

DOI: 10.31319/2519-2884.44.2024.2

УДК 669.162.463.2

Єськов Д.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: esdenn1@gmail.com
Сігарьов Є.М., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-8229-7877, e-mail: en_sigarev@ua.fm
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Eskov Denis, Postgraduate Student

Sigarev Eevhen, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief of the Department of Metallurgy,
ORCID: 0000-0002-8229-7877, e-mail: en_sigarev@ua.fm
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ПАРАМЕТРИ ВДУВАННЯ РЕАГЕНТІВ ТА ЗАКУПОРЮВАННЯ Т-ПОДІБНИХ НАКОНЕЧНИКІВ ФУРМ

Метою роботи є дослідження причин та механізму закупорювання сопел Т-подібних наконечників заглибних фурм, що використовують для інжекції порошкоподібних реагентів-десульфураторів вглиб ковшової ванни. Показано, що інтенсивність засмічення та остаточного закупорювання сопел заглибних фурм по ходу вдування реагентів залежать від зміни параметрів операції, у тому числі режиму вдування, створення умов для гідродинамічних зворотних ударів, зміни пилового навантаження, коливань тиску у системі та умов охолодження наконечника. Досліджено макроструктуру засмічень та запропоновано механізм їх накопичення у робочому просторі сопла Т-подібного наконечника. Запропоновані заходи для попередження закупорювання сопел наконечника фурми.

Ключові слова: фурма; наконечник; сопло; пилове навантаження; газогідродинаміка; режим вдування; зворотний удар.

The purpose of the work is to investigate causes and mechanism of clogging nozzles T-shaped tips submersible lances, which are used for injecting powdered desulfurizing reagents deep into the ladle bath. It is shown that the intensity clogging and final clogging of the nozzles submersible lance during the injection of reagents depends on the change parameters operation, including injection mode, creation of conditions for hydrodynamic backlashes, changes in the dust load, pressure fluctuations in system, and cooling conditions of the tip. The macrostructure of clogging was studied and mechanism of their accumulation in the working space of the nozzle T-tip was proposed. Proposed measures to prevent clogging of nozzles gun tip.

Keywords: lance; tip; nozzle; dust load; gas-hydrodynamics; blowing mode; blowback.

Постановка проблеми

Вдування порошкоподібних сумішей реагентів-десульфураторів углиб металеві ванни в ківші крізь сопла наконечників або канали заглибних фурм різних конструкцій [1—3] залишається найбільш розповсюдженим технологічним варіантом ковшової десульфуратії переробного чавуну.

Підтримання постійного рівня витрат газу-носію та рівномірності надходження реагентів у розплав, визначена глибина їх проникнення та розосередження є основою стабільності роботи системи й високих техніко-економічних показників операції. Коливання тиску та недостатні витрати газу-носію сприяють закупорюванню сопел наконечника фурми. З іншого боку, надмірні витрати газу-носію сприяють виникненню викидів металу із ківшу, зниженню ступеня засвоєння реагентів на сірку, переохолодженню ванни та т. ін. Крім того значна глибина вдування реагентів, особливо у великовантажних ківшах, потребує високого тиску для їх подачі в металеву ванну. Так, наприклад, вдування реагентів у металеву ванну на глибину > 3 м у 230-т заливальному ківші здійснюється в умовах феростатичного тиску на рівні 0,78 бар/м глибини,

потребує збільшення швидкості газопорошкового потоку (ГП) та призводить до додаткових витрат тепла (до 60 % від усіх теплових витрат). При вході у фурму тиск газу-носію складає 0,5—0,7 МПа.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Режим витоку газових струменів із каналу заглибної фурми у системі «газ-розплав» є визначальним для структури та гідродинаміки ванни, умов формування барботажних зон та зон виходу газових об'ємів на поверхню ванни та т. ін. Розрізняють [4] два основних принципово різних режими: з утворенням дискретних газових об'ємів (т. зв. пульсаційний, бульбашковий, тупикового стрижня, барботування — *bubbling* та т. ін.) та з утворенням сталого струменевого потоку (режим вприскування — *fetting*, струменевий, компактного струменю та т. ін.).

За даними [4], при використанні неасимілюємого газу пульсаційний режим реалізується при турбулентній течії газу на зрізі сопла діаметром d_c у діапазоні тисків $(1,03—1,1) \cdot 10^5 \leq P_0 \leq (1,3—1,5) \cdot 10^5$ Па. Гідродинамічна нестійкість газового струменю у рідкій ванні призводить до періодичних пульсацій потоку з частотою 15—25 Гц, що викликає збільшення діаметру потоку на зрізі сопла до $(4—6)d_c$ (у момент утворення «ніжки») й до $(10—15)d_c$ при формуванні пузиря та набіганні останнього на фурму. Струменевий, в залежності від частоти окремих пульсацій потоку поділяють на перехідний, режим поодиноких зворотних ударів та «безударного витоку». У випадку подальшої інтенсифікації дугтя навколо сопла реалізується ділянка сталого струменевого потоку з кутом розкриття 16—20°, на кінці якого із частотою 10—20 Гц спостерігається руйнування потоку із утворенням дискретних крупних газових об'ємів-каверн та систем мілких пузирів.

Порошкоподібне вапно ($\text{CaO} > 96\%$) відносно тонкого помелу (0—0,2 мм) має погану текучість, газопроникність та схильність до закупорювання транспортувального каналу фурми й потребує підвищених витрат газу-носію. Гранульований магній, завдяки зменшеній густині, володіє незначною швидкістю відкладення, що дозволяє транспортувати його з малими витратами газу-носію. В той же час, обмежена міцність його частинок призводить до ускладнень при транспортуванні внаслідок тертя об стінки трубопроводів та каналів, а також за рахунок стирання гранул між собою. В умовах КЦ ПрАТ «Камет-Сталь» на установці ковшової десульфуратії чавуну фірми «TyssenKrupp Polysius» (надалі УДЧКС) у якості десульфураторів використовують імпортовані флюїдизоване вапно та гранульований магній [5].

