

УДК 669.184

DOI: 10.31498/2225-6733.52.2025.351012

**ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ ГОЛОВОК ДЛЯ ВЕРХНІХ
КОНВЕРТЕРНИХ ФУРМ**

Пантейков С.П. канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0385-7603>, e-mail: ser_pant_in@ukr.net

Метою роботи є розробка верхніх дуттьових пристроїв для подачі в робочу порожнину кисневих конвертерів для виплавки сталі різних технологічних газів (кисню, азоту та інших), які забезпечують значну безпеку виробництва при їх експлуатації та мають більш високу стійкість у порівнянні з іншими конструкціями. На основі проведеного аналізу різних літературних джерел і патентного пошуку та результатів промислового випробування різних конструкцій головок (як штатних головок, так і розроблених автором раніше) до верхніх кисневих фурм була розроблена та запропонована інноваційна конструкція безпечної фурменної головки (з розробкою необхідної технічної документації для виготовлення дуттьового пристрою) для 250-т конвертерів ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (м. Кам'янське, Україна), що захищена патентом України на винахід № 78112. Результатами даної роботи вперше доведено високу ефективність розвантаження зовнішнього мідного зварного шва завдяки застосуванню в конструкції фурменної головки спеціальних зміцнюючих итифтів. Це є найбільш ефективним і необхідним заходом для підвищення безпеки експлуатації та стійкості будь-якої конструкції головки до верхньої кисневої фурми. Застосування нової безпечної конструкції фурменної головки, що описана в роботі, дозволить значно підвищити безпеку конвертерного виробництва сталі, а також збільшити стійкість головок до верхніх кисневих фурм у порівнянні з відомими конструкціями, що призведе до повного виключення можливості виникнення великих аварій у цеху через руйнування зовнішнього мідного зварного шва фурменної головки та витрат додаткових коштів на її ліквідацію. Також це дасть можливість отримати значний економічний ефект завдяки високій ефективності вирішення зазначених проблем, які завжди присутні в діючих конвертерних цехах.

Ключові слова: зміцнюючий итифт, стійкість, продувка розплаву, зварний шов, охолодна вода, аварійна ситуація, дуттьовий пристрій, конвертерний цех, економічний ефект.

Постановка проблеми

Тривалий термін служби верхньої продувальної (кисневої) фурми сприяє ритмічній та економічній роботі кисневого конвертера. Для підтримання високого терміну служби фурми критично важливе охолодження її водою, витрати якої повинні підтримуватися на рівні, що є не нижчим за проєктний. Температура охолодної води на виході з фурми не повинна перевищувати 60–65°C. Якість охолодника також є важливим параметром. Якщо вода забруднена оксидами або брудом, на внутрішніх поверхнях труб і фурменної головки зазвичай утворюються відкладення. Це негативно впливає на теплопередачу та скорочує термін служби верхньої фурми, який варіюється в залежності від умов експлуатації в кожному конкретному цеху та становить 50–1000 плавок, а іноді й більше.

Найбільш вразливою частиною верхньої фурми є так звана фурмена головка (наконечник фурми), яка в процесі експлуатації піддається впливу значних температур – понад 2000°C. При цьому висота розташування головки фурми над рідким металом критично важлива для забезпечення глибокого проникнення кисневого струменя в залізобуглецевий розплав. Однак, якщо висота фурми занадто мала, існує висока ймовірність оплавлення певних зон поверхні фурменної головки, які зазнають сильного перегріву. Тому зовнішня торцева поверхня (нижня чаша) головки верхньої фурми повинна бути виготовлена з міді, яка має високу теплопровідність, завдяки чому тепло від нагрітого торця

(нижньої чаші) головки швидко відводиться до води, що охолоджує фурму. Це може забезпечити лише кована та хімічно чиста мідь.

При цьому фурмена головка будь-якої (зварної, цільноточеної, литої, ковано-штампованої) конструкції обов'язково має зовнішній мідний зварний шов, який з'єднує мідну частину головки (нижню чашу) із сталевим зовнішнім перехідним кільцем, що необхідне для швидкої заміни головки на верхній фурмі шляхом кріплення цього кільця до стовбура (зовнішньої труби) верхньої фурми за допомогою сталевого зварного шва. Однак у процесі експлуатації верхньої фурми зазначений вище мідний зварний шов піддається розтріскуванню і, в багатьох випадках, розривається, що призводить до відриву сталевого перехідного кільця від мідної частини (нижньої мідної чаші) фурменної головки.

Тріщини та наступні розриви зовнішнього зварного з'єднання перехідного кільця з мідною частиною головки на верхніх конвертерних фурмах – серйозна проблема, яка може призвести до значних аварійних ситуацій в конвертерному цеху: верхня фурма, як ракета, виривається з конвертера, обриваючи металопластові рукави, які підводять до неї кисень та охолодник, що також може призвести до вибуху конвертера через потрапляння значної кількості води в високотемпературну робочу порожнину агрегату.

Причини тріщиноутворення зазначеного зовнішнього мідного зварного шва можуть бути різними: дефекти металу, порушення технології зварювання та її

неправильні режими, усадкові напруги під час охолодження шва, його корозія тощо.

При цьому розрізняють чотири види тріщин: гарячі, холодні, водневі та тріщини напруги. Гарячі тріщини зазвичай виникають до завершення формування зварного шва та мають поздовжню форму. Холодні тріщини утворюються після завершення процесу зварювання під час охолодження нижче температурного інтервалу 100-150°C або впродовж подальшого часу; відносяться до найбільш небезпечних дефектів і за всіма діючими нормативно-технологічними документами є неприпустимими. Водневі тріщини пов'язані з наявністю в зварному шві водню, який сприяє підвищенню крихкості металу. Тріщини напруги виникають через температурний, механічний або термомеханічний вплив на матеріал зварного шва в процесі експлуатації дуттьового пристрою.

Для запобігання утворенню перших трьох видів тріщин необхідно: суворе дотримання технології та режимів зварювання; здійснення контролю якості металу деталей та зварних швів; використання зварювальних матеріалів з низьким вмістом водню; проведення термічної обробки зварних швів; застосування антикорозійних захисних покриттів зварних швів.

Застосування всіх зазначених заходів повинно практично повністю виключити ризик тріщиноутворення зварних швів на верхніх кисневих фурмах і забезпечити надійну та безпечну роботу пристроїв.

