

## МЕТАЛУРГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.1

УДК 669.162

**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  
**Матина І.М.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня, e-mail: igor.matyna66@gmail.com  
**Похвалітий А.А.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-9652-767X, e-mail: artemmslp@gmail.com  
**Руденко М.Р.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8016-5221, e-mail: 18rudenko@gmail.com  
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**Yeskov Denis**, Postgraduate Student

**Sigarev Evgen**, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Metalworking of Pressure

**Matina Igor**, Postgraduate Student

**Pokhvalityi Artem**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Metalworking of Pressure

**Rudenko Mykola**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals and Metalworking of Pressure  
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

### УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА СТІЙКІСТЬ ВОГNETРИВКОГО ФУТЕРУВАННЯ ЗАГЛИБНОЇ ФУРМИ

*Метою роботи є дослідження особливостей руйнування вогнетривкого футерування заглибних фурм, призначених для вдування вглиб ковшової ванни порошкоподібних реагентів з метою десульфурзації залізовуглецевих розплавів. Для реалізації поставленої мети використали практичну інформацію з досліджуваного питання та методику ізотермічного моделювання гідрогазодинаміки ковшової ванни із застосуванням варіативних конструкцій наконечників стаціонарних та обертових заглибних фурм.*

**Ключові слова:** ківш; фурма; газ; футерування; шлак; десульфурация.

*The purpose work is to study characteristics destruction of the refractory lining of submersible nozzles intended for blowing powdery reagents deep into the ladle bath for purpose of desulfurization of iron-carbon melts. To realize goal, we used practical information on the researched question and method of isothermal modeling hydrogas dynamics of a bucket bath using variable designs tips of stationary and rotating submersible lances.*

**Keywords:** ladle; lance; gas; lining; slag; desulfurization.

#### Постановка проблеми

Для забезпечення надійної та довготривалої роботи заглибних фурм, що використовують у процесах ковшової десульфурзації чавуну перед конвертерною переробкою, необхідні надійні засоби та відповідні умови подачі порошкоподібних реагентів-десульфураторів крізь сопла наконечника фурми, раціональна схема вогнетривкого футерування заглибної фурми та удосконалення режимів її експлуатації.

Інтенсивність зносу та руйнування вогнетривкого покриття заглибної фурми в основному визначається впливом високих температур ковшової ванни (1280—1360 °C), взаємодією з покривним шлаком, стан та хімічний склад якого безперервно змінюються по ходу операції [1], впливом газометалевих мас, спливаючих вздовж фурми та градієнтом температур у вогнетривкому шарі при тривалих перервах між обробками чавуну. Крім того, умови експлуатації вогнетривкого футерування заглибних фурм, що обертаються навколо вісі, ускладнені виникненням

розвинених зон турбулентності [2] та інтенсифікацією масообмінних процесів на міжфазових границях.

Найбільш сприятливим, з точки зору мінімізації зносу вогнетривкого футерування, вважають спосіб десульфурації чавуну шляхом коінжекції реагентів (на основі сумішей вапна з магнієм,  $\text{CaC}_2$  та ін.) вглиб розплаву [3, 4], як такий, що за певних умов сприяє наближенню складу покривного шлаку до вимог за десульфуруючою здатністю та в'язкістю, при зменшеній, у порівнянні з вдуванням «чистого» магнію [5] або KR-процесом, турбулентності ванни.

До найбільш розповсюдженої на сьогодні у промисловості конструкції наконечника заглибної фурми для вдування порошкоподібних реагентів вглиб ванни відносять Т-подібний, що має 2 циліндричних сопла, розташованих на одній осі у протилежних напрямках.

Механізм та закономірності руйнування футерування фурми в зонах контакту з покривним шлаком в основному досліджені у достатньому ступені. Обсяг відомостей стосовно особливостей руйнування вогнетривкого футерування заглибних фурм у зонах нижче границі «шлак—метал», у тому числі при інтенсифікації перемішування ванни та використанні обертових фурм [6, 7] є обмеженим.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Заглибна фурма являє собою жорстку металоконструкцію з внутрішнім каналом (зі сталеві труби) для транспортування реагентів. До зовнішньої поверхні труби зазвичай приварюється арматура (кути, плоскі та колоподібні прутки тощо) для утримання вогнетривкого футерування. Для футерування використовують неформовані вогнетриви з додаванням сталевих волокон довжиною від 5 до 25 мм (3—5 мас. %), які повинні сприяти підвищенню механічної міцності, стійкості до розтріскування та відшарування. В той же час, згідно з дослідженнями [8], зі збільшенням вмісту волокон у вогнетриві погіршується технологічність, внаслідок окислення збільшується об'ємне розширення та знижується температура плавлення, що призводить до зниження корозійної стійкості та іншим недолікам.

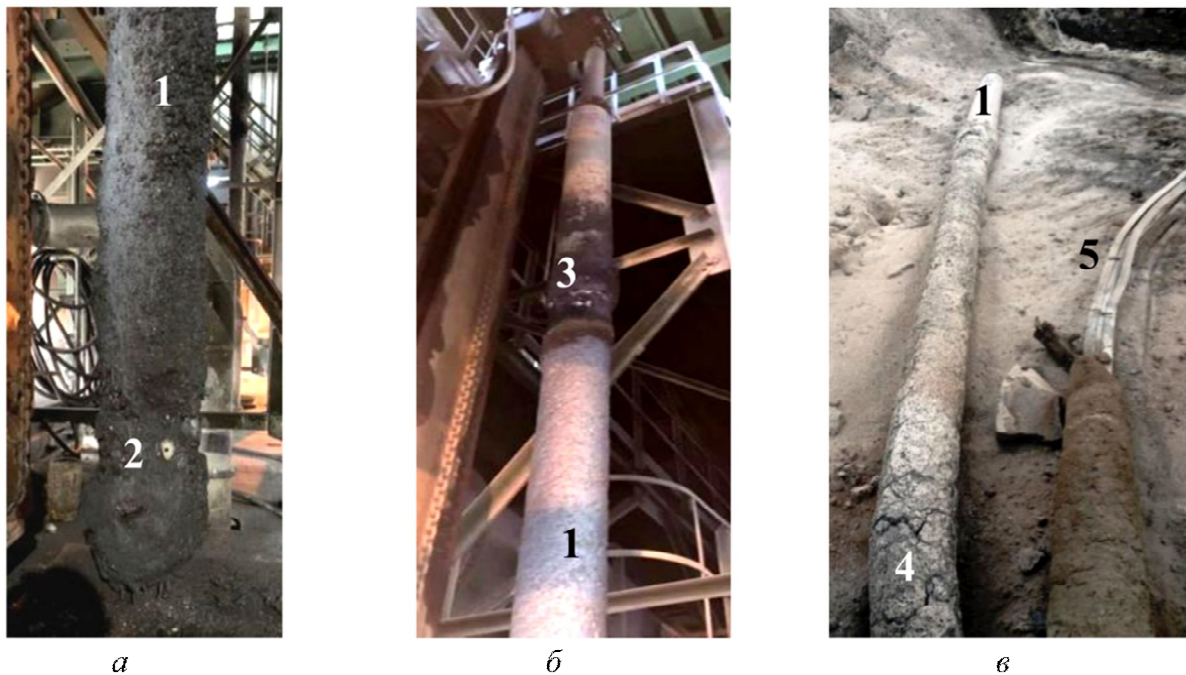
Знос та руйнування вогнетривкого футерування заглибної фурми — процес, що складається з сукупності одночасного або послідовного хімічного зносу (корозії у зони шлакового поясу) і фізико-механічного впливу (ерозії) з утворенням та розвитком тріщин й подальшим відшаруванням. До групи так званих «холодних» тріщин відносять механогенні, кристалізаційні, сушильні, криогенні, утворення яких зумовлено як внутрішніми напруженнями, внаслідок позитивної або негативної зміни об'єму, так і зовнішніми механічними напруженнями. У свою чергу, до «гарячих» тріщин, більш чисельних та різноманітних за генезисом, температурний рівень утворення яких знаходиться в межах від 20 до 1600 °С, відносять термічну та фізико-хімічну. За статистикою, близько 30 % від загального об'єму футерівки фурм виходить з ладу внаслідок формування тріщин та сколів.

У процесі експлуатації вогнетривке футерування фурми піддається механічному впливу рідкого чавуну, багатократному нагріву та охолодженню та ін. У барботажних зонах ванни розвивається сильна турбулентність з підвищеними швидкостями масопереносу та масообміну; пульсації швидкості розплаву можуть сягати до 50 % від середніх значень швидкості у потоці. Форма та структура вогнетривкого футерування при цьому змінюються. З колоподібної гладкої форма робочої поверхні поступово набуває форм із вираженими зонами інтенсивного вимивання робочого шару по довжині стовбура (рис. 1, б, в). Поверхня бетону стає шоркуватою, з попереочними, нерівномірно розташованими тріщинами як на утвореній «глазурі», так і в робочому шарі бетону. Внаслідок нагріву або охолодження зростання тріщин прискорюється, «куски» бетону вимиваються із футерування потоками металу.

Руйнування вогнетривкого бетону внаслідок безпосередньої хімічної взаємодії з розплавом чавуну малоімовірно. Як і забруднення металеві ванни вогнетривками фурми при температурах до 1600 °С. Зазвичай спливаючими до поверхні ванни металевими потоками найбільш інтенсивно розмивається поверхня футерування фурми у зоні, наближеній до максимального газопотоку (рис. 1, а).

Фірмою «Кавасакі сейтецу» (Японія) випробувано декілька варіантів бетонів (з вмістом 46—59 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 24—38 %  $\text{SiO}_2$ , 6—11 %  $\text{SiC}$ ) для футерування заглибних фурм з метою підвищення корозійної стійкості. Встановлено [9], що утворення тріщин відіграє більш значну роль у

руйнуванні футерівки, ніж корозія. Відмічено, що розвиток тріщин обумовлений чергуванням нагрівання і охолодження фурми. У подальшому, рідкий чавун заповнює порожнини тріщин, руйнує металеву конструкцію і фурма обривається. Крім того, при утворенні тріщин легко відшаровується вогнетривка маса. Утворенню тріщин сприяє також те, що несуча труба має підсилюючі елементи для виключення її прогинів. Різна товщина слоїв вогнетривкого бетону в місцях посилення і поза їх межами місць також сприяє розтріскуванню футерівки. Суттєвий вплив і знакоперемінних напружень, що виникають в металевому каркасі фурми в умовах високих температур [10]. Запропоновано вилучити зі складу бетону SiC, з введенням у якість зв'язки глини та використання сталевго дроту для армування.



*Рис. 1.* Вигляд характерних зон руйнування вогнетривкого покриття заглибних фурм з Т-подібним наконечником: а) у області витікання газових та/або газопорошкових струменів; б) область на границі «шлак—метал»; в) стовбур фурми з вигином та сталеві кути для його армування: 1 — вогнетривке покриття фурми; 2 — циліндричне сопло; 3 — зона контакту футерування з покривним шлаком; 4 — тріщини; 5 — кути для армування

Стійкість вогнетривкого футерування фурм підвищується при спокійному протіканні процесу обробки чавуну, оскільки при цьому зменшується ерозійна дія рідкого металу на футерування і знижуються механічні навантаження в результаті зменшення вібрації і трясіння пристроїв. Більш спокійне протікання процесу при кращих результатах десульфурзації і меншій тривалості обробки досягається при використанні багатосоплових обертових фурм.

Для моделювання складних металургійних процесів, розрахунку режимів нагріву й охолодження та їх впливу на футерування, а також визначення ефективності систем продування ковшової ванни широко застосовуються методи розрахункової гідродинаміки (CFD), аналізу методом кінцевих елементів (FEA), ізотермічного та прямого високотемпературного експерименту [11]. З використанням програмного комплексу FactSage, виконуються термодинамічні розрахунки для моделювання шлакових режимів обробки та т. ін. На окрему увагу заслуговує подальше набуття знань щодо енергетичних принципів стабільності тріщин у футеруванні при їхньому виникненні та розвитку. Термодинамічні концепції «сталюї» та «хиткої» рівноваги, «розвитку та гальмування тріщини» пов'язані з механічними напруженнями при роботі футерування фурми у розплаві та її пошкодженнями при термоударах.

Ерозія шару футерівки в області витікання газових та/або газопорошкових струменів (рис. 1, *a*), корозія та відшарування вогнетривкого покриття в області контакту з покривним шлаком (рис. 1, *b*), тенденція до вигину стовбура фурми по границям зон армування (при армуванні сталевими кутами) (рис. 1, *в*), виникнення повздовжніх тріщин при армуванні плоскими (50×6 мм) і колоподібними прутками (Ø 25—32 мм) з нестачею пружності й відшаруванням футерування, зниження інтенсивності руйнування при використанні U-подібних кріплень на прутках діам. 25 мм та ін. свідчать про необхідність подальших досліджень та визначення умов для попередження руйнування вогнетривкого футерування.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою роботи є дослідження особливостей руйнування вогнетривкого футерування заглибних стаціонарних та обертових фурм та визначення умов для підвищення його стійкості.

#### **Виклад основного матеріалу**

Як відмічено вище, з метою зменшення схильності футерівки до розтріскування у вогнетривку масу виробники заглибних фурм додають армування у вигляді відрізків дроту (фібри) з різною довжиною та діаметром волокон, зазвичай із корозійностійких марок сталі. Так, згідно з результатами наших досліджень, при хімічному складі вогнетривкого покриття, %: 3,0 CaO; < 48,0 SiO<sub>2</sub>; > 44,0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; < 1,4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; з зернами бетону фракцій 0—6 мм й армуванні останнього чотирма сталевими кутами, стійкість футерування фурм українського виробника складає 67—72 (в середньому 69) обробок чавуну за коінжекційною технологією вдування суміші вапна з магнієм). Використання фурм закордонного виробництва, з футеруванням складу, %: 40,0 SiO<sub>2</sub>; 51,0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1,0 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3,0 MgO; 1,2 TiO<sub>2</sub> та 0,3 Al, фракцій, із зернами бетону (0—6 мм) і введенням 3 % сталеві фібри та армуванням трьома сталевими кутами, забезпечує вже 158—166 (в середньому 162) обробок чавуну з метою десульфурзації за аналогічних вихідних умов.

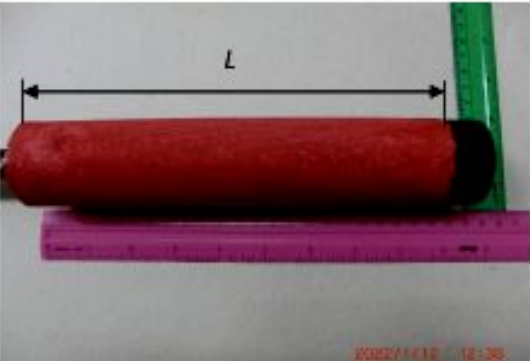
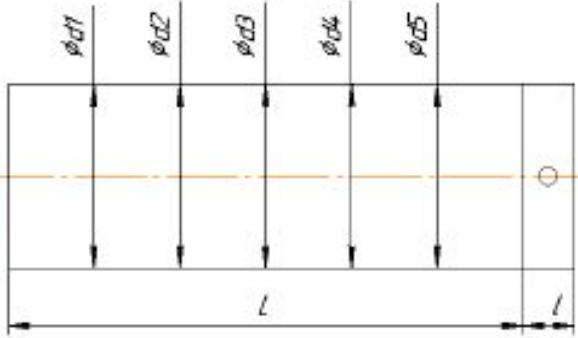
Порівняльний аналіз та вивчення особливостей руйнування футерування заглибної стаціонарної та обертової фурм в області контакту з металевим розплавом (нижче границі «шлак—метал») по ходу вдування газу вглиб ванни проводили з використанням моделі 230-т заливального ковша з поліметилметакрилату. Використано авторську методику ізотермічного моделювання гідрогазодинамічних процесів [2]. У якості речовини, моделюючої чавун, використали попередньо охолоджену воду (8—10 °C), а вогнетривкого футерування фурми — кристалізований шар із діаміду вуглецевої кислоти (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>). Останній, товщиною 23—29 мм, наносили на металеву трубу для подачі газу вглиб ванни з використанням розробленої технології інтенсивного наморожування. Загальний діаметр моделі фурми складