

ПРО ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ОДНОЯРУСНИХ ВЕРХНІХ ФУРМ КИСНЕВИХ КОНВЕРТЕРІВ

Анотація. Очікувані показники виробництва сталі в Україні за 2024 рік повинні перевищити виробництво 2023 року на 17%. До 75% світового виробництва сталі відбувається киснево-конвертерним способом. В Україні на сьогодні потужності конвертерного виробництва зосереджені на ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Дніпровський металургійний завод», ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Для киснево-конвертерного способу отримання сталі, окрім самого конвертерного агрегату, однією з найважливіших складових обладнання є верхня фурма, визначення та пояснення особливостей роботи якої надано у цій роботі. Постійний розвиток та вдосконалення конструкцій верхніх фурм від моменту їх появи призвів до того, що вони мають різні конструктивні особливості, для пояснення яких, у роботі відповідно до мити сформульовано поняття: група сопел; ярусність; рядність верхньої фури кисневого конвертеру. Наведено загальну будову верхньої фури класичної конструкції. Охарактеризовано основні конструктивні особливості односоплових та багатосоплових верхніх фурм. Відзначено, що за принципом охолодження виділяють верхні фури з центральним і периферійним підведенням води. Надано класифікацію наконечників верхніх фурм за кількістю та типом сопел, способом виготовлення. Відзначено, що найбільшого поширення у ведучих металургійних державах мають багатосоплові верхні фури з соплами Лаваля у наконечнику з кількістю від 3 до 12 шт., в Україні з 4, 5, 6 соплами. Відповідно до сформульованих у роботі понять групи сопел, ярусності та рядності, такі верхні фури визначені як одноярусні багатосоплові відповідно до тенденції розвитку багатоярусних та багаторядних конструкцій верхніх фурм. Важливо відзначити, що від вірного підбору верхньої фури, залежить ряд параметрів перетворення розплаву, переваг та недоліків киснево-конвертерного способу одержання сталі порівняно з мартенівським та електросталеплавильним. Визначено, що подальша розробка нових верхніх фурм повинна бути у напрямку посилення існуючих та створення нових переваг конвертерного способу виробництва сталі з одночасним усунення недоліків.

Ключові слова: киснево-конвертерна технологія; конвертер, верхня продуква, верхня фурма, верхня одноярусна фурма, наконечник, сопла.



Посилання для цитування: Юшкевич П. О. Про особливості конструкцій одноярусних верхніх фурм кисневих конвертерів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 321-335. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-321-335>.

Актуальність роботи та стан питання. За 2024 рік запланований обсяг виробництва сталі відповідно до даних у відкритому доступі [1, 2] може скласти від 7300000 т/рік до 7500000 т/рік, що перевищує показники обсягу виробництва 2023 року на 17%. Можлива тенденція до збільшення обсягу виробництва сталі є позитивним сигналом так як металургія займає друге місце у економіці нашої держави за обсягом експорту [1, 2]. Важливо відзначити, що на сьогодні до 75% [3-8] світового виробництва сталі відбувається у конвертерах: верхньої, комбінованої, донної та бічної продувки, садка яких може досягати до 450 т. Відповідно до джерела [4] з 2017 р. доля конвертерної сталі в Україні перевищувала 70% від загального виробництва, однак нажалі у зв'язку з знищенням або критичним ушкодженням певних металургійних підприємств України у ході війни, відбулося перерозподілення співвідношення долі виробництва сталі між конвертерним, мартенівським і електросталеплавильним технологічним способом. Потужності конвертерного виробництва сталі на сьогодні зосереджені на трьох великих металургійних підприємствах України: ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Дніпровський металургійний завод», ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» [2, 7-9]. Сукупно у своїй структурі ці підприємства мають за проектними потужностями 11 конвертерних агрегатів садкою від 60 до 250 т, що розраховані під технологію верхньої продувки розплаву [8, 9]. Рівень завантаження проектних потужностей цих металургійних підприємств у 2023 році становив до 25 % . Важливо відзначити, що у світі окрім верхньої продувки має широке поширення комбінована (верхньо-донна) продувка конвертерної ванни, яка є сучаснішою та має більше керуючих впливів для контролювання перебігу перетворення розплаву [3, 5, 9].

