

**А. Г. Чернятевич**<sup>1</sup>, д. т. н., проф., г. н. с., ORCID 0000-0002-4552-4997  
**Л. С. Молчанов**<sup>1\*</sup>, к. т. н., старш. дослід., ORCID 0000-0001-6139-5956

<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України*

\* *Автор для листування: metall729321@gmail.com*

## **НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ В УМОВАХ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»**

**Анотація.** Останні 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 до 90 % і більше. На сьогодні найбільш актуальним напрямком вдосконалення процесу виплавки киснево-конвертерної сталі в Україні, в умовах поширених у світовій практиці технологій попереднього нагріву металевого брухту в порожнині конвертера і комбінованої продувки ванни киснем зверху через звичайну багатосоплову фурму та нейтральним перемішуючим газом (азот, аргон) через днище, є підвищення частки брухту, що поробляється, вище 25 %. Метою роботи є розробка та запропоновання до впровадження в повосенний період в умовах конвертерного цеху ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» на 160-т конвертерах: нової конструкції паливно-кисневої фурми і енергоефективного способу для попереднього нагріву металевого брухту в порожнині конвертера; багатоцільової двоярусної 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 залізобудельного напівпродукту з підвищеною витратою металобрухту, а також нанесення шлакового гарніазу на футерівку конвертера з метою подовження робочої кампанії конвертера. З використанням отриманих даних високотемпературного моделювання нагріву металевого брухту в порожнині конвертера і комбінованої продувки конвертерної ванни розроблені та запропоновані до впровадження в повосенний період наступні нові енергоефективні фурменні пристрої та способи введення конвертерної плавки з підвищеною часткою брухту в металошихті: обертова паливно-киснева фурма для нагріву брухту в конвертері при вертикальному положенні з використанням пилоугільного палива або природного газу, що обладнана головкою з 4-ма кисневими соплами Лавала з розміщенням в кожному із них циліндричних паливних сопел та технологія

© А. Г. Чернятевич, Л. С. Молчанов, 2026



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

нагріву брухту з подаванням ПВП або ПГ в кільцевій кисневій оболонці; енергоефективна технологія комбінованої продувки конвертерної ванни зверху надзвуковими і звуковими кисневими і азотними струменями з допалюванням СО до СО<sub>2</sub> відхідних газів і нейтральним газом перемішуючим газом (азот, аргон) через днище з використанням нової конструкції двоярусної фурми, що містить дворядну нижню головку (4 сопла Лаваля і 8 циліндричних) і верхній сопловий блок із 8-ма циліндричними соплами.

**Ключові слова:** кисневий конвертер, паливно-киснева фурма, нагрів металевго брухту, двоярусна киснева фурма, комбінована продувка конвертерної ванни, допалювання відхідних газів, енергоефективність плавки

**Посилання для цитування:** Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С. Напрямки підвищення енергоефективності конвертерної плавки в умовах ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ». *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 386-432. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-025>

**Вступ.** Важливою умовою досягнення високих темпів розвитку економіки України в повоєнний період є проведення робіт по технічному переозброєнню підприємств чорної металургії, особливо киснево-конвертерних цехів з організацією декарбонізації (зниження викидів СО<sub>2</sub>) виробництва сталі по технологічному маршруту «доменна піч – кисневий конвертер» за рахунок підвищення частки металевго брухту в шихті (брухт + рідкий чавун) конвертерної плавки понад 25 % [1, 2].

В умовах дефіциту рідкого чавуну та зростаючої кількості металевго брухту забезпечити належне виробництво якісної киснево-конвертерної сталі зі зниженням витрати чавуну можливо за рахунок поліпшення теплового балансу плавки шляхом розробки і впровадження нових конструкцій 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.

Удосконалення існуючих та розробка нових енергоефективних технологій конвертерної плавки з підвищеною переробкою металобрухту на сьогоднішній день передбачає попередній нагрів брухту в порожнині конвертера з використанням природного газу (ПГ) і пиловугільного палива (ПВП), подальшу комбіновану продувку конвертерної ванни різноімпульсними надзвуковими і звуковими кисневими та азотними струменями з частковим допалюванням відхідних газів.

В даний час актуальним є проведення в нових напрямках високотемпературних експериментальних досліджень механізму явищ,

що супроводжують нагрів металевого брухту в порожнині конвертера газо-кисневими і пиловугільно-кисневими факелами, комбіновану верхню продувку конвертерної ванни надзвуковими кисневими струменями та допалювання СО до СО<sub>2</sub> звуковими кисневими струменями з можливістю заміни останніх на азот. Отримана при цьому інформація конче потрібна для розробки і практичної реалізації нових енергоефективних технологій нагріву металобрухту в порожнині конвертера та комбінованої продувки конвертерної ванни з використанням нових конструкцій паливно-кисневих та кисневих фурм, які виконують функції попереднього нагріву брухту, продувки ванни з частковим допалюванням відхідних газів та нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера.

**Мета роботи.** Розробити та запропонувати до впровадження в повосенний період в умовах ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» нові енергоефективні фурмени пристрої і способи попереднього нагріву металевого брухту в порожнині 160-т конвертерів та продувки ванни з частковим допалюванням відхідних газів із забезпеченням підвищеної переробки металобрухту в шихті конвертерної плавки без зниження стійкості футеровки агрегату.

**Аналіз попередніх промислових досліджень.** З моменту пуску і по сьогоднішній день у конвертерному цеху № 2 металургійного комбінату «Криворіжсталь», а нині ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» (ПАТ «АМКР»), що мав у своєму складі спочатку шість 130-т конвертерів, а надалі замінені на 160-т агрегати, були випробувані в дослідно-промисловому масштабі і освоєні в постійній промисловій експлуатації ряд прогресивних технічних рішень, що стосуються:

- конструкцій паливно-кисневих фурм і технологій для попереднього нагріву металевого брухту в порожнині агрегату [3-5];
- конструкцій двоярусних кисневих фурм і технологій для продувки конвертерної ванни з частковим допалюванням СО до СО<sub>2</sub> відхідних газів [6-10];
- спеціальних конструкцій фурм факельного торкретування футеровки конвертера, гарнісажних фурм і технологій для нанесення шлакового гарнісажу та торкрет-покриття на футерівку конвертера з метою продовження стійкості останньої [11-18].

Свого часу співробітниками Інституту чорної металургії (на сьогодні ІЧМ НАНУ, м. Дніпро) і конвертерного цеху № 2 металургійного комбінату «Криворіжсталь» на 160-т конвертері були проведені дослідження [2-5] по підвищенню витрати металевого брухту в результаті його нагріву природним газом (ПГ). При цьому використали універсальну паливно-кисневу фурму-пальник [3,4] для

нагріву брухту і продувки ванни, головка якої містить (рис. 1) центральне циліндричне газове сопло діаметром 62 мм та 4 периферійні сопла Лаваля критичного діаметру 32 мм, розташовані по колу під кутом  $18^\circ$  до вертикалі фурми в кисневій камері і головці.

В 160-т конвертер завантажували брухт, частину вапна ( $\sim 20\%$ ), після чого опускали фурму-пальник і гріли брухт в порожнині конвертера газокисневим факелом на протязі 2-8 хв. в залежності від витрати брухту. Фурму-пальник розташовували на висоті 1,0-1,5 м над поверхнею брухту, співвідношення витрати кисню і природного газу в суміші складало в середньому 1,83. Загальну витрату вапна скорочували пропорційно зниженню витрати чавуну.

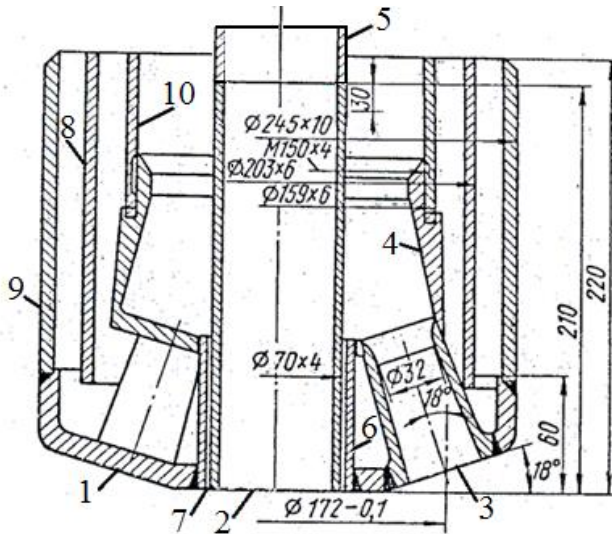


Рисунок 1 - Конструкція зварної головки паливно-кисневої фурми-пальника [3,4] для нагріву брухту і продувки ванни в 160-т конвертері: 1- головка; 2- центральне газове сопло; 3- кисневі сопла; 4- киснева камера; 5- центральна труба підведення природного газу; 6- металевий стакан; 7- кільцевий зазор для проходження кисню; 8, 9- патрубки підведення і відведення охолоджуючої води відповідно; 10- труба підведення кисню

Кількість брухту підвищували на 2-8 % від маси металозавалки при відповідному зниженню витрати чавуну. Плавки продували по відпрацьованій в цеху технології, при цьому тривалість продувки дослідних плавок була менше на 1,7 хв. за рахунок зниження витрати чавуну і, очевидно, часткового окислення брухту.

Попередній нагрів в 160-т конвертері металевого брухту тривалістю 4,4 хв. паливно-кисневою фурмою (див. рис. 1) з тепловою потужністю 110,2 МДж/хв. на тонну брухту дозволив забезпечити наступні показники плавки: при витраті чавуну 797,0 та брухту 334,5 кг/т сталі (29,6 %) на плавку підвищення витрати брухту складало 34,7 кг/т; зросла тривалість циклу плавки на 2 хв. та знизилась продуктивність конвертера на 4,5 %.

Співробітниками Дніпропетровського металургійного інституту (ДМетІ), Українського науково-дослідного інституту металів (м. Харків) і металургійного комбінату «Криворіжсталь» вперше в світовій практиці була досліджена [6-8] довготривала робота промислових

130-т конвертерів з двоярусними кисневими [6] різних конструкцій (рис. 2), призначеними для організації допалювання СО в робочому просторі агрегату. Нижній ярус сопел всіх фурм представляв собою звичайну п'ятисоплову кисневу фурму з кутом нахилу сопел Лавала в головці до вертикалі  $20^{\circ}$ , розраховану на витрату основного потоку кисню безпосередньо на продувку ванни 400-500 м<sup>3</sup>/хв.. Віддалення головки двоярусної фурми від рівня спокійної ванни при продувці складало 1,0 м. Відстань між нижнім і верхнім ярусами сопел - 1,0, 1,65 і 2,0 м (для фурм різних варіантів), витрати додаткового потоку кисню через циліндричні сопла верхнього ярусу на допалювання СО до СО<sub>2</sub> досягали 100-200 м<sup>3</sup>/хв.

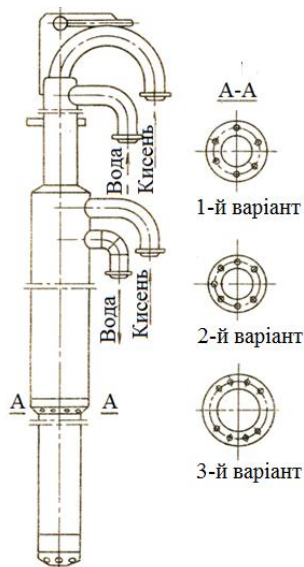


Рисунок 2 – Загальний вигляд досліджених варіантів двоярусних кисневих фурм: 1- головка фурми; 2- верхній ярус сопел

При продувці конвертерної ванни через фурму 1 варіанту (див. рис. 2), яка мала у верхньому ярусі 6 сопел діаметром 15 мм з кутом нахилу до вертикалі  $45^{\circ}$ , віддалених від торця головки фурми на відстань 1,65 м, спостерігався значний місцевий знос футеровки конвертера навпроти кожного із сопел верхнього ярусу на 0,4-0,8 м вище точки перерізу осі сопла і поверхні кладки (в ділянці горловини конвертера).

При використанні для продувки ванни 2 варіанту фурми, яка мала у верхньому ярусі 8 сопел діаметром 18 мм з кутом нахилу до вертикалі  $30^{\circ}$  з подачею через сопла  $60 \text{ м}^3/\text{хв.}$  і більше зона локального зносу футеровки зміщувалась до середини циліндричної частини конвертера (до зони інтенсивного зносу на звичайних плавках).

Кисневі струмені верхнього ярусу фурми 3 варіанту були направлені на ділянки футеровки, які менше зношуються внаслідок утворення шлакового гарнісажу при поворотах конвертера і можуть бути підварені протягом гарячого ремонту. Але в цьому випадку висока стійкість футеровки досягається за рахунок зниження продуктивності конвертера, викликаного простоями на гарячому ремонті футеровки, тому від застосування фурми 3 варіанту відмовилися.

Найвищі показники отримали при використанні фурм варіанту 2 з видаленням верхнього ярусу сопел від торця головки на відстань 1,65 м і подачею кисню в кількості 30-35 % від витрат через сопла Лавала головки. Завдяки значному надходженню тепла у ванну від допалювання СО вдалося збільшити витрати брухту на 6-7 %, скоротити тривалість продувки на 22 %, знизити витрати вапна, вапняку і плавикового шпату, підвищити основність кінцевого шлаку, ступінь десульфурзації і дефосфорації металу. Окисленість металу і вміст в ньому азоту на дослідних і порівняльних плавках знаходились на однаковому рівні, окисленість шлаків на дослідних плавках була на 2-3 % вища, ніж на порівняльних.

Досвід застосування у 130-т конвертерах металургійного комбінату «Криворіжсталь» двоярусних кисневих фурм [6-8] також показав, що таким методом можна збільшити масовий вміст у шихті брухту на 6-7 %, одночасно підвищуючи інтенсивність продувки і продуктивність конвертерів внаслідок скорочення тривалості продувки при тому ж газовідвідному тракті. Оскільки теплопередача в металевій ванні, в даному випадку від факела горіння СО, здійснюється недостатньо ефективно (термічний ККД складає 30-35 %), а стійкість футеровки у верхній частині дещо знижується (на 30 %), процес допалювання газів у порожнині конвертерів необхідно було удосконалювати з одночасним підвищенням стійкості футеровки конвертера.

Свого часу було встановлено [7], що продувка ванни 160-т

конвертерів киснем з витратою 380-390 м<sup>3</sup>/хв. з використанням штатної конструкції фурми з 5-ти сопловою головкою (сопла Лаваля критичного діаметру ( $d_{кр}$ ) 30 мм, розташовані по колу під кутом ( $\alpha$ ) 20<sup>0</sup> до вертикальної осі фурми) та технології з частковим проміжним скачуванням первинного низькоосновного шлаку, з присадкою звичайного і доломітизованого вапна при малій кількості добавок плавикового шпату і формуванням в процесі продувки шлаку з підвищенням до 8 % вмістом оксиду магнію, часто супроводжується «згоранням» шлаку, погіршенням видалення шкідливих домішок, посиленням виносу крапель металу і шлаку з утворенням металошлакової охолоді на стовбурі фурми, конусної частини футеровки і горловині конвертера.

Щоб запобігти інтенсивному заметалюванню стовбура фурми і горловині конвертера, локальному зносу футеровки у верхній частині робочого простору агрегату, співробітниками Дніпродзержинського державного технічного університету (ДДТУ), а нині Дніпровського державного технічного університету (ДДТУ, м. Кам'янське) була розроблена та пройшла дослідно-промислові випробування технологія верхньої продувки ванни 160-т конвертерів ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» із використанням спрощеної конструкції двоярусної кисневої фурми [7-10] із розділенням потоку кисню за допомогою спеціального розподільника на основний і додатковий, що подаються через нижній і верхній яруси сопел відповідно. Двоярусна фурма (рис. 3) містить нижню мідну литу головку 9 із 4-ма соплами Лаваля (рис. 3, а, г) критичного діаметру ( $d_{кр}$ ) 34 мм з кутом нахилу до вертикалі ( $\alpha$ ) фурми 20<sup>0</sup> для формування надзвукових струменів при витратах кисню 380-390 м<sup>3</sup>/хв. та верхній мідний литий 12-ти сопловий блок 7 із циліндричними соплами ( $d_{ц}$ = 7 мм;  $\alpha$ = 30<sup>0</sup>), розташований на відстані 2,5 м від торця головки, для формування дозвукових струменів при витратах кисню 20-25 м<sup>3</sup>/хв. Передбачалось також використання штатної литої конструкції 5-ти соплової нижньої головки 9 (рис. 3, д) з соплами сопла Лаваля ( $d_{кр}$ =30 мм і  $\alpha$ =20<sup>0</sup>).

