині конвертера природним газом та комбінованої продувки конвертерної ванни киснем зверху і кисневими струменями в кільцевій оболонці природного газу через днище, у тому числі з вдуванням порошкоподібного вапна в потоці кисню, що забезпечувало розроблену ІЧМ технологію конвертерної плавки з підвищеною витратою до 40 % металевого брукхту.

Разом із тим важливо відзначити, що у період з 2006 р. по 2017 р., коли підприємство ДМК перебувало у власності корпорації «Індустріальний союз Донбасу» (ІСД), відбулося суттєве технічне переозброєння маршруту «доменна піч - кисневий конвертер», який є основним у світовій практиці виплавки високоякісної сталі і включає:

- високопродуктивної виплавки у доменних печах низького за собівартістю низькомарганцевистого чавуну з нерегламентованим вмістом сірки завдяки використанню безмарганцевистої залізорудної шихти, вдування пиловугільного палива і роботі на шлаках з пониженою основністю;

- попередньої десульфурзації чавуну в ковшах перед киснево-конвертерною плавкою із забезпеченням вмісту сірки $\leq 0,005$ %;
- комбінованої продувки конвертерної ванни за малошлаковою технологією з вдуванням кисню зверху і нейтрального перемішуючого газу через днище з використанням в якості охолоджувача плавки, поряд з бруктом, марганецьвміщуючих сировинних добавок;
- нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера після випуску в сталерозливний ківш залізовуглецевого напівпродукту шляхом роздуву підготовленого кінцевого шлаку з підвищеним вмістом оксиду магнію азотними струменями з використанням верхньої кисневої фурми;
- ківшевої обробки металевого напівпродукту з доводкою останнього по хімічному складу і температурі до заданої марки сталі на спеціалізованих установках завдяки проведення операцій розкислення, легування, десульфурзації, вакуумування, продувки інертними газами перед розливанням на МБЛЗ.

Власниками ІСД в рамках модернізації та підвищення енергоефективності технологічного маршруту виплавки сталі «доменна піч - кисневий конвертер» в умовах ДМК були закуплені наступне обладнання і технології закордонних фірм з установкою «під ключ» у доменному і киснево-конвертерному цехах:

- обладнання і технології фірми Paul Wurth для приготування пилувугільного палива та вдування останнього в потоці несучого азоту через фурми в горно трьох доменних печей;
- установка і технологія фірми Krupp Polyzius для десульфурзації чавуну в 200-т заливальному ковші перед киснево-конвертерною плавкою шляхом вдування через занурену фурму вглиб розплаву порошкоподібної суміші магнію і вапна;
- обладнання і технологія фірми VAI Siemens для комбінованої продувки ванни 250-т конвертера № 2 киснем зверху через звичайну 5-ти соплову фурму і нейтральним перемішуючим газом (азот, аргон) через днище, фурма-зонд для відбору проб металу і заміру температури ванни під час продувки, пристрій газодинамічного відсікання кінцевого шлаку під час випуску залізовуглецевого напівпродукту в 250- т ківш;
- лазерний сканер LACAM фірми FERROTRON Elektronik G_{mbH} для дослідження зносу футерівки конвертера під час кампанії;
- обладнання і технологія фірми VAI Siemens для обробки сталі в ковшах місткістю 250-т на двох установках ківш-піч змінного струму потужністю 35 МВ·А з нагрівом розплаву електричною дугою з одночасним донним перемішуванням аргонном.

Сучасний стан обладнання і технології конвертерної плавки в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». В даний воєнний час на 250-т конвертерах киснево-конвертерного цеху базова технологія виробництва сталі за технологічним маршрутом «доменна піч - кисневий конвертер» включає етапи:

- постачання з доменного цеху до міксерного відділення конвертерного передільного чавуну із середнім місячним діапазоном коливань за складом (0,52 - 0,72 % Si; 0,18 - 0,43 % Mn; 0,015 - 0,036 % S; 0,049 - 0,061 % P) та температури (1275 - 1316 °C), що зумовлено неритмічною роботою доменного цеху через сировинні умови;

- епізодичної ковшової десульфуратії чавуну з підвищеною до 0,045-0,050 % S в заливному ковші вдуванням через двосоплову занурену вглиб розплаву фурму порошокподібної суміші (25 % Mg і 75 % CaO) у потоці несучого азоту із забезпеченням кінцевого вмісту сірки 0,010 % в чавуні, що заливається в конвертер;

- шихтовки конвертерної плавки з використанням у складі 265,3 - 282,5 т металошихти 63,5 - 74,4 т металевого неякісно підготовленого металевого брухту (частка металобрухту 23,4 - 26,7 %) і 195,4 - 215,6 т рідкого передільного чавуну із середньою температурою заливки в конвертер 1295 °C, що містить у середньому 0,59% кремнію, 0,22% марганцю, 0,029 % сірки, 0,059 % фосфору брухту;

- попереднього нагріву металевого брухту на протязі 3 - 6 хв. в порожнині конвертера (приблизно на 45 % плавок) з використанням 0,7 - 2,18 т (10,3 - 32,6 кг/т брухту) газового кускового вугілля з подачею останнього на завантажений брухт під струмені кисню з витратою 2200 - 3529 м³ (31,47 - 55,22 м³/т брухту; 1,48 - 2,86 м³/кг вугілля), що формуються 5-ти сопловою фурмою (рис. 1, а-в).

По ходу 1 - 2 хв. нагріву металобрухту забезпечуються інтенсивність подавання кисню 550 - 650 м³/хв. при висоті фурми 3,7 - 4,0 м, а потім підвищується до 800-900 м³/хв. з одночасним зниженням висоти фурми до 3,0 - 2,5 м. В такому режимі створюються умови локального розплавлення брухту у підфурменій зоні, а також поширюється вплив високотемпературного випромінювання із зон горіння кускового вугілля на футеровку конвертера, що негативно впливає на стійкість останньої і тривалість кампанії конвертера. У випадку наявності рідкої фази здійснюють її нейтралізацію присадкою вапна або кускового конвертерного шлаку. Показник дійсної витрати кисню на нагрів металевого брухту 1,48 - 2,86 м³ на 1 кг вугілля також свідчить про втрати кисню в газову фазу та недосконалість технологічного режиму попереднього нагріву

металевого брухту в конвертері шляхом спалювання кускового газового вугілля в атмосфері кисню, який подається за допомогою верхньої 5-ти соплової фурми (рис. 1, а-в);

- верхньої продувки конвертерної ванни за режимами з частковим і повним (у разі порушень у роботі газовідвідного тракту і газоочищення) допалюванням відхідних газів з інтенсивністю подачі кисню 750 - 1000 і 550 - 650 м³/хв. відповідно через 5-ти соплову фурму (рис. 1, а-в) при середній питомій витраті кисню 62,6 м³/т на плавку з отриманням середніх показників вмісту вуглецю 0,04 %, марганцю 0,07 %, сірки 0,037 % та фосфору 0,014 % у кінцевому залізовуглецевому напівпродукті (вихід рідкого 89,5 %) з температурою 1653 °С перед випуском у сталерозливний ківш;

- газодинамічного відсікання кінцевого шлаку, що містить 8,4 - 10,7 % MgO, 13,5 - 16,3 % FeO з основністю (CaO) / (SiO₂) = 2,0 - 2,1, розкислення та навуглецювання залізовуглецевого напівпродукту в процесі випуску в сталерозливному ковші;

- нанесення шлакового гарнісажу на футеровку конвертера з метою підвищення її стійкості шляхом роздування кінцевого шлаку з вмістом 8,4-10,7 % MgO азотними струменями за допомогою спеціальної з подовженим стовбуром гарнісажної фурми з 6-ти сопловою голівкою (сопла Лавалю, d_{кр}=37 мм, α =15°) з витратою азоту 650 - 700 м³/хв.;

- завершальне доведення сталі на установках ківш-під з додатковою десульфуратцією металу та остаточним коригуванням хімічного складу сталі та температури перед розливом на МБЛЗ.