Однією з важливих складових обладнання для реалізації як технології верхньої так і комбінованої (верхньо-донної) продувки конвертерної ванни та перетворення вихідного рідкого розплаву чавуну та металевого брухту на сталевий напівпродукт необхідного хімічного складу є верхня фурма [5-15]. На сьогодні існують багато різновидів верхніх фурм, що відрізняються за конструкцією стовбура, наявністю та кількістю продувних блоків та видом наконечників і сопел в них [5, 6, 8-10]. Таке різноманіття сприяє можливості підбору найбільш раціональної конфігурації верхньої фурми під певний

технологічний процес продувки розплаву, як верхньої так і комбінованої (верхньо-донної) у конвертерній ванні [5-15]. Додавання у конструкцію верхньої фурми декількох груп сопел, що розташовані на одному рівні у горизонтальній площині умовного перерізу і рознесені одна від одної за певною відстанню відносно вертикальної осі фурми призвело до появи поняття ярусності (ярусу, ярусів) та рядності (ряду, рядів) верхньої фурми. Разом з цим нажаль бракує сучасних наукових робіт за останні роки які надають широке представлення стосовно особливостей конструкцій багатосоплових та односоплових верхніх фурм, визначають поняття група сопел, ярусність та рядність верхніх фурм та ідентифікують багатосоплові та односоплові верхні фурми стосовно цих понять.

Мета роботи. Сформулювати поняття група сопел, ярусність, рядність для верхніх фурм та ідентифікувати багатосоплові, односоплові верхні фурми відповідно до них. Охарактеризувати основні конструктивні особливості властиві односопловим та багатосопловим верхнім фурмам. Відзначити конструктивні особливості верхніх фурм у конвертерних цехах України. Навести загальні переваги та недоліки конвертерного виробництва сталі пов'язані з вірністю підбору верхньої фурми.

Методика проведення досліджень. Базується на пошуку наукових літературних джерел, що відповідають за тематикою та змістом, меті роботи та подальшій їх аналітичній обробці. Завдяки проведеній обробці визначено необхідну інформацію та данні, що дали можливість сформулювати поняття група сопел, ярусність та рядність верхніх фурм. Охарактеризувати різновиди верхніх фурм в залежності від зміни конструктивних особливостей. Відзначити особливості верхні фурми у конвертерних цехах України. Обґрунтувати необхідність подальшого розвитку конструкцій верхніх фурм.

Основні матеріали дослідження. Верхня фурма класичної конструкції загалом складається з:

1. Наконечника у якому розташовані як продувні сопла так і система каналів для забезпечення проходження охолоджуючої води;
2. Трьох концентрично розташованих труб одна відносно одної, що мають збільшення діаметру від внутрішньої - найменшої, проміжної, до зовнішньої – найбільшої. Вільний простір що утворюється між стінками труб призначений для забезпечення подання продувального кисню, підведення та відведення потоку циркулюючої води для охолодження;
3. Систем компенсації термічного розширення і подовження

зовнішньої труби для внутрішньої і проміжної труби;

4. Трьох патрубків для з'єднання фурми з магістралями подання кисню, підведення та відведення охолоджуючої води.

Верхня фурма – продувний пристрій у вигляді стовбура з наконечником у якому розмішені сопла, використовується для конвертера та вводиться у його робочій простір через горловину, первинно до вихідної висоти з поступовою її зміною до початкового та робочого розташування, над дзеркалом металу. Призначений для подання через сопла наконечника на поверхню дзеркала рідкого розплаву (первинно чавуну), струменів технологічно чистого кисню – $\{O_2\}$, котрі забезпечують окислення домішок розплаву, що сприяє його перетворенню (рафінуванню) у сталевий напівпродукт необхідного хімічного складу. Взаємодія кисню – $\{O_2\}$ з рідким чавуном забезпечує окислення фосфору – [P], кремнію – [Si], марганцю – [Mn], вуглецю – [C], заліза – [Fe], незначної частки сірки – [S], в залежності від величини спорідненості елемента до кисню та інших необхідних фізико-хімічних умов для розвитку цього процесу. Всі утворені оксиди домішок, окрім продуктів окислення вуглецю, скупчуються в поверхневих шарах ванни утворюючи над розплавом металу покрив шлаку. Продукти окислення вуглецю монооксид – $\{CO\}$ і діоксид – $\{CO_2\}$ вуглицю, є образотворчими складовими потоку відхідних газів, що вивільнюється з робочого простору ванни конвертеру через горловину. Важливо відзначити, що першочерговими керуючими впливами, що регулюють процес окислення вище відзначених домішок в ході продувки конвертерної ванни є зміна інтенсивності продувки, витрати газу та/або висоти розташування фурми над поверхнею розплаву. Окрім кисню через верхню фурму можуть подаватися $\{N_2\}$ – азот, $\{Ar\}$ – аргон та інші технологічні гази як одночасно з поданням кисню – $\{O_2\}$ так і незалежно від нього у ході продувки.