Стовбур розробленої двоярусної фурми (рис. 3) довжиною 13050 мм складається з трьох частин. Верхня частина стовбура довжиною 2500 мм включає три концентрично розташовані сталеві труби: внутрішню 1 (діаметром 133 × 8 мм) для підведення технологічного кисню, проміжну 2 (діаметром 168 × 6 мм) і зовнішню 4 (діаметром 219 × 8 мм) для підведення і відведення охолоджуючої води відповідно. У середній частині стовбура перед верхнім сопловим блоком 7 здійснена заміна зовнішньої труби 4 діаметром 219 × 8 мм на трубу 3 діаметром 273 × 8 мм і довжиною 2425 мм, яка з'єднана з верхнім сопловим блоком 7. При цьому в центральну трубу вмонтований

металошланговий компенсатор 8. Для проходу охолоджуючої води в міжсопловому просторі блоку 7 є 24 циліндричні проточки діаметром 14 мм.

З мідним сопловим блоком 7 за допомогою зварювання з'єднані зовнішні і проміжні вставки зі сталевих труб  $\varnothing 273 \times 8$  мм,  $\varnothing 219 \times 8$  мм і  $\varnothing 168 \times 6$  мм. З проміжною і центральною вставками герметично з'єднаний сталевий розподільник 6, який має 4 циліндричні канали діаметром 10 мм для проходу додаткового кисню в передсопловий простір, обмежений проміжними вставками, кришкою і вставкою. Прохід охолоджуючої води через розподільник 6 забезпечується за допомогою 4-х щілинних проточок.

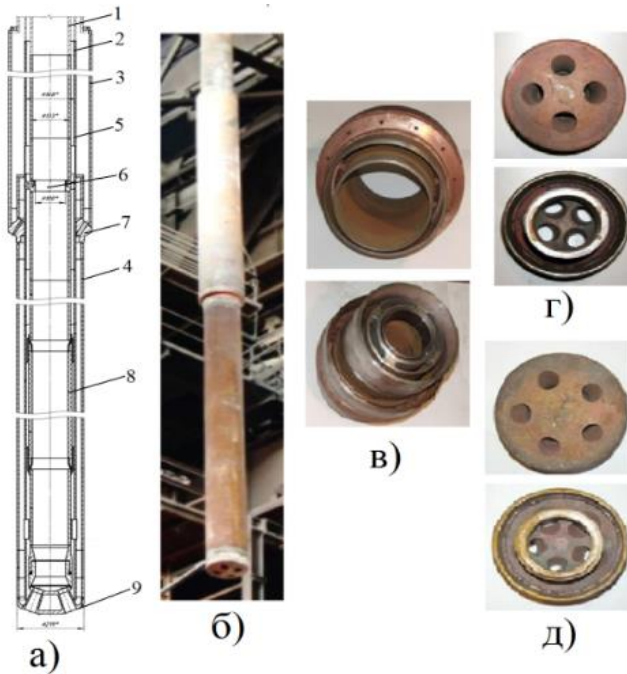


Рисунок 3 - Конструкція (а) і фотографії стовбура двоярусної фурми ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» (б), верхнього соплового блоку (в) і нижньої 4-х (г) і 5-ти (д) соплових головок: 1,2,3 - внутрішня, проміжна і зовнішня труби верхньої частини стовбура фурми відповідно; 4 - зовнішня труба середньої частини стовбура фурми; 5 - роз'ємний компенсатор; 6 - розподільник; 7 - верхній сопловий блок; 8 - металошланговий компенсатор; 9 - нижня головка

Розподільник 6 здійснює поділ потоку кисню, що надходить по внутрішній трубі 1 ( $\varnothing 133 \times 8$  мм), на основний, що йде на продувку конвертерної ванни через головку 9, і додатковий, що вдувається через верхній соплової блок 7 в робочий простір конвертера. Компенсація температурних напружень в двоярусній фурмі забезпечується за допомогою роз'ємного і металошлангового компенсаторів.

Запропонована конструкція двоярусної фурми працює наступним чином. Кисень від підвідного патрубку з загальною витратою 380-390 м<sup>3</sup>/хв. надходить по внутрішній трубі діаметром 133 × 8 мм до розподільника верхнього соплового блоку. При цьому 20 - 25 м<sup>3</sup>/хв. кисню подається через 12 циліндричних сопел верхнього соплового блоку, що призводить до формування своєрідної завіси із дозвукових кисневих струменів на шляху зустрічного потоку відхідних конвертерних газів, що несе в підвішеному стані дрібнодисперсний пил, краплі металу і шлаку. Тим самим знижується інтенсивність покриття металошлаковими охолодами стовбура фурми і горловини конвертера (рис. 4). При цьому допалювання монооксиду вуглецю відхідних газів в цьому випадку відбувається без агресивного високотемпературного впливу факелів допалювання, що утворюються, на футеровку верхньої частини конвертера. Основний потік кисню по центральній трубі діаметром 133 x 8 мм направляється до нижньої 4-х або 5-ти соплової головки і забезпечує формування надзвукових кисневих струменів і продування конвертерної ванни з глибоким проникненням їх в розплав при робочій висоті фурми, інтенсивне перемішування і зневуглещування ванни.

При максимальній подачі кисню через 12-ти сопловий верхній блок 25 м<sup>3</sup>/хв. розрахункова довжина утворених факелів допалювання СО складає 0,54 м, таким чином попереджається високотемпературний вплив факелів на футеровку агрегату.

У ході дослідно-промислової кампанії була підтверджена ефективність запропонованої конструкції двоярусної фурми (рис. 3, а) із забезпеченням: надійної роботи системи охолодження при витраті води 80-100 м<sup>3</sup>/год; спокійного ходу продувки конвертерної ванни із заглушенням виносу мілких крапель металу, попередженням інтенсивного заметалювання стовбура фурми та горловини конвертера; підвищенням витрат кисню до 450 м<sup>3</sup>/хв. та скороченням тривалості продувки на 0,5-1,0 хв.

Свого часу належна стійкість футеровки всіх шести 160-т конвертерів ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» забезпечувалась шляхом факельного торкретування футеровки вертикальним способом з використанням установок (рис. 5) по проєкту «Укрдіпромеза» (м. Дніпро) і розробкам ДонНДІчормета (м. Донецьк) [11,12]. Для

торкретування футеровки конвертерів використовувалась торкрет-маса (вміст фракції 0,09 мм не менше 90 %), що включала горючий сланець і магнезит (не більше 65 % MgO, не менше 18 % CaO і 10 % C) або кам'яновугільний кокс і магнезит (не менше 56 % MgO і 21 % C, не більше 7 % CaO). Установка для торкретування (рис. 4) містить рухому платформу, на якій по вертикальним направляючим переміщується каретка з торкрет-фурмою [15]. Торкрет-фурму можна пересувати, піднімати, опускати і обертати навколо поздовжньої осі на 180 град по обидва боки зі швидкістю 0,78-1,56 об/хв., що дозволяє ремонтувати футеровку на будь-якій ділянці робочого простору конвертера.

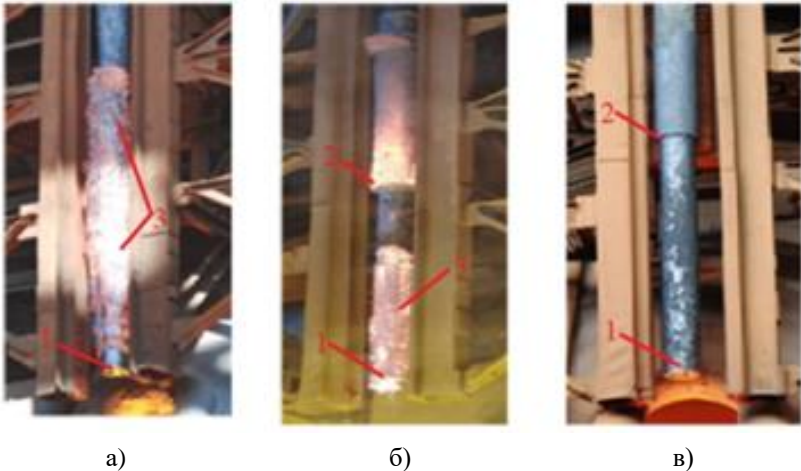


Рисунок 4 – Вид шлакометалевої охолоді на стовбурах штатної кисневої фурми з 5-ти сопловою головою (а) та на двоярусних фурмах з 4-х (б) і 5-ти (в) сопловими головками: 1- нижня головка; 2- верхній сопловий блок; 3- металошлакова охолодь

Наконечник торкрет-фурми (рис. 5, б) складається із корпусу, який є продовженням чогирирубного стовбура торкрет-фурми, сопел подавання кисню і торкрет-маси, знімної заглушки. Сопла для подавання кисню і торкрет-маси типу «труба в трубі» (10 шт.) розташовані в два ряди по висоті наконечника в одній площині. Під час зливу залізовуглецевого напівпродукту і випуску шлаку із конвертера каретка з продувальною кисневою фурмою відводиться і замість неї наводиться торкрет-фурма, що виключає додатковий час на підготування конвертера до факельного торкретування.

Крім факельного торкретування продовжування стійкості футеровки 160-т конвертерів додатково забезпечувалось формуванням в ході продувки шлаку, збагаченого оксидом магнію до 8-10 %, який

після випуску залізовуглецевого напівпродукту, через штатну 5-ти соплову кисневу фурму роздувався на протязі 3-4 хв. азотними струменями з метою нанесення шлакового гарнісажу на футеровку [19].

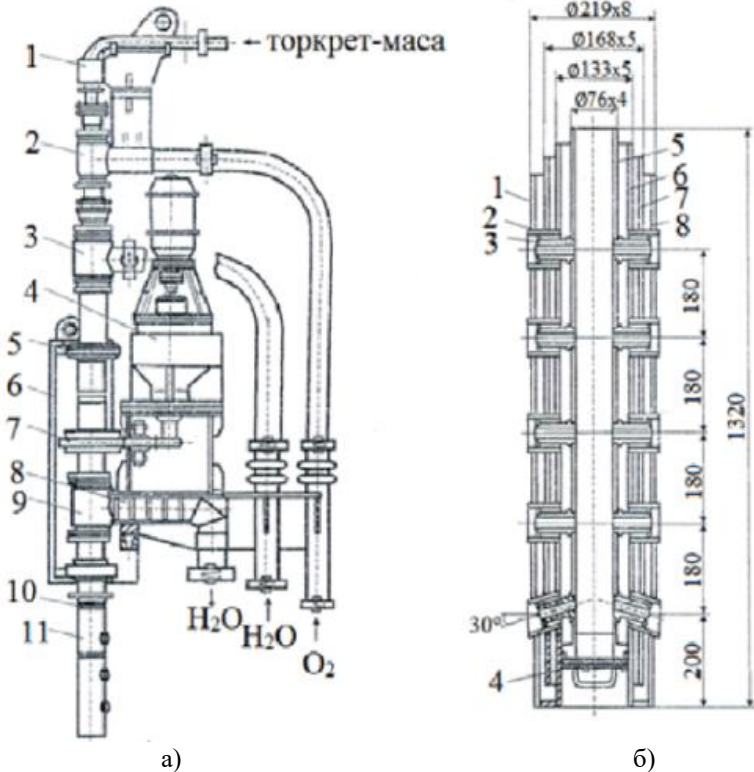


Рисунок 5 – Схеми установки для факельного торкретування футеровки 160-т конвертера (а) і наконечника торкрет-фурми (б): а) 1-3 - верхні колектори; 4- мотор-редуктор; 5- підшипник; 6- каретка; 7- зубчата передача; 8- платформа; 9- нижній колектор; 10- вертикальна торкрет-фурма; 11- наконечник торкрет-фурми; б) 1- корпус; 2- сопла подавання кисню; 3- сопла подавання торкрет-маси; 4- знімна заглушка; 5- труба подавання торкрет-маси; 6- труба подавання кисню; 7- труба подавання води; 8- труба відведення води

На основі отриманих даних холодного моделювання процесів роздування шлаку і факельного торкретування [20] співробітниками ДІТУ було запропоновано [13-18]:

- поєднання в часі операцій роздування кінцевого шлаку азотними струменями і факельного торкретування футеровки шляхом

модернізації базової конструкції установки (рис. 5);

- спрощення конструкції торкрет-фурми за рахунок реалізації газового охолодження наконечника азотом, замість прийнятого охолодження за допомогою води.

На першому етапі була розроблена та освоєна технологія гарячого ремонту футеровки 160-т конвертерів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» із використанням комбінованої газоохолоджуваної торкрет-фурми (рис. 6), що забезпечує сумісне або роздільне нанесення шлакового гарнісажу та факельне торкретування футеровки [13, 15, 16]. Після відпрацювання технології транспортування порошоків без вуглецьвміщуючої складової, повністю відмовились від використання доломітосланцевої торкрет-маси та впровадили технологію ремонту футеровки з використанням сирого доломіту.

В подальшому на другому етапі була розроблена та впроваджена у промислому експлуатацію технологія газопорошкового роздування шлаку із використанням газоохолоджуваної обертової гарнісажної фурми із соплами Лавалю типу «труба у трубі» (рис. 7).

Фурма забезпечує подавання порошкоподібного необпаленого доломіту (400-800 кг/хв.) у потоці повітря (60-80 м<sup>3</sup>/хв.) через сопла 1 (рис. 6, а) безпосередньо у шлакову ванну по ходу операції [13-15,17]. При цьому соплами Лавалю 2 (рис. 6,а) забезпечується подача азоту (350-430 м<sup>3</sup>/хв.) для роздування шлакової ванни на футеровку конвертера.