Поряд з незаперечними економічними перевагами такої технології ведення плавки, особливо в період зниження виробництва, виявлено ряд недоліків, а саме: підвищення циклу плавки на 4-7 хв через нагрів металобрухту, витрати дуттьового кисню, електроенергії і твердого теплоносія, складність забезпечення рівномірного нагріву всього об'єму металобрухту без виникнення рідкої складової.

Застосовувана в цеху для нагрівання брухту і продувки конвертерної ванни штатна конструкція кисневої 5-ти соплової фурми (рис. 1, а - в) має застарілу складну систему компенсації температурного подовження зовнішньої труби у вигляді двох металошлакових рукавів і захисних патрубків, а також зварну голівку. Фурма також характеризується обмеженими можливостями з погляду поліпшення теплового балансу конвертерної плавки у вигляді часткового допалювання СО до СО₂ у робочому просторі конвертера.

Істотне коливання у складі та якості металевої частини шихти конвертерної плавки з урахуванням часто незбалансованої за тепловим

режимом витрати охолоджувачів, вапна та магнєзійних шлакоутворюючих матеріалів змушує операторів плавки вести продувку з глибоким «передувом» ванни до вмісту вуглецю 0,03 - 0,05 %, що призводить до надмірного підвищення окисленості металу та шлаку, особливо у разі вимушених додувок на «температуру», «сірку», «фосфор» та «шлак», а також супроводжується зниженням виходу рідкого залізுவуглецевого напівпродукту та стійкості футеровки конвертера. Глибокий «передув» ванни та випуск із конвертера залізுவуглецевого напівпродукту з підвищеним вмістом кисню, природно, відбивається в гірший бік на результатах навуглюцювання, розкислення та десульфурзації сталі при зливів в ківш і при обробці на установці ківш-піч, призводить до збільшення випалу навуглєрожувачів, підвищеної забрудненості сталі неметалевими включеннями та погіршення якості сталі перед розливом на МБЛЗ.

На жаль, повсякденно застосовувані в цеху технології попереднього нагріву металевого брухту в порожнині конвертера і верхньої кисневої продувки ванни не дозволяють забезпечити відчутне підвищення частки металобрухту, що переробляється, виходу рідкого залізுவуглецевого напівпродукту, зниження витрати шлакоутворювачів, навуглєрожувачів і розкислювачів на плавку та збереження належним чином стійкості футеровки агрегату, а також поліпшити якість сталі перед розливом на МБЛЗ.

Як вже відзначалось, на сьогоднішній день в цеху не збереглося обладнання, що використовувалося раніше, для підвищеної переробки брухту в 250-т конвертерах, а саме:

- трубопроводи регульованого підведення 200 - 500 м³/хв. природного газу, 400 - 1000 м³/хв. кисню та 100 м³/хв. азоту до фурми-пальника (рис. 4) для попереднього нагрівання брухту в порожнині конвертера;

- обладнання факельного торкретування футерівки конвертерів у складі торкретмашини наземного типу [17] з обертовою торкрет-фурмою з подачею до неї по роздільним трубопроводам 250 - 400 м³/хв. кисню, а від камерного живильника в потоці 50 - 70 м³/хв. повітря 800 - 1000 кг/хв. торкрет маси (70 % MgO та 30 % коксу);

- трубопроводи підведення додаткового 50-250 м³/хв. кисню та до 200 м³/хв. азоту для продування конвертерної ванни з допалюванням відхідних газів у порожнині агрегату до двоконтурної фурми (рис. 2).

Разом із тим у цеху на конвертері № 2 були встановлені, але так і не запущені на сьогодні в промислову експлуатацію фурма-зонд для

відбору проб металу та заміру температури ванни під час комбінованої продувки киснем зверху через 5-ти соплову фурму (рис. 1, а - в) та нейтральним перемішуючим газом (азот, аргон) через 14 розміщених в днище продувних блоків фірми RHI (рис. 5) з використанням системи VAI Siemens донної продувки.

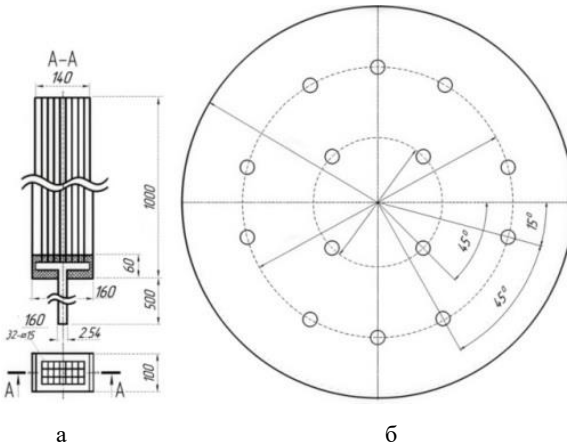


Рисунок 5 –
Загальний вид
донних 32-х
каналних
продувних блоків
фірми RHI (а) і
схема їх
розміщення (б) у
днищі 250-т
конвертера ПрАТ
«КАМЕТСТАЛЬ».

Слід урахувати, що ця найбільш поширена у світовій сталеплавильній практиці технологія комбінованої продувки конвертерної ванни киснем зверху через звичайну багатосоплову фурму і нейтральним газом (азот, аргон) через донні багатоканальні пробки [18,19], сприяючи більш спокійному ходу продувки, поліпшенню перемішування ванни зі зниженням окисленості металу і шлаку, особливо при вмісті вуглецю в кінцевому металевому напівпродукті $\leq 0,05\%$, характеризується наступними недоліками:

- для верхньої продувки ванни 160 і 250–350-т конвертерів з витратою кисню відповідно 500 і від 1050 до 1200 м³/хв. застосовуються кисневі фурми класичної конструкції з литими наконечниками, що містять 5 і 6 сопел Лавалю, розташованими по колу під кутом (α) нахилу до вертикальної осі фурми 17° і 20°. Разом із тим ці наконечники не задовольняють вимогам технології відносно поліпшення теплового балансу конвертерної плавки за допомогою допалювання CO до CO₂, інтенсифікації шлакоутворення і видалення фосфору при підвищеному вмісті вуглецю в металевому розплаві;

- використання у свій час для комбінованої продувки двоярусних кисневих фурм, замість звичайних, супроводжувалося інтенсифікацією допалювання CO відхідних газів, але з одночасним посиленням

локальним зношенням верхньої частини футерівки конвертера;

- вдування через днище конвертера холодних перемішуючих газів (азот, аргон), а також зниження приходу тепла за рахунок зниження окислення заліза і марганцю також негативно відбивається на тепловому балансі конвертерної плавки, що супроводжується зниженням кількості перероблювального брухту у межах від 5 до 10 кг/т сталі;

- інтенсифікується заметалювання технологічного обладнання (стовбура кисневої фурми, горловини конвертера і екранних поверхонь каміна) через більш тривале протікання комбінованої продувки в режимі «згортання» шлаків, особливо при вмісті в останньому більше 6 % оксиду магнію. Видалення металошлакової охолоді з кисневої фурми за допомогою киснево-паливних різаків, горловини конвертера – совком для завантаження брухту, закріпленням на крані, вимушений перехід на продувку з повним допалюванням відхідних газів, з метою видалення охолоді з екранних поверхонь каміна, супроводжуються зниженням продуктивності конвертера і стійкості кисневих фурм, руйнуванням футерівки кінцевої частини агрегату і прискореним виходом горловини і трубчастих водоохолоджуваних елементів газовідвідного тракту з ладу;

- суттєво ускладнюється технологія нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера і особливо догляд за днищем з метою запобігання його зношування і забезпечення працездатності відповідно 10 і 14-16 донних фурм (багатоканальних вогнетривких пробок) для подачі азоту і аргону з витратою від 0,2 до 1,7 м³/хв. через одну продувну пробку;

- через прискорене зношування днища, припинення роботи частини донних продувних пробок, у результаті ушкодження при завантаженні брухту або «запечаткування» високомагнєзальним кінцевим шлаком при його роздуванні, кампанія комбінованої продувки закінчується і агрегат переводиться на класичну верхню продувку.