Як вище відзначено технологічні гази подаються з сопла або сопел верхньої фурми та можуть мати дозвукову, звукову або надзвукову швидкість поширення за рахунок чого забезпечують розвиток циркуляційних гідрогазодинамічних процесів у об'ємі розплаву, сприяють перемішуванню, вирівнюванню його хімічного складу та температури. За температури сухого повітря – $t_{ср} = 20^{\circ}C$ звукова швидкість становить 343 м/с [5], відповідно до числа Маха, це значення записується як 1 Мах або альтернативно позначається M1 [5]. Дозвукові швидкості відповідають значенням меншим за M1. Надзвукові швидкості можуть становити від M1 та зазвичай до M2 (2 Маха) для верхньої фурми кисневого конвертера [5]. Вихідна швидкість струменя у значній мірі залежить не тільки від тиску газу,

витрати та інтенсивності продувки, а й від типу профіля сопла за рахунок якого відбувається безпосереднє формування ядра струменю, структура якого зберігається на виході з сопла до меж довжини початкової ділянки струменю. За типом профілю у верхніх фурмах найбільшого поширення отримали сопла Лаваля, циліндричні та конічні. Сопло Лаваля забезпечує формування струменя з надзвуковою швидкістю, тобто вищою за М1 за дотримання усіх необхідних вихідних фізичних умов для цього. Циліндричне і конічне сопло забезпечує формування струменя з швидкістю звуку і нижче, тобто до М1 включно, а також мають межі повного розкриття (поширення) основної ділянки струменя приблизно у два рази більші ніж у струменя з сопла Лаваля порівняно.

Першочергово, зазвичай сопла розташовують сукупно на торці одного з найважливіших конструктивних елементів верхньої фурми, а саме наконечника. Сопла можуть бути розмішені не тільки на торці, а й бокових сторонах наконечника. Так чи інакше, зазвичай будь які сукупності сопел у наконечнику розташовані з нахиленням під певним кутом до вертикальної осі фурми, рівновіддалено одне від одного за колом певного діаметру та у одній площині умовного горизонтального перерізу. Постійний розвиток та вдосконалення конструкцій верхніх фурм [5-15] від моменту їх появи призвів, до створення конструкцій, що можуть мати у наконечнику декілька сукупностей сопел [6, 7, 9], розмішених за однією площиною у умовному горизонтальному перерізі і на певній відстані одна від одної відносно вертикальної осі верхньої фурми. Окрім наконечника фурми з соплами, на стовбурі верхньої фурми можуть бути розташовані окремі продувні блоки, що теж можуть мати від однієї до декількох сукупностей сопел [5-15]. Наявність у одній верхній фурмі декількох окремих сукупностей сопел розташованих у наконечнику або продувних блоках за їх використання, призвела до використання таких характеристик у описі верхніх фурм як група сопел, ярусність і рядність, про які сформульовані у цій роботі наступні поняття:

1. Група сопел – сукупність сопел, що можуть бути розмішені у наконечнику або продувному блоці верхньої фурми, так щоб сопла були розташовані разом на одному рівні у горизонтальному перерізі за колом одного діаметру. Відстань між двома січними площинами розташування груп сопел за горизонтально перерізу кола одного діаметру відносно вертикальної осі фурми, ведено як висоту основного перерізу розташування сопел;

2. Ярусність (ярус, яруси) верхньої фурми кисневого конвертеру введено для розташування першої групи сопел у наконечнику фурми, відносно поверхні (дзеркала) розплаву у стані спокою та кожної

наступної групи сопел розташованої окремо від неї та однієї від одної у продувному блоці або віддалено на стовбурі фурми за вистою вертикальної осі фурми не менше ніж на калібр наконечника фурми або продувного блоку, що визначається відповідно до більшого значення цього розміру;

3. Рядність (ряд, ряди) верхньої фурми кисневого конвертеру введено для випадку розміщення більше однієї групи сопел у наконечнику або продувному блоці верхньої фурми, відносно поверхні (дзеркала) розплаву у стані спокою, коли наступні групи від першої групи сопел розташовані окремо одна від одної у межах розміру висоти наконечнику фурми або продувного блоку і відстань між ними не перевищує цього розміру.

Наконечник верхньої фурми приварюється до торця труб стовбура фурми. У якості матеріалу для наконечника фурми використовують переважно мідь, через один з найкращих показників теплопровідності, рідинно текучості, оброблюваності, зварюваності та її сплави з іншими кольоровими металами. У якості матеріалу труб стовбура фурми використовують сталь. Матеріали з яких виготовлені труби стовбура фурми та наконечник, не розраховані самостійно витримувати високі температури сталеплавильних процесів. У зв'язку з чим для зниження температури як стовбура так і наконечника фурми у ході використання для продувки розплаву, передбачено безперервне водяне охолодження, циркулюючим потоком з рекомендованою швидкістю від 8 м/с [5], який бере на себе тепловідведення від конструктивних елементів фурми для підтримання їх допустимої робочої температури за якої вони зберігають свої механічні властивості.

За реалізацією принципу охолодження виділяють верхні фурми з центральним і периферійним підведенням охолоджуючої води. У випадку фурм з центральним підведенням охолоджуючої води за каналом внутрішньої – найменшої за діаметром труби відбувається подання охолоджуючої води. У межах вільного проміжку – каналу між внутрішньою і проміжною трубою відбувається подання продувного газу. Межі вільного проміжку – каналу між проміжною і зовнішньою трубою призначені для відведення нагрітої води, що була вже використана для охолодження конструктивних елементів верхньої фурми.

Фурма з периферійним підведенням води на відміну від схеми з центральним підведенням, передбачає подання через канал внутрішньої труби продувного газу, через вільний проміжок - канал між внутрішньою і проміжною трубою охолоджуючої води, а вільний проміжок – канал між проміжною і зовнішньою трубою, також призначений для відведення нагрітої води.

У обох випадках сполучення стовбура фурми, що складається з трьох концентричних труб з наконечником фурми, повинно ізолювати канал підведення технологічного газу від взаємопов'язаних каналів підведення та відведення охолоджуючої води взаємоузгоджених для забезпечення циркуляційного руху води з необхідною швидкістю. Треба відзначити, що досвід експлуатації цих різновидів схем у підході до реалізації способу охолодження стовбура і наконечника фурми, довів більшу практичність у експлуатації фурм з периферійним підведенням охолоджуючої води, які на сьогодні і мають поширення у киснево-конвертерних цехах ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Дніпровський металургійний завод», ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

Разом з цим важливою конструктивною рисою верхніх фурм є наконечник. Наконечники верхніх фурм можна класифікувати за:

1. Кількістю сопел на: односоплові; багатосоплові та багаторядні (дворядні, трирядні та ін.).

2. Типом сопел: Лаваля; простої геометричної форми (циліндричні, конічні та ін.); складної геометричної форми (сопла, що складаються з декількох врізаних геометричних фігур; мають завади або нарізи на внутрішній поверхні у профілі).

3. Способом виготовлення: цільноточені; литі; зварено-штамповані.

Цільноточені наконечники – виготовлюють переважно шляхом токарної, свердлильної обробки цільної заготовки за допомогою мультифункціональних комбінованих верстатів з числовим програмним забезпеченням (ЧПУ) заздалегідь складеними програмами відповідно до робочих креслень. Такий підхід до виготовлення дозволяє отримувати наконечники верхніх фурм, що мають високі показники геометричної точності, гладку внутрішню поверхню, відсутність дефектів пов'язаних із зварюванням та відливанням, відсутність внутрішніх напруг, високі характеристики механічних властивостей та показники стійкості. До недоліків належить потреба у вихідній заготовці, обмеження конструктивної складності можливостями верстата та особливостями типів обробки, висока вартість та складність обладнання, найвища вартість з трьох способів виготовлення, у разі зношення або ушкодження одного з конструктивних елементів можливість тільки повної заміни наконечника. Великі витрати матеріалу у ході процесу отримання з заготовки готового виробу.

Литі наконечники – виготовлюють за рахунок спеціальних технологій ливарного виробництва. Концепція конструкції майбутнього литого наконечника повинна враховувати ливарні обмеження пов'язані з виготовлення форм та відливанням. За кресленнями першочергово створюється 3-D модель у якості шаблону

(вихідного зразка) з врахуванням усіх розмірів до сотих міліметра. Створений прототип наконечника у вигляді 3-D моделі підлягає подальшому формуванню з використанням комбінованих форм, які дозволяють детально точно відтворити усі контури 3-D моделі. Литі наконечники мають високі показники стійкості, гарні механічні властивості, меншу вартість виготовлення та простіше обладнання порівняно з цільноточеними. Одними з недоліків таких наконечників можуть бути переливи або недоливи металу у важко доступних конструктивних місцях, утворення раковин або пор, у тому числі внутрішніх в результаті кристалізації металу, внутрішні напруги, шорсткість внутрішньої поверхні, обмеження у складності конструкції наконечників, що пов'язані з підходом до виготовлення, у разі ушкодження або зношення конструктивних елементів литих наконечників можлива тільки повна заміна наконечника.

Зварено-штамповані наконечники – виробляють за технологією відповідно до якої окремі конструктивні елементи виготовлюють методом штамповки на спеціальних пресах (механічних, гідравлічних, ексцентрикових та ін.) з подальшим їх зварюванням спеціальними методами (аргонодуговим, лазерним та ін.) у об'єднану цілісну конструктивну складову. За цією технологією виготовлення можлива комбінація різних матеріалів (сталь, мідь та різновиди її сплавів), котрі можуть окремо підбиратися для кожного складового елемента наконечника, в залежності від його розташування у конструкції, теплового навантаження на цей елемент у ході експлуатації та ефективності охолодження. Таке комбінування матеріалів дозволяє максимально раціоналізувати витрати та суттєво знизити вартість матеріалів. Технологія також дозволяє створювати конструкції наконечників складних геометричних форм та деталізації, що за певних випадків окрім операцій зварювання, викликає необхідність використання точних операцій пайки дрібних та геометрично складних деталей. Окремо виготовлені деталі мають високу геометричну точність штампованих елементів. У ході зношення або ушкодження можлива заміна окремих елементів наконечника. Зварено-штамповані наконечники мають найнижчу вартість порівняно з цільноточеними та литими. Разом з цим недоліки такої технології виготовлення полягають у тому, що зварні шви є потенційними місцями внутрішніх концентричних напружень та появи тріщин. Також спостерігається наявність дефектів зварних швів та/або пайки, щільності стикування конструктивних елементів після зварювання один відносно одного, що призводить до погіршення параметрів геометричної точності. Ускладнення конструкції наконечника викликає необхідність у збільшенні кількості зварних швів та виконання операцій пайки. Такі

наконечники мають нижчу надійність та стійкість порівняно з цельноточеними або литими.

Відповідно до отриманих даних за технологією виготовлення найбільшого поширення для верхніх фурм кисневих конвертерів в Україні довгий час мали зварено-штамповані наконечники, а з 2000-х років набули поширення литі наконечники. Так в умовах ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Дніпровський металургійний завод», ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», переважало використання литих наконечників, закордонних виробників.

За всіма наведеними технологіями виробництва можливо одержання як односоплових наконечників так і багатосоплових, багаторядних. Односоплові та багатосоплові наконечники в останні десятиліття розвитку киснево-конвертерного виробництва переважно використовують з соплами або соплами Лавала. У багаторядних зазвичай одночасно використовують як сопла Лавала так і простої геометричної форми (циліндричні, конічні та ін.). У кожному випадку верхньої фурми наконечник має свій зовнішній діаметр – калібр, що відповідає діаметру – калібру зовнішньої труби фурми, певні геометричні розміри сопел та їх кількість. Обрання типу геометрії сопел (сопла) їх кількості та геометричних розмірів кожного сопла, залежить від необхідних газодинамічних характеристик струменю на виході з сопла (структура, швидкість, відстань та межі поширення), садки конвертерної ванни, інтенсивністю продувки, витрати технологічного газу, типу продувки, висоти розташування фурми та ряду інших важливих технологічних факторів.

Найбільшого поширення у ведучих металургійних державах: Сполучених Штатах Америки (США); Україні; країнах Європейського Союзу (ЄС); Китаї; Японії; Індії, Підвентній Кореї та ін. [5, 8-10] на сьогодні мають багатосоплові верхні фурми з соплами Лавала. Кількість сопел у наконечнику цих фурм може складати від 3 до 12 шт., за садки промислових конвертерів від 5 до 400 т [5]. В Україні мали широке застосування верхні фурми з 4, 5, 6 соплами Лавала за садки конвертерів від 60 до 350 т [8, 9]. Відповідно до введених понять групи сопел, ярусності та рядності, такі верхні фурми можна визначити як одноярусні багатосоплові в тенденції розвитку багатоярусних та багаторядних конструкцій верхніх фурм. Не зважаючи на широке поширення конструкцій одноярусних багатосоплових верхніх фурм у наш час в Україні та світі, вони мають обмежені можливості з точки зору керуючого впливу на перебіг продувки.

Важливо відзначити, що від вірного підбору конструкції верхньої фурми, під реалізацію дуттьового режиму для технології киснево-

конвертерного виробництва, залежить ряд параметрів перетворення розплаву. Також це впливає на проявлення переваг та недоліків виробництва сталі киснево-конвертерним способом, порівняно з мартенівським та електросталеплавильним. За киснево-конвертерним способом виробництва сталі можна виділити наступні переваги:

1. Найвища продуктивність. Такий показник забезпечується за рахунок того, що тривалість конвертування розплаву до отримання сталевого напівпродукту може становити від 60 до 15 хвилин;

2. Швидше протікання усіх фізико-хімічних процесів пов'язаних з окисленням домішок вихідного розплаву за рахунок безпосередньо прямого подання до його об'єму від 2,5 м³/хв·т до 6 м³/хв·т [5] {O₂} – кисню зі звуковою або надзвуковою швидкістю;

3. Незначні капітальні витрати, на будівництво, капітальну реконструкцію та поточний ремонт конвертерних агрегатів, технологічного обладнання для конвертування сталі;

4. Вища економічність, це забезпечується тим, що технології конвертерного виробництва сталі потребують менше енергії на виробництво 1 т. сталі і можуть обходитись без зовнішніх окремих джерел енергії (електроенергія, паливні носії енергії);

5. Сприятливі умови для переробки у конвертері значної кількості металевго брухту (скрапу) до 30 %, будь якого хімічного складу та іншої твердої металошихти від загальної металевго шихти;

6. Краща керованість перебігом технологічного процесу перетворення розплаву у сталеплавильний напівпродукт;

7. Ліпші екологічні показники за рахунок меншого впливу на навколишнє середовище порівняно з мартенівським способом;

До недоліків конвертерного виробництва сталі порівняно з електросталеплавильним можна віднести:

1. Залежність успішності та тривалості конвертування розплаву від: початкової температури рідкого чавуну; вихідного вмісту: [Si] – кремнію, [Mn] – марганцю, [C] – вуглецю та кількості металевго брухту у співвідношенні шихтовки плавки;

2. Велика інтенсивність утворення відхідних конвертерних газів та пилу у ході продувки;

3. Неможливо проведення плавки без рідкого чавуну, що має температуру від 1260 °С, з використанням тільки твердої металошихти;

4. Складність видалення [S] – сірки з розплаву, під час його переробки в кисневому конвертері;

5. Висока окисненість шлаку. Вміст різновидів форм оксиду заліза (FeO) у шлаковому розплаві, може зростати від 10 до 25 %;

6. Підвищений вміст кисню та азоту у сталевому напівпродукті;

7. Утворення металевих (заметалювання), металошлакових або шлакових настилів на верхній фурмі, горловині конвертеру та екрануючих поверхнях кіссону газовідвідного тракту.

У подальшому розроблення нових верхніх фурм повинно бути спрямовано на створення конструкцій, що дозволять посилити існуючі переваги конвертерного способу виробництва сталі та забезпечити нові, одночасно з зведенням недоліків до мінімуму або їх повним усуненням за можливості.

Висновки

В Україні на сьогодні потужності конвертерного виробництва сталі зосередженні на трьох великих металургійних підприємствах: ПрАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Дніпровський металургійний завод», ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Рівень завантаження проектних потужностей цих металургійних підприємств у 2023 році становив до 25 %.

Окрім самого киснево-конвертерного агрегату, однією з найважливіших складових для реалізації конвертерного способу виробництва сталі є верхня фурма. Постійний розвиток та вдосконалення конструкцій верхніх фурм від моменту їх появи призвів до того, що вони мають різні конструктивні особливості, для пояснення яких, у роботі було сформульовано поняття: група сопел; ярусність (ярус, яруси); рядність (ряд, ряди) верхньої фурми кисневого конвертеру. Відповідно до сформульованих у роботі понять верхні односоплові та багатосоплові фурми класичної конструкції, були визначені як одноярусні в тенденції розвитку багатоярусних та багатоярусних конструкцій верхніх фурм.

Найбільшого поширення у ведучих металургійних державах: Сполучених Штатах Америки (США); Україні; країнах Європейського Союзу (ЄС); Китаї; Японії; Індії та ін. на сьогодні мають багатосоплові одноярусні верхні фурми з соплами Лаваля у наконечнику від 3 до 12 шт., саме в Україні широке застосування мають з 4, 5, 6 соплами Лаваля. Не зважаючи на широке поширення конструкцій одноярусних багатосоплових верхніх фурм у наш час в Україні та світі, вони мають обмежені можливості з точки зору керуючого впливу на перебіг продувки.

Вірний підбір конструкції верхньої фурми, під реалізацію дуттьового режиму для технології киснево-конвертерного виробництва сталі, впливає на ряд параметрів перетворення розплаву, переваг і недоліків над мартенівським та електросталеплавильним способом виробництва сталі.

Подальша розробка нових конструкцій верхніх фурм повинна бути

спрямовано на посилення існуючих та забезпечення нових переваг конвертерного способу виробництва сталі над іншими способами, одночасно з зведенням до мінімуму недоліків за можливістю з повним їх усуненням.

Перелік посилань

1. Григоренко Ю. Українські метпідприємства у 2024 році можуть збільшити виплавку сталі до 7,3 млн. т. Веб-сайт <https://metinvest-smc.com>. URL: <https://is.gd/w24pkf> (дата звернення 30.11.2024).
2. Юшкевич П. О. Сучасний стан та переваг киснево-конвертерне виробництва сталі в Україні. *Збірник тез: Всеукраїнської науково-технічної конференції «Наука і металургія присвячена 85-річчю ІЧМ НАН України»*. Дніпро. 19-20 листопада 2024 р. Дніпро: Візіон. С. 12.
3. Гарбатенко В. Ключові технології виплавляння сталі. Веб-сайт <https://metinvest-smc.com>. URL: <https://is.gd/w24pkf> (дата звернення 30.11.2024).
4. Основним способом виплавки сталі в Україні залишається киснево-конвертерний: більше 70% виробництва: веб-сайт. URL: https://ukrudprom.ua/news/Osnovnim_sposobom_viplavki_stali_v_Ukraine_ostaetsya_kislorodnok.html (дата звернення 30.11.2024).
5. *Конвертерне виробництво сталі*: теорія, технологія, якість сталі, рециркуляція матеріалів і екологія / Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Дніпро : Дніпро-ВАЛ, 2006. 456 с.
6. Величко А. Г., Бойченко Б. М., Грішин В. С., Шипко А. І. Досвід використання наконечників кисневих фурм с дворядним розміщенням сопел в умовах ПАТ «ДМЗ». *Металургійна і гірничорудна промисловість*. 2010. №7. С. 115–116.
7. Чернятевич А. Г., Вакульчук В. В., Сигарев Е. Н. Підвищення ефективності верхньої продувки ванни 160-т конвертерів з викорис-танням двоярусної кисневої фурми. *Сталь*. 2017. № 9. С. 9–13.
8. Юшкевич П. О. Стан та досвід використання кисневих конвертерів на металургійних підприємствах сучасної України. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 304–315. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-304-315>
9. Зражевский А. Д., Чернятевич А. Г., Сущенко А. В., Грищенко А. С. Стан і подальше вдосконалення конструкцій кисневих фурм в конвертерних цехах України. *Металургійна і горнорудна промисловість*. 2014. №6. С. 20-30.
10. Величко А. Г., Чернятевич А. Г., Сущенко А. В., Чернятевич І. В. Рациональні конструкції багатосоплових наконечників для киснево-конвертерних фурм. *Металургійна і гірничорудна промисловість*. 2012. №7. С. 49–52.
11. Хаустов В., Венгер В. Будівництво електрометалургійних заводів с перспективним напрямом розвитку металургійної галузі загалом. URL: https://zn.ua/ukr/macrolevel/metalurgiya-ukrayini-kudi-ydemo-307033_.html (дата звернення 29.11.2024).
12. Чернятевич А. Г., Сигарев Е. Н., Чернятевич І. В. Нові розробки конструкцій кис-невих фурм і способів продувки ванни 160-т конвертерів ПАТ

«Арсе-лорМіталл Кривий Ріг». *Теорія і практика металургії*. 2010. № 1–2. С. 31–38.

13. *Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва /* Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Київ: Видавничий дім "Вініченко". 2016. 224 с.

14. Полетаєв В. В. Конспект лекцій з дисципліни «Технологія виплавки сталі». Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет. 2012. 104 с.

15. Чернятевич А. Г., Коваленко А. Г., Сущенко А. В. Розробка і вдосконалення конструкції двоярусної фурми для 160-т конвертерів ПАТ «ЄМЗ». *Теорія і практика металургії*. 2014. № 3-6. С. 20-28.

References

1. Hryhorenko, Yu. (2024). *Ukrainski metpidpriemstva u 2024 rotsi mozht zbilshytu vyplavku stali do 7.3 mln. t*. URL: <https://is.gd/w24pkf>

2. Yushkevych, P. O. (2024). Suchasnyi stan ta perevah kysnevo-konverterne vyrobnytstva stali v Ukraini. *Zbirnyk tez Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Nauka i metalurhiia prysviachena 85-richchii IChM NAN Ukrainy", Dnipro, 19-20 lystopada 2024*. Vizion. P. 12.

3. Harbatenko V. (2024). *Klyuchovi tekhnohohiyi vyplavlyannya stali*. URL: <https://is.gd/w24pkf>

4. *Osnovnym sposobom vyplavky stali v Ukraini zalyshaietsia kysnevo-konvertirnyi: bilshhe 70% vyrobnytstva*. (2017). URL: https://ukrrudprom.ua/news/Osnovnim_sposobom_viplavki_stali_v_Ukraine_ostaets_ya_kislorodnok.html

5. Boichenko, B. M., Okhotskyi, V. B., & Kharlashyn, P. S. (2006). *Konverterne vyrobnytstvo stali: teoriia, tekhnohohiia, yakist stali, retsyrkuliatyia materialiv i ekolohiia*. Dnipro-VAL.