Авторами [6] показано, що гідродинаміка утворення газового пузиря на зрізі сопла як при вдуванні порошоків, так і вдуванні чистого газу залишається без змін, навіть при перевищенні густини частинок порошку над густиною рідини. На основі чого зроблені висновки, що такі явища як ерозія сопла, зворотній потік металу у сопло, а також поведінка горизонтальних і вертикально орієнтованих (зверху-вниз) газових і газопорошкових струменів (ГПС) будуть подібними. При цьому, у всіх трьох випадках на виході із сопла утворюються газові оболонки з частотою ~ 10 Гц.

Переважну кількість досліджень з вивченням особливостей вдування порошкоподібних реагентів в залізовуглецеві розплави виконано з використанням ізотермічних моделей, свинцю та його сплавів [7]. Встановлено, що при малій концентрації тонкодисперговані частинки формують газопорошковий потік, що проникає крізь газовий пузир у ванні. При використанні порошоків грубого помелу пузирковий режим є превалюючим [3, 6]. З наведених у [7] діаграм режимів для реагентів на основі вапна та магнію (рис. 4 [7], с. 48) витікає, що в умовах УДЧКС тонкодисперговане вапно буде вдуватись у розплав чавуну у струменевому режимі, тоді як гранульований магній — у пузирковому. Пузирковий режим сприятиме утворенню настилів внаслідок затікання розплаву у канал фурми у перервах між виходом пузирів.

При малих швидкостях газу-носію (коли число Маха $M < 0,05$), тверді частинки не проникають крізь границю розділу пузиря та розплаву [7]. При $0,03 < M < 1,0$ реалізуються пузирковий або струменевий режими витоку, а при збільшенні швидкості до $0,3 < M < 1,0$ вдування навіть крупних частинок призводить до формування струменя поблизу сопла, з наступним формуванням пузирів. При збільшенні ефективності зчеплення газу з більш щільною фазою, наприклад з тонкодиспергованими частинками вапна, імпульс підвищується і для виникнення струменевого режиму достатньо невеликих швидкостей газу.

Встановлено також [3, 7], що у випадках використання нахилених або Y-подібних фурм, навіть при високій концентрації тонкодиспергованих порошків у газі, на зрізі сопла формується пазир. При цьому порошкоподібний матеріал сегрегуються у нижній частині сопла, а у верхній знаходиться газ та окремі тверді частинки. Як наслідок, у верхньої частини сопла можуть формуватися газові пазирі, а поблизу нижньої можливе формування ГПС (рис. 1, а). При використанні Т-подібних наконечників створюються умови для формування газопорошкового струменя за відомими закономірностями й класичною структурою (рис. 1, б).

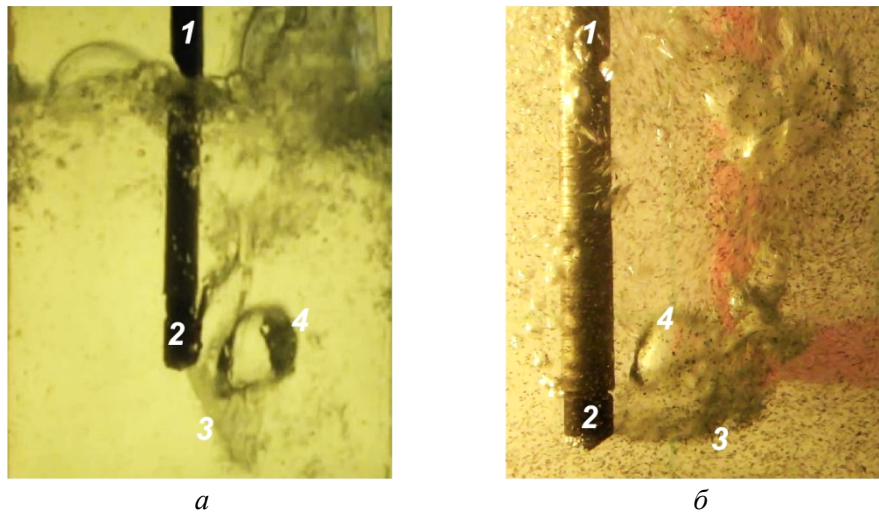


Рис. 1. Формування газопорошкового струменя при використанні наконечників заглибленої фурми з кутом нахилу сопел 45 град (а) та Т-подібного при засміченні одного із сопел (б) з відділенням газового пазиря від газопорошкового потоку: 1 — фурма; 2 — наконечник; 3 — порошковий струмінь; 4 — газовий пазир

При відділенні газового пазиря (рис. 1) створюються умови для ударного заміщення об'єму хвилею розплаву (зворотний удар). Процес супроводжується потужними турбулентними вихорами газорідного середовища та затіканням металу у сопло. Подібний барботажний

режим продувки виникає за умови $Fr' < 2500$, що розраховують за виразом $Fr' = \frac{\rho_{ГП}}{\rho_{М}} \frac{V_{стр}^2}{g \cdot d_c}$,

де $\rho_{ГП}$ та $\rho_{М}$ — густина газопорошкового струменя та металу, відповідно, кг/м^3 ; $V_{стр}$ — швидкість струменя на зрізі сопла, м/с ; d_c — внутрішній діаметр сопла, м . При $Fr' > 2500$, у свою чергу, забезпечується перехід до струменевого режиму продувки ванни.