З урахуванням зазначеного вище важливо в повоєнний період підвищити енергоефективність плавки в умовах конвертерного цеха ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» шляхом удосконалення попереднього нагріву металевого брухту в порожнині конвертера та комбінованої продувки конвертерної ванни з частковим допалюванням CO до CO₂ (табл. 4).

Таблиця – 4. Задачі і способи підвищення енергоефективності конвертерної плавки в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

Поставлена задача	Способи вирішення задачі
Попередній нагрів металевого брухту у порожнині конвертера	
1. Розробка нових конструкцій паливно-кисневих фурм з підвищеною тепловою потужністю і способів нагріву брухту. Скорочення тривалості і більш рівномірний нагрів брухту без створення рідкої складової із забезпеченням спокійного заливання чавуну в конвертер без викидів металу і шлаку.	Відновлення існуючих раніше в цеху розводок кисню, природного газу ПГ, азоту, пиловугільного палива ПВП до фурми-пальника (рис. 4) і машини факельного торкретування футерівки конвертера. Використання ПВП замість кускового вугілля для нагріву брухту. Застосування замість фурми-пальника нової конструкції багатосоплової паливно-кисневої фурми підвищеної теплової потужності з соплами типу «труба в трубі», яка забезпечена системою підведення до неї кисню, азоту, ПВП і ПГ і може бути використана для нагріву металевого брухту при вертикальному положенню конвертера. Переобладнання торкрет-фурми машини факельного торкретування футерівки конвертера. Застосування нової конструкції обертової паливно-кисневої фурми підвищеної теплової потужності з використанням ПВП і ПГ для більш рівномірного нагріву металевого брухту при горизонтальному положенню конвертера.
2. Підвищення стійкості і забезпечення працездатності нових конструкцій паливно-кисневих фурм з підвищеною тепловою потужністю для нагріву брухту.	Застосування замість зварних цільнолитих мідних головок верхніх паливно-кисневих фурм із стовбуром, обладнаним сучасною системою компенсації температурного подовження зовнішньої труби фурми.

Продовження табл. 4.

Поставлена задача	Способи вирішення задачі
Комбінована продувка конвертерної ванни	
3. Розробка нової конструкції двоконтурної кисневої фурми для продувки конвертерної ванни з допалюванням відхідних газів. Підвищення кількості керуючих дій на хід комбінованої продувки	Відновлення існуючих раніше в цеху трубопроводів підведення додаткового кисню та азоту до двоконтурної фурми (рис. 2). Розробка і застосування нової конструкції стовбура двоконтурної фурми з дворядним литим наконечником, обладнаної сучасною системою зниження механічної напруги в головці з компенсацією температурного подовження зовнішньої труби фурми і системою підведення регульованих потоків основного и додаткового кисню з можливістю заміни останніх на азот.
4. Прискорення процесу шлакоутворення, інтенсифікація видалення фосфору при високому вмісті вуглецю.	Підвищення кількості реакційних зон дії над- і звукових кисневих струменів на поверхню ванни з оптимальним розподілом кисню між металевою, шлаковою і газовою фазами порожнини конвертера і прискореним формуванням спіненої шлако-металевої емульсії, стійкої у потрібний час продувки без виникнення викидів.
5. Поліпшення теплового балансу конвертерної плавки.	Підвищення ефективності допалювання в об'ємі спіненої шлако-металевої емульсії потоку CO, що виходить із основної реакційної зони взаємодії надзвукових кисневих струменів з конвертерною ванною, шляхом формування зустрічно направленої завіси звукових кисневих струменів.
6. Запобігання інтенсивному заметалюванню стовбура фурми і горловини конвертера.	Придушення інтенсивного виносу крапель металу і шлаку в напрямку стовбура фурми і горловини конвертера за рахунок створення над основною реакційною зоною завіси звукових кисневих струменів, а при потребі азотних струменів.
7. Зниження окисленості металу і шлаку з отриманням залізовуглецевого напівпродукту ($[C]=0,03-0,05\%$)	При вмісті вуглецю у металевому розплаві менше 0,12% перехід на «жорстку» кисневу продувку через сопла Лавалю з подачею азота через циліндричні сопла з витратою, що забезпечує запобігання «запечатування» сопел бризками металу і шлаку.
8. Запобігання зносу футеровки конвертера.	Роздувка кінцевого конвертерного шлаку з підвищеним до 8-11% вмістом оксиду магнію надзвуковими і звуковими азотними струменями через двоконтурну фурму

Розроблені і запропоновані до впровадження фурмені пристрої і способи нагріву металобрухту. Для підвищення енергоефективності попереднього нагріву металевго брухту в порожнині конвертера запропоновані до впровадження два способи нагріву брухту, а саме:

- при вертикальному положенні конвертера за допомогою нової конструкції верхньої паливно-кисневої фурми з використання ПГ і ПВП;
- при горизонтальному положенні конвертера за допомогою нової конструкції паливно-кисневої фурми машини факельного торкretування футеровки конвертера з використання ПГ і ПВП.

Для реалізації першого способу нагріву брухту на основі ліквідації вказаних недоліків головки фурми-пальника (рис. 4), також отриманих даних високотемпературного моделювання нагріву брухту пиловугільним факелом [20] розроблена нова конструкція [21]

верхньої 6-ти соплової головки паливно-кисневої фурми (рис. 6), що пристосована для нагріву металевго брухту в порожнині конвертера з використанням як пиловугільного палива, так і природного газу.

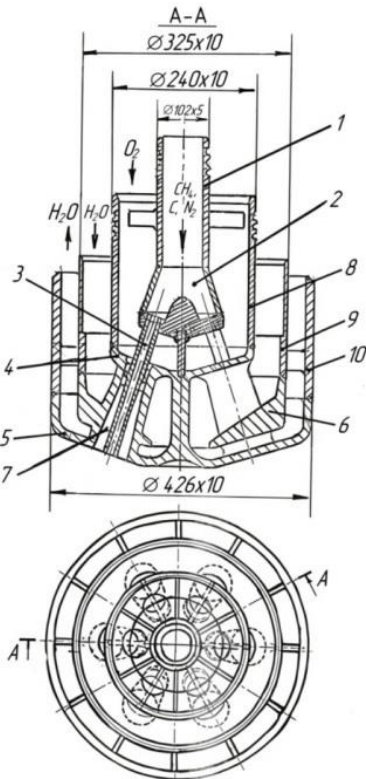


Рисунок 6 – Конструкція 6-ти соплової головки паливно-кисневої фурми для нагріву металевго брухту в 250-т конвертері: 1- паливний патрубок, 2- паливний розподільник, 3- паливне сопло, 4- верхня чаша суцільнолитой мідної головки фурми; 5- нижня чаша головки; 6- розподільник охолоджуючої води; 7- кисневі сопла Лавалю; 8- кисневий патрубок; 9- патрубок підведення води; 10- зовнішній патрубок головки.

Технологічні параметри фурми:

- | | |
|---|-----------------------------|
| - робочий тиск кисню перед фурмою | - 1,8 МПа; |
| - робочий тиск природного газу перед фурмою | - 0,8 МПа; |
| - робочий тиск азоту перед фурмою | - 0,8 МПа; |
| - максимальні витрати кисню | - 1000 м ³ /хв.; |
| - максимальні витрати природного газу | - 700 м ³ /хв.; |
| - максимальні витрати пиловугільного палива (ПВП) | - 600 кг/хв.; |
| - максимальні витрати азоту на подачу ПВП | - 40 м ³ /хв.; |
| - кількість сопел типу «циліндричне сопло в соплі Лавалє» | - 6 шт.; |
| - витрати охолоджуючої води | - 350 м ³ /год. |

При витратах на нагрів брухту 600 кг/хв. пиловугільного палива або 350 м³/хв. природного газу, 700 м³/хв. кисню проектна теплова потужність паливно-кисневої головки (рис. 6) складає 230 - 250 МВт.

Водоохолоджувальна цільнолита мідна головка фурми (рис. 6) включає паливний патрубок (Ø 102x5 мм) 1 з паливним розподільником 2, в якому розміщені за допомогою різьбового з'єднання рівномірно по колу під кутом 17° до вертикалі фурми шість паливних сопел 3. Кожне паливне сопло 3 містить центральний циліндричний паливний канал Ø 22 мм, на вхідній частині зовнішньої циліндричної поверхні кожного паливного сопла виконана різьба, вихідна частина має форму шестигранника, центральна зовнішня циліндрична частина виконана із центруючими виступами, які розташовані по колу відповідно з ребрами шестигранника.

Між верхньою 4 і нижньою 5 чашами суцільноливої мідної головки розміщені розподільник 6 охолоджуючої води і рівномірно під тим же кутом до вертикалі шість кисневих сопел Лавалє 7, що мають вхідну звужувальну, центральну циліндричну Ø 46 мм і вихідну розширену частини з фіксацією по центру в них паливних сопел 3.

Багатосоплова паливно-киснева фурма працює наступним чином. Охолоджувальна вода надходить в головку фурми по кільцевому зазору між кисневим патрубком 8 (Ø 240x10 мм) та проміжним патрубком 9 підведення води (Ø 325x10 мм) і проходить до розподільника 6. Потім по відвідних каналах між верхньою чашею і розподільником і між корпусами кисневих сопел вода направляєється до центра нижньої чаші 5. Далі по відвідних каналах між розподільником, нижньою чашею і корпусами кисневих сопел вода відводиться в кільцеві зазори між проміжним 9 (Ø 325x10 мм) та зовнішнім 10 (Ø 426x10 мм) патрубками головки.

Кисень надходить до верхньої чаші 4 головки по кільцевим зазорам між паливним 1 (Ø 102x5 мм) і кисневим 8 (Ø 240x10 мм) патрубками. Потім потік кисню розподіляється між шістьма кисневими соплами

Лавалю 7 і проходить по трьом змінним по довжині зазорам між: поверхнею вхідної звужувальної частини кисневого сопла і циліндричною зовнішньою поверхнею паливного сопла 3; поверхнею центральної циліндричної частини кисневого сопла і зовнішньою циліндричною поверхнею із шістьма центруючими виступами паливного сопла; поверхнею вихідного розширеної частини кисневого сопла і шестигранною боковою поверхнею паливного сопла. В результаті на виході головки фурми формуються шість турбулізованих кільцевих пульсуючих кисневих струменів.

Пиловугільне паливо в струмені азоту або природного газу надходить через паливний патрубок 1 ($\varnothing$ 102x5 мм) в паливний розподільник 2. Далі паливо перерозподіляється між центральними циліндричними паливними каналами паливних сопел 3 з формуванням шістьох паливних струменів на торцевій шестигранній поверхні паливного сопла.

З одночасним надходженням палива і кисню через паливні 3 і кисневі 7 сопла забезпечується на виході із головки фурми поширення паливних струменів в турбулізованій пульсуючій кільцевій кисневій оболонці з формуванням шістьох високотемпературних факелів, що направлені на поверхню металевого брукху у порожнині конвертера. Використання турбулізованої пульсуючої кільцевої кисневої оболонки навколо паливного струменя, що витікає із паливного сопла 3 з центральним каналом, дозволяє забезпечити інтенсивне перемішування кисню і палива та спалювання останнього порівняно із звичайними соплами типу «труба у трубі». Все це дозволяє значно підвищити теплову потужність фурми, скоротити час нагрівання підвищеної кількості металевого брукху, забезпечити розосереджений характер взаємодії високотемпературних факелів з поверхнею металевого брукху без локального розплавлення останнього перед заливанням чавуну в конвертер, досягти економії чавуну і підвищення продуктивності киснево-конвертерного процесу.

Компенсація лінійного подовження зовнішньої труби ($\varnothing$ 426x10 мм) фурми, яка виникає при попередньому нагріванню металевого брукху у порожнині конвертера, забезпечується завдяки створенню кільцевих ковзних ущільнень з гумовими кільцями на патрубках паливної ($\varnothing$ 102x5 мм) та кисневої ($\varnothing$ 240x10 мм) труб головки.

В процесі монтажу суцільнолитой головки проводиться тільки один зварний кільцевий шов для з'єднання зовнішнього водяного патрубку ($\varnothing$ 426x10 мм) з трубою відведення охолоджуючої води з фурми. Заміна головки здійснюється шляхом розрізання зовнішнього водяного

патрубка і подальшого вилучення головки шляхом роз'єднання паливного ($\varnothing 102 \times 5$ мм) і кисневого ($\varnothing 240 \times 10$ мм) патрубків з гумовими ущільнювальними кільцями відповідно із стаканами, що розміщені на паливній ($\varnothing 102 \times 5$ мм) і кисневій ($\varnothing 240 \times 10$ мм) трубах стовбура паливно-кисневої фурми.

У випадку зношення центральних каналів корпусів паливних сопел з заміна їх у верхній тарілці паливного розподільника головки здійснюється шляхом викручування зношених та укручування нових за допомогою спеціального торцевого шестигранного ключа. При цьому відпадає необхідність відрізання головки від верхньої паливно-кисневої фурми та приварювання до фурми нової головки, що значно знижує витрати часу і матеріалів, адже це можна здійснювати при знаходженні верхньої фурми безпосередньо над конвертерами у каретці машини для подачі кисню, палива та води. Таким чином забезпечується продовження терміну експлуатації фурми за рахунок зниження трудомісткості виготовлення і збирання фурми, спрощення і прискорення ремонтних операцій по заміні як паливних сопел, так і зношеної головки.

Для реалізації другого способу нагріву брукхту пропонується модернізація установки факельного торкретування футеровки 250-т конвертерів ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ» (рис. 7) із застосуванням нової конструкції головки торкрет-фурми для попереднього нагріву металобрукхту з використанням пиловугільного палива і природного газу. Технічні характеристики модернізованої установки нагріву:

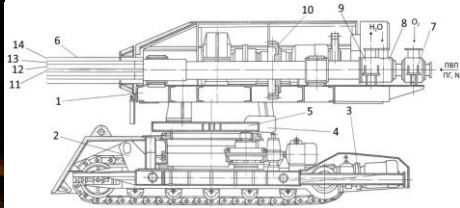
- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| - витрати пиловугільного палива ПВП | - 400 - 450 кг/хв; |
| - витрати природного газу ПГ | - 400 - 450 м ³ /хв |
| - витрати кисню | - 800 - 900 м ³ /хв; |
| - витрати азоту | - 25 - 30 м ³ /хв; |
| - витрати охолоджуючої води | - 140 - 160 м ³ /год; |
| - частота обертання фурми | - 2 об/хв. |

Як показано на рис. 7 пристрій для нагріву металевого брукхту містить наземну пересувну платформу 1 на гусеничному ході 2 з механізмами пересування 3, нахилу 4 і повороту 5 платформи, стовбур 6 паливно-кисневої фурми з колектором 7 для підведення пиловугільного палива ПВП в потоці азоту або природного газу ПГ в кільцевій оболонці кисню, а також азоту для продувки тракту подавання пиловугільного палива, з колекторами 8 для підведення і відведення 9 охолоджуючої води, з механізмом обертання 10, що забезпечує зміну напрямку обертання стовбура паливно-кисневої фурми на протилежний після кожного оберту стовбура 6 фурми на 90⁰ навколо поздовжньої осі, який складається із центральної труби 11

підведення пилувугільного палива в потоці азоту або природного газу 10, концентрично розміщених навколо неї труб подавання кисню 12, підведення 13 і відведення 14 охолоджуючої води, корпус головки паливно-кисневої фурми.