6. Velychko, A. H., Boichenko, B. M., Hrishyn, V. S., & Shypko, A. I. (2010). Dosvid vykorystannia nakonechnykh kysnevykh furn s dvoriadnym rozmishchenniam sopol v umovakh PAT DMZ. *Metalurhiina i hirnychorudna promyslovist*, (7), 115–116

7. Cherniatevych, A. H., Vakulchuk, V. V., & Syharev, E. N. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti verkhnoi produvky vanny 160-t konverteriv z vykorystanniam dvoiarusnoi kysnevoi furny. *Stal*, (9), 9–13

8. Yushkevych, P. O. (2023). Stan ta dosvid vykorystannia kysnevykh konverteriv na metalurhiinykh pidpriemstvakh suchasnoi Ukrainy. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 304–315. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-304-315>

9. Zrazhevskiy, A. D., Cherniatevych, A. H., Sushchenko, A. V., & Hrytsenko, A. S. (2014). Stan i podalshe vdoskonalennia konstrukttsii kysnevykh furn v konverternykh tsekhakh Ukrainy. *Metalurhiina i hornorudna promyslovist*, (6), 20-30

10. Velychko, A. H., Cherniatevych, A. H., Sushchenko, A. V., & Cherniatevych, I. V. (2012). Ratsionalni konstrukttsii bahatosoplovykh nakonechnykh dlia kysnevo-konverternykh furn. *Metalurhiina i hirnychorudna promyslovist*, (7), 49–52

11. Khaustov, V., & Venher, V. *Budivnytstvo elektrometalurhiinykh zavodiv ye perspektyvnyym napriamom rozvytku metalurhiinoi haluzi zahalom*. URL: https://zn.ua/ukr/macrolevel/metalurgiya-ukrayini-kudi-ydemo-307033_.html

12. Cherniatevych, A. H., Syharev, E. N., & Cherniatevych, I. V. (2010). Novi rozrobky konstruksii kys-neyvkh furn i sposobiv produkvy vanny 160-t konverteriv PAT "Arse-lorMittal Kryvyi Rih". *Teoriia i praktyka metalurhii*, (1-2), 31–38

13. Verkhovliuk, A. M., Narivskyi, A. V., & Mohylatenko, V. H. (2016). *Tekhnologii oderzhannia metaliv ta splaviv dlia lyvarnoho vyrobnytstva. Vydavnychiy dim "Vinichenko"*

14. Polietaiev, V. V. (2012). *Konspekt leksii z dystsyplyny "Tekhnolohiia vyplavky stali"*. Dniprovskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet

15. Cherniatevych, A. H., Kovalenko, A. H., & Sushchienko, A. V. (2014). Rozrobka i vdoskonalennia konstruksii dvoiarusnoi furny dlia 160-t konverteriv PAT "IeMZ". *Teoriia i praktyka metalurhii*, (3-6), 20-28

P. O. Yushkevych¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-2675-0737

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

FEATURES OF THE CONSTRUCTION OF SINGLE-TIER TOP TUYERES FOR OXYGEN CONVERTERS

Abstract. Expected steel production in Ukraine in 2024 is projected to exceed the 2023 output by 17%. Up to 75% of global steel production is carried out using the oxygen converter process. In Ukraine, the capacity of converter production is concentrated at PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rih, PJSC Dnipro Metallurgical Plant, and PJSC Kamet Steel. For the oxygen converter process, in addition to the converter agregat one of the most important components of the equipment is the top tuyere. In this work definition and explanation of the top tuyere operating principles are provided. Continuous development and improvement of top tuyere constructions since their inception have led to various construction features. To explain these, the concepts of nozzle group, tier, and row of an oxygen converter top tuyere are introduced in this work. The general structure of a classic top tuyere is presented. The main design features of single-nozzle and multi-nozzle top tuyeres are characterized. It is noted that, according to the cooling principle, top tuyeres with central and peripheral water supply are distinguished. A classification of top tuyere tip is provided based on the number and type of nozzles and the manufacturing method. It is noted that multi-nozzle top tuyeres with Laval nozzles in the tip with quantity from 3 to 12 are the most widely used in leading metallurgical countries, and in Ukraine, those with 4, 5, 6 nozzles in tip. According to the formulated notions for the nozzle group, tier, and row, such top tuyeres are defined as single-tier multi-nozzle, corresponding to the trend towards the development of multi-tier and multi-row top tuyere designs. It is important to note that the correct selection of the top tuyere affects a number of parameters of the converting melt process, advantages and disadvantages of the oxygen converter method compared to the open-hearth and

electric steelmaking processes. It is determined that further development of new top tuyeres should be aimed at strengthening the existing and creating new advantages of the converter steelmaking process while simultaneously eliminating its drawbacks.

Key words: oxygen converter technology, converter, top tuyere, single-tier top tuyere, tip, nozzles

For citation: Yushkevych, P. O. (2024). Features of the construction of single-tier top tuyeres for oxygen converters. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 321-335. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-321-335>

Стаття надійшла до редакції збірника 05.10.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)