Розрахунками А.Ф. Шевченка для прямопотокових фурм показано [1], що при вихідному діаметрі труби 40 мм та 35—65 $\text{м}^3/\text{год}$ газу-носія швидкість витoku останнього 8—15 м/с (пазирковий режим). У цьому режимі при відриванні пазиря вихід труби на певний час «захлопується» металом, який наморожується на стінки труби з формуванням діафрагми з отвором, діаметр якого поетапно зменшується (вже через 5 хв. продувки діаметр отвору зменшується до 2—3 мм). До основних причин закупорювання сопел авторами [8] віднесені наявність крупних частинок гранульованого Са у суміші та недостатня швидкість частинок в момент проходження сопла, що призводить до розплавлення останніх в фурмі.

Поряд зі зміною тиску у системі нагрівання газу-носія та ГП може суттєво впливати на швидкість ГПС. Через складнощі прямого вимірювання практично відсутні експериментальні дані про нагрівання ГП у заглибній фурмі. Наявні дані мають суперечливий характер. Так, на підставі отриманих даних авторами [1] зроблені висновки про збереження твердого стану частинками Mg на виході із каналу сопел й під час прольоту крізь газову порожнину у прифурменній зоні із подальшим їх плавленням та випарюванням в об'ємі розплаву. В таких умовах може

відбуватись утворення та схлопування каверн від занурених частинок магнію та інтенсивного випарювання магнію зі створенням умов для забризкування й заростання вихідного отвору каналу фурми. З використанням одновимірної моделі двофазового нагрівання *G. Igons* розраховано [9], що у промислових умовах температура газопорошкової суміші (з CaC_2 та азотом або з CO_2 у якості газу-носія) на виході із фурми повинна бути менше 500°C . Крім того *G. Igons* визначено [9], що закупорювання каналу фурми при введенні частинок SiO_2 у рідкий свинець відбувалося у барботажному режимі, коли внутрішня температура фурми падала нижче за температуру ліквідусу свинцю. Згідно з даними [10] газ-носієм нагрівається до 307°C при досягненні торця фурми, тоді як частинки Mg на виході з фурми мають температуру 31°C . Ступінь нагріву заглибленої фурми за перетином розраховано авторами раніше [11].

У цілому, процес затікання металевого розплаву у сопло визначається в основному швидкістю витоку газу, змочуваністю кромки сопла, його орієнтацією, густиною розплаву та пиловим навантаженням ГПС. Для ГПС глибина проникнення металу у сопло дещо менше, ніж для газового струменя, й зменшується пропорційно зменшенню розміру твердих частинок у суміші.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи, викладеної нижче, є вирішення наступних задач:

- виконати аналіз можливих причин закупорювання сопел Т-подібного наконечника в умовах проведення ківшової десульфурзації чавуну на УДЧКС на основі досліджень макроструктури засмічень закупореного сопла Т-подібного наконечника;
- проаналізувати, в якій мірі зміна пилового навантаження газопорошкового потоку перед соплом Т-подібного наконечника впливає на умови формування газопорошкового струменя й створення умов для закупорювання сопла.

Виклад основного матеріалу

Закупорювання одного із сопел Т-подібного наконечника фурми призводить до суттєвих порушень симетричності гідродинаміки ковшової ванни, збільшується небезпека руйнування з'єднувальних шлангів, знижується продуктивність установки десульфурзації та т. ін. Дослідженнями із використанням скануючого мікроскопу (SEM) та спектроскопії (EDS) структури та складу «засмічень» каналу Т-подібного наконечника зроблено встановлено, що зовнішній шар засмічень сформований із розплаву заліза, а внутрішній являє собою осад, основними компонентами якого є CaO , MgO та Na_2O . На основі аналізу розподілу елементів у осаді, % max/min: 47,83/57,23 O; 0,89/15,6 Na_2O ; 0,93/34,7 Mg; 0,72/43,11 Ca авторами роботи [12] зроблені висновки, що причинами закупорювання сопла є поганий потік та відкладення десульфураторів.

За даними досліджень Шевченко А.Ф. зі співавторами [1] характер закупорювання зрізу каналу заглиблених фурм при вдуванні Mg у чавун також вказував на недостатню енергію газопорошкового потоку; наявність голкоподібних частинок Mg (довжиною до 10 мм) погіршував рівномірність його надходження; безпосередній контакт рідкого чавуну й каналу фурми та недостатній його діаметр обумовлювали підвищення гідродинамічного опору. Газопорошковий потік не мав достатньої «жорсткості», а пульсації у зоні витоку від барботажу ванни сприяли швидкому закупорюванню каналу фурми.

На відміну від припущень [1] стосовно віднесення магніймістячого потоку з об'ємною концентрацією твердої фази у газовій $< 1,6\%$ до газового струменя, у даній роботі ГПС, що сформовано із гранульованого магнію ($Q_{\text{Mg}} = 17$ кг/хв) та вапна ($Q_{\text{в}} = 42$ кг/хв) в умовах УДЧКС, віднесли до категорії газопорошкових. Згідно зі специфікацією «ThyssenKrupp Polysius» (Німеччина) розміри зерен флюїдизованого вапна та гранульованого магнію (Mg97), що вдувають крізь два сопла внутрішнім діаметром 0,012 м Т-подібного наконечника (рис. 2, в) повинні складати < 1000 мкм ($> 95\%$ розміром < 200 мкм) та 200—1000 мкм відповідно. Вдування суміші вказаних вище реагентів здійснюють у потоці газу-носія (азоту) з питомою витратою, у основний період операції, на рівні 54—56 $\text{nm}^3/\text{год}$ (< 1 $\text{nm}^3/\text{хв}$).