Однак навіть при дотриманні всіх зазначених вимог (що практично неможливо в умовах виробництва) ризик виникнення тріщин у зварних швах дуже великий через те, що верхня фурма піддається значним термічним навантаженням та вібраціям під час її експлуатації, працюючи в агресивному високотемпературному середовищі (при цьому це стосується як верхніх кисневих (продувальних), так і верхніх гарнісажних (роздувальних) фурм кисневих конвертерів). Це сприяє неминучому виникненню (накопиченню) напруг в конструкції верхньої фурми при її нагріванні через температурне подовження зовнішньої труби (стовбура) верхньої фурми та недосконалості її компенсаційних пристроїв, що призводить до виникнення тріщин напруги в зварних швах через їх меншу товщину та нижчу міцність у порівнянні з іншими зонами зварюваних частин конструкції верхньої фурми.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Підвищення техніко-економічних показників роботи будь-якого конвертерного цеху та експлуатаційних характеристик технологічного обладнання (в тому числі й верхніх кисневих фурм) передбачає розробку та експлуатацію верхніх багатосоплових дуттьових пристроїв.

Висока температура рідкої ванни, утворення факелів полум'я внаслідок окислення вуглецю при продувці розплаву технічно чистим киснем, розбрикування рідких шлаку і металу, а також наявність факелів

допалювання СО відхідних газів до CO_2 створюють у робочому просторі конвертера окислювальну атмосферу з високими температурами [1]. Вона чинить агресивний вплив на матеріали та складові частини верхньої фурми, зокрема на її головку [2].

Робота верхнього продувального пристрою в таких несприятливих умовах зазвичай призводить до змін у мікроструктурі її вихідних матеріалів (мідь, сталь), з яких виготовлені складові частини фурми (сопла, чаші, труби), що з часом викликає втомленість металів. Це також веде до розм'якшення зварних (як мідних, так і сталевих) швів, що, в свою чергу, призводить до руйнування (зазвичай зовнішніх, а іноді й внутрішніх) зварних швів, особливо мідних [1].

З метою запобігання цим явищам були розроблені конструкції фурмених головок, у водоохолодному тракті яких досягається необхідна швидкість руху води, щоб забезпечити належне охолодження всього дуттьового пристрою [3]. Це стало можливим завдяки використанню при проектуванні та розробці конструкцій верхніх конвертерних фурм (як продувальних, так і роздувальних) інформаційно-моделюючої системи прогнозування теплового режиму верхньої кисневої фурми [4], а також методики розрахунку теплопередачі при числовому моделюванні теплового режиму гарнісажної фурми в системі прогнозування [5].

При розробці конструкцій верхніх фурм основна увага в даний час приділяється підвищенню ресурсозберігаючої ефективності процесу виплавки сталі в конвертерах за рахунок використання внутрішніх резервів процесу. У зв'язку з цим постійно розробляються різні конструкції головок для верхніх фурм, які адаптовані для допалювання СО до CO_2 , що дозволяє покращити тепловий баланс плавки, підвищити ступінь перемішування розплаву, зменшити час продувки, прискорити процес дефосфоратії і знизити рівень браку придатного металу [6]. Встановлено, що при забезпеченні в конвертері умов допалювання СО до CO_2 при $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{CO}} = 1$ температура відхідних конвертерних газів збільшується з 1800 до 2000 К [7].

Для збільшення швидкості масообміну між рідким шлаком і металом була розроблена фурма, яка самообертається та використовує як джерело енергії струмінь газу. В результаті цього швидкість масопереносу зросла більш ніж на 30% [8].

Аналіз впливу площі перерізу основного дуттьового отвору верхньої фурми та витрати дуття на параметри струменя, що заглиблюється в розплав, дозволив спроектувати та оптимізувати центральне сопло верхньої кисневої фурми для подачі газової суміші $\text{O}_2 + \text{CO}_2$ у порожнину конвертера [9]. Також було досліджено вплив витрати цієї суміші (80% $\text{O}_2 + 20\% \text{CO}_2$) на розподіл газопорошкових струменів, що транспортують порошкоподібне вапно [10].

Для проектування та розробки профілю сопла кисневої фурми було проведено дослідження впливу спрацювання вихідної частини сопла Лавалю на характеристики струменя, що витікає з сопла, в умовах

надзвукової швидкості. Встановлено [11], що до більш швидкого зниження швидкості газових струменів, а також до більш ранньої точки їх конвергенції призводить збільшення ступеня спрацювання сопел. При цьому причини розпаду вихідних кромок сопла та можливі заходи щодо їх усунення не розглядалися.

З метою проєктування та виготовлення верхньої кисневої фурми, що забезпечує велике число Маха ($M = 2,15$ при тиску кисню $1,01$ МПа) на виході з сопла, були досліджені та проаналізовані характеристики струменя при різних тисках подаваного кисню, а також його вплив на поведінку плавильної ванни [12].

Також вивчені параметри продувки з використанням динамічної кисневої фурми в конвертері. Встановлено вплив її конструктивних особливостей (зокрема кута закручування та швидкості її обертання) на ефективність дефосфорації розплаву [13].

В рамках проєктування верхніх занурених фурм були проведені дослідження, що спрямовані на вивчення динаміки таких процесів: впровадження газу в розплав [14]; утворення і спливання бульбашок в металевій ванні [15], зокрема з використанням рентгенівської візуалізації [16]; обертання хлюпаючих хвиль в розплаві [17]. Встановлено, що на гідродинаміку сталеплавильної ванни суттєвий вплив мають в'язкі та міжфазні сили [18].

В останній час, у зв'язку із значним поширенням технології нанесення захисного шлакового гарнісажу на вогнетривку футерівку конвертерів, значно зріс інтерес до дослідження процесів роздування та спінювання рідкого кінцевого шлаку із застосуванням верхньої (продувальної або спеціальної гарнісажної) фурми. Зокрема, в роботі [19] було вивчено вплив ударного впливу дуття верхньої фурми на процес спінювання конвертерного шлаку в умовах комбінованого (верхнього та нижнього) дуття.

Як видно з проведеного літературного огляду, роботи щодо вдосконалення конструкцій верхніх конвертерних фурм з точки зору підвищення їх безпеки не проводяться, і публікації з цієї тематики повністю відсутні, хоча це є однією з найважливіших проблем, що завжди присутня в усіх працюючих конвертерних цехах. Таким чином, актуальність робіт у цьому напрямку не викликає сумнівів і вимагає швидкого та ефективного вирішення цього питання.