а



б

Рисунок 7 – Торкрет-машина інституту ВНДІмехчормет (м. Дніпро) [17], яка переобладнується в пристрій для нагріву металевго брухту в 250-т конвертерах ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ».

Розроблена нова конструкція головки паливно-кисневої фурми (рис. 8) обладнана 10-ю соплами типу «труба в трубі», розміщеними рівномірно в 5 рядів по довжині 900 мм стовбура фурми, при цьому в кожному ряду в плані вісі сопел типу «труба в трубі» розташовані під визначеним кутом.

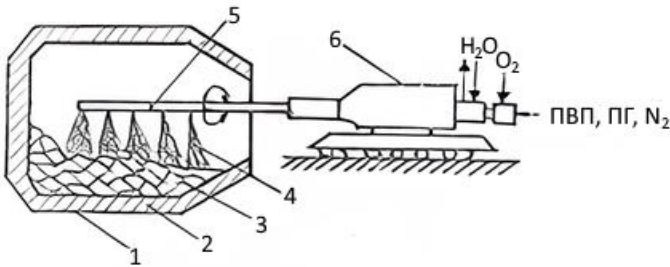


Рисунок 8 - Схема технологічного процесу нагріву брухту в 250-т конвертері ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ»: 1- конвертер, 2- футеровка конвертера, 3- металевий брухт, 4- паливно-кисневі факели, 5- головка паливно-кисневої фурми; 6- пристрій для нагріву брухту.

Нагрів металевго брухту здійснюється наступним чином. До порожнини конвертера 1 з футеровкою 2 і завантаженим брухтом 3 через горловину конвертера вводять за допомогою наземного пристрою 6 обертovu паливно-кисневу фурму 5 з концентрично розташованими в корпусі головки фурми по довжині п'ятьма групами

із двох циліндричних сопел типу «труба в трубі» в кожній, що дозволяє отримати в кожній групі по два високотемпературних факели 4 для нагріву металевого брукхту, сформованих з визначеним кутом між осями факелів при одночасній подачі через центральні циліндричні сопла в потоці азоту пиловугільного палива ПВП або природного газу ПГ, а через кільцеві канали між соплами кисню.

Паливно-киснева фурма 5 встановлюється над поверхнею металевого брукхту 3 на рівній відстані від футеровки бокових стін конвертера. Спочатку через центральні циліндричні сопла паливно-кисневої фури з визначеною витратою подається природний газ або пиловугільне паливо в потоці азоту, а потім через кільцеві канали між циліндричними соплами подається з підвищеною витратою кисень, щоб сформувати 10 усталених паливно-кисневих факелів необхідної довжини і теплової потужності.

Після цього включають привод обертання паливно-кисневої фури і розпочинають нагрів металевого брукхту шляхом переміщення високотемпературних пиловугільних факелів в межах площі поверхні металевого брукхту в конвертері при змінній напрямку обертання факелів на протилежний після кожного оберту паливно-кисневої фури на визначений кут навколо поздовжньої осі фури. При цьому завдяки обертанню фури забезпечується розосереджений характер взаємодії високотемпературних факелів з поверхнею металевого брукхту, більш рівномірний нагрів без локального розплавлення останнього перед заливанням чавуну в конвертер.

По закінченні операції нагріву металобрукхту пиловугільним факелом спочатку припиняють обертання фури, виключають подавання пиловугільного палива, потім кисню і залишають подавання азоту для продувки тракту подавання пиловугільного палива через центральні циліндричні сопла паливно-кисневої фури. По закінченні продувки азотом тракту подавання пиловугільного палива паливно-кисневу фуру виводять із порожнини конвертера.

По закінченні операції нагріву металевого брукхту природним газом припиняють обертання фури, виключають подавання природного газу, потім кисню і включають подавання азоту для продувки тракту подавання природного газу через центральні циліндричні сопла паливно-кисневої фури. По закінченні продувки азотом тракту подавання природного газу паливно-кисневу фуру виводять із порожнини конвертера.

Розроблена і запропонована до впровадження конструкція двоконтурної кисневої фури і режим комбінованої продувки вання 250-т конвертера. В даний час, в умовах конвертерного цеху

ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ», коли в ході робочої кампанії конвертера зазнають суттєвих змін параметри початку плавки (температура футеровки і розміри робочого простору агрегату, якість завантаженого металевго брухту, температура і склад чавуну, що заливається), а верхня продувка ванни здійснюється з прийнятою витратою кисню через звичайну 5-ти соплову фурму (рис. 1. а-в), не завжди вдається забезпечити:

- прискорене розчинення присадок вапна і магнезійних шлакоутворюючих матеріалів за відсутності добавок плавикового шпату з формуванням в початковий період продувки рідкорухомого окислювального шлаку з належною основністю і вмістом оксиду магнію для випереджаючого окислення фосфору в порівнянні з вуглецем в розплаві;

- спокійний без викидів і виносів характер продувки конвертерної ванни в режимі «заглиблених» кисневих струменів при розташуванні рівня спіненого шлаку вище зрізу головки фурми протягом переважної частини часу операції;

- більш ефективне допалювання СО до СО₂ в порожнині конвертера для поліпшення теплового балансу плавки з метою переробки підвищеної кількості металевго брухту;

- запобігання інтенсивного заметалювання стовбура кисневої фурми, горловини конвертера і екранної поверхні каміна;

- більш інтенсивне перемішування конвертерної ванни на остаточній стадії продувки, мінімальний вміст кисню в кінцевому залізовуглецевому ($\leq 0,08\%$ С) напівпродукті при оптимальному вмісті оксидів заліза в шлаку.

Виходячи з цього важливо було з урахуванням набутого досвіду [5,1, 18,19] розробити та запропонувати до впровадження в повосенний період освоєння нової технології комбінованої продувки конвертерної ванни зверху різноімпульсними над- і звуковими кисневими і нейтральними газовими (N₂) струменями з частковим допалюванням відхідних газів та подачею через днище нейтральних перемішуючих газів (N₂, Ar), яка дозволить досягти істотного ресурсо- та енергозберігаючого ефекту. З використанням результатів високотемпературного моделювання продувки конвертерної ванни різноімпульсними кисневими і азотними струменями через двоконтурні фурми та методики розрахунків конструктивних параметрів фурм і дуттьових режимів плавки з їх використанням розроблена та запропонована до впровадження замість раніше випробуваної (рис. 2) наступна конструкція головки двоконтурної фурми (рис. 9) з відновленою системою підведення до неї

технологічних газів зверху та через днище конвертера (рис. 10).

Технологічні параметри двоконтурної фурми:

- робочий тиск кисню перед фурмою - 1,8 МПа;
- робочий тиск азоту перед фурмою - 1,2 МПа;
- макс. витрати основного кисню через сопла Лавалю - 900 м³/хв;
- максимальні витрати додаткового кисню через циліндричні сопла - 250 м³/хв;
- максимальні витрати основного азоту через сопла Лавалю - 750 м³/хв;
- максимальні витрати додаткового азоту через циліндричні сопла - 100 м³/хв;
- кількість сопел Лавалю - 5 шт;
- кількість циліндричних сопел - 10 шт;
- витрати води на охолодження фурми - 350 м³/год.

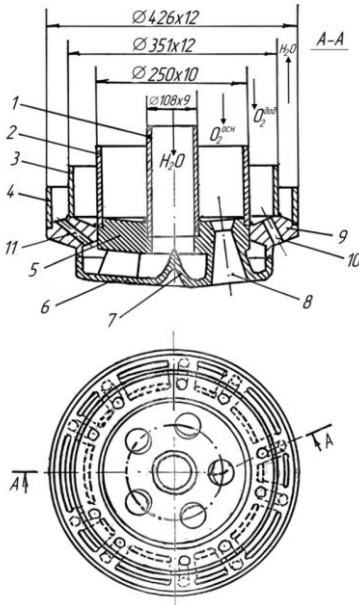


Рисунок 9 - Конструкція суцільнолитой головки двоконтурної фурми: 1- патрубок підведення охолоджуючої води; 2- патрубок підведення основного кисню та азоту до сопел Лавалю; 3- патрубок підведення додаткового кисню та азоту до циліндричних сопел; 4- патрубок відведення охолоджуючої води; 5, 6 - верхня і нижня тарілка суцільнолитой мідної головки; 7- розподільник охолоджуючої води; 8- сопла Лавалю; 9- верхній суцільнолитий мідний сопловий блок; 10- циліндричні сопла; 11- проточки для відведення охолоджуючої води.

У порівнянні з попередньою конструкцією стовбура двоконтурної фурми і зварної 9-ти соплової головки (рис. 2) запропонована нова конструкція двоконтурної фурми має наступні відмінності:

- взамін металешлангових рукавів із захисними трубами стовбур фурми обладнано сучасною надійною системою зниження механічної напруги в головці з компенсацією температурного подовження зовнішньої труби за допомогою встановлення на трубах підведення

води, основного і додаткового кисню муфт, в які входять відповідні патрубки головки у вигляді кільцевого змінного ущільнення з гумовими кільцями. Це дозволяє значно знизити трудовитрати на заміну зношених головок фурм в процесі експлуатації;

- взамін зварної 9-ти соплової головки розроблена суцільнолита мідна 15-ти соплова головка, що містить центральну групу із 5-ти сопел Лавалля ($d_{кр}=40$ мм), розташованих рівномірно по колу під кутом нахилу (α_1) 15 град до вертикалі та периферійну групу із 10-ти циліндричних сопел ($d_{ц}=20$ мм) з кутом нахилу $\alpha_2 = 23$ град. Відсутність зварних швів на торці головки та удосконалена система охолодження останньої при центральному підведенні води дозволяє значно підвищити стійкість кисневого дуттьового пристрою.

- двоконтурна головка фурми (рис. 9) розрахована на витрату основного кисню 800-900 м³/хв.. на продувку ванни через сопла Лавалля надзвукowymi кисневими струменями і додаткового кисню 200 - 250 м³/хв. звуковими кисневими струменями на шлакоутворення і допалювання відхідних газів через циліндричні сопла з можливістю заміщення основного кисню на азот до 750 м³/хв., а додаткового кисню на азот до 100 м³/хв в потрібні періоди операції.

Запропонована технологія дуттьового і шлакового режимів ведення плавов при комбінованій продувці конвертерної ванни киснем зверху через двоконтурну фурму (рис. 9) і нейтральним перемішуючим газом через днище (рис. 5, 10) має наступні особливості. Перша порція вапна (30 - 40 % від загальної кількості) завантажується на попередньо нагрітий металобрухт перед заливкою чавуну. Вугілля в кількості 1 - 2 т присаджується в конвертер після заливання чавуну.

При вході фурми в горловину конвертера витрата основного кисню через 5 сопел Лавалля двоконтурної головки (рис. 9) устанавлюється 800 - 900 м³/хв., а додаткового кисню через 10 циліндричних сопел – 200 - 250 м³/хв. Після стійкого «запалювання» плавки протягом перших 3 - 4 хв. продувки проводиться плавне опускання фурми з початкової 2,3 - 2,5 м до робочої висоти 1,3 - 1,5 м. Решта вапна присаджується з 2 по 5 хв. продувки.

З початку продувки протягом 7 хв. через 14 донних продувних блоків у конвертерну ванну подається азот з витратою 12 м³/хв., а потім азот замінюється на аргон з витратою 12 м³/хв. до 12 хв. продувки.

Перед початком падіння факелу над горловиною конвертера, що відбувається на 12 хв. продувки при вмісті вуглецю в металі 0,12 - 0,15 %, проводиться підвищення подавання аргону через днище конвертера з витратою до 25 м³/хв. на протязі 2 хв. В той же час відбувається заміщення подаваного через верхню двоконтурну фурму

додаткового кисню на азот з витратою 15 - 20 м³/хв. з метою запобігання переокислення металу і шлаку при глибокій «передувці» ванни. Одночасно підвищується витрата основного кисню через двоконтурну фурму на 100 - 120 м³/хв.

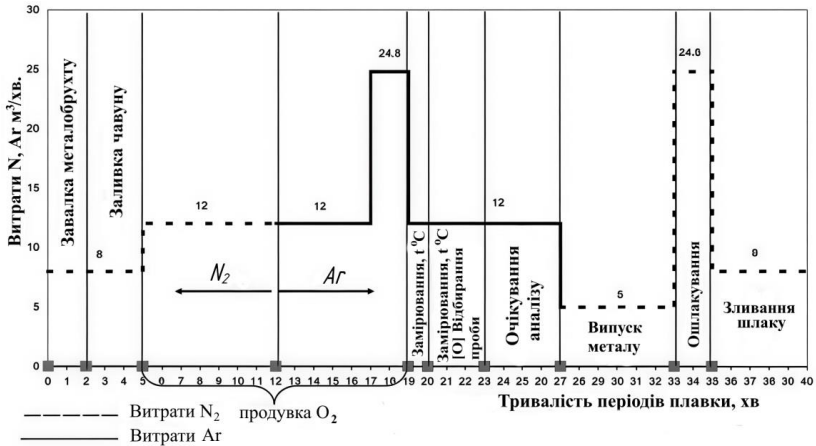


Рисунок 10 – Режим подачі через днище 250-т конвертера ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ» нейтральних перемішувачів газів.

Короткочасна заміна додаткового кисню, що подається через циліндричні сопла двоконтурної фурми, на азот в кінцевий період операції дозволяє реалізувати при виробництві низьковуглецевого напівпродукту (< 0,08 % C) перехід на «жорстке» кисневе дуття, що призводить до зниження окислюваності кінцевого металу і шлаку.

Розроблена конструкція двоконтурної фурми також використовується для нанесення шлакового гарнісажу на периклазовуглецеву футеровку конвертера шляхом роздуву кінцевого шлаку з підвищенням до 8 - 11 % вмістом оксиду магнію надзвучковими і звуковими азотними струменями, які створюються при одночасному подаванні через сопла Лавалю і циліндричні головки (рис. 9) азоту з максимальною витратою до 750 і 100 м³/хв відповідно. При цьому в період роздуву шлаку забезпечується подавання азоту через днище конвертера з витратою 25 м³/хв.