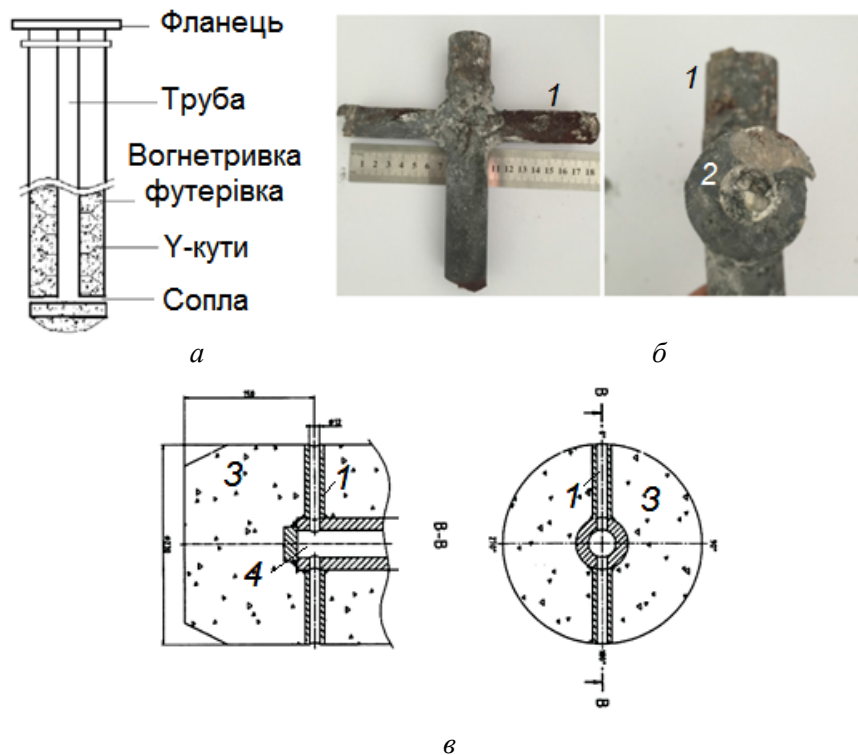


Рис. 2. Схема конструкції Т-подібної фурми компанії «Beijing Shougang Co., ltd» (Китай) (а) й вигляд закупореного сопла (б) [12] та Т-подібного наконечника (в) заглибної фурми УДЧКС. 1 — сопло; 2 — засмічення; 3 — вогнетривка футерівка фурми; 4 — антитурбулентна порожнина

Результати розрахунків фактичного пилового навантаження газопорошкового потоку та критичної густини газопорошкового потоку перед соплами Т-подібного наконечника, виконані за методикою Меджибожського М. Я. [13] приведені на рис. 3.

Таким чином, фактичне пилове навантаження (ФПН) газопорошкового потоку з частинками вапна та магнію у прийнятих на УДЧКС умовах ($Fr' > 2500$) в цілому відповідає критичній густині потоку (крива 2, рис. 3, б). При закупорюванні одного із сопел наконечника або зменшенні питомих витрат газу-носія ФПН суттєво змінюється (криві 3, рис. 3, а, б). Запобігання умов перевищення ФПН величин критичної густини потоку сприятиме збільшення витрат газу-носія до 90—120 $\text{nm}^3/\text{год}$ (криві 2 та 5, рис. 3, а).

Дослідження макроструктури засмічення, вилученого із сопла Т-подібного наконечника УДЧКС (рис. 4), дозволило уточнити можливий механізм процесу закупорювання. Утворення металевої настилі на зрізі сопла (3, рис. 4) у сукупності зі зростанням пилового навантаження потоку вище критичних величин густини потоку (рис. 3), призводить до переходу у пузирковий режим продувки та навіть до зниження витрати газопорошкової суміші крізь сопло до нуля.

У цей період газ-носії (із зниженою витратою) продовжує виходити крізь сопло; через певний час настіль розплавляється і процес повторюється. У моменти відриву пузирів виникають сприятливі умови для зворотних ударів та проникнення розплаву чавуну у сопло. Запропонована [14] для визначення максимальної глибини проникнення розплаву чавуну в сопло наконечника фурми залежність має вигляд:

$$l_{max} = 4,44 \cdot 10^{-3} d_c Ar_x^{1/2}, \quad (1)$$

де $Ar_x = \rho_f^3 V_a^2 / (g \rho_p^3 d_c)$. Згідно із виконаними за виразом (1) розрахунками для умов УДЧКС глибина проникнення розплаву у сопло складає $0,193 \cdot 10^{-3}$ м.