Мета статті

Мета роботи – розробка і дослідження інноваційної конструкції безпечної фурменої головки для усунення проблем можливих аварій і підвищення стійкості верхніх дуттьових пристроїв у діючих конвертерних цехах.

Матеріали та методи

Об'єкт дослідження – виплавка сталі у кисневих конвертерах з верхньою подачею кисню.

Предмет дослідження – розроблена конструкція головки для верхніх продувальних фурм, що захищена патентом України № 78112. Досліджувався вплив зміни конструкції головки фурми шляхом посилення зовнішнього мідного зварного шва, який з'єднує мідну нижню чашу із сталевим зовнішнім перехідним кільцем, на безпеку експлуатації фурмених головок та їх стійкість. Експерименти проводились на 250-тонних конвертерах, застосовувалося структуроване спостереження, вихід фурмених головок з ладу фіксувався за допомогою фотозйомки. Для графічного зображення результатів досліджень використовувалася програма MS Excel 2015.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що в процесі експлуатації верхніх конвертерних фурм в їх конструкціях виникають значні термомеханічні напруги (що викликані, в основному, явищем лінійного теплового розширення зовнішньої труби дуттьових пристроїв внаслідок зміни їх температурного стану під час продувки), які намагаються зменшити різними конструкціями компенсаційних пристроїв (сальниковими, тарілчастими, металошланговими, телескопічними, у тому числі з гумовими кільцями, та іншими), що встановлені на трубах верхніх фурм.

Однак, незважаючи на це, всі верхні фурми характеризуються низькою міцністю зовнішнього мідного зварного шва головки, що з'єднує мідний наконечник зі сталевим зовнішнім перехідним кільцем. В результаті впливу на фурму значних силових навантажень ударного характеру від застосованих кисню та охолодної води, особливо під час їх подачі, термічного подовження та повернення в початкове положення зовнішньої труби фурми, її деформації та впливу на зовнішню трубу крутих і згинальних моментів, вона може розірватися в самому слабкому місці – тобто по зовнішньому мідному зварному шву на фурменій головці, що з'єднує два різні матеріали (мідь і сталь) і, до того ж, має низьку міцність та додатково не зміцнений. Погане з'єднання різнорідних матеріалів (мідної чаші і сталевих кільця) мідним швом, низька якість його виконання (низька щільність і висока пористість міді) і менша товщина зварного шва порівняно з товщиною самого з'єднання нижньої чаші (наконечника) з кільцем пояснюють низьку міцність зовнішнього мідного зварного шва. Крім того, зовнішній мідний зварний шов розм'якшується внаслідок впливу на нього високотемпературного середовища, а також може частково вимиватися високотемпературним агресивним газошлако-металевим середовищем. Руйнування цього зовнішнього шва може призвести до відриву нижньої чаші від зовнішньої труби або навіть до відриву всієї фурменої головки від верхньої кисневої фурми, ставши причиною великої аварії в цеху, що неодноразово траплялося в практиці діючих конвертерних цехів.

Подовження ΔL зовнішньої труби верхньої фурми при її нагріванні в процесі продувки в конвертері можна розрахувати за формулою лінійного теплового розширення, взятою з літературних джерел по компенсації теплового розширення труб, наприклад з [20]:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T,$$

де $\alpha = 16 \cdot 10^{-6}$ – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу труби (сталі), $^{\circ}\text{C}^{-1}$; L_0 – довжина зовнішньої труби фурми, що піддається нагріванню, м;

$\Delta T = T_{\text{тр}} - T_0$ – градієнт температур, $^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{тр}}$ – середня температура нагріву труби, $^{\circ}\text{C}$; T_0 – початкова температура труби, $^{\circ}\text{C}$).

На рис. 1 зображена досліджена автором залежність величини подовження ΔL зовнішньої труби верхньої фурми (в мм) від довжини ділянки її стовбура (в м), яка піддається нагріванню в процесі продування залізовуглецевого розплаву в 250-т конвертері, та від середньої температури цього нагріву (в $^{\circ}\text{C}$).

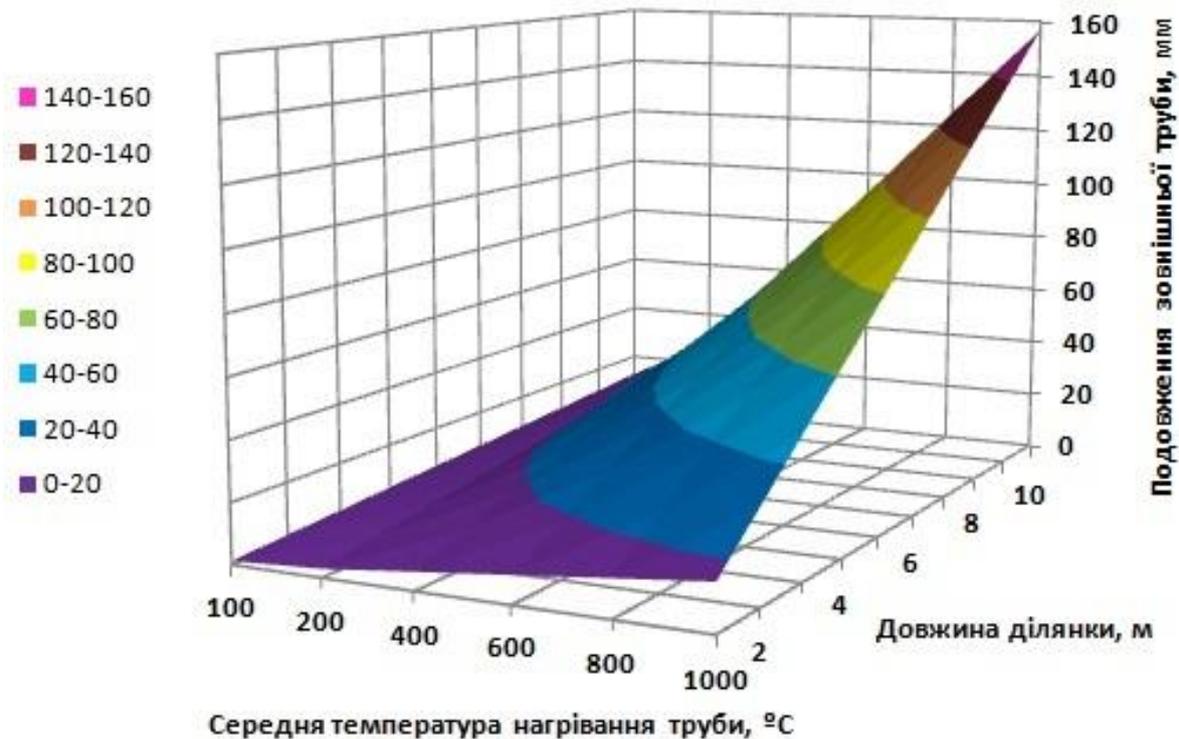


Рис. 1 – Залежність величини подовження ΔL зовнішньої труби верхньої фурми (зовнішній діаметр 426 мм) від довжини ділянки стовбура фурми, що піддається нагріванню, та від середньої температури цього нагріву