Висновки

Проведений аналіз стану технологій та дуттьових пристроїв для реалізації конвертерної плавки зі збільшеною переробкою металевих брухтів при введенні вуглецевмісних теплоносіїв свідчить про те, що вирішення існуючих проблем неможливе без теоретичних та

експериментальних пошуків у нових напрямках з метою створення енергоефективних багатопільових конструкцій паливно-кисневих і кисневих фурм та технологій конвертерної плавки з попереднім нагрівом металевого брухту та продувки конвертерної ванни з допалюванням відхідних газів. Для умов роботи 250-т конвертерів ПрАТ «КАМЕТСТАЛЬ» розроблені та запропоновані на вибір до впровадження в післявоєнний період наступні енергоефективні фурмені пристрої та способи введення конвертерної плавки з підвищеною часткою брухту в металошихті:

- нова конструкція вертикальної паливно-кисневої фурми для нагріву брухту в порожнині конвертера з використанням пилувугільного палива або природного газу, що обладнана головкою з 6-ма кисневими соплами Лавалю з розміщенням в кожному із них циліндричних паливних сопел та технологія нагріву брухту з подаванням ПВП або ПГ в кільцевій кисневій оболонці;

- нова конструкція оберткової паливно-кисневої фурми для нагріву брухту при горизонтальному положенні конвертера, що обладнана головкою з 10-ю циліндричними соплами типу «труба в трубі», розміщеними в 5 рядів по довжині стовбура фурми та технологія нагріву брухту з подаванням ПВП або ПГ в кільцевій кисневій оболонці;

- нова енергоефективна технологія комбінованої продувки конвертерної ванни киснем зверху і нейтральним газом перемішувачим газом (азот, аргон) через днище з використанням нової конструкції двоконтурної фурми, що містить дворядну 15-ти соплову головку (5 сопел Лавалю і 10 циліндричних).

Перелік посилань

1. Шнееров Я.А., Афонин С.З., Лепорский С.В. Снижение расхода чугуна при производстве стали в действующих конвертерных цехах. *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 1987. № 21. С. 2-19.
2. Voraberger B., Wimmer G., Salgado U.D., Wimmer E., Pastucha K., Fleischanderl A. Green LD (BOF) Steelmaking – reduced CO₂ emissions via increased scrap rate. *Metals*. 2022. № 12. С. 466-483. <https://doi.org/10.3390/met12030466>
3. Чернятевич А.Г., Носов К.Г., Борисов Ю.Н. Разработка и совершенствование дутьевого режима плавки при переделе низкомарганцовистого чугуна в 250-т конвертерах. *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 1987. № 2. С. 47-49.
4. Чернятевич А.Г., Несвет В.В., Зражевский А.Д., Ситало А.А. Фурмы для 250-т конвертеров. *Сталь*. 1989. №2. С. 32-35.
5. Чернятевич А.Г., Учитель Л.М., Несвет В.В. Этапы разработок и направления совершенствования конструкций кислородных фурм в

конвертерном цехе Дніпровського металургічного комбіната. *Металл и литье Украины*. 1996. № 9-10. С. 42-47.

6. Шнееров Я.А., Носов К.Г., Борисов Ю.Н. Комбинированная продувка металла кислородом в большегрузных конвертерах. *Сталь*. 1986. №1. С. 21-24.

7. Чернятевич А.Г., Носов К.Г., Бродский А.С. Повышение эффективности комбинированной продувки ванны 250-т конвертеров. *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 1989. №7. С. 56-58.

8. Лапицкий В.В., Смоктий В.В., Борисов Ю.Н. Использование фурмы-горелки при выплавке стали в конвертере. *Сталь*. 1993. №11. С. 22-25.

9. Чернятевич А.Г., Баптизманский В.И., Носов К.Г. А.с. 1116072 СССР, МКИ С21 С 5/48. Многооплавная фурма для продувки металла № 3575336/22-02, заявл. 07.04.83; опубл. 30.09.84. Бюл. № 36.

10. Чернятевич А.Г., Шиш Ю.И., Коржавин Ю.А. А.с. 931754 СССР, МКИ С21 С 5/28. Способ передела чугуна в конвертере № 2934422/22-02, заявл. 04.06.80; опубл. 30.05.82. Бюл. № 20,

11. Чернятевич А.Г. Опыт разработки кислородных фурм с центральным охлаждением головок. *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2017. №10. С. 72-80.

12. Зражевский А.Д., Смоктий В.В., Учитель Л.М. Выплавка стали в конвертерах с пониженным расходом чугуна. *Сталь*. 1989. №2. С. 27-29.

13. Старков П.А., Наливайко А.П., Школьный С.Н. Эффективность использования антрацита в 250-т конвертерах с верхней продувкой. *Бюл. НТИ. Черная металлургия*. 1990. № 2. С. 57-58.

14. Носов К.Г., Смоктий В.В., Махницкий В.А. Конвертерная плавка с предварительным подогревом лома. *Сталь*. 1986. №10. С.9-11.

15. Лапицкий В.В., Смоктий В.В., Махницкий В.А. Освоение технологии выплавки металла для производства рельсов с предварительным нагревом лома. *Бюл. НТИ. Черная металлургия*. 1988. № 10. С. 35-36.

16. Чернятевич А.Г., Учитель Л.М., Гресс А.В. Совершенствование технологии предварительного подогрева лома в конвертере. *Бюл. НТИ. Черная металлургия*. 1990. № 2. С. 58-59.

17. Штепа Е. Д., Ярмаль А. А., Червоненко В. М. Факельное торкретирование футеровки кислородных конвертеров. К.: Техніка, 1984. 143 с.

18. Чернятевич А.Г. Направления совершенствования комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. вып. 28. С. 147–160.

19. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Меркулов А.Е. Разработка многоцелевых конструкций кислородных фурм и способов комбинированной продувки конвертерной ванны фурмы. *Сталь*. 2021. № 9. С. 14-21.

20. Чернятевич А.Г., Похвалітій А.А., Сігарьов Є.М. Використання пилосугільного палива для попереднього підігріву металобрухту. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (тематичний випуск «До 95 річчя кафедри металургії ім. професора В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету»)*.

Кам'янське: ДДТУ. 2024. С. 123-131.

21. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Сігарьов Є.М., Меркулов О.Є., Башмаков О.М., Вакульчук В.В., Похвалітій А.А., Чубін К.І. Патент на винахід 129644 Україна, МПК C21C 5/48. Багатосоплова паливно-киснева фурма для попереднього нагрівання металевго брухту в конвертері № 2023 05906; Заявл. 07.12.2023; Опубл. 18.06.2025; Бюл. №25.

References

1. Shneerov, Ya. A., Afonin, S. Z., & Leporskii, S. V. (1987) Snizhenie rashoda chuguna pri proizvodstve stali v deistvuushchih konvertornykh tsekh. [Reducing pig iron consumption in steel production in existing converter shops]. *Ferrous Metallurgy: Bulletin of the Chermetinformatiya Institute*, 21, 2-19.
2. Voraberger, B., Wimmer, G., Salgado, U. D., Wimmer, E., Pastucha, K., & Fleischanderl, A. (2022) Green LD (BOF) steelmaking – reduced CO₂ emissions via increased scrap rate. *Metals*, 12, 466-483. <https://doi.org/10.3390/met12030466>
3. Cherniatevych, A. H., Noskov, K. H., & Borisov, Yu. N. (1987) Razrabotka i sovershenstvovanie dutevogo rezhyma plavki pri peredele nizkomargantsovistogo chuguna v 250-t kovverterah. [Development and improvement of the blowing mode during the processing of low-manganese cast iron in 250-ton converters]. *Ferrous Metallurgy: Bulletin of the Institute of Ferrous Metallurgy*, 2, 47-49. [in Russian]
4. Cerniatevych, A. H., Nesvet, V. V., Zhrazhevskii, A. D., & Sitalo, A. A. (1989) Furmy dlia 250-t konverterov [Lances for 250-ton converters]. *Steel*, 2, 32-35.
5. Cherniatevych, A. H., Uchitel, L. M., & Nesvet, V. V. (1996) Etapy razrabotok i napravleniia sovershenstvovaniia konstruktssii kislorodnykh furn v konvertornom tsehe Dneprovskogo metallurgicheskogo kombinata. [Development stages and areas of improvement for oxygen lances in the converter shop of the Dneprovsky Metallurgical Plant]. *Metal and Casting of Ukraine*, 9-10, 42-47.
6. Shneerov, Ya. A., Noskov, K. H., & Borisov, Yu. N. (1986) Kombinirovannaiia produvka metalla kislorodom v bolshegruznykh konvertterah. [Combined oxygen blowing of metal in heavy-duty converters]. *Steel*, 1, 21-24.
7. Cherniatevych, A. H., Noskov, K. H., & Brodskii, A. S. (1989) Povyshenie effektivnosti kombinirovannoi produvki vannы 250-t konverterov. [Improving the efficiency of combined bath blowing for 250-ton converters]. *Ferrous Metallurgy: Bulletin of the Institute of Ferrous Metallurgy*, 7, 56-58.
8. Lapitskii, V. V., Smoktii, V. V., & Borisov, Yu. N. (1993) Ispolzovanie furny-gorelki pri vyplavke stali v konvertere [Using a lance-burner in steelmaking in a converter]. *Steel*, 11, 22-25.
9. Cherniatevych, A. H., Baptizmankii, V. I., & Nosov K. H. (1983) USSR patent 1116072.
10. Cherniatevych, A. H., Shish, Yu. I., & Korzhavin, Yu. A. (1982) USSR patent 931754
11. Chtrniatevych, A. H. (2017) Opyt razrabotki kislorodnykh furn s tsentralnym ohlazhdeniem golovok. [Experience in the development of oxygen lances with centrally cooled heads]. *Bulletin Ferrous Metallurgy*, 10, 72-80.
12. Zrazhevskii, A. D., Smoktii, V. V., & Uchitel, L. M. (1989) Vyplavka stali

v konverterah s ponizennym rashodom chuguna. [Steelmaking in converters with reduced iron consumption]. *Steel*, 2, 27-29.

13. Starkov, P. A., Nalyvaiko, A. P., & Shkolnyi, S. N. (1990) Effektivnost ispolzovania antratsita v 250-t konverterah s verhnei produvkoi [Efficiency of anthracite coal use in 250-ton converters with top blowing]. *NTI Bulletin. Ferrous Metallurgy*, 2, 57-58.

14. Noskov, K. H., Smoktii, V. V., & Mahnitskii, V. A. (1986) Konverternaia plavka s predvaritel'nyim podogrevom loma. [Converter melting with preheated scrap. *Steel*, 10, 9-11.

15. Lapitskii, V. V., Smoktii, V. V., & Mahnitskii, V. A. (1988) Osvoenie tehnologii vyplavki metalla dlia proizvodstva relsov s predvaritel'nyim nagrevom loma. [Mastering the technology of metal smelting for rail production using scrap preheating]. *NTI Bulletin. Ferrous Metallurgy*, 10, 35-36.

16. Cherniatevych, A. H., Uchitel, L. M., & Hres, A. V. (1990) Sovershenstvovanie tehnologii predvaritelnogo podogreva loma v konvertere. [Improving the technology of scrap preheating in a converter]. *NTI Bulletin. Ferrous Metallurgy*, 2, 58-59.

17. Shtepa, Ye. D., Yarmal, A. A., & Chervonenko, V. M. (1984) *Fakelnoe torkretirovanie futerovki kislorodnykh konverterov*. [Torch gunning of linings of oxygen converters]. Kyiv: Tekhnika.

18. Cherniatevych, A. H. (2014) Napravlenia sovershenstvovaniia kombinirovanoi produvki konverternoï vanny kislorodom i neitralnym gazom [Directions for improving combined oxygen and neutral gas blowing of the converter bath]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 28, 147–160.

19. Cherniatevych, A. H., Molchanov, L. C., & Merkulov, A. Ye. (2021) Razrabotka mnogotsel'nykh konstruksii kislorodnykh furn I sposobov kombinirovanoi produvki konverternoï vanny. [Development of multi-purpose oxygen lances and combined converter bath blowing methods]. *Steel*, 9, 14-21.

20. Cherniatevych, A. H., Pohvalityi, A. A., & Sigarev, Ye. N. (2024) Vykorystannia pulovugil'nogo palyva dlia poperedniogo pidigrivu metalobruhtu. [Vikoristaniya powder-coal fuel for the forward heating of metal scrap]. *Collection of scientific works of the Dnipro State Technical University (thematic issue "To the 95th birthday of the Department of Metallurgy of Professor V.I. Loginov of the Dnipro State Technical University")*. Kamyanske: DDTU, 123-131.

21. Cherniatevych, A. H., Molchanov, L. S., Sigarev, Ye. N., Merkulov, O. Ye., Bashmakov, O. M., Vakulchuk, V. V., Pohvalityi, A. A., & Chubin, K. I. (2023) Ukrainian patent 129644

A. H. Cherniatevych¹, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-4552-4997

L. S. Molchanov^{1,*}, Ph D, ORCID 0000-0001-6139-5956

¹ Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine

* Corresponding author: metall729321@gmail.com

DIRECTIONS FOR IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF CONVERTER SMELTING IN THE CONDITIONS OF PJSC "KAMET-STEEL"

Abstract. Reasoned forecasts indicate that in the next 20-30 years, blast furnace and oxygen converter production will remain the dominant link in steel production along the "blast furnace - oxygen converter" technological route due to economic profitability with a thermal efficiency of up to 90% and more. The most relevant direction for improving the steelmaking process in oxygen converters, in the conditions of the most widespread technology in world practice with combined blowing of the bath with top oxygen supply through a conventional multi-nozzle lance and neutral mixing gas (nitrogen, argon) through the bottom, is to increase the share of recycled scrap above 25%. The aim of the work is to develop and propose for implementation in the post-war period in the converter shop of PrJSC "KAMET-STEEL" on 250-ton converters of new designs of fuel-oxygen lances and energy-efficient methods for preheating metal scrap in the converter cavity, a multi-purpose dual-circuit oxygen lance, which provides the functions of energy-efficient combined blowing of the converter bath with postcombustion of exhaust gases when supersonic and sonic oxygen and nitrogen jets are supplied from above with simultaneous injection of neutral mixing gases (nitrogen, argon) through the bottom of the unit and obtaining the final iron-carbon intermediate product with increased scrap metal consumption, as well as applying slag garniture to the converter lining in order to extend the converter's operating campaign. The following new energy-efficient lance devices and methods of conducting converter melting with an increased proportion of scrap in the metal charge have been developed and proposed for implementation in the post-war period: a fuel-oxygen lance for heating scrap in the converter in a vertical position using pulverized coal fuel or natural gas, equipped with a head with 6 Laval oxygen nozzles with cylindrical fuel nozzles in each of them and scrap heating technology with the supply of PCF or NG in an annular oxygen shell; a design of a rotating fuel-oxygen lance for heating scrap in a horizontal position of the converter, equipped with a head with 10 cylindrical nozzles of the "pipe in pipe" type, placed in 5 rows along the length of the lance barrel and scrap heating technology with the supply of PCF or NG in an annular oxygen shell; energy-efficient technology of combined blowing of the converter bath with oxygen from above and neutral mixing gas (nitrogen, argon) through the bottom using a new design of a dual-circuit lance containing a double-row 15-nozzle head (5 Laval nozzles and 10 cylindrical nozzles).

Keywords: oxygen converter, fuel-oxygen lance, scrap metal heating, dual-circuit oxygen lance, combined blowing of the converter bath, postcombustion of exhaust gases, energy efficiency of smelting.

For citation: Cherniatevych, A. H., & Molchanov, L. S. Directions for increasing the energy efficiency of converter smelting in the conditions of PrJSC "KAMET-STEEL". *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 89-134. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-06>

Рукопис надійшов до редакції / Received 12.07.2025

Рекомендовано до друку / Accepted 21.10.2025