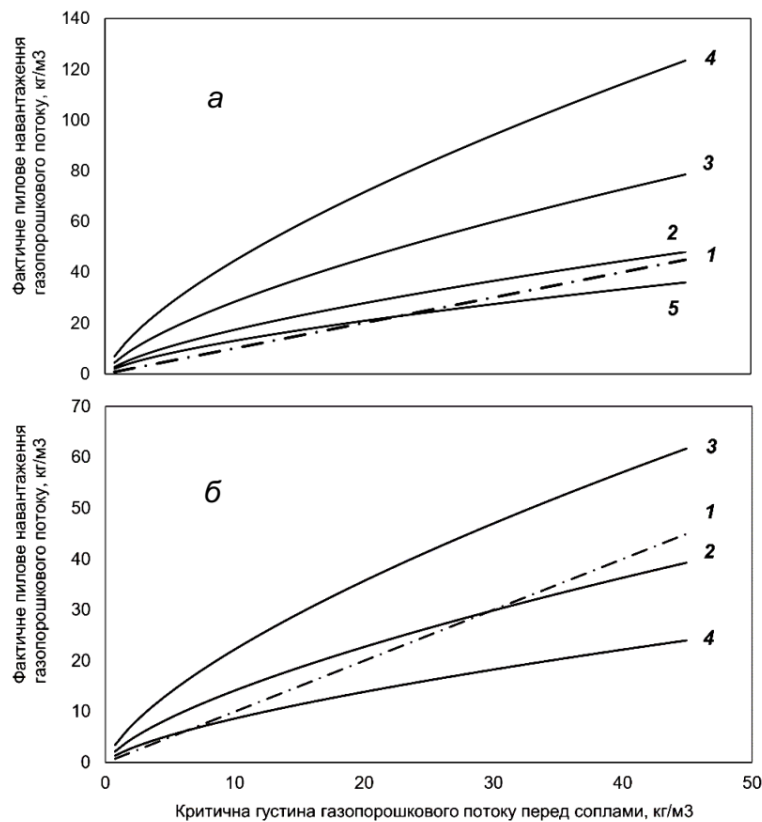


Рис. 3. Відповідність фактичного пилового навантаження (ФПН) газопорошкового потоку перед соплами Т-подібного наконечника (рис. 2, в) розрахунковій критичній густині потоку при закупорюванні одного із сопел (а) та штатній роботі наконечника (б) в умовах зміни питомих витрат (ПВ) газу-носія: а) 1 — критична густина газопорошкового потоку перед соплами при ПВ=55 $\text{нм}^3/\text{год}$; 2 — ФПН при ПВ=90 $\text{нм}^3/\text{год}$; 3 — ФПН при ПВ=55 $\text{нм}^3/\text{год}$; 4 — ФПН при ПВ=35 $\text{нм}^3/\text{год}$; 5 — ФПН при ПВ=120 $\text{нм}^3/\text{год}$; б) 1 — критична густина газопорошкового потоку перед соплами при ПВ=55 $\text{нм}^3/\text{год}$; 2 — ФПН при ПВ=55 $\text{нм}^3/\text{год}$ (штатні умови); 3 — ФПН при ПВ=35 $\text{нм}^3/\text{год}$; 4 — ФПН при ПВ=90 $\text{нм}^3/\text{год}$

У той же час, фактично встановлена глибина ($l_{\text{зат}}$) затікання металу у сопло (рис. 4) довжиною ($l_{\text{сопл}}$) складає у різних перетинах від $48 \cdot 10^{-3}$ до $61 \cdot 10^{-3}$ м. Співвідношення $l_{\text{зат}}/l_{\text{сопл}} = 0,53—0,67$ (53—67 % від загальної довжини сопла).

Встановлено, що внаслідок закупорювання каналу сопла утворюються своєрідні агломерати (рис. 5), що складаються із деформованих під впливом температури та тиску гранул магнію та частинок вапна й сягають розмірів у 700—1200 $\mu\text{м}$ та 330—1580 $\mu\text{м}$ відповідно.

Для макроструктури досліджених зразків засмічень, вилучених із закупореного сопла Т-подібного наконечника фурми УДЧКС, характерними є наступні особливості:

- наявність шарів товщиною 0,1—0,4 мм кожного поетапно намороженого чавуну на внутрішніх стінках сопла;
- довжина зони, закупореної агломератами із вапна, складає 7,8 % довжини сопла, конгломератами із частинок магнію — 12 % відповідно;
- на зрізі сопла утворено настіль дзвіноподібної форми з кутом розкриття, що відповідає куту розкриття ГП (5, 6 рис. 4, б), що складається із краплі намороженого чавуну й суміші (агломератів) із частинок вапна та деформованого магнію.

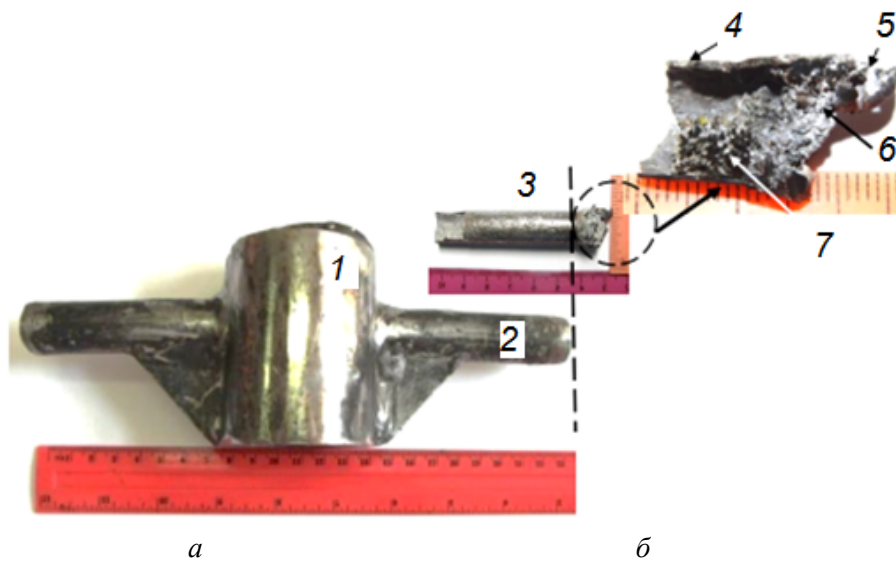


Рис. 4. Вигляд Т-подібного наконечника заглибної фурми УДЧКС (а) та засмічення (б) вилученого із закупореного сопла: 1 — Т-подібний наконечник; 2 — сопло; 3 — металевий настиль, що вилучено із робочого простору сопла; 4 — поетапно наморожені на стінки сопла шари чавуну; 5 — крапля намороженого чавуну (настиль); 6 — шар із частинок вапна; 7 — шар із гранул магнію

Нагрівання ГП може відбуватись у підфурменній зоні, у зонах циркуляції та барботажу. Згідно з розрахунками Лернера Т.В. [15] газ-носії у розплаві нагрівається за рахунок конвективного теплообміну до температури розплаву за декілька мс. Для частинок діаметром 200 мкм, що безпосередньо контактують із розплавом з температурою 1400—1600 °С за умов теплопередачі за рахунок теплопровідності, тривалість нагріву складає 10^{-3} — 10^{-1} с. Згідно з [1] для частинок Mg (діам. 1,6 мм) їх температура в районі оголовку фурми підвищується не більш ніж на 10 °С. Тривалість нагріву та плавлення частинок при потраплянні у розплав чавуну на глибинах від 1 до 4 м не перевищує 0,005 с ($5 \cdot 10^{-3}$ с).

Таким чином, за умов збереження гранулами Mg на зрізі сопел твердого стану, колапсі газових пузирів та інтенсивному випарюванні Mg створюються умови для забризкування каналу сопел металом. Встановлені особливості структури та складу закупорювання каналу підтвердили наявність залишків розплаву чавуну на стінках сопел (рис. 4, б). Під час зворотних ударів металевий розплав частково затікає у сопло, стінки якого мають суттєво нижчу температуру і є холодною підкладкою для кристалізації металу. Згідно з [16] товщину намороженої металеві півки можна визначити за виразом $\delta = k\sqrt{\tau}$, де k — коефіцієнт кристалізації, мм/с^{0.5} (для Fe-C розплавів $k = 2,7$ — $4,2 \cdot 10^{-3}$ мм/с^{0.5}). Розрахунок тривалості утворення металевого шару у соплі (рис. 4, а) товщиною 0,1—0,4 мм показав, що τ становить 0,15—0,38 с. З певним припущенням таку тривалість можна вважати часом перебування металевого розплаву у робочому просторі сопла у періоди зворотних ударів.

Умовами запобігання вказаних явищ автори [1] вважають досягнення потоком на виході з каналу швидкості понад 60—70 м/с, а також використання наконечників з вигином каналу на кут 30—45° до вертикальної осі фурми (при підвищених до 115—150 нм³/год. витратах газу-носію). Розрахована нами з використанням запропонованого у [13] рівняння $\tau_{\text{пл}} = Fo \cdot r^2 / a$, де $a = \lambda / C_p \cdot \rho_{Mg}$ ($\lambda = 300$ Вт/м⁰С; $C_p = 1200$ Дж/кг⁰С), тривалість плавлення частинок Mg розміром 0,6—1,6 мм за умов безпосереднього контакту з розплавом чавуну (з температурою 1300 °С) у робочому просторі сопла складає $0,096$ — $6,82 \cdot 10^{-3}$ с. Після потрапляння у робочий простір наконечника гранули магнію пролітають крізь сопло за $1,95 \cdot 10^{-3}$ с, але при контакті з металом, що потрапив у сопло, мають час для нагріву. Ймовірно, це сприяє утворенню конгломератів із гранул магнію у приграничній зоні. Запобіжником повного розплавлення гранул магнію слугує охолоджуючий ефект газу-носія.