З метою підвищення безпеки експлуатації верхніх кисневих фурм і збільшення їхньої стійкості кафедрою металургії чорних металів Дніпродзержинського державного технічного університету (тепер кафедра металургії Дніпровського ГТУ) спільно з працівниками конвертерного цеху ПАТ "Дніпровський металургійний комбінат" (тепер ПрАТ «КАМЕТ-Сталь», м. Кам'янське, Україна) для 250-тонних конвертерів були розроблені нові безпечні конструкції (патент 78112 UA) фурмених головок, в яких завдяки застосуванню спеціальних зміцнюючих штифтів здійснюється посилення зовнішнього мідного зварного шва.

На рис. 2 зображені розроблені варіанти головок з різними варіантами (I–IV) конструкцій зміцнюючих штифтів (див. рис. 3), відповідно для фурм з центральною подачею кисню (рис. 2, а, б) і з центральним підведенням води (рис. 2, в, г). Фурмені головки (рис. 2, а, б – з п'ятьма соплами і конструкціями штифтів I, II; рис. 2, в, г – з шістьма соплами і конструкціями штифтів III, IV) складаються з нижньої мідної чаші

(наконечника) 1, центрального 2, проміжного 3 і зовнішнього 4 перехідних сталевих кілець, сопел 5, верхньої сталеві чаші (колектора) 6, зміцнюючих штифтів 7 (для з'єднання нижньої мідної чаші 1 і зовнішнього сталеві перехідного кільця 4 між собою), які вставлені у наскрізні отвори, що виконані в з'єднуваних деталях, і утримуються від випадання за допомогою зварного шва 8 (рис. 3, I). Крім того, мідна чаша 1 і сталеве зовнішнє кільце 4 з'єднані між собою за допомогою мідного зварного шва 9. Штифти 7 можуть бути виконані подовженими і своїми внутрішніми торцями вставлені в наскрізні (рис. 3, II) або глухі (рис. 3, III) отвори, що виконані в проміжному перехідному кільці 3 або в спеціальних накладках 10 (рис. 3, IV), які прикріплені за допомогою зварного шва 11 до зовнішньої поверхні проміжного перехідного кільця 3. Для досягнення максимальної ефективності роботи запропонованих конструкцій дуттьових пристроїв кількість зміцнюючих штифтів 7 у кожній головці повинна бути не меншою за три.

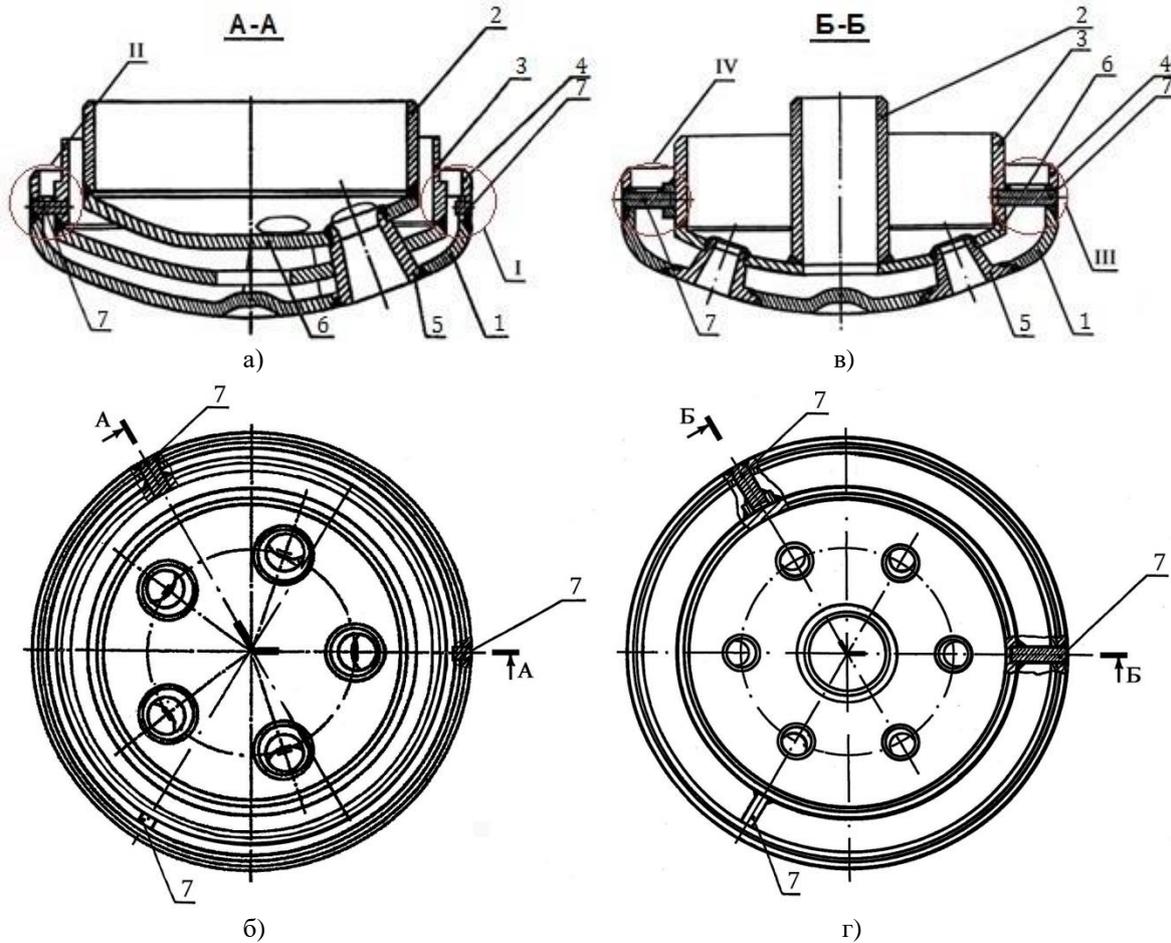


Рис. 2 – Конструкції головок для верхніх фурм з центральною подачею кисню (а, б) і води (в, г) з штифтовим посиленням зовнішнього мідного зварного шва (позначення див. в тексті статті)