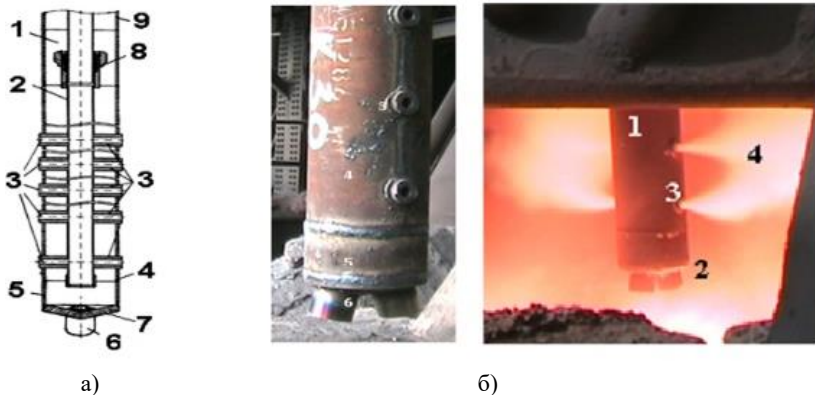


Рисунок 6 – Конструкція (а) та вигляд (б) комбінованої газоохолоджуваної торкрет-фурми: а) 1- наконечник фурми; 2- внутрішня труба подачі торкрет-маси; 3- бокові циліндричні сопла; 4- зовнішня труба; 5- торцева головка; 6- сопла Лавалю; 7- тарілка; 8- сальниковий компенсатор; 9- зовнішня труба стовбура фурми; б) 1-наконечник фурми; 2- сопла Лавалю; 3- бокові циліндричні сопла; 4- торкрет-факела

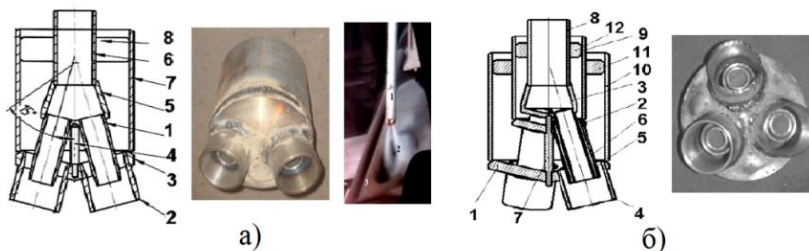


Рисунок 7 – Конструкція та вигляд наконечників дво- (а) та трисоплової (б) газопорошкової фурми:

а) 1- газопорошкове сопло; 2- азотне сопло Лаваля; 3- нижня тарілка; 4- фіксатор; 5- верхня тарілка; 6 - труба 7- зовнішня труба; 8- фіксатор; 9- наконечник у зборі;

б) 1- нижня тарілка; 2- верхня тарілка; 3- чаша; 4- азотне сопло Лаваля; 5- газопорошкове сопло; 6- кисневе сопло; 7- фіксатор; 8, 9, 10- патрубки; 11 та 12- фіксатори

У період 2006-2008 р.р. забезпечено зменшення питомої витрати торкрет-маси з 2,88 кг/т сталі до 0,92 кг/т сталі (на 68%), при зменшенні тривалості операції ремонту на 50% та підвищенні стійкості футеровки, у середньому на 750 плавок, підвищення випуску сталі, у середньому на 103,0 тис.т/конвертер за кампанію по футеровці. За рахунок безпосереднього направлено вдування порошкоподібних матеріалів у об'єм кінцевого конвертерного шлаку, що містить 5-6% MgO:

- зменшені втрати торкрет-маси із відповідними газами. Середня витрата торкрет-маси на операцію склала 360,0 кг, що на 72% та 58% менше ніж при використанні штатної водоохолоджуваної торкрет-фурми (рис. 5) та комбінованої гарнісажної торкрет-фурми (рис. 6) відповідно. Зменшення питомої витрати торкрет-маси склало 62% (з 1,42 кг/т сталі у 2008 р. до 0,53 кг/т сталі у 2012 р.), тривалість операції ошлакування скоротилась на 30-35% (до 2,0- 2,5 хв.) із формуванням більш міцного гарнісажу;

- у 2011 р. середня стійкість футеровки конвертерів у порівнянні із 2010 р. збільшилася на 297 плавок та склала 3172 плавки (рекордна стійкість 4475 плавок);

- по ходу роздування стовбур гарнісажної фурми (рис. 7) покривається шаром продуктів дисоціації карбонатів торкрет-маси, що сприяє його самоочищенню від шлакової охолоді по закінченню операції;

- використання запропонованих гарнісажних фурм сприяло зниженню інтенсивності заметалювання кисневої фурми та призвело до скорочення кількості операцій обрізання охолоді з 2-3 у зміну до 1-2. Вихід з ладу кисневих фурм унаслідок пошкодження під час обрізання

оохолді скоротився з 44% у 2006 р. до 26% у 2011 р.

Для реалізації технології роздування в'язких конвертерних шлаків була розроблена та запропонована до впровадження гарнісажна фурма із трисопловим наконечником (рис. 7, б) типу «труба у трубі» [18], що забезпечує формування струменів, які складаються з центрального газопорошкового струменю (60- 80 м<sup>3</sup>/хв. повітря + 100-350 кг/хв. сирого доломіту) та двох кільцевих струменів (100- 150 м<sup>3</sup>/хв. кисню та 350- 430 м<sup>3</sup>/хв. азоту).

### **Передумови вдосконалювання технологічного маршруту виробництва залізвуглецевого напівпродукту в умовах роботи конвертерного цеху ПАТ«АРСЕЛЮРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»**

В даний воєнний час в роботі знаходяться тільки три 160-т конвертера другого відділення цеху, кожний з яких експлуатується у складі технологічного маршруту «доменна піч - кисневий конвертер – установка ківш-піч – машина безперервного лиття заготовок». Перше відділення цеху у складі трьох 160-т конвертерів законсервовано.

Відома технологія попереднього нагріву металевого брухту в порожнині конвертера з використанням кускового газового вугілля з подачею останнього на завантажений брухт під струмені кисню в цеху не використовується.

Хімічний склад доставленого із доменного цеху переробного чавуну коливається в широких межах: 3,9- 4,6 % С, 0,5-1,2 % Si, 0,25-0,42 % Mn, 0,10- 0,15 % P та 0,025- 0,070 % S.

На сьогоднішній день виплавка залізвуглецевого напівпродукту в 160-т конвертерах передбачає максимальне видалення фосфору і сірки безпосередньо при верхній продувці ванни киснем з використанням штатної конструкції кисневої фурми з 5-ти сопловою мідною литою головкою китайського виробництва. При цьому забезпечується продувка конвертерної ванни киснем з інтенсивністю 380-390 м<sup>3</sup>/хв. через сопла Лавалє критичного діаметра 30 мм, розташовані в головці під кутом 20° до вертикальної осі фурми. При діаметрі зовнішньої труби фурми 219 мм реалізовано периферійне підведення охолоджувальної води до головки з витратою 90-100 м<sup>3</sup>/год..

В початковий період продувки конвертерної ванни (до 5-6 хв. плавки) з витратою кисню 380-390 м<sup>3</sup>/хв. при висоті фурми від 1,9 до 2,3 м над рівнем ванни здійснюється повне видалення кремнію, частини марганцю і вуглецю з наведенням рідкорухливого основного шлаку, що містить 4-6 % оксиду магнію, шляхом присадки суміші доломітизованого і звичайного вапна в співвідношенні 3:1 без добавок плавикового шпату. Подальша продувка ванни з робочим положенням фурми від 1,0-1,2 м у період інтенсивного окислювання вуглецю найчастіше супроводжується «згоранням» шлаків, погіршенням

видалення шкідливих домішок, посиленням виносу крапель металу і шлаку з утворенням металошлакової охолоді на стовбурі кисневої фурми і горловині конвертера. Необхідні значення температури металу на випуску і вмісту в ньому фосфору і сірки забезпечуються переважно за рахунок відповідних додувок ванни (з досягненням вмісту [C] від 0,04-0,06 %), що супроводжується підвищенням окисленості металу і шлаку, збільшенням витрат розкислювачів і зниженням виходу рідкого залізовуглецевого напівпродукту. Після випуску із конвертера залізовуглецевого напівпродукту проводиться роздув кінцевого шлаку азотними струменями при інтенсивності подавання азоту через кисневу фурму 390-400 м<sup>3</sup>/хв. з метою нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера.

Розроблена та впроваджена в свій час технологія гарячого ремонту футеровки 160-т конвертерів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» із використанням комбінованої газоохолоджуваної торкрет-фурми [13-15,17] не використовується. Необхідне обладнання, крім самої торкрет-фурми (рис. 7, а), в своїй більшості виведено із ладу.

Експлуатація штатної 5-ти соплової кисневої фурми в конвертерному цеху характеризується:

- низькою стійкістю головок (у середньому 120 плавок) і високими витратами зовнішньої труби фурми Ø219×7 мм через ушкодження при обрізуванні кисневою трубкою металошлакової охолоді;
- високими середньомісячними простоями на ремонт і заміну фурм, видалення металошлакової охолоді зі стовбура фурми і горловини конвертера. Видалення охолоді з горловини конвертера за допомогою совка, закріпленого на завалочному крані, найчастіше супроводжується ушкодженням футерівки верхньої конічної частини робочого простору агрегату.

З урахуванням наявного досвіду застосування в конвертерному цеху ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» попереднього нагріву металевого брухту [3,5] з використанням паливно-кисневої фурми (рис. 1), верхньої продувки конвертерної ванни надзвукочисними і звуковими кисневими струменями, сформованими соплами Лавалля і циліндричними двоярусних фурм відповідно [6-9], а також підвищення стійкості футеровки конвертерів шляхом нанесення шлакового гарнісажу за допомогою обертових торкрет-фурм [13-15], пропонується у рамках технічної модернізації конвертерного цеху в повоєнний період реалізувати наступну енергоефективну технологічну схему конвертерної плавки з підвищеною до 40 % витратою металобрухту, яка включає:

- попередній нагрів металевого брухту в порожнині всіх 6-ти 160-т конвертерів з використанням нової конструкції обертової паливно-

кисневої фурм на модернізованих установках факельного торкретування футерівки конвертерів (рис. 5), обладнаних відновленими трубопроводами підведення кисню, природного газу, азоту, пиловугільного палива і води;

- комбіновану продувку конвертерної ванни зверху кисневими надзвуковими та звуковими кисневими і азотними струменями з використанням нової конструкції двоярусної фурми з дворядною головкою, оснащеною системи підведення до неї двох регульованих потоків кисню з можливістю їхньої повної заміни на азот у потрібні періоди операції, при одночасному подаванні через днище конвертера нейтральних перемішуючих газів (азот, аргон);

- нанесення шлакового гарнісажу шляхом роздуву кінцевого підготовленого конвертерного шлаку з підвищеним вмістом 8,0-10,0 % MgO надзвуковими і звуковими азотними струменями з використанням двоярусної фурми з дворядною головкою.

Для реалізації запропонованої технологічної схеми конвертерної плавки з підвищеною переробкою металевго брухту було необхідно:

- з використанням високотемпературного моделювання здобути достовірну невідому інформацію відносно: особливості нагріву металевго брухту в порожнині конвертера багатосопловою паливно-кисневою фурмою з використанням в якості палива природного газу і вугільного пилу; фізико-хімічних і гідрогазодинамічних закономірностей верхньої продувки ванни з допалюванням відхідних газів через двоярусну фурму з дворядною головкою;

- на основі даних високотемпературного моделювання і досвіду розробки промислових конструкцій двоярусних і гарнісажних фурм [6-9, 13-15] розробити та запропонувати до впровадження нову конструкцію обертної паливно-кисневої фурми для нагріву металобрухту, багатопільову двоярусну кисневу фурму для комбінованої продувки конвертерної ванни з допалюванням відхідних газів і нанесення шлакового гарнісажу на футерівку агрегату та енергоефективні режими ведення плавки з їх використанням.

### **Обладнання та методика високотемпературного моделювання нагріву металевго брухту і продувки конвертерної ванни.**

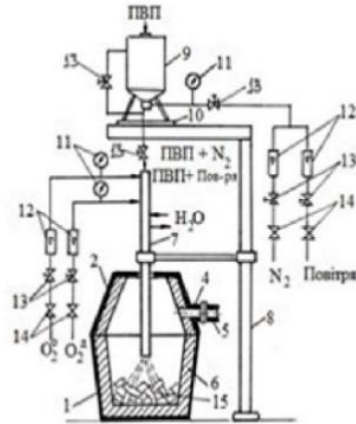
Високотемпературне моделювання процесу нагріву брухту за умов, найбільш подібних до виробничих, вирішували із застосуванням установки (рис. 8), змонтованої на базі 80-кг конвертера, виготовленого в масштабі 1:18 щодо 160-т промислового агрегату.

Конвертер 1 оснащено знімною горловиною 2, що має оглядове вікно 3 з кришкою і патрубок 4 евакуації відхідних газів і пилу, який з'єднується з металошланговим рукавом. Футерівка 6 конвертера виконана шляхом набивання по шаблонах з обпаленого магнезійного

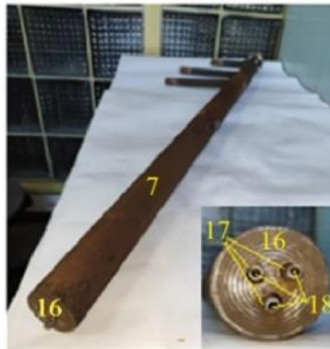
порошку зі зв'язкою на рідкому склі. Зменшення тепловтрат досягається застосуванням шару каолінової вати і листового азбесту, покладених між кожухом і футеровкою конвертера.



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Вид (а) і схема (б) установки високотемпературного моделювання нагріву металевго брухту з використанням паливно-кисневої фурми (в): 1- корпус конвертера; 2- знімна горловина; 3- оглядове вікно; 4- патрубок евакуації відхідних газів і пилу; 5- металошланговий рукав; 6- футеровка конвертера; 7- паливно-киснева фурма для нагріву металевго брухту; 8- пристрій для закріплення і переміщення фурми; 9- живильник пилувугільного палива; 10- лабораторні ваги ТВЕ-120-5; 11-манометри; 12- ротаметри; 13- регулювальні вентилі; 14- відсічні вентилі; 15- металевий брухт; 16- головка паливно-кисневої фурми; 17- кільцеві канали; 18- центральні циліндричні сопла

До складу установки входять: паливно-киснева фурма 7 для нагріву металевого брухту з використанням пиловугільного палива (ПВП) і пропан-бутанової суміші (ПБС), пристрій 8 для закріплення і переміщення фурми; живильник 9 пиловугільного палива, встановлений на лабораторних вагах 10 марки ТВЕ-120-5; обладнання для подачі до конвертера кисню, азоту, пропан-бутанової суміші, компресорного повітря і води; контрольно-вимірвальна й регулююча апаратура. Живлення конвертера киснем, азотом, аргоном і пропан-бутаном від рамп із балонами, повітрям від компресора, які розміщені в спеціальному приміщенні, здійснюється через газові магістралі, обладнані манометрами 11 і ротаметрами 12 для контролю тиску і витрат газів, регульовальними 13 та відсічними 14 вентилями.

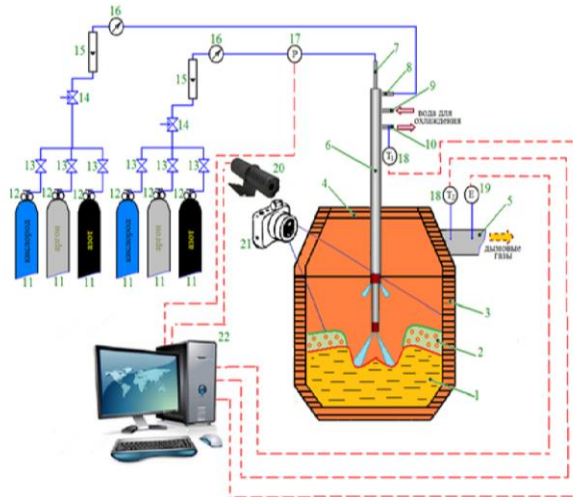
Паливно-киснева фурми (рис. 8, в) містить мідну головку з 3-ма розміщеними по колу під кутом  $15^{\circ}$  до вертикальної осі фурми концентричними циліндричними соплами типу «труба в трубі» з подачею через центральні циліндричні сопла 18 діаметром 2 мм пропан-бутану або пиловугільного палива в потоці азоту, а через 1,5 мм кільцевий канал 17 між соплами кисню.

Випал і розігрів футеровки конвертера перед нагрівом металевого брухту і конвертерною плавкою здійснюється шляхом спалювання завантаженого в конвертер коксу з вдуванням в порожнину останнього компресорного повітря за допомогою кисневої або паливно-кисневої фурми при закритому кришкою оглядовому вікні. Відведення димових газів, що утворюються в ході розігріву футеровки, так і нагріву металевого брухту проводиться через металошланговий рукав, з'єднаний із димососом ВДД-11 і димовідвідною трубою.

Експрес-контроль температури поверхні футеровки конвертера під час розігріву останньої, а також температури нагріву металевого брухту у діапазоні від 800 до 1300  $^{\circ}\text{C}$  здійснюється за допомогою переносного пірометра часткового випромінювання «Смотрич-5ПО2». Спостереження за перебігом нагріву металевого брухту з використанням ПВП і ПБС, діяння кисневих та паливно-кисневих струменів на поверхню металобрухту, безпосереднє формування паливно-кисневих струменів здійснюється через оглядове вікно з фіксацією відеокамерою CASIOES-FH25 (30 – 1000 к/с).

Високотемпературне моделювання верхньої продувки конвертерної ванни кисневими і азотними струменями з використанням двоярусної фурми проводились теж з використанням установки (рис. 8, 9) на базі 80-кг конвертера.

а)



б)

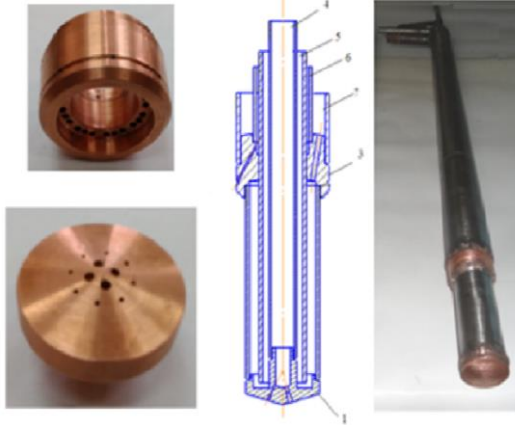


Рисунок 9- Схема (а) установки високотемпературного моделювання продувки конвертерної ванни кисневими і нейтральними ( $N_2$ ,  $A_r$ ) газовими струменями з використанням двоярусної фурми з дворядною головою (б): а) 1- металева ванна; 2- шлакометалева емульсія; 3- корпус конвертера; 4- знімна горловина з оглядовим вікном; 5- димовідвідний тракт; 6- двоярусна фурма; 7- патрубок підведення основного кисню; 8- патрубок підведення додаткового кисню; 9,10- патрубки підведення і відведення охолоджуючої води; 11- газові балони; 12- редуктори; 13- відсічні вентиля; 14- регулюючі вентиля; 15- ротаметри; 16- манометри аналогові; 17- манометр цифровий; 18- термопари; 19- датчик викиду пилу ДВП-02; 20- пірметр; 21- відеокамера; 22- комп'ютер; б) 1- нижня дворядна головка (а); 2- верхній сопловий блок; 4- труба підведення основного кисню; 5- труба підведення води; 6- труба підведення додаткового кисню; 7- труба відведення води

Двоярусна киснева фурма (рис. 9, б) обладнана нижньою дворядною головкою 1, що містить розміщені по внутрішньому кругу 4 сопла Лаваля з критичним ( $d_{кр}$ ) і вихідним ( $d_{вих}$ ) діаметром 1,7 і 2,5 мм відповідно для формування надзвукових кисневих струменів та 12 розміщених по зовнішньому кругу циліндричних сопел діаметром ( $d_{ц}$ ) 1,0 мм для формування дозвукових кисневих струменів. Кут нахилу до вертикалі фурми сопел Лаваля ( $\alpha_1$ ) і циліндричних ( $\alpha_2$ ) в головці фурми дорівнює відповідно 12 і 30 град. Верхній сопловий блок, розташований на відстані 2,5 м від торця нижньої головки ( $H_в$ ) 105 мм, містить розміщених по кругу 8 циліндричних сопел ( $d_{ц}=1,0$  мм,  $\alpha_3=30$  град) для формування дозвукових кисневих струменів.

Переробний рідкий чавун відомого складу (в середньому 4,15% С, 0,32% Mn, 0,55% Si, 0,034% S та 0,095% P) з температурою 1350-1450 °С готували в кислому тиглі індукційної печі. Після відбору проби чавуну і заливання 60 кг останнього в конвертер починали продувку ванни з використанням двоярусної кисневої фурми (рис. 9, б), забезпеченої незалежно регульованими підводами до неї основного ( $Q_{O_2}^{очн}$ ) і додаткового ( $Q_{O_2}^{доп}$ ) потоків кисню з витратами в межах 2,0 - 3,3 і 0,18 - 1,65 м<sup>3</sup>/т·хв. відповідно через групи сопел Лаваля і циліндричних. Висоту фурми над рівнем ванни у спокійному стані змінювали в межах 20 - 60 калібрів.

Для наведення шлаку розосереджено присаджували доломітизоване вапно, плавиковий шпат і залізорудні окотиші фракцією 8 - 12 мм в кількості 1,5 - 2,5, 0,2 - 0,3 і 0,1 - 0,2 кг відповідно.

З метою пошуку додаткових керуючих впливів на стан спіненої шлакометалевої емульсії в конвертері у певні періоди продувки проводили заміну додаткового кисню на азот з витратою 0,18 - 2,05 м<sup>3</sup>/т·хв.

Спостереження за перебігом продувки, процесів взаємодії кисневих і азотних струменів з конвертерною ванною здійснювалося через оглядове вікно з фіксацією відеокамерою Casio Exilim EX F1 зі швидкістю 300 кадрів/с. Протягом всього періоду продувки з інтервалом 3 - 5 хв. відбирали проби металу і шлаку для подальшого хімічного аналізу, фіксували температуру металу.

### **Результати високотемпературного моделювання нагріву металевго брухту в порожнині конвертера**

На початковому етапі лабораторних досліджень [21] були виявлені наступні особливості нагріву металевго брухту в конвертері з подаванням через сопла типу «труба в трубі» паливно-кисневої фурми (рис. 8, в) пилувугільного палива з витратою 0,4-0,5 кг/хв. в потоці азоту 0,15-0,20 м<sup>3</sup>/хв. і кисню 0,25-0,39 м<sup>3</sup>/хв.:

- зниження температури футеровки конвертера до 700-750 °С перед

нагрівом брухту, а також використання баластного азоту в якості газу-носія пиловугільного палива призводить до сповільнення стадій спалювання пиловугільних частинок, а саме до зростання часу прогріву частинок вугілля до запалювання летких та їх згорання, подальшого прогріву коксового залишку до займання і вигорання з формуванням високотемпературного пиловугільного факелу належної теплової потужності (рис. 10);

- при спалюванні вугільного пилу в кисневому середовищі, через значну сумарну поверхню вугільних частинок, основна маса летких  $C_mH_n$  не встигає виділитися до початку займання частинок, і вуглець горить з такою ж швидкістю, як і леткі. Це сприяє формуванню високотемпературних факелів з великою світлістю, які ефективно впливають на поверхню брухту (рис. 11);

- коефіцієнт використання кисню, що вдувається, і пиловугільного палива суттєво вищий, ніж при використанні кускового газового вугілля протягом нагрівання будь-якої тривалості. Це обумовлено більшою світлістю утворених факелів, що сприяє інтенсивному поглинанню теплової енергії поверхню брухту.

- скорочується час, необхідний для нагрівання поверхні металобрухту до заданої температури, що дозволяє уникнути утворення рідкої складової, яка може призвести до небажаних наслідків, таких як нерівномірний нагрів або пошкодження футерівки конвертера.

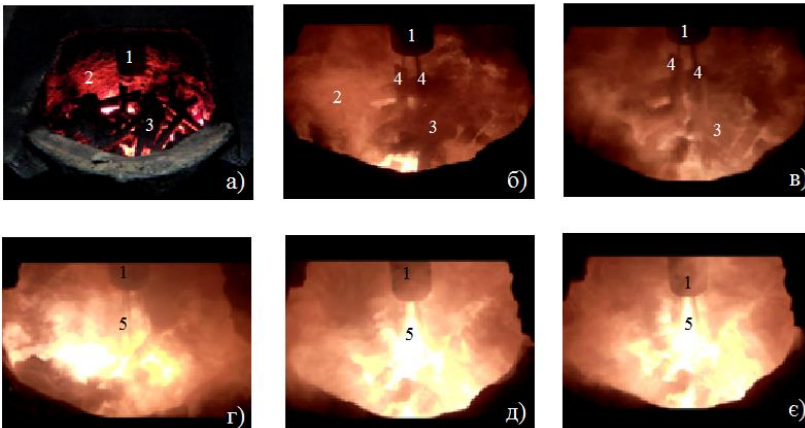


Рисунок 10.- Динаміка інкубаційного періоду нагріву металевго брухту в порожнині конвертера пиловугільним факелом: 1- паливно-киснева фурма; 2- футерівка конвертера; 3- металевий брухт; 4- струмені пиловугільного палива; 5- пиловугільні факели

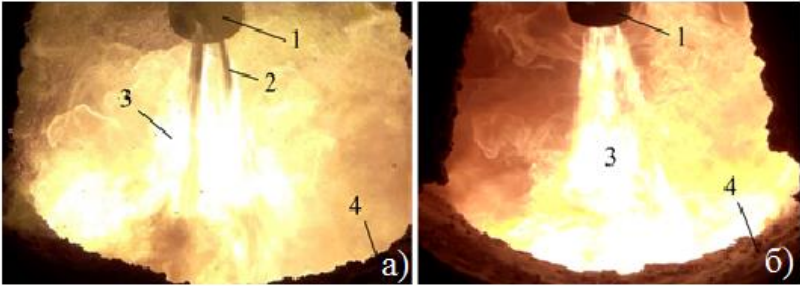


Рисунок 11- Початок процесів запалювання (а) і горіння (б) сформованого пиловугільного палива: 1- паливно-киснева фурма; 2- струмені пиловугільного палива; 3- пиловугільні факели; 4- футерівка конвертера

На початку вдування частинки вугільного пилу нагріваються до температури запалювання. Це відбувається за рахунок теплопередачі випромінюванням від нагрітої футеровки конвертера. На першому етапі нагріваються крайові області струменю ПВП через недостатнє перемішування з киснем кільцевої оболонки. В подальшому з підвищенням температури горіння формуються високотемпературні (до 2000 °С) пиловугільні факели, що діють на поверхню металевго брукхту (рис. 12).

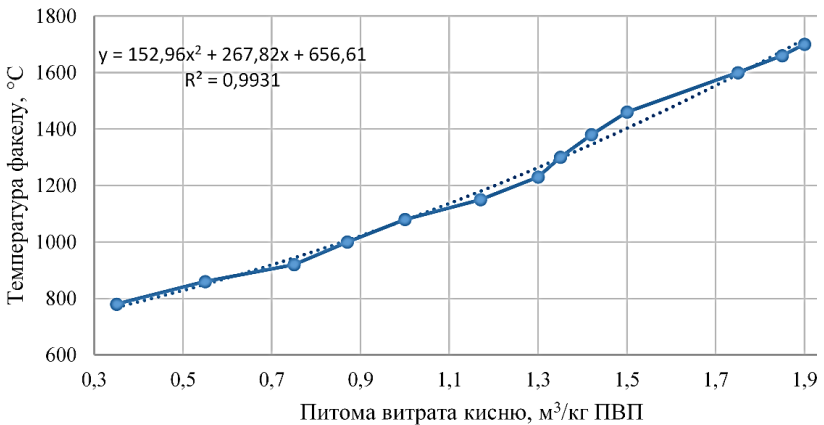


Рисунок 12 – Вплив питомої витрати кисню на температуру факелу ПВП

Як відомо [22], а це підтверджено експериментами (рис. 13), природний газ (пропан-бутанова суміш) спалюється в малосвітному факелі з низькою тепловіддачею випромінюванням. У зв'язку з цим необхідно організувати спалювання природного газу так, щоб утворюваний факел мав максимальну світність, яка підвищує ступінь

чорноти його і тепловіддачу випромінюванням металевому брухту.

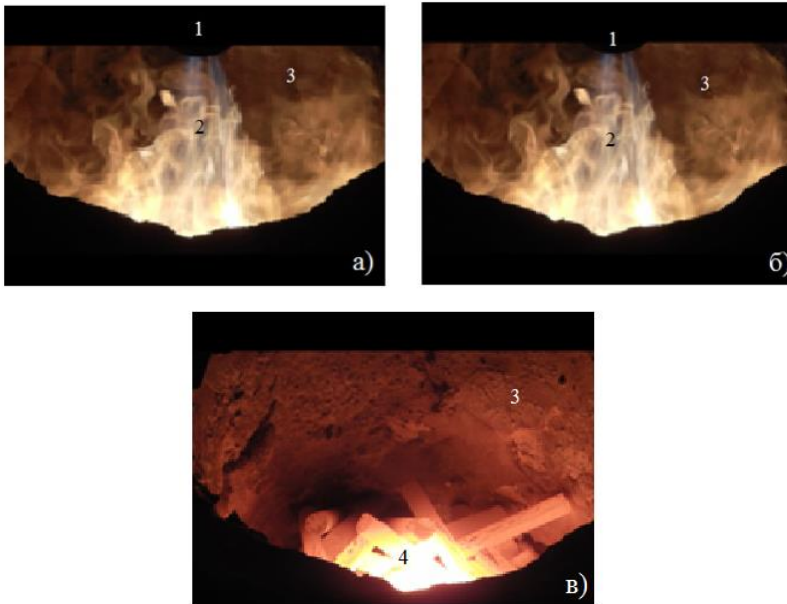


Рисунок 13- Динаміка нагріву металевому брухту пропан-бутановим факелом: 1- головка паливно-кисневої фурми; 2- сформований пропан-бутановий факел; 3- футеровка конвертера; 4 – нагрітий металевий брухт

Світність факелу значно зростає при появі в ньому часток сажистого вуглецю, які можуть бути внесені в нього або створені в самому факелі в процесі горіння вуглеводнів. Значна кількість сажистого вуглецю створюється в факелі при горінні вуглеводнів, які входять до складу рідкого палива (мазут). При добавці рідкого палива в факел природного газу його світність може бути значно підвищена [22]. Однак практична реалізація цього методу підвищення світності факела природного газу (шляхом карбюрації рідким паливом) при нагріві металевому брухту в конвертерах пов'язана з організацією мазутного господарства, ускладненням експлуатації і не завжди може бути рекомендована.

Проведеними експериментами встановлено (рис. 14), що підвищення світності і температури факела газової пропан-бутанової суміші досягається шляхом введення в потік останньої добавки пиловугільного палива. За рахунок одночасної подачі через центральні циліндричні сопла в потоці пропан-бутанової суміші пиловугільного палива, а через кільцеві канали між соплами кисню забезпечується

прискорене формування високотемпературного пиловугільного факела з підвищеною температурою і тепловою потужністю.

Це пояснюється, насамперед тим, що пропан-бутанова суміш (природний газ) виконує роль летких складових, займаючись раніше пиловугільного палива, він сприяє прискореному прогріву частинок вугілля з підвищенням швидкості згорання вуглецю. Крім того, внаслідок зменшення кількості баластного азоту в якості газу-носія пиловугільного палива виділяється більше тепла при згоранні вуглеводнів  $C_mH_n$  і вугільного пилу, що призводить до підвищення температури і теплової потужності пиловугільних факелів, а також скорочення часу нагріву металевого брухту до визначеної температури та підвищення продуктивності киснево-конвертерного процесу.

### **Результати високотемпературного моделювання продувки конвертерної ванни двоярусною фурмою з допалюванням відхідних газів**

З початком продувки конвертерної ванни з витратою основного кисню ( $Q_{O_2}^{оч}$ )  $0,20 \text{ м}^3/\text{хв}$  ( $3,33 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{хв.})$ ) через двоярусну фурму з двоярусною головкою (рис. 9, б) стійке «запалювання» плавки відбувалося [23,24] при розташуванні торця головки на початковій висоті ( $H_{\phi}^{оч}$ ) 45-50 калібрів. Зі встановленням двоярусної фури на робочій висоті ( $H_{\phi}^{роб}$ ) 30 калібрів і витраті основного кисню  $0,20 \text{ м}^3/\text{хв}$ . через 4 сопла Лавалля забезпечувалася продувка в режимі глибокого проникнення надзвукових кисневих струменів в розплав з формуванням в глибині останнього відокремлених реакційних зон. З меж цих реакційних зон, в разі розташування рівня спіненої шлакометалевої емульсії поблизу торця наконечника фури, відбувається періодичний вихід на поверхню ванни об'ємів  $CO$  у вигляді макропузирів. При цьому у формуванні факелів допалювання  $CO$  до  $CO_2$  беруть участь тільки звукові струмені додаткового кисню, розташовані на стороні виходу макропузиря, інші ж струмені впроваджуються у спінений шлак і взаємодіють з останнім (рис. 15).

З підвищенням швидкості зневуглецювання в основний період продувки, а відповідно зі збільшенням обсягу виділяемого за межі реакційної зони монооксиду вуглецю, зростає по діаметру довколофуриена область виходу на поверхню ванни  $CO$ . Це сприяє при витраті додаткового кисню  $0,084\text{-}0,13 \text{ м}^3/\text{хв}$ . ( $1,4\text{-}2,16 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{хв.})$ ) інтенсивному розвитку допалювання залученого в звукові струмені  $CO$  до  $CO_2$  з формуванням високотемпературних факелів, що взаємодіють з поверхнею ванни за межами зон безпосередньої взаємодії надзвукових кисневих струменів з розплавом (рис. 16).

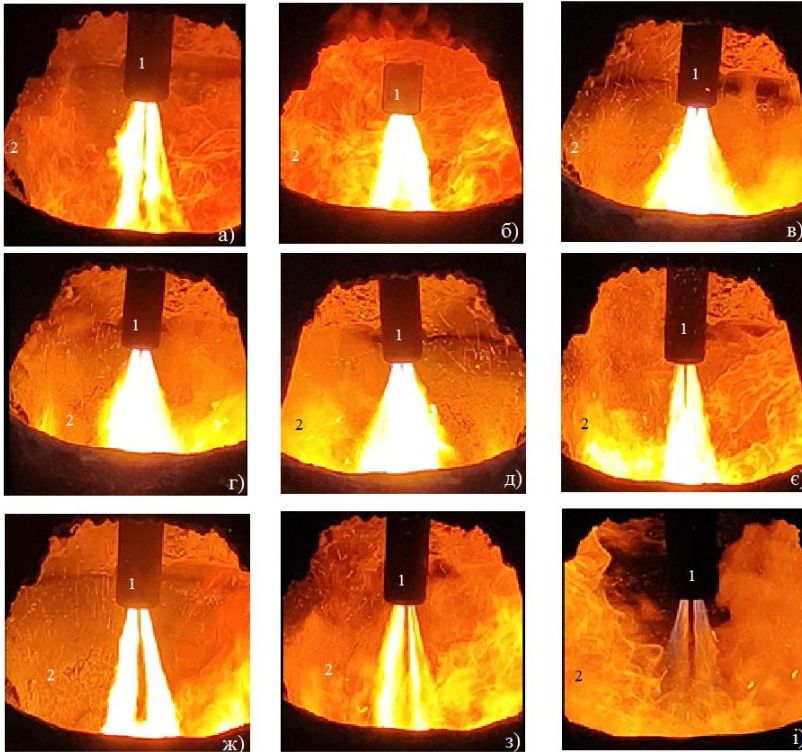


Рисунок 14- Стадії формування і підвищення світності факелу пропан-бутанової суміші шляхом карбюрації добавкою пиловугільного палива: 1-паливно-киснева фурма; 2- футеровка конвертера; а)- сформовані пропан-бутанові факели; (б-д)- формування факелів пропан-бутанової суміші з добавкою пиловугільного палива; (е-з)- поступове зменшення добавки пиловугільного палива в пропан-бутанові факели; і)- створення пропан-бутанового факелу

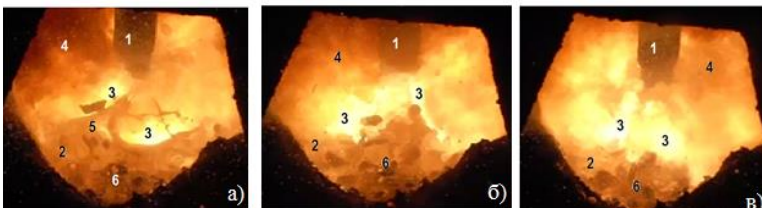


Рисунок 15- Картина продувки конвертерної ванни з використанням двоярусної фурми при параметрах дуття:  $Q_{O_2}^{CH} = 0,20 \text{ м}^3/\text{хв}$  ( $3,33 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{хв}$ .);  $Q_{O_2}^{ДОД} = 0,12 \text{ м}^3/\text{хв}$ . ( $2,0 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{хв}$ );  $N_{\Phi}^{\text{роб}} = 30$  калібрів: 1- двоярусна фурма; 2 - поверхня шлаку; 3 – факели допаловання  $CO$ ; 4 – вихід бурого диму; 5 – сплески шлаку; 6 – шматки доданого вапна

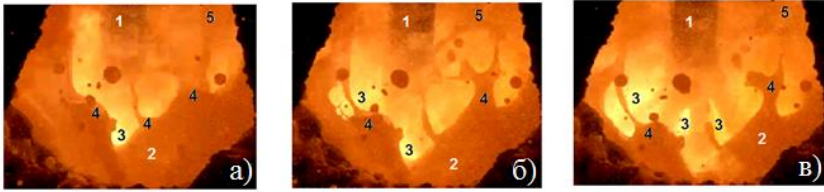


Рисунок 16 – Картина продувки конвертерної ванни з використанням двоярусної фурми в період наведення шлаку при параметрах дуття: ( $H_{\text{ф}}^{\text{роб}} = 30$  калібрів,  $Q_{\text{O}_2}^{\text{оч}} = 0,20$  м<sup>3</sup>/хв. (3,33 м<sup>3</sup>/т·хв.),  $Q_{\text{O}_2}^{\text{дол}} = 0,13$  м<sup>3</sup>/хв (2,17 м<sup>3</sup>/т·хв.): 1- двоярусна фурма; 2 – поверхня шлаку; 3 – факела допалювання СО; 4 –сплески шлаку; 5 – вихід бурого диму

З інтенсифікацією окислення вуглецю із меж реакційної зони посилюється потік великих і дрібних бризок металу, спрямованих в шлак, а утворені в результаті дроблення металеві корольки (к) піддаються в шлаку зневуглицюванню за реакцією



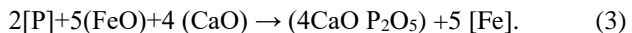
При цьому дрібні бульбашки СО накопичуються в шлаку з формуванням спіненої шлакометалевої емульсії.

При рівні спіненої шлакометалевої емульсії, що розташовується поблизу (див. рис. 16) або над верхнім ярусом (рис. 17) циліндричних сопел продувка зазвичай протікає в режимі, коли з певною частотою за межі реакційної зони виходить ланцюжок спливаючих уздовж стовбура фурми макропузирей СО, які в процесі спливання і укрупнення викликають початкове збільшення висоти шару спіненого шлаку і подальше зниження після виходу і руйнування чергового макропузиря на поверхні ванни у довоклофурменій зоні.

Високотемпературні продукти реакції допалювання



передають тепло оточуючій макропузир оболонці шлакометалевої емульсії, яка в перегрітому до більш високої температури стані виноситься на поверхню ванни (рис. 18), приймаючи участь в процесі передачі тепла від допалювання через шлак до присадженого кускового вапна і металевій ванні. Теплопередача від факела допалювання здійснюється за закономірностями зануреного горіння, завершується в шлаковому шарі і не викликає додаткового нагріву футеровки. Як відомо, на кордоні розділу шлак-метал і в об'ємі спіненої шлакометалевої емульсії отримує переважний розвиток окислення фосфору за реакцією



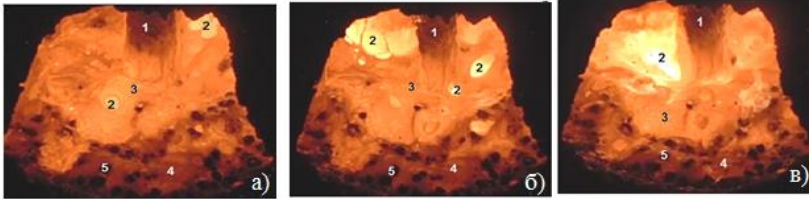


Рисунок 17- Картина продувки конвертерної ванни з використанням двоярусної фурми в період наведення шлаку при параметрах дуття: ( $H_{\Phi}^{\text{роб}} = 50$  калібрів,  $Q_{O_2}^{\text{сн}} = 0,20 \text{ м}^3/\text{хв}$  ( $3,33 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{хв}$ ),  $Q_{O_2}^{\text{доД}} = 0,13 \text{ м}^3/\text{хв}$  ( $2,17 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{хв}$ ): 1 - двоярусна фурма; 2 - вихід CO; 3 - довколофурмений перегрітий об'єм шлаку; 4 - периферійний шлаковий об'єм; 5 - шматки доданого вапна

Для прискорення видалення фосфору при високому вмісті вуглецю в конвертерній ванні, а також запобігання утворенню металошлакової охолоді на стовбурі звичайної кисневої фурми необхідно домагатися максимально раннього спінування шлаку і можливо більшої тривалості продувки з наявністю спіненої шлакометалевої емульсії, що наближається до горловини конвертера, не допускаючи при цьому виникнення викидів.

У початковий і основний періоди продувки конвертерної ванни через двоярусну фурму з двоярядним наконечником (рис. 18) вдалося прискорити процес шлакоутворення без додавання плавикового шпату, інтенсифікувати видалення фосфору при високому вмісті вуглецю шляхом:

- розташування в ході продувки двоярусної фурми на початковій ( $H_{\Phi}^{\text{поч}}$ ) і робочій ( $H_{\Phi}^{\text{роб}}$ ) висоті, яка визначається з рівнянь:

$$H_{\Phi}^{\text{поч}}/d_{\text{кр}} = 63,1(\sum i_{O_2}^{\text{сн}}/\text{mg})^{0,094}, \quad (4)$$

$$H_{\Phi}^{\text{роб}}/d_{\text{кр}} = 40,8(\sum i_{O_2}^{\text{сн}}/\text{mg})^{0,092}, \quad (5)$$

де  $\sum i_{O_2}^{\text{сн}}$  - сумарний імпульс основних надзвучових кисневих струменів, що впливають на ванну,  $\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$ ;  $m$  - маса рідкого металу,  $\text{кг}$ ;  $g$  - прискорення сили тяжіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $d_{\text{вих}}$ - критичний діаметр сопла Лавалю;

- розподілу загального потоку кисню на основний  $Q_{O_2}^{\text{сн}} = Q_{O_2}^{\text{л,н}} + Q_{O_2}^{\text{ц,н}}$ , що вдувається в порожнину конвертера через сопла Лавалю та циліндричні головки, і додатковий ( $Q_{O_2}^{\text{доД}} = Q_{O_2}^{\text{ц,я}}$ ), що подається через верхній ярус циліндричних сопел, в процентному співвідношенні 78:12:10.

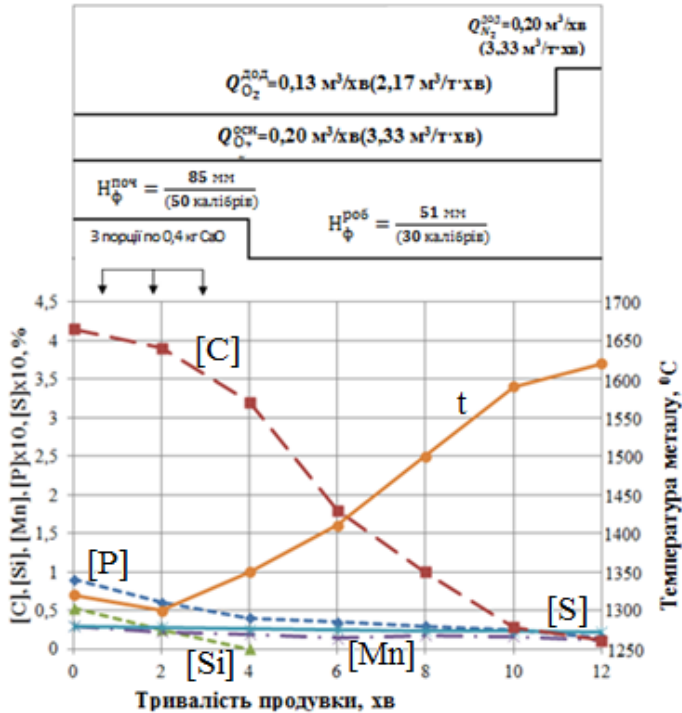


Рисунок 18- Зміна хімічного складу і температури металу у процесі продувки з використанням двоярусної фурми з двоярусною голівкою при відпрацьованих параметрах дуття і присадки шлакоутворюючих матеріалів.

При такому режимі дуття (див.рис. 18) по завершенню початкового періоду продувки при низькій температурі металу 1300-1330 °C і основності рідкорухливого шлаку  $\text{CaO/SiO}_2 = 1,9-2,1$ , що містить 23,7 - 24,2% FeO і 4,0 - 4,2% MgO, забезпечується видалення фосфору з початкового вмісту в чавуні 0,09 - 0,12% до 0,024 - 0,025% по завершенню початкового періоду продувки з досягненням ступіня дефосфорації 73,3 - 79,1%. По закінченню продувки ванни концентрація вуглецю і фосфору в металі становила 0,09 - 0,10% і 0,015 - 0,017% відповідно.

### Розроблені і запропоновані до впровадження конструкція паливно-кисневої фурми і спосіб нагріву металобрухту

З урахуванням попереднього досвіду нагріву металобрухту в порожнині 160-т конвертера з використанням природного газу [3], відомих недоліків зварної голівки [3.4] фурми-пальника (рис. 1),

запланованої модернізації установки факельного торкретування футеровки конвертера (рис. 5, а) і наконечника торкрет-фурми (рис. 5, б) з метою переобладнання останньої для нагріву брухту, а також отриманих даних високотемпературного моделювання нагріву брухту пиловугільними [21] і пропан-бутановими факелами, розроблена, замість торкрет-фурми (рис. 5, а,б), нова конструкція [25] верхньої 4-х соплової головки обертової паливно-кисневої фурми (рис. 19), що пристосована для нагріву металевго брухту в порожнині конвертера з використанням як пиловугільного палива, так і природного газу.

Технологічні параметри фурми:

- |   |                           |
|---|---------------------------|
| - робочий тиск кисню перед фурмою                         | - 1,5 МПа;                |
| - робочий тиск природного газу перед фурмою               | - 0,8 МПа;                |
| - робочий тиск азоту перед фурмою                         | - 0,8 МПа;                |
| - максимальні витрати кисню                               | - 400 м <sup>3</sup> /хв; |
| - максимальні витрати природного газу                     | - 250 м <sup>3</sup> /хв; |
| - максимальні витрати пиловугільного палива (ПВП)         | - 500 кг/хв;              |
| - максимальні витрати азоту на подачу ПВП                 | - 40 м <sup>3</sup> /хв;  |
| - кількість сопел типу «циліндричне сопло в соплі Лаваля» | - 4 шт;                   |
| - витрати охолоджуючої води                               | - 80 м <sup>3</sup> /год. |

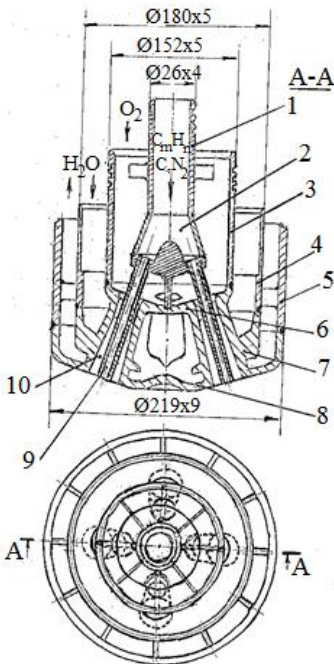


Рисунок 19 - Конструкція 4-х соплової головки обертової паливно-кисневої фурми для нагріву металевго брухту в 160-т конвертері: 1- паливний патрубок; 2- паливний розподільник; 3- кисневий патрубок; 4- проміжний водяний патрубок; 5- зовнішній водяний патрубок; 6- верхня чаша суцільнолитий мідної головки; 7- розподільник води; 8- нижня чаша головки, 9- паливні циліндричні сопла; 10- кисневі сопла Лаваля

Водоохолоджувана цільнолита мідна головка фурми (див.рис. 19) включає паливний патрубок 1 ( $\varnothing$  76x4 мм) з паливним розподільником 2, в якому розміщені за допомогою різьбового з'єднання рівномірно по колу під кутом  $17^{\circ}$  до вертикалі фурми чотири паливних сопел 9. Кожне паливне сопло містить центральний циліндричний паливний канал, на вхідній частині зовнішньої циліндричної поверхні кожного паливного сопла виконана різьба, вихідна частина має форму шестигранника. Між верхньою 6 і нижньою 8 чашами суцільнолітої мідної головки розміщені розподільник 7 охолоджуючої води і рівномірно під тим же кутом до вертикалі чотири кисневих сопла Лавалю 10.

Багатосоплова паливно-киснева фурма працює наступним чином. Охолоджувальна вода надходить в головку фурми по кільцевому зазору між кисневим патрубком 3 ( $\varnothing$  152x 5 мм) та проміжним патрубком 4 підведення води ( $\varnothing$  180x 5 мм) і проходить до розподільника 7. Потім по відповідних каналах між верхньою чашею і розподільником і між корпусами кисневих сопел вода направляється до центра нижньої чаші 8. Далі по відповідних каналах між розподільником, нижньою чашею і корпусами кисневих сопел вода відводиться в кільцеві зазори між проміжним 4 ( $\varnothing$  180x10 мм) та зовнішнім 5 ( $\varnothing$  219x9 мм) патрубками.

Кисень надходить до верхньої чаші 6 головки по кільцевим зазорам між паливним 1 ( $\varnothing$  76x4 мм) і кисневим 3 ( $\varnothing$  152x5 мм) патрубками. Потім потік кисню розподіляється між чотирма кисневими соплами Лавалю 10 і проходить по трьом змінним по довжині зазорам між: поверхнею вхідної звужувальної частини кисневого сопла 10 і циліндричною зовнішньою поверхнею паливного сопла 9; поверхнею центральної циліндричної частини кисневого сопла і зовнішньою циліндричною поверхнею; поверхнею вихідного розширеної частини кисневого сопла 10 і шестигранною боковою поверхнею паливного сопла 9. В результаті на виході головки фурми формуються чотири турбулізованих кільцевих пульсуючих кисневих струменів.

Пилоугільне паливо в струмені азоту або природний газ надходять через паливний патрубок 1 ( $\varnothing$  76x4 мм) в паливний розподільник 2. Далі паливо перерозподіляється між центральними циліндричними каналами паливних сопел 9 з формуванням чотирьох паливних струменів на торцевій шестигранній поверхні паливного сопла.

З одночасним надходженням палива і кисню через паливні 9 і кисневі 10 сопла забезпечується на виході із головки фурми поширення паливних струменів в турбулізованій пульсуючій кільцевій кисневій оболонці з формуванням чотирьох високотемпературних факелів, що направлені на поверхню металевого брухту у порожнині конвертера. Використання турбулізованої пульсуючої кільцевої кисневої оболонки

навколо паливного струменя, що витікає із паливного сопла 9 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 металевго брухту, забезпечити розосереджений характер взаємодії високотемпературних факелів з поверхнею металевго брухту без локального розплавлення останнього перед заливанням чавуну в конвертер, досягти економії чавуну і підвищення продуктивності киснево-конвертерного процесу.

Компенсація лінійного подовження зовнішньої труби ( $\varnothing 219 \times 9$  мм) фурми, яка виникає при попередньому нагріванню металевго брухту у порожнині конвертера, забезпечується завдяки створенню кільцевих ковзних ущільнень з гумовими кільцями на патрубках паливної ( $\varnothing 76 \times 4$  мм) та кисневої ( $\varnothing 152 \times 5$  мм) труб головки.

В процесі монтажу суцільнолитої головки проводиться тільки один зварний кільцевий шов для з'єднання зовнішнього водяного патрубка ( $\varnothing 219 \times 9$  мм) з трубою відведення охолоджуючої води з фурми. Заміна головки здійснюється шляхом розрізання зовнішнього водяного патрубка і подальшого вилучення головки шляхом роз'єднання паливного ( $\varnothing 76 \times 4$  мм) і кисневого ( $\varnothing 152 \times 5$  мм) патрубків з гумовими ущільнювальними кільцями відповідно із стаканами, що розміщені на паливній ( $\varnothing 76 \times 4$  мм) і кисневій ( $\varnothing 152 \times 5$  мм) трубах стовбура паливно-кисневої фурми.

У випадку зношення центральних каналів корпусів паливних сопел 9 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.

### **Розроблені і запропоновані до впровадження конструкція двоярусної кисневої фурми і режим комбінованої продувки ванни 160-т конвертера**

Запропонована до впровадження конструкція двоярусної фурми з дворядною головкою (рис. 20) складається зі стовбура довжиною 13286

мм, нижньої головки і верхнього соплового блоку з відстанню між їхніми торцями 2600 мм [26].

Верхня частина стовбура включає три концентрично розташовані суцільнотягнуті сталеві труби: внутрішню 1 ( $\text{Ø } 133 \times 7$  мм), проміжну 2 ( $\text{Ø } 169 \times 5$  мм) і зовнішню 3 ( $\text{Ø } 219 \times 7$  мм), з'єднаних з патрубками 4, 5, 6 підведення до них основного потоку кисню, охолоджувальної води і додаткового потоку кисню відповідно. У середній частині до верхнього стовбура фурми додана зовнішня труба 7 ( $\text{Ø } 273 \times 8$  мм) відведення охолоджувальної води через патрубок 8. У верхній частині стовбура труби 1 і 2 з рівномірним зазором між ними закріплені жорстко за допомогою зварювання, а кріплення труб 2 і 3, 3 і 7 здійснено за допомогою розбірних сальникових компенсаторів 9 і 10 відповідно.

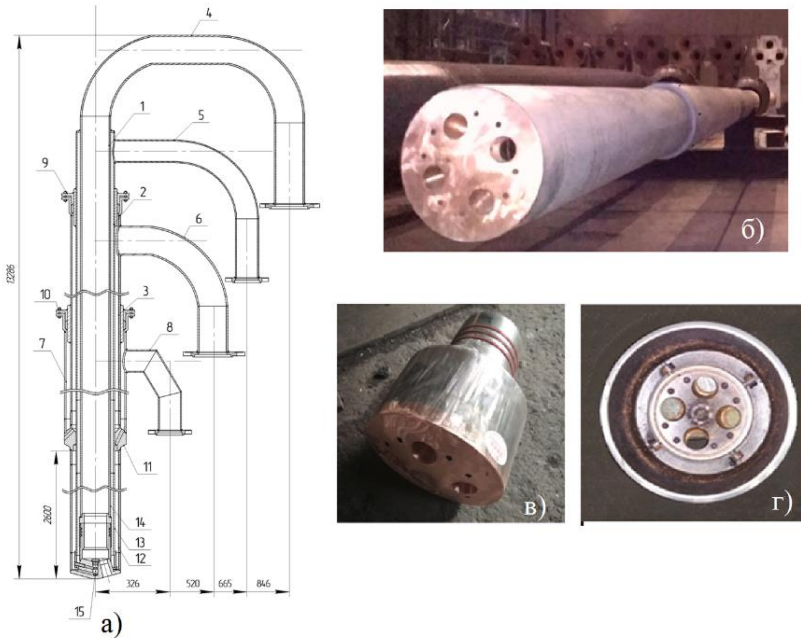


Рисунок 20 – Загальний вигляд запропонованої до впровадження конструкції двоярусної кисневої фурми (а,б) з двоярусною нижньою головою (в,г): 1,2,3- внутрішня, проміжна і зовнішня труби верхньої частини стовбура фурми; 4,5,6- патрубки підведення основного потоку кисню, охолоджувальної води і додаткового потоку кисню; 7,8- зовнішня труба і патрубок відведення охолоджувальної води; 9,10- сальникові компенсатори; 11- верхній сопловий блок; 12,13,14- зовнішня, проміжна і внутрішня труби нижньої частини стовбура фурми; 15- нижня двоярусна головка; 16,17- сопла Лавалю і циліндричні

Верхній сопловий блок 11 призначений для подачі додаткового потоку кисню з формуванням своєрідної завіси із звукових струменів для допалювання CO до CO<sub>2</sub> відхідних газів із запобіганням локального зносу футеровки у верхніх горизонтах робочого простору конвертера та інтенсивного заростання металошлаковою охолоддю горловини останнього.

Нижня частина стовбура фурми довжиною 2600 мм складається із зовнішньої труби 12 (Ø 219×7 мм), проміжної 13 (Ø 169×5 мм) і внутрішньої 14 (Ø 133×7 мм). Нижня двоядна головка (15) із круговим розташуванням сопел Лаваля і циліндричних, яка забезпечує, за рахунок підведення до неї по трубі 14 основного потоку кисню, формування над-і звукових струменів, що впливають безпосередньо на металеву, шлакову і газову фази конвертерної ванни в межах утворюваної реакційної зони.

Основною деталлю конструкції верхнього соплового блоку двоярусної фурми є виготовлений з мідної кованої заготівки суцільноточений сопловий блок (рис. 21, 22), що містить вісім циліндричних сопел діаметром 13 мм, розташованих під кутом 30 град. до вертикальної осі фурми, для подачі в порожнину конвертера додаткового кисню, а також вісім щілинних проточок для проходу охолоджувальної води між соплами. Вихідні перетини сопел розташовані на бічній поверхні суцільноточеного блоку.

Відмінною особливістю запропонованої конструкції двоярдної нижньої головки для двоярусної фурми є застосування суцільноточеного мідного соплового блоку (рис. 23), у якому під кутом 12° до вертикалі розміщаються по колу у внутрішньому ряді чотири сопла Лаваля критичного діаметру 41 мм, а в зовнішньому ряді під кутом нахилу 30° вісім циліндричних сопел діаметром 9 мм, що формують відповідно основні надзвукові і додаткові звукові кисневі струмені. У блоці між соплами виконано чотири радіальні нижні (3), одна вертикальна (4) і чотири верхніх (5) циліндричних проточок для проходу охолоджувальної води. У зібраному вигляді головка (рис. 24) включає з'єднані зварюванням з мідним сопловим блоком 1 сталеві штуцер із циліндричними пазами (5) для розміщення гумових ущільнюючих кілець і вставку (6) із труби Ø219×7 мм. Розсікач (3) потоку води, який надходить, закріплюється на сопловому блоці 1 з допомогою відвідних трубок 2, при цьому необхідний зазор для проходу води під торцем розсікача забезпечується трьома рівномірно привареними до нього обмежниками 7. Пробка 8 закриває зверху вертикальну проточку 9 без якої неможливо було б конструктивно виконати водяне охолодження міжсоплового простору в суцільноточеному мідному блоці 1.

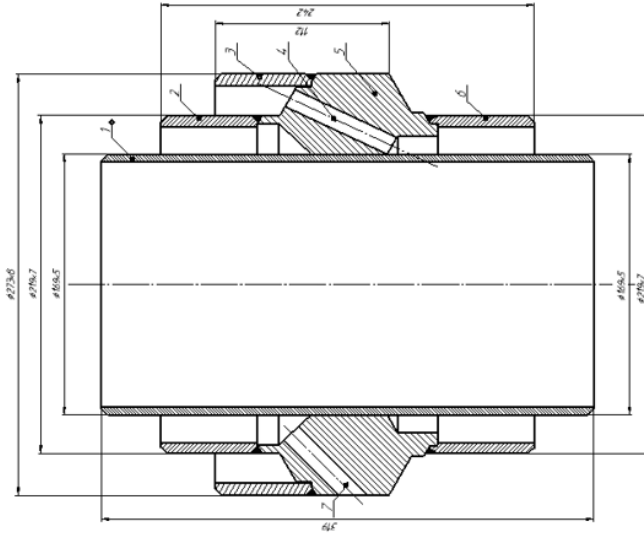


Рисунок 22 – Верхній сопловий блок у зібраному вигляді: 1 - вставка труби  $\varnothing 169 \times 5$  мм; 2, 6 - вставки труби  $\varnothing 219 \times 7$  мм; 3 - вставка труби  $\varnothing 273 \times 8$  мм; 4 - щільні проточки; 5 - мідний суцільноточений сопловий блок

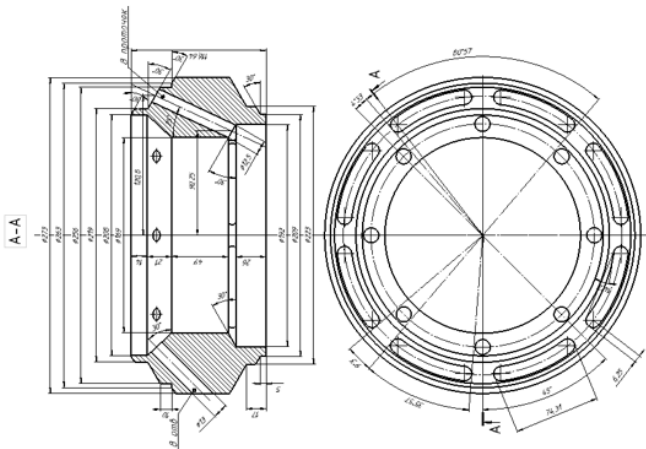


Рисунок 21 – Верхній мідний суцільноточений сопловий блок



Приєднання нижньої дворядної головки (див.рис. 24) до фурми здійснюється (рис. 25) з використанням прогресивної системи зниження механічного напруження в головці з компенсацією температурного подовження зовнішньої труби фурми. Забезпечується це за допомогою кільцевого ковзного ущільнення з гумовими кільцями 3 на штуцері 2 головки, яка входить у муфту 1, з'єднану із трубою  $\text{Ø}219 \times 7$  мм підведення основного потоку кисню.

Додаткова компенсація температурних напруг у двоярусній фурмі забезпечується за допомогою телескопічного рознімного 4 (рис. 24) і сальникових 9, 10 компенсаторів (рис. 20, а).

Запропонована конструкція двоярусної фурми працює в такий спосіб (рис. 20, а). Основний кисень із загальною витратою  $360 \text{ м}^3/\text{хв.}$  надходить від патрубка 4 по трубах 1, 14 до дворядної нижньої головки (рис. 23) і з витратою  $330$  і  $30 \text{ м}^3/\text{хв.}$  через чотири сопла Лавалля 1 і вісім циліндричних сопел 2 відповідно вдувається в порожнину конвертера з формуванням надзвукових і звукових струменів. При цьому забезпечується продувка із глибоким проникненням надзвукових кисневих струменів у металевий розплав з допалюванням  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$  звуковими струменями у верхній частині реакційної зони при робочій висоті розташування фурми, інтенсивне перемішування і зневуглицювання ванни із запобіганням «згортання» шлаків і утворенням металошлакової охолоді над головкою фурми..

Додатковий кисень із витратою  $30 \text{ м}^3/\text{хв.}$  подається від патрубка 6 по трубі 3 до верхнього соплового блоку 11 (рис. 20, а) і через вісім циліндричних сопел вдувається в порожнину конвертера, що приводить до формування другої завіси зі звукових кисневих струменів на шляху зустрічного потоку відхідних конвертерних газів, що несе у суспензійному стані дрібнодисперсний пил, краплі металу і шлаку. Тим самим гарантовано знижується інтенсивність покриття металошлаковою охолоддою стовбура фурми і горловини конвертера. При цьому допалювання монооксиду вуглецю відхідних газів у цьому випадку відбувається без агресивного високотемпературного впливу утворених факелів допалювання на футерівку верхньої частини конвертера. Охолоджувальна вода з витратою від  $100$  до  $120 \text{ м}^3/\text{год.}$  подається (рис. 20, а) від патрубка 5 у кільцевому зазорі між трубами 1, 2 і 13, 14 до нижньої головки, проходить у кільцевому зазорі (див.рис. 24) між штуцером 4 і розсікачем 3. При цьому здійснюється подвійне розділення основного потоку води: один потік обмиває периферійну поверхню соплового блоку 1 із проходженням під торцем розсікача 3 у кільцевий зазор між ним і зовнішньою вставкою 6 головки, а потім між трубами 12 і 13 нижньої частини стовбура фурми (рис. 20, а); другий потік по чотирьох нижніх радіальних міжсоплових проточках

спрямовується в центр блоку, а потім по вертикальній і через чотири верхні радіальні проточки із вставленими відвідними трубками 2 (рис. 24) спрямовується в тракт відводу охолоджувальної води між розсікачем і зовнішньою трубою. Надалі (рис. 20) вода в зазорі між трубами 12 і 13 нижньої частини стовбура фурми надходить до верхнього соплового блоку 11 (рис. 20) і проходить через вісім щілинних проточок останнього в кільцевий простір між трубами 3 і 7 середньої частини стовбура фурми і видаляється з фурми через патрубок 8.

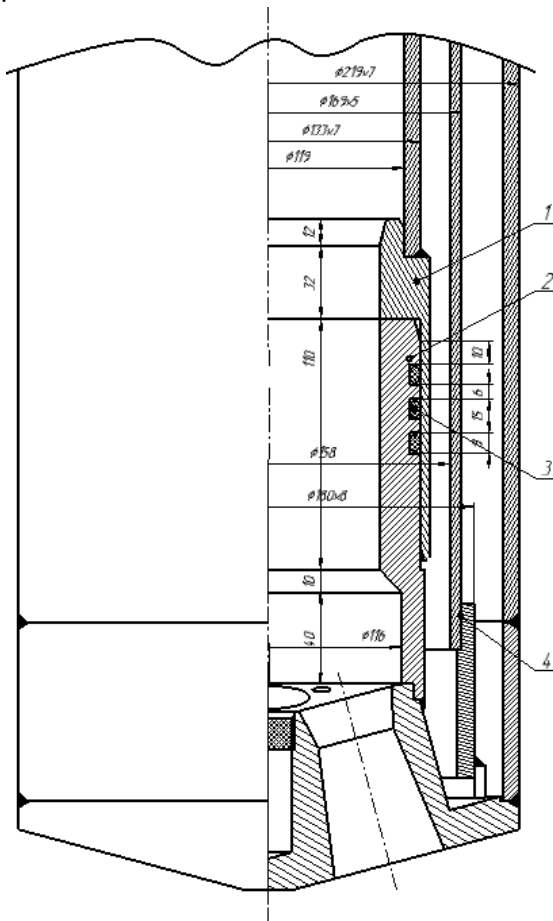


Рисунок 25 – Дворядна головка у приєднаному до стовбура двоярусної фурми стані: 1- муфта; 2- штуцер; 3- кільцеві ущільнення з гумовими кільцями; 4- телескопічне з'єднання

Приєднання дворядної головки (рис. 25) до фурми здійснюється шляхом попереднього встановлення трьох гумових кілець у пази штуцера 2 і з'єднання штуцера і муфти 1 із забезпеченням надійної герметичності шляхом нанесення рідкого герметика на зовнішню поверхню штуцера. При цьому розсікач телескопічно охоплює розділювальну трубу фурми  $\varnothing 169 \times 5$  мм, формуючи спрямоване підведення охолоджувальної води до головки. У процесі монтажу проводиться тільки один зварний кільцевий шов при з'єднанні зовнішньої труби фурми і вставки головки.

Особливості запропонованої технології дуттьового і шлакового режимів ведення плавок (рис. 26) при комбінованій продувці конвертерної ванни [26] киснем зверху через двоярусну фурму (рис. 20-25) і нейтральним перемішуючим газом ( $N_2$ ,  $A_r$ ) через днище наступні. Верхню продувку конвертерної ванни ведуть через двоярусну фурму (рис. 26, а), оснащену модернізованою системою підведення до неї двох незалежно регульованих потоків основного і додаткового кисню з можливістю їх заміни на азот у необхідні періоди плавки (рис. 26, а). Донну подачу нейтральних газів ( $N_2$ ,  $A_r$ ) здійснюють з витратою 12-16  $m^3/xv.$  через 8 фурм типу «труба в трубі» з вогнетривкою заглушкою в центральному каналі, розміщених в днище конвертера по двох колах. У період завалювання брукхту і заливання чавуну через днище подається азот з витратою 8  $m^3/xv.$

Вапно в кількості від 20 до 30 % від загальної витрати (від 4 до 5 т) присаджується на завантажений металевий брукхт до заливання чавуну.

Включення основного  $Q_{O_2}^{осн}$  і  $Q_{O_2}^{дод}$  додаткового кисню на продувку проводиться при введенні фурми в конвертер у момент розташування верхнього соплового блоку на рівні горловини. Фурма опускається до заданого положення від 3,0 до 2,5 м, характерного для стійкого «запалювання» плавки при сталих витратах основного і додаткового кисню. При використанні підготовленого металевого брукхту початок продувки плавки протягом від 1 до 2 хв. після «запалювання» ведеться з положенням двоярусної фурми над рівнем спокійної ванни від 3,0 до 2,5 м при витраті основного  $Q_{O_2}^{осн}$  кисню 400  $m^3/xv.$  і додаткового  $Q_{O_2}^{дод}$  – 20  $m^3/xv.$  (рис. 26, б). Надалі, протягом від 0,5 до 1,0 хв., щоб уникнути ушкодження дворядної головки шляхом «посадки» на виступаючий над поверхнею ванни брукхт проводиться плавне опускання фурми до початкової  $H_{\phi}^{поч}$  для періоду шлакоутворення висоти 1,7-1,6 м і при вищенаведених параметрах продувка ведеться до закінчення періоду шлакоутворення з повним окисленням кремнію, переважної частини марганцю і фосфору.

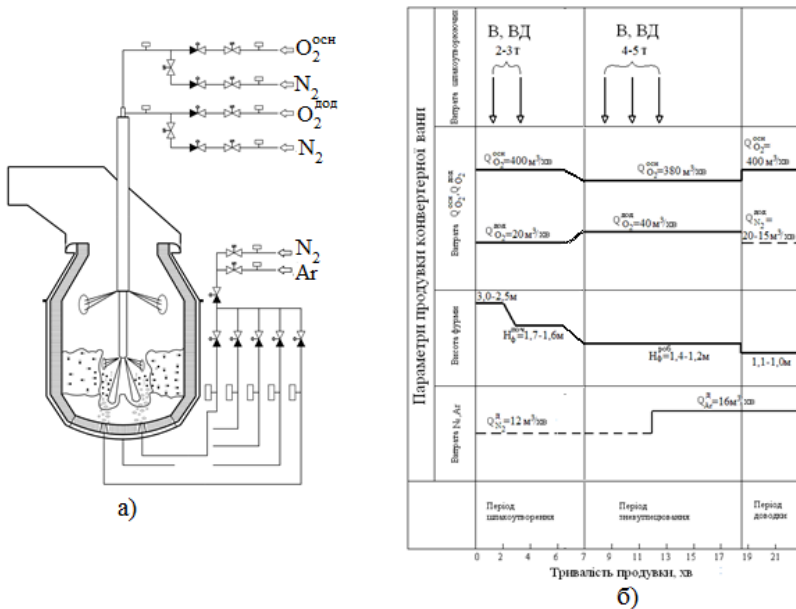


Рисунок 26 – Загальний вигляд комбінованої продувки ванни 160-т конвертерів ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» (а), дуттьовий і шлаковий режими плавки (б)

Для прискореного наведення первинного окислювального шлаку (18-23 % FeO, 3-5 % MgO, CaO/SiO<sub>2</sub>=1,9-2,1), який має необхідну дефосфоруючу здатність, здійснюється присадка звичайного вапна (В) і доломітизованого вапна (ВД) у співвідношенні 3:1 без добавок плавикового шпату з першої по сьому хвилини продувки трьохчотирма рівними порціями загальною вагою 2–3 т. Температурний хід процесу регулюється добавкою від 0,2 до 0,4 т залізорудних окатишів.

Після витрати 2500- 2800 м<sup>3</sup> кисню на протязі 6-7 хв. продувки з наявністю спіненої шлакометалевої емульсії перший період продувки (період шлакоутворення) закінчується з організацією видалення кремнію до сліду, фосфору до 0,020-0,025% і вуглецю до 3,3-3,5% і температури металу не більше 1450 С.

У другий період продувки (період інтенсивного зневуглицювання) робочу висоту ( $H_f^{роб}$ ) розташування фурми над рівнем спокійної ванни підтримують у межах 1,4-1,2 м, а витрати основного і додаткового кисню на рівні 380 і 40 м<sup>3</sup>/хв. відповідно при донній подачі азоту з інтенсивністю 12 м<sup>3</sup>/хв. Здійснюється наведення шлаку основністю 3,5-4,0 та вмістом 10-12% MgO шляхом присадки порцій звичайного (1,0 т)

і доломітизованого (1,0 т) вапна.

По досягненню витрат на продувку від 4000 до 4500 м<sup>3</sup> кисню проводиться заміна азоту, що вдувається через днище, на аргон з витратою 16 м<sup>3</sup>/хв., подача якого зберігається до моменту повалення конвертера.

У третій період продувки (період доводки) аби уникнути перегріву і переокислення металу при виплавці залізовуглецевого напівпродукту  $[C] \leq 0,12\%$  в останні 2-3 хв. продувки двоярусна фурма опускається на висоту 1,1- 1,0 м, витрати основного кисню збільшуються до 400 м<sup>3</sup>/хв., а додатковий кисень замінюється на азот  $Q_{N_2}^{дод}$  з витратою 20 -15 м<sup>3</sup>/хв., що дозволяє запобігти запечатування верхніх циліндричних сопел двоярусної фури бризками металу і шлаку.

Момент закінчення продувки визначається за кількістю витраченого кисню, показниками газоаналізатора і приладу, що реєструє вихід димових газів, за рекомендаціями АСУ плавкою, а також орієнтуючись на попередні плавки.

З початком випуску залізовуглецевого напівпродукту з конвертера через днище подається азот з інтенсивністю 5 м<sup>3</sup>/хв. По закінченню випуску металу, з переходом на роздувку кінцевого шлаку з нанесенням шлакового гарнісажу на футерівку, щоб уникнути запечатування донних фурм високомагнетизальним шлаком витрати азоту становлять 18 м<sup>3</sup>/хв., а після ошлакування футерівки знижуються до 8 м<sup>3</sup>/хв.

Необхідно відзначити, що запропонована до впровадження в умовах киснево-конвертерного цеха ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» конструкція двоярусної кисневої фури (рис. 20) і режим комбінованої продувки ванни 160-т конвертера (рис. 26) з позитивним результатом вже випробувані в дослідно-промисловому масштабі на 120-т конвертері в одному із закордонних конвертерних цехів [27].

## **Висновки**

Проведений аналіз стану технологій та дуттьових пристроїв для реалізації конвертерної плавки в умовах ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» зі збільшеною переробкою металевого брухту свідчить про те, що вирішення існуючих проблем потребує теоретичних та експериментальних пошуків у нових напрямках з метою створення енергоефективних багатоцільових конструкцій паливно-кисневих і кисневих фурм та технологій конвертерної плавки з попереднім нагрівом металевого брухту та продувки конвертерної ванни з допалюванням відхідних газів. На основі отриманих результатів високотемпературного моделювання нагріву металевого брухту в порожнині конвертера паливно-кисневою фурию з використанням в якості палива природного газу і вугільного пилу, а також верхньої продувки конвертерної ванни через двоярусну фуру з дворядною

головкою надзвуковими кисневими і звуковими кисневими і азотними струменями з допалованням відхідних газів для умов роботи 160-т конвертерів ПАТ «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВИЙ РІГ» розроблені та запропоновані до впровадження в післявоєнний період:

- нова конструкція вертикальної обертової паливно-кисневої фурми для нагріву брухту в порожнині конвертера з використанням пиловугільного палива або природного газу, що обладнана головкою з 4-ма кисневими соплами Лаваля з розміщенням в кожному із них циліндричних паливних сопел та технологія нагріву брухту з подаванням ПВП або ПГ в кільцевій кисневій оболонці;

- нова конструкція багатоцільової двоярусної кисневої фурми, що містить дворядну нижню головку (4 сопла Лаваля і 8 циліндричних) і верхній сопловий блок (8 циліндричних сопел), для комбінованої продувки конвертерної ванни з допалованням відхідних газів і нанесення шлакового гарнісажу на футерівку агрегату та енергоефективні режими ведення конвертерної плавки з її використанням.

#### **Перелік посилань**

1. Voraberger B., Wimmer G., Dieguez U. Wimmer S. E., Pastucha K., Fleischanderl A. Green LD (BOF) Steelmaking – Reduced CO<sub>2</sub> Emissions via Increased Scrap Rate. *Metals*. 2022. № 12. P. 466-483. <https://doi.org/10.3390/met12030466>
2. Шнееров Я. А., Афонин С. З., Лепорский С. В., Вяткин Ю. Ф., Смоктий В. В., Старов Р. В., Адаменко Л.П. Снижение расхода чугуна при производстве стали в действующих конвертерных цехах. *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 1987. № 21. С. 2-19.
3. Горобец В. Г., Белокуров Э. С., Павлов Н. И., Береза В. В. Анализ технико-экономических показателей плавки с повышенным расходом лома. *Технология выплавки конвертерной и мартеновской стали (Тематический сборник научных трудов)*. М. : Металлургия. 1985. С. 28 – 31.
4. Белокуров Э. С., Горобец В. Г., Кобеза И. И., Береза В. В. А.с. 1167209 СССР, МКИ С21 С 5/48. Газокислородная фурма для нагрева лома и продувки металла в конвертере. № 3506043/22-02, заявл. 22.10.82; опубл. 15.07.85. Бюл. № 26.
5. Кобеза И. И. Энергосберегающие методы интенсификации сталеплавильных процессов. М. : Металлургия. 1988. 167 с.
6. Баптизманский В. И., Куликов В. О., Китаев А. Т., Никифоров Б. В., Бойченко Б. М., Козин Г. Н., Качур Б. К., Душа В. М., Хмиров В. И. Работа 130-т конвертеров, оборудованных двухъярусными фурмами. *Экспресс-информация ЦНИИ и ТЭИ ЧМ*. 1974. серия 6. вып.3. С. 1–14.
7. Чернятевич А. Г., Сигарев Е. Н., Чернятевич И. В. Новые разработки конструкций кислородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». *Теория и практика металлургии*. 2010. №1. С. 31-38.

8. Чернятевич А. Г., Сигарев Е. Н., Чернятевич И. В., Чубин К. И., Величко Е. А., Мантяженко Д. Ю. Разработка конструкции двухъярусной фурмы и режима продувки ванны 160-т конвертеров ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с ее использованием. *Теория и практика металлургии*. 2012. №5-6. С. 76- 85.
9. Чернятевич А. Г., Сігарьов Є. М., Сущенко А. В., Коцур С. Д., Коваленко О. Г., Димченко Є. М., Чубін К. І., Грищенко А. С. Патент на винахід 106676 Україна, МПК С21С 5/48. Двоярусна киснева фурма. № 2013 02425; Заявл. 25.09.2014; Опубл. 25.09.2014. Бюл. №18.
10. Чернятевич А. Г., Вакульчук В. В., Сигарев Е. Н., Чубин К. И., Чернятевич И. В., Мантяженко Д. Ю., Клименко А. Г., Стриченко С. М. Повышение эффективности верхней продувки ванны 160-т конвертеров с использованием двухъярусной кислородной фурмы. *Сталь*. 2017. № 9. С. 9-13.
11. Низяев Г. И., Бельман Л. М., Лукьянов Ж. В., Задов Е. Л. Проект реконструкции конвертерного цеха № 2 «Криворожстали» для внедрения факельного торкретирования конвертеров. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1986. № 2. С. 13-14.
12. Кукурузняк И. С., Врублевская И. С., Порхун В. Г., Петрунин А. П. Факельное торкретирование футеровки 160-т конвертеров вертикальным способом. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1989. № 3. С. 15-17.
13. Чернятевич А. Г., Сигарев Е. Н., Чернятевич И. В., Чубина Е. А., Чубин К. И. Новые технологические режимы нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. *Теория и практика металлургии*. 2011. №5-6(2). С. 19-27.
14. Чернятевич А. Г., Сигарев Е. Н., Протопопов Е. В., Шеремет В. А., Чернятевич И. В., Чубин К. И. Освоение технологии нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера путем раздувки шлака перемещающимися газопорошковыми струями. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2011. №2. С. 15-20.
15. Чернятевич А. Г., Сигарев Е. Н., Чернятевич И. В., Чубина Е. А., Чубин К. И. Этапы совершенствования конструкций гарнисажных фурм и технологий ошлакования футеровки 160-т конвертеров ПАО «АРСЕЛОРМИТТАЛ КРИВОЙ РОГ» ОАО «Черметинформация». *Бюллетень «Черная металлургия»*. 2012. №6. С. 55-64.
16. Чернятевич А. Г., Сігарьов Є. М., Чернятевич І. В., Чубін К. І., Чубіна О. А. Патент на винахід 83445 Україна, МПК С21С 5/44, F27D 1/16. Спосіб ремонту футерівки конвертера та торкрет-фурма для його здійснення № 200705316; Заявл. 15.05.2007; Опубл. 10.07.2008; Бюл. № 13.
17. Чернятевич А. Г., Сігарьов Є. М., Чубін К. І., Чубіна О. А. Патент на винахід 93161 Україна, МПК С21С 5/44. Спосіб ремонту футерівки конвертера та торкрет-фурма для його здійснення. № 201000032; Заявл. 11.01.2010; Опубл. 10.01.2011; Бюл. № 1.
18. Чернятевич А. Г., Сігарьов Є. М., Чубін К. І., Чубіна О. А. Патент на винахід 97754 Україна, МПК С21С 5/44, F27D 1/16. Спосіб ремонту футерівки конвертера та гарнісажна фурма для його здійснення № 201100480; Заявл. 17.01.2011; Опубл. 12.03.2012; Бюл. № 5.
19. Нечепоренко В. А., Омесь Н. М., Боровиков Г. Ф. Технология

ошлакования футеровки кислородных конвертеров. *Теория и практика металлургии*. 1999. № 3. С. 22,23.

20. Чернятевич А. Г., Сигарев Е. Н., Чубина Е. А., Чернятевич И. В., Демиденко М. Г. Гидрогазодинамические особенности новых технологий нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. № 7. С. 153-157.

21. Чернятевич А. Г., Похвалитий А. А., Сигарьов Є. М., Чубіна О. А., Кодрашенко Д. С. Використання пиловугільного 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. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.11>

22. Арсеев А.В. Сжигание природного газа, М.: Металлургиздат, 1963. 408 с.

23. Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Юшкевич П. О. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы. *Металл и литье Украины*. 2017. № 6-7. С. 17-21.

24. Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Сигарев Е. Н., Чубин К. И., Похвалитий А. А. Особенности продувки конвертерной ванны с применением модернизированных двухъярусных кислородных фурм. *Сталь*. 2021. №8. С. 8-16.

25. Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Сигарьов Є. М., Меркулов О. Є., Башмаков О. М., Вакульчук В. В., Похвалитий А. А., Чубін К. І. Патент на винахід 129644 Україна, МПК С21С 5/48. Багатосоплова паливно-киснева фурма для попереднього нагрівання металевого брухту в конвертері № 2023 05906; Заявл. 07.12.2023; Опубл. 18.06.2025; Бюл. №25.

26. Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Юшкевич П. О., Вакульчук В. В. Питання теорії і практики підвищення ефективності комбінованої продувки конвертерної ванни. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 1-2. С. 83-95.

27. Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Меркулов А. Е., Башмаков А. М., Юшкевич П. О. Разработка многоцелевых конструкций кислородных фурм и способов комбинированной продувки конвертерной ванны. *Сталь*. 2021. № 9. С. 14-21.

## References

1. Voraberger B., Wimmer G., Dieguez U. Wimmer S.E., Pastucha K., & Fleischanderl A. (2022). Green LD (BOF) Steelmaking – Reduced CO<sub>2</sub> Emissions via Increased Scrap Rate. *Metals*, (12), 466-483. <https://doi.org/10.3390/met12030466>
2. Shneerov, Ya. A., Afonin, S. Z., Leporsky, S. V., Vyatkin, Yu. F., Smoktiy, V. V., Starov, R. V., & Adamenko, L. P. (1987). Snizhenie rashoda chuguna pri proizvodstve stali v deistvuushchih konverternih tsehah [Reduction of pig iron consumption in steel production in operating converter shops]. *Ferrous metallurgy: Bulletin of the Chermetinformatiya Institute*, 21, 2-19. [in Russian]
3. Gorobets, V. G., Belokurov, E. S., Pavlov, N. I., & Bereza, V. V. (1985). Analiz tehniko-ekonomicheskikh pokazatelei plavki s povyshennim rashodom loma

[Analysis of the technical and economic indicators of smelting with increased scrap consumption]. *Technology of smelting converter and open-hearth steel (Thematic collection of scientific papers)*. Moscow: Metallurgy, 28 – 31. [in Russian]

4. Belokurov, E. S., Gorobets, V. G., Kobeza, I. I., & Bereza, V. V. (1985). Copyright certificate of USSR 1167209. Gas-oxygen lance for heating scrap and blowing metal in the converter. Bul. 26.

5. Kobeza, I. I. (1988). Energosberigaushie metody intensivifikatsii staleplavilnykh protsessov. [Energy-saving methods for intensifying steelmaking processes]. Moscow: Metallurgy. [in Russian]

6. Baptizmanskii, V. I., Kulikov, V. O., Kitaev, A. T., Nikiforov, B. V., Boychenko, B. M., Kozin, G. N., Kachur, B. K., Dusha, V. M., & Khmirov, V. I. (1974). Rabota 130-t konverterov, oborudovannykh dvuhjarsunymi furnami [Operation of 130-ton converters equipped with double-tier tuyeres]. *Express information from the Central Research Institute*, 6, 3, 1–14. [in Russian]

7. Cherniatevych, A. G., Sigarev, E. N., & Cherniatevych, I. V. (2010). Novye razrabotki konstruktssii kislородnykh furn i sposobov produvki vannы 160-t konverterov OAO “ArcelorMittal Kryvvy Rig” [New developments in oxygen lances and bath blowing methods for 160-ton converters at JSC “ArcelorMittal Kryvvy Rih”]. *Theory and Practice of Metallurgy*, 1, 31-38. [in Russian]

8. Cherniatevych, A. G., Sigarev, Ye. N., Cherniatevych, I. V., Chubin, K. I., Velichko, E. A., & Mantyazhenko D. Yu. (2012). Razrabotka konstruktssii dvuhjarsunoi furnы i rezhima produvki vannы 160-t konverterov PAO “ArcelorMittal Kryvvy Rig” s ee ispolzovaniem. [Development of a two-tier lance design and a bath blowdown system for 160-ton converters at PJSC “ArcelorMittal Kryvvy Rih” using it]. *Theory and Practice of Metallurgy*, 5-6, 76- 85. [in Russian]

9. Cherniatevych, A. G., Sigariov, E. M., Sushchenko, A. V., Kotsur, S. D., Kovalenko, O. G., Dimchenko, E. M., Chubin, K. I., & Gritsenko, A. S. (2014). Patent of Ukraine No 106676. Two-tier lance. Bul. 18.

10. Cherniatevych, A. G., Vakulchuk, V. V., Sigarev, Ye. N., Chubin, K. I., Cherniatevych, I. V., Mantyazhenko, D. Yu., Klimenko, A. G., & Strichenko, S. M. (2017). Povyshenie effektivnosti verhnei produvki vannы 160-t konverterov s ispolzovaniem dvuhjarsunoi kislородnoi furnы. [Improving the efficiency of top blowing of the bath of 160-ton converters using a two-tier oxygen lance]. *Steel*, 9, 9-13. [in Russian]

11. Nizyaev, G. I., Belman, L. M., Lukyanov, Zh. V., & Zadov, E. L. (1986). Proekt rekonstruktssii konverternogo tseha #2 “Kryvorozhstali” dlia vnedrenia fakelnogo torkretirovaniа konverterov. [Reconstruction project for converter shop No. 2 at “Kryvorozhstal” to implement torch gunning of converters]. *Metallurgical and mining industry*, 2, 13-14. [in Russian]

12. Kukuruзnyak, I. S., Vrublevskaya, I. S., Porkhun, V. G., & Petrunin, A. P. (1989). Fakelnoe torkretirovanie futerovki 160-t konverterov vertikalnym sposobom. [Vertical torch shotcreting of 160-ton converter linings]. *Metallurgical and mining industry*, 3, 15-17. [in Russian]

13. Cherniatevych, A. G., Sigarev, Ye. N., Cherniatevych, I. V., Chubina, Ye. A., & Chubin, K. I. (2011). Novye tehnologicheskie rezhimy nanesenia shlakovogo garnisazha na futerovku konverterra. [New technological methods for applying slag coating to converter linings]. *Theory and Practice of Metallurgy*, 5-6(2), 19-27. [in

Russian]

14. Cherniatevych, A. G., Sigarev, Ye. N., Protopopov, Ye. V., Sheremet, V. A., Cherniatevych, I. V., & Chubin, K. I. (2011). Osvoenie tehnologii nanesenia shlakovogo garnisazha na futerovku konvertera putem razduvki shlaka peremeshchaushchimisia gazoporoshkovymi strujami. [Mastering the technology of applying a slag coating to a converter lining by blowing the slag with moving gas-powder jets]. *Proceedings of the Universities. Ferrous Metallurgy*, 2, 15-20. [in Russian]

15. Cherniatevych, A. G., Sigarev, Ye. N., Cherniatevych, I. V., Chubina, Ye. A., & Chubin, K. I. (2012). Etapy sovershenstvovaniia konstruktsii garnisazhnykh furn I tehnologii oshlakovaniia futerovki 160-t konverterov PAO "ArcelorMittal Kryvyi Pih". [Stages of improving the design of ganning lances and lining slag technologies for 160-ton converters at PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Pih"]. *Chermetinformatsiya. Bulletin "Ferrous Metallurgy"*, 6, 55-64. [in Russian]

16. Cherniatevych, A. G., Sigariiov, Ye. M., Cherniatevych, I. V., Chubin, K. I., & Chubina, O. A. (2007). Patent of Ukraine No 83445. A method for repairing a converter lining and a shotcrete lance. Bul.13.

17. Cherniatevych, A. G., Sigariiov, Ye. M., Chubin, K. I., & Chubina, O. A. (2010). Patent of Ukraine No 93161. Bul. 1.

18. Cherniatevych, A. G., Sigariiov, Ye. M., Chubin, K. I., & Chubina, O. A. (2011). Patent of Ukraine No 97754 Ukraine. Bul. 5.

19. Necheporenko, V. A., Omes, N. M., & Borovikov, G. F. (1999). Tehnologია oshlakovaniia futerovki kislородnykh konverterov. [Slag removal technology for oxygen converter linings]. *Theory and practice of metallurgy*, 3, 22-23. [in Russian]

20. Cherniatevich, A. G., Sigarev, Ye. N., Chubina, Ye. A., Cherniatevych, I. V., & Demidenko, M. G. (2006). Gidrodinamicheskie osobennosti novykh tehnologii nanesenia shlakovogo garnisazha na futerovku konvertera. [Hydrogasdynamic features of new technologies for applying slag coating to converter linings]. *Metallurgical and Mining Industry*, 7, 153-157. [in Russian]

21. Cherniatevych, A. G., Pokhvalityi, A. A., Sigariiov, Ye. M., Chubina, O. A., & Kodrashenkov, D. S. (2024). Vykorystannia pylovugilnogo palyva dlia poperedniogo pidigrivu metalobruhtu. [Use of pulverized coal fuel for preheating scrap metal]. *Collection of scientific papers of Dnipro State Technical University (thematic issue "To the 95th anniversary of the Department of Metallurgy of Professor V.I. Loginov of Dnipro State Technical University")*. Kamianske: DSTU, 123-131. <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.11>[in Ukrainian]

22. Arseev, A. V. (1963). Szhiganie prirodnogo gaza. [Combustion of natural gas]. Moscow: Metallurgy Publishing House. [in Russian]

23. Cherniatevych, A. G., Molchanov, L. S., & Yushkevich, P. O. (2017). Vysokotemperaturnoe modelirovaniie produvki konverternoi vannы s primeneniem trehjarusnoi furnы. [High-temperature modeling of converter bath blowing using a three-tier lance]. *Metal and Casting of Ukraine*, 6-7, 17-21. [in Russian]

24. Cherniatevych, A. G., Molchanov, L. S., Sigarev, Ye. N., Chubin, K. I., & Pokhvalityi, A. A. (2021). Osobennosti produvki konverternoi vannы s primeneniem modernizirovannykh dvuhjarusnykh kislородnykh furn. [ Features of converter bath blowing using modernized two-tier oxygen lances]. *Steel*, 8, 8-16. [in Russian]

25. Cherniatevych, A. G., Molchanov, L. S., Sigaryov, Ye. M., Merkulov, O.

Ye., Bashmakov, O. M., Vakulchuk, V. V., Pokhvalityy, A. A., & Chubin, K. I. (2025). Patent of Ukraine No 129644. Bul. 25.

26. Cherniatevych, A. G., Molchanov, L. S., Yushkevich, P. O., & Vakulchuk, V. V. (2018). Putannya teorii i praktyky pidvyshchennia efektyvnosti kombinovanoi produvki konverternoi vanny. [Questions of theory and practice of increasing the efficiency of combined purging of a converter bath]. *Theory and practice of metallurg.* 1-2, 83-95. [in Ukrainian]

27. Cherniatevych, A. G., Molchanov, L. S., Merkulov, A. Ye., Bashmakov, A. M., & Yushkevich, P. O. (2021). Razrabotka mnogotselevykh konstruksii kislorodnykh furn i sposobov kombinirovannoi vanny. [Development of multi-purpose oxygen lances and combined converter bath blowing methods]. *Steel*, 9, 14-21. [in Russian]

**A. H. Cherniatevych**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-4552-4997

**L. S. Molchanov**<sup>1,\*</sup>, Ph. D., Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6139-5956

<sup>1</sup> *Iron and steel institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine*

\* *Corresponding author: ferrosplav@ukr.net*

### **DIRECTIONS FOR IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF CONVERTER MELTING IN THE CONDITIONS OF PJSC "ARCELORMITTAL KRYVYI RIG"**

**Abstract.** The latest forecasts indicate that in the next 20-30 years blast furnace and oxygen converter production will remain the dominant link in obtaining steel along the technological route "blast furnace – oxygen converter" due to economic profitability with a heat coefficient of up to 90 % and more. Today the most relevant direction for improving the process of smelting oxygen converter steel in Ukraine is to increase the share of scrap being processed above 25%. It is in the conditions of technologies common in world practice of preheating metal scrap in the converter cavity and combined blowing with top oxygen supply through a conventional multi-nozzle lance and neutral mixing gas (nitrogen, argon) through the bottom. The aim of the research is to develop and propose for implementation in the post-war period in the converter shop of PJSC "ARCELORMITTAL KRYVI RIG" on 160-t converters the follow: new design of a fuel-oxygen lance and an energy-efficient method for preheating metal scrap in the converter cavity; a multi-purpose two-tier oxygen lance, which provides the functions of energy-efficient combined blowing of the converter bath with post combustion 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 an increased scrap metal consumption, as well as applying slag garniture to the converter lining in order to extend the converter's operating campaign. Using the obtained data of high-temperature modeling of metal scrap heating in the converter cavity and combined blowing of the converter bath, the following new energy-efficient lance devices and methods of converter melting with an increased proportion of scrap in the metal charge were developed and proposed for implementation in the post-war period: a rotating 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 4 Laval oxygen nozzles with cylindrical fuel nozzles located in each of them 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 top supersonic and sonic oxygen and nitrogen jets supply with CO to CO<sub>2</sub> post combustion of the exhaust gases and neutral gas with mixing gas (nitrogen, argon) through the bottom using a new design of a two-tier lance, which contains a two-row lower head (4 Laval nozzles and 8 cylindrical) and an upper nozzle block with 8 cylindrical nozzles.

**Key words:** oxygen converter, fuel-oxygen lance, heating of metal scrap, two-tier oxygen lance, combined blowing of the converter bath, post combustion of exhaust gases, energy efficiency of smelting.

**For citation:** Cherniatevych, A. H., & Molchanov, L. S. (2026). Directions for increasing the energy efficiency of converter smelting in the conditions of PJSC "ARCELORMITTAL KRYVYI RIG". *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 386-432. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-025>

*Рукопис надійшов до редакції / Received 02.03.2025*

*Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026*

*Опубліковано / Published 30.05.2026*