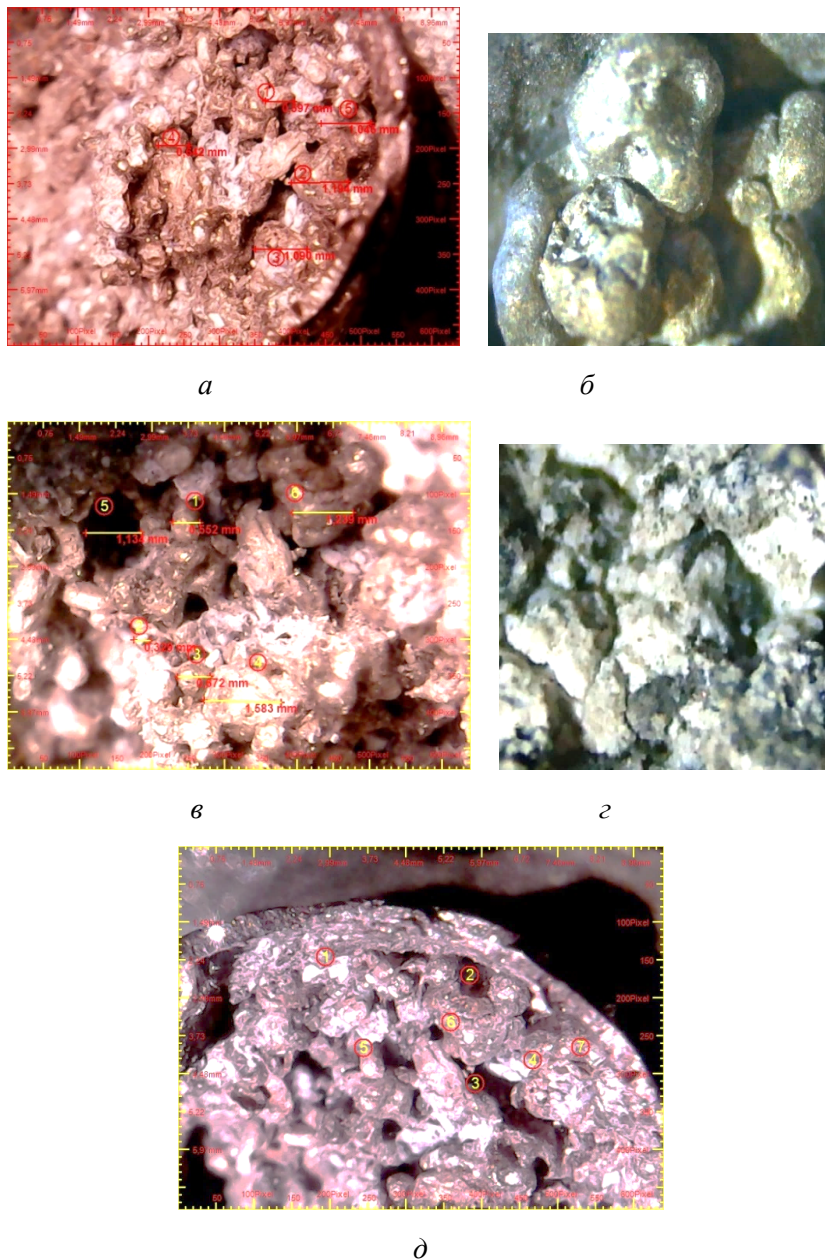


Рис. 5. Макроструктура засмічень із частинок магнезію (розміром 0,7—1,2 мм) (а) у нижній частині та із вапна (0,33—1,58 мм) (в) у верхній частині сопла наконечника (рис. 4), суміш агрегованих частинок магнезію 5, 6, 7 та вапна 1, 4 з каналами 2, 3 від проникнення газу-носіїю (д) та вигляд деформованих частинок магнезію (б) та агломератів вапна (в) у складі засмічень (x25)

У цілому, механізм закупорювання каналу сопла Т-подібного наконечника можна представити наступним:

- перекриття зрізу сопла рідким металом внаслідок виникнення пульсацій у щільній фазі системи «газ-носіїю — суміш реагентів» внаслідок відхилень від проєктних значень, перепадів тиску та зворотних ударів з досягненням критичної швидкості витоку ГП при перепадах тиску;
- затікання рідкого металу у робочій простір сопла на відстань у 40—70 % від його довжини з заморожуванням металевого шару на стінках та наступним витісненням залишків розплаву під тиском газопорошкового потоку у ковшову ванну;

- частковий нагрів частинок магнію та вапна при безпосередньому контакті з рідким металом, що затік у сопло;

- накопичення, при перекритті зрізу сопла, частинок вапна та магнію на різних за перевином сопла висотах у приграничній зоні виходу ГП, у тому числі внаслідок збільшення шоруватості поверхні та ускладнень з виходом у ванну крізь пористу «пробку»; агломеровані частинки вапна розміщуються переважно у верхніх горизонтах, конгломерати магнію — у нижній частині сопла відповідно.

Висновки

Запобігти відкладенню та накопиченню порошкоподібних реагентів у нижній частині робочого простору Т-подібного наконечника та у соплах можливо як за рахунок підтримання високих фіксованих швидкостей витоку газопорошкового потоку збільшенням тиску, так і шляхом удосконалення конфігурації внутрішнього робочого простору з метою зменшення втрат енергії потоку на виході із сопел й запобігання наморожуванню металу за рахунок стабілізації струменевого режиму витоку. Доцільним є перехід до застосування у конструкції Т-подібних наконечників постійних або змінних сопел з оптимізованими під існуючі на УДЧ ПрАТ «Камет-Сталь» умови проведення ківшової десульфурації геометричними розмірами, виготовлених з вуглецьвміщуючих матеріалів, що відрізняються поганою змочуваністю рідким чавуном. Для попередження закупорювання сопла може бути рекомендовано також підвищення витрат газу-носія на 90—120 % від робочих значень у початковий та кінцевий періоди обробки чавуну.

Список використаної літератури

1. Шевченко А.П., Большаков В.І., Башмаков О.М. Технологія та устаткування десульфурації чавуну магнієм у великовантажних ковшах. К.: «Наукова думка», 2011. 207 с.
2. James H. Young, Jr. A comparison of injection technologies utilizing various lance types. VI International symposium for desulphurization of hot metal and steel. (September 14-16, 2000 in Magdeburg). Germany. 2000.
3. Sigarev E.N., Chernyatevich A.G., Chubin K.I. & Zarandiya S.A. Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating. Steel in Translation. 2011. Vol. 41, No 6, pp. 487-491.
4. Сурин В.А., Назаров Ю.Н. Массо- и теплообмен, гидрогазодинамика металлургической ванны. К.: «Техніка», 1994. 352 с.
5. Сігарьов Є.М., Недбайло М.М., Кривцун І.В. Напрямки удосконалення ківшової десульфурації чавуну. Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки). Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2016. Вип. 2(28). С. 3–9.
6. Robertson D.G.C., Conochie D.S., Castillejos A.H. Research on a model of the process of blowing solid particles into liquid metal. 2-nd International conference on injection metallurgy. Lulea, Sweden. 1980, pp.43-65.
7. Irons G.A. Transactions of the Iron and Steel Society, 1984. Vol. 5, pp. 33-45.
8. Marique C. 4th International conference on injection metallurgy. Lulea, Sweden (June 11-13, 1986), pp. 263-279.
9. Farias L.R. & Irons G.A. Metal. Trans. B, 1985. Vol. 16B, pp. 211-225.
10. Sain D.R., Belton G.R. Met. Trans. 1976. Vol. 7. No 2. pp. 235-244.
11. Гуржий Д.О., Сигарев Е.Н., Чубин К.И. Модель тепловой работы системы «ковш-фурма». Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції «Проблеми математичного моделювання» (25-27 травня 2016 року, м. Дніпродзержинськ). Дніпропетровськ: Вид. Біла К.О. 2016. С. 31–34.
12. Wenjun Ma, Haibo Li, Jun Zhang, Yang Cui and Liang Sun. Influence of clogging of a T-shaped desulfurization lance on the flow field in a hot metal ladle. Metall. Res. Technol. 2019. Vol. 116, No 301, pp. 1-7.
13. Порошкообразные материалы в сталеплавильном производстве. М.Я. Меджибожский, В.И. Сельский, В.Е. Купершток и др. Київ: Техніка, 1975. 184 с.

14. Narita T., Matsumoto E., Takehiso M. / *Tetsu to hagane*. 1979. Vol. 65. No 8, pp. 145-148.
15. Lerner T.V. / International conference on injection metallurgy. 1981, pp. 94–118.
16. The length of the zone of plastic deformation and the permissible speed during ingotless rolling / M.Ya. Brovman, V.A. Nikolaev, V.P. Polukhin // *Metals*. 2007. No 1, pp. 44–49.

REAGENTS INJECTION PARAMETERS AND CLOGGING T-SHAPED LANCE

Abstract

The results of a critical analysis of the operating conditions of immersion lances with a T-shaped tip, which are used for deep injection of powdered reagents into iron-carbon melt for the purpose of desulfurization in non-stationary process conditions, are presented. Based on the symbiosis macrostructural analysis debris removed from the clogged nozzle of submersible lance of desulfurization unit PrJSC «Kamet-Stal» converter shop and the comparison calculated and actually obtained data, conclusions were made regarding the main reasons for the blockage of the nozzle outlet lance T-tip with the complete cessation of the flow of reagents. Clogging one of the nozzles leads to a violation symmetry of the hydrodynamics bucket bath and excessive wave formation, intensification of local wear bucket lining, metal emissions and a decrease in the degree assimilation of magnesium into hot metal sulfur. The main causes of nozzle clogging include the transition from a jet to a bubbling regime of gas-powder jet leakage, with the creation of conditions for reverse hydrodynamic shocks and metal flow into the nozzle, exceeding the dust load of the gas-powder flow to supercritical values, formation of agglomerates from reagents in the working space of the nozzle, taking into account thermal load «gas-nozzle» systems. The actual values of the depth penetration of the metal into the nozzle and the reduction of its cross-section, size and location of the agglomerates are established. A mechanism for clogging the nozzle of a T-tip lance and measures for improving the modes of blowing powdery reagents and their mixtures into a ladle bath are proposed.

References

- [1] Shevchenko, A.F., Bolshakov, V.I., Bashmakov, A.M. (2011). *Technologiya ta ustakuvannia desulfuratsii chavunu magniem u velikovantazhnikh kovshah [Technology and equipment for desulfurization of cast iron with magnesium in heavy-duty ladles]*. Kyiv: Scientific opinion [in Ukrainian].
- [2] James H. Young, Jr. (2000). A comparison of injection technologies utilizing various lance types. *VI International symposium for desulphurization of hot metal and steel*. (September 14–16, 2000). Germany. Magdeburg.
- [3] Sigarev, E.N., Chernyatevich, A.G., Chubin, K.I., Zarandiya, S.A. (2011). Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating. *Steel in Trans-lation*. (Vol. 41), 6, 487–491. <https://doi.org/10.3103/S0967091211060155>.
- [4] Surin V.A., Nazarov Yu.M. (1994). *Maso- ta teploobmin, gidrogazodinamika metalurgiynoi vanny [Mass and heat exchange, hydrogas dynamics of a metallurgical bath]*. Kyiv: Technics [in Ukrainian].
- [5] Sigarev, E.M., Nedbaylo, M.M., Krivtsun, I.V. (2016). Napryamky udoskonalennya kovshovoi desulfuratsii chavunu [Directions for improvement of bucket desulfurization of cast iron]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*. Vol. 2(28), 3–9 [in Ukrainian].
- [6] Robertson, D.G.C., Conochie, D.S., Castillejos, A.H. (1980). Research on a model of the process of blowing solid particles into liquid metal. *2-nd International conference on injection metallurgy*. (pp. 43–65). Lulea, Sweden.
- [7] Irons, G.A. (1984). *Transactions of the Iron and Steel Society*. (Vol. 5), 33–45.
- [8] Marique, C. (1986). *4th International conference on injection metallurgy*. (pp. 263–279). Lulea, Sweden (June 11–13, 1986).
- [9] Farias, L.R., Irons, G.A. (1985). *Metal. Trans. B*. (Vol. 16B), 211–225.
- [10] Sain, D.R., Belton, G.R. (1976). *Met. Trans.* (Vol. 7), 2, 235–244.

- [11] Gurzhiy, D.O., Sigarev, E.N., Chubin, K.I. (2016). Model teplovoy raboty sistemy «kovsh–furma» [Model of thermal work of the «ladle–lance» system]. *Materials of the All-Ukrainian Scientific and Methodological Conference «Problems of Mathematical Modeling»*. (pp. 31–34) [in Russian].
- [12] Wenjun, M., Haibo, L., Jun, Zh., Yang, C., Liang, S. (2019). Influence of clogging of a T-shaped desulfurization lance on the flow field in a hot metal ladle. *Metall. Res. Technol.* (Vol. 116), 301, 1–7.
- [13] Medzhibozhskiy, M.Ya., Selskiy, V.I., Kupershtok. (1975). *Poroshkopodibny materialy u staleplavlynomu vyrobnitstvy [Powder materials in steelmaking production]*. Kyiv: Tecnic [in Ukrainian].
- [14] Narita, T., Matsumoto, E., Takehiso, M. (1979). *Tetsu-to-hagane*. (Vol. 65), 8, 145–148.
- [15] Lerner T. V. (1981). *International conference on injection metallurgy*. (pp. 94–118).
- [16] Brovman, M.Ya., Nikolaev, V.A., Polukhin, V.P. (2007). The length of the zone of plastic deformation and the permissible speed during ingotless rolling. *Metals, 1*, 44–49.

Надійшла до редколегії 23.04.2024