При роботі головки фурми відбувається тиск дуття і охолодника на внутрішню поверхню нижньої чаші 1, а також зовнішньої труби фурми внаслідок її термічного подовження на зовнішній мідний зварний шов 9, який з'єднує зовнішнє перехідне кільце 4 з нижньою чашею 1 головки, що призводить до деформації, розтріскування і руйнування зовнішнього мідного зварного шва 9. Наявність зміцнюючих штифтів 7 в телескопічному з'єднанні нижньої чаші 1 із зовнішнім перехідним кільцем 4 (рис. 3, I) дозволяє зменшити навантаження на зовнішній зварний шов 9, оскільки в цьому випадку основне навантаження сприйматимуть штифти 7, а зварний шов 9 фактично буде лише герметизувати зазор між зазначеними з'єднуваними деталями з метою запобігання потраплянню води з верхньої фурми в порожнину конвертера.

Більш переважним є варіант конструкції, що зображений на рис. 3, II, в якому штифт 7 виготовлений подовженим і вставлений своїм внутрішнім торцем у наскрізний отвір, який виконаний у проміжному перехідному кільці 3. Однак цей варіант прийнятний тільки для конструкцій головок з центральною подачею кисню (рис. 2, а, б), оскільки в головках з центральною

подачею води (рис. 2, в, г) з'явиться можливість потрапляння води в кисневий тракт внаслідок її витoku з наскрізного отвору, що категорично неприпустимо, оскільки призведе до аварії через потрапляння води в сопла верхньої фурми.

Для фурмених головок з центральною подачею води (рис. 2, в, г) доцільно використовувати варіанти з подовженими штифтами 7 (див. рис. 3, III, IV).

На рис. 3, III показано варіант, коли зміцнюючий штифт 7 вставлений своїм внутрішнім торцем у глухий отвір, що виконаний на зовнішній поверхні проміжного перехідного кільця 3. Цей варіант передбачає використання товстостінних проміжних перехідних кілець 3, оскільки при використанні для їх виготовлення труб середньої товщини в місцях вставки штифтів 7 знижується міцність проміжного перехідного кільця 3 внаслідок зменшення його товщини при виконанні отвору. Це може призвести до порушення цілісності проміжного перехідного кільця 3 в місцях розташування отворів. Використання ж тонкостінних проміжних перехідних кілець 3 при такому варіанті конструкції неприпустимо (на рис. 3 відсутні позиції 2, 5, 6, див. рис. 2).

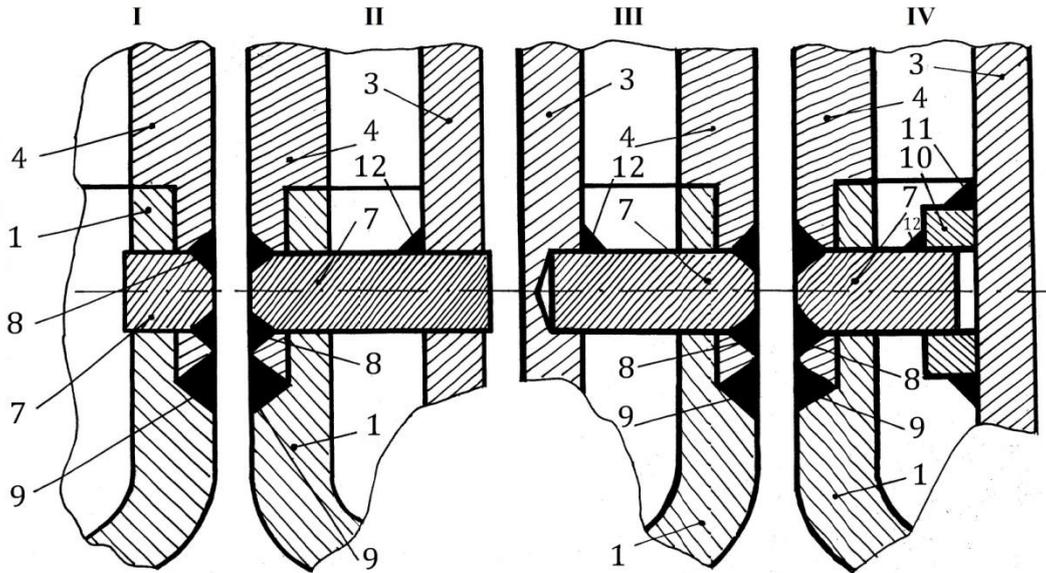


Рис. 3 – Варіанти установлення зміцнюючих штифтів у фурменних головках (позначення див. в тексті статті)

Більш безпечний варіант, який дозволяє використовувати проміжне перехідне кільце 3 з будь-якою товщиною стінки і уникнути його пошкодження, зображений на рис. 3, IV. В ньому пропонується використання спеціальних накладок 10 з отвором (наскрізним або глухим), у який вставлений зміцнюючий штифт 7 своїм внутрішнім торцем. Накладки, у свою чергу, закріплюються на зовнішній поверхні проміжного перехідного кільця 3 за допомогою суцільного зварного шва 11.

При цьому, з метою збільшення жорсткості конструкції фурменної головки, штифти 7 можуть бути додатково прикріплені за допомогою точкового зварного шва 12 до зовнішньої поверхні проміжного перехідного кільця 3 (рис. 3, II, III) або до тіла спеціальних накладок 10 (рис. 3, IV).

Таким чином, забезпечується достатнє розвантаження від термомеханічних напруг зовнішнього мідного зварного шва 9 в конструкції фурменної головки, що в підсумку підвищує її безпеку використання та

стійкість. При цьому три останні варіанти з подовженими штифтами 7, окрім того, збільшують жорсткість всієї конструкції головки за рахунок додаткового скріплення складових частин (патрубків) головки між собою, тим самим розвантажуючи і захищаючи від руйнування зварні шви навколо сопел 5 (як зовнішні, які з'єднують сопла 5 з нижньою чашею 1, так і внутрішні, які закріплюють сопла 5 в колекторі 6), що в більшій мірі підвищить стійкість фурменних головок.

На рис. 4 наведені випадки розтріскування зовнішнього мідного зварного шва після певної кількості конвертерних плавок (їх кількість вказана нижче), в результаті чого верхні продувальні фурми виходили з ладу і знімалися для проведення ремонту. Розрахунками встановлено, що міцність цього мідного зварного шва на розрив складає 40-100 МПа, що значно нижче за міцність міді високої чистоти марки М0 (210-250 МПа). Такий зварний шов практично ненадійний для відповідальних механічних конструкцій, до яких належить і верхня киснева фурма.

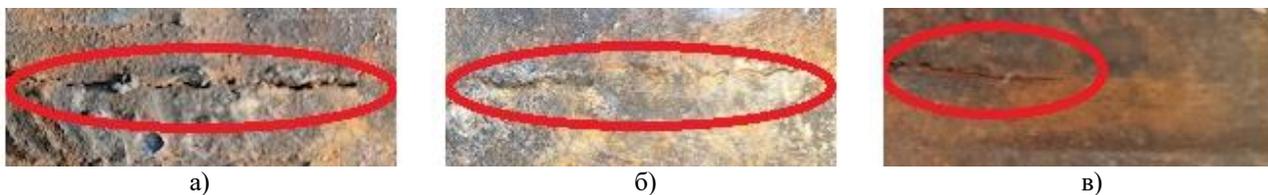


Рис. 4 – Розтріскування зовнішнього мідного зварного шва (стійкість верхньої фурми: а) – 45 плавки; б) – 62 плавки; в) – 8 плавки).

Використання варіанту I (див. рис. 3, I) установки зміцнюючих штифтів у фурменних головках дозволило значно зміцнити зовнішній мідний зварний шов (розрахункова міцність на розрив зварного з'єднання при цьому складала 400 МПа) і повністю виключити його

розтріскування, при цьому верхні фурми виходили з ладу виключно з інших причин, а саме через: розтріскування зовнішніх зварних швів навколо соплових вкладишів (сопел), перегрів вихідних ділянок дуттьових сопел Лавалля, пошкодження фурменної головки

внаслідок посадки верхньої фурми на металобрухт, розтріскування внутрішніх зварних швів навколо соплових вкладишів, необхідність заміни металошлангових компенсаторів через їх пошкодження.

Продовжуються роботи з подальшої оптимізації конструкцій фурмених головок з метою подальшого підвищення їх безпеки експлуатації та збільшення стійкості, у тому числі передбачається виготовлення їх способом литтям під тиском [21] з належним контролем якості виливків [22]

Висновки

У роботі на основі проведених аналізів літературних джерел і патентного пошуку та результатів промислового випробування різних (як штатних, так і розроблених автором раніше) конструкцій головок до верхніх кисневих фурм на 250-т конвертерах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (тепер ПрАТ «КАМЕТ–Сталь», м. Кам'янське, Україна) була розроблена і запропонована інноваційна конструкція безпечної фурменої головки, що захищена патентом України на винахід № 78112.

Вперше доведена висока ефективність розвантаження зовнішнього мідного зварного шва фурменої головки завдяки встановленню в її конструкції зміцнюючих штифтів, що є єдиною дієюю та вкрай необхідною мірою для ефективного вирішення проблем безпеки експлуатації верхніх конвертерних фурм, а також низької стійкості їх головок, що завжди є присутніми в діючих конвертерних цехах.

Використання цих конструкцій забезпечує високу безпеку виробництва: що дозволяє повністю виключити ймовірність виникнення великих аварій у цеху, уникнути травм персоналу і витрат значних коштів на ліквідацію наслідків аварії, а також підвищити стійкість головок та отримати економічний ефект.

Перелік використаних джерел

- [1] Failure Analysis of Basic Oxygen Furnace Lance Head Assembly / S. K. Gupta et al. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2020. Vol. 20. Pp. 605-612. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-020-00866-1>.
- [2] Lim S.-M., Park S.-S., Yi, K.-W. Extension of Lance Life by Change of Height of Lances in the Smelting Furnace of Mitsubishi Process. *Metals and Materials International*. 2021. Vol. 27. Pp. 3721-3729. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00712-x>.
- [3] Panteikov S. P. Stages of Improvement for Welded Structures with Five-Nozzle Lance Heads in the Converter Shop of Public Joint Stock Company «Dneprovsky Metallurgical Combine». *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50. Pp. 756-761. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091220110108>.
- [4] Zhul'kovskii O. A., Panteikov S. P., Zhul'kovskaya I. I. Information-Modeling Forecasting System for Thermal Mode of Top Converter Lance. *Steel in Translation*. 2022. Vol. 52. Pp. 495-502. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091222050138>.
- [5] Heat Transfer Calculation for Numerical Simulation of Thermal Mode of Slag-Splashing Lance in the Forecasting System / O. Zhulkovskyi et al. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems : Selected Papers of 18th International Conference, Chernihiv, Ukraine, 13-15 November 2023*. Vol. 1091. Pp. 70-81. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_6.
- [6] Dong P., Zheng S., Zhu M. Numerical Study on Gas-Metal-Slag Interaction with Single-Flow Postcombustion Oxygen Lance in the Steelmaking Process of a Top-Blown Converter. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2022. Vol. 74. Pp. 509-1520. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05147-2>.
- [7] Peculiarities of Exhaust Gases Afterburning in Converter with Application of Two-Tier Oxygen Lance Blowing / E.V. Protopopov et al. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. Pp. 872-878. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091221120093>.
- [8] Effect of a self-rotating oxygen lance system on mass transfer between slag and molten steel / Gao Q., Wu W., Zhi J.-G., Zhang B., Li X.-C. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2021. Vol. 28. Pp. 152-159. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-020-00515-9>.
- [9] Effects of Nozzle Layout and Parameters on the Jet Characteristics of a CO₂ + O₂ Mixed Oxygen Lance / C. Feng et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020. Vol. 52. Pp. 425-439. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-02048-8>.
- [10] Influence of Carrier Gas of Converter Oxygen Lance on Smooth Distribution of O₂-CO₂-CaO Mixed Jet / W. Li et al. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2020. Vol. 73. Pp. 3027-3035. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02105-5>.
- [11] Effect of Nozzle Exit Wear on the Fluid Flow Characteristics of Supersonic Oxygen Lance / C. Feng et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2020. Vol. 51. Pp. 187-199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01722-w>.
- [12] Jet Characteristics of a High-Mach-Number Oxygen-Lance Nozzle Under High Oxygen Pressure / Y. Zhang et al. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2021. Vol. 52. Pp. 4070-4081. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02325-0>.
- [13] A Numerical Study on Blowing Characteristics of a Dynamic Free Oxygen Lance Converter for Hot Metal Dephosphorization Technology Using a Coupled VOF-SMM Method / Li M., Shao L., Li Q., Zou Z. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2021. Vol. 52. Pp. 2026-2037. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02155-0>.
- [14] CFD Modeling and Experimental Validation of Top-Submerged-Lance Gas Injection in Liquid Metal / D. Obiso et al. *Metallurgical and Materials*

- Transactions B.* 2020. Vol. 51. Pp. 1509-1525. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01864-2>.
- [15] Determining the Bubble Dynamics of a Top Submerged Lance Smelter / A. Kandalam et al. *Resource Awareness of Systems and Society / Recycling & Waste Symposium 2022: Developing Tomorrow's Technical Cycles*, Anaheim, USA, 27 February – 3 March 2022. Vol. I. Pp. 541-551. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92563-5_57.
- [16] X-ray Radioscopic Visualization of Bubbly Flows Injected Through a Top Submerged Lance into a Liquid Metal / M. Akashi et al. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2020. Vol. 51. Pp. 124-139. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01720-y>.
- [17] Obiso D., Reuter M., Richter A. CFD Investigation of Rotational Sloshing Waves in a Top-Submerged-Lance Metal Bath. *Metallurgical and Materials Transactions B.* 2021. Vol. 52. Pp. 2386-2394. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02182-x>.
- [18] Bubble Formation and Surface Sloshing in the TSL Flow with a Viscous Liquid / L. Cao et al. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society.* 2022. Vol. 74. Pp. 4920-4929. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05539-y>.
- [19] Physical Modeling of Slag Foaming in Combined Top and Bottom Blowing Converter / R. Wang et al. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society.* 2022. Vol. 74. Pp. 151-158. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04984-5>.
- [20] Єршомін О. Компенсація теплового розширення труб. URL: <https://aw-therm.com.ua/articles/details/655> (дата звернення: 10.09.2025).
- [21] Vacuum Technology for Magnesium Alloys During Die Casting of Radiators / O. Stalnichenko et al. *Advanced Manufacturing Processes VI : Selected Papers from the 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2024)*, Odesa, Ukraine, 10-13 September 2024. Pp. 220-229. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_20.
- [22] Study of the Laws of Random Fluctuations in the Parameters of Foundry Processes and the Quality of Castings / O. Ponomarenko et al. *Innovations in Mechanical Engineering IV : Conference proceedings*, Prague, Czech Republic, 18-20 June 2025. Pp. 402-411. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1_36.

ENHANCING THE OPERATIONAL SAFETY OF TIP DESIGNS FOR TOP CONVERTER LANCES

Panteikov S.P.

PhD (Engineering), associate professor, Dniprovsky State Technical University, Kamianske, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0385-7603>, e-mail: ser_pant_in@ukr.net

The primary objective of this study is to develop advanced top-blowing devices for the injection of various technological gases (such as oxygen, nitrogen, and others) into the working chambers of oxygen converters used in steel production. These devices are crucial for ensuring operational safety and offer greater durability when compared to conventional designs. Through an extensive review of literature, patent searches, and industrial trials of different lance tip configurations (including both standard tips and those previously developed by the author), an innovative design of a safe lance tip has been developed and proposed for the 250-ton converters at PJSC "Dniprovsky Metallurgical Combine" (Kamianske city, Ukraine). Along with this design, comprehensive technical documentation for manufacturing the lance device has been prepared. This design is protected by Patent No. 78112 UA. The findings of this research highlight, for the first time, the effectiveness of reducing stress on the external copper welded joint by incorporating specialized reinforcing pins within the lance tip structure. This measure stands as the most efficient and crucial method to improve the safety and lifespan of any top-oxygen lance tip design. The adoption of this new safe lance tip design, as outlined in this study, is expected to greatly enhance the safety of steelmaking processes in converters and to prolong the service life of the lance tips when compared to current designs. One of the key benefits of this innovation is the complete elimination of the risk of large-scale accidents within the workshop caused by the failure of the copper welded joint of the lance tip. This not only addresses safety concerns but also reduces the significant repair costs associated with such failures. Furthermore, the proposed design offers substantial economic advantages by efficiently tackling issues commonly faced in operational converter shops. This work presents a significant advancement in the field of steelmaking, offering both improved safety and cost-effectiveness.

Keywords: reinforcing pin, durability, melt blowing, weld seam, cooling water, emergency situation, blowing device, converter shop, economic effect.

References

- [1] S.K. Gupta, A. Deva, S. Toppo, S. Srikant, and K.K. Keshari, "Failure Analysis of Basic Oxygen

Furnace Lance Head Assembly," *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 3721-3729, 2021. doi: [10.1007/s12540-020-00712-x](https://doi.org/10.1007/s12540-020-00712-x).

- [2] S.-M. Lim, S.-S. Park, and K.-W. Yi, "Extension of Lance Life by Change of Height of Lances in the Smelting Furnace of Mitsubishi Process," *Metals and Materials International*, vol. 27, pp. 3721-3729, 2021. doi: [10.1007/s12540-020-00712-x](https://doi.org/10.1007/s12540-020-00712-x).
- [3] S.P. Panteikov, "Stages of Improvement for Welded Structures with Five-Nozzle Lance Heads in the Converter Shop of Public Joint Stock Company «Dneprovsky Metallurgical Combine»,» *Steel in Translation*, vol. 50, pp. 756-761, 2020. doi: [10.3103/S0967091220110108](https://doi.org/10.3103/S0967091220110108).
- [4] O.A. Zhul'kovskii, S.P. Panteikov, and I.I. Zhul'kovskaya, "Information-Modeling Forecasting System for Thermal Mode of Top Converter Lance," *Steel in Translation*, vol. 52, pp. 495-502, 2022. doi: [10.3103/S0967091222050138](https://doi.org/10.3103/S0967091222050138).
- [5] O. Zhulkovskiyi, S. Panteikov, I. Zhulkovska, M. Kashcheev, and E. Leshchenko, "Heat Transfer Calculation for Numerical Simulation of Thermal Mode of Slag-Splashing Lance in the Forecasting System," in Selected Papers of 18th Int. Conf. «Mathematical Modeling and Simulation of Systems», Chernihiv, Ukraine, November 13-15, 2023, vol. 1091, pp. 70-81. doi: [10.1007/978-3-031-67348-1_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_6).
- [6] P. Dong, S. Zheng, and M. Zhu, "Numerical Study on Gas-Metal-Slag Interaction with Single-Flow Post-combustion Oxygen Lance in the Steelmaking Process of a Top-Blown Converter," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 74, pp. 509-1520, 2022. doi: [10.1007/s11837-021-05147-2](https://doi.org/10.1007/s11837-021-05147-2).
- [7] E.V. Protopopov, M.V. Temlyantsev, N.F. Yakushevich, V.V. Solonenko, and S.O. Safonov, "Peculiarities of Exhaust Gases Afterburning in Converter with Application of Two-Tier Oxygen Lance Blowing," *Steel in Translation*, vol. 51, pp. 872-878, 2021. doi: [10.3103/S0967091221120093](https://doi.org/10.3103/S0967091221120093).
- [8] Q. Gao, W. Wu, J.-G. Zhi, B. Zhang, and X.-C. Li, "Effect of a self-rotating oxygen lance system on mass transfer between slag and molten steel," *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 28, pp. 152-159, 2021. doi: [10.1007/s42243-020-00515-9](https://doi.org/10.1007/s42243-020-00515-9).
- [9] C. Feng et al., "Effects of Nozzle Layout and Parameters on the Jet Characteristics of a CO₂ + O₂ Mixed Oxygen Lance," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, pp. 425-439, 2020. doi: [10.1007/s11663-020-02048-8](https://doi.org/10.1007/s11663-020-02048-8).
- [10] W. Li, R. Zhu, C. Feng, G. Wei, and B. Han, "Influence of Carrier Gas of Converter Oxygen Lance on Smooth Distribution of O₂-CO₂-CaO Mixed Jet," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 73, pp. 3027-3035, 2020. doi: [10.1007/s12666-020-02105-5](https://doi.org/10.1007/s12666-020-02105-5).
- [11] C. Feng et al., "Effect of Nozzle Exit Wear on the Fluid Flow Characteristics of Supersonic Oxygen Lance," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 51, pp. 187-199, 2020. doi: [10.1007/s11663-019-01722-w](https://doi.org/10.1007/s11663-019-01722-w).
- [12] Y. Zhang, C. Zhang, Y. Han, B. Wang, L. Zhu, and Q. Zhang, "Jet Characteristics of a High-Mach-Number Oxygen-Lance Nozzle Under High Oxygen Pressure," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, pp. 4070-4081, 2021. doi: [10.1007/s11663-021-02325-0](https://doi.org/10.1007/s11663-021-02325-0).
- [13] M. Li, L. Shao, Q. Li, and Z. Zou, "A Numerical Study on Blowing Characteristics of a Dynamic Free Oxygen Lance Converter for Hot Metal Dephosphorization Technology Using a Coupled VOF-SMM Method," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, pp. 2026-2037, 2021. doi: [10.1007/s11663-021-02155-0](https://doi.org/10.1007/s11663-021-02155-0).
- [14] D. Obiso et al., "CFD Modeling and Experimental Validation of Top-Submerged-Lance Gas Injection in Liquid Metal," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 51, pp. 1509-1525, 2020. doi: [10.1007/s11663-020-01864-2](https://doi.org/10.1007/s11663-020-01864-2).
- [15] A. Kandalam, M. Stelter, M. Reinmüller, M.A. Reuter, and A. Charitos, "Determining the Bubble Dynamics of a Top Submerged Lance Smelter," in Proc. of the Resource Awareness of Systems and Society / Recycling & Waste Symposium: Developing Tomorrow's Technical Cycles, Anaheim, USA, 27 February – 3 March, 2022, vol. i, pp. 541-551. doi: [10.1007/978-3-030-92563-5_57](https://doi.org/10.1007/978-3-030-92563-5_57).
- [16] M. Akashi, O. Keplinger, N. Shevchenko, S. Anders, M.A. Reuter, and S. Eckert, "X-ray Radioscopic Visualization of Bubbly Flows Injected Through a Top Submerged Lance into a Liquid Metal," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 51, pp. 124-139, 2020. doi: [10.1007/s11663-019-01720-y](https://doi.org/10.1007/s11663-019-01720-y).
- [17] D. Obiso, M. Reuter, and A. Richter, "CFD Investigation of Rotational Sloshing Waves in a Top-Submerged-Lance Metal Bath," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, pp. 2386-2394, 2021. doi: [10.1007/s11663-021-02182-x](https://doi.org/10.1007/s11663-021-02182-x).
- [18] L. Cao, Y. Wang, Z. Cheng, H. Wang, and G. Li, "Bubble Formation and Surface Sloshing in the TSL Flow with a Viscous Liquid," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 74, pp. 4920-4929, 2022. doi: [10.1007/s11837-022-05539-y](https://doi.org/10.1007/s11837-022-05539-y).
- [19] R. Wang, B. Zhang, C. Hu, C. Liu, and M. Jiang, "Physical Modeling of Slag Foaming in Combined Top and Bottom Blowing Converter," *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 74, pp. 151-158, 2022. doi: [10.1007/s11837-021-04984-5](https://doi.org/10.1007/s11837-021-04984-5).
- [20] O. Yeromin, Компенсація теплового розширення труб (Compensation for thermal expansion of pipes). [Online]. Available: <https://aw-therm.com.ua/articles/details/655>. Accessed on: September 10, 2025.
- [21] O. Stalnichenko, T. Lysenko, O. Ponomarenko, K. Kreitser, and E. Kozishkurt, "Vacuum Technology for Magnesium Alloys During Die Casting of Radiators," in Selected Papers from the 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing

Processes (InterPartner-2024) «Advanced Manufacturing Processes VI», Odesa, Ukraine, Sept. 10-13, 2024, pp. 220-229. doi: 10.1007/978-3-031-82746-4_20.

proceedings «Innovations in Mechanical Engineering IV», Prague, Czech Republic, June 18-20, 2025, pp. 402-411. doi: 10.1007/978-3-031-93554-1_36.

[22] О. Ponomarenko, N. Yevtushenko, О. Akimov, V. Vasilets, and H. Lopes, “Study of the Laws of Random Fluctuations in the Parameters of Foundry Processes and the Quality of Castings,” in Conference

Стаття надійшла 15.11.2025
Стаття прийнята 27.11.2025
Стаття опублікована 29.12.2025

Цитуйте цю статтю як: Пантейков С. П. Підвищення безпеки експлуатації конструкцій головок для верхніх конвертерних фурм. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 52. С. 114-123. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.52.2025.351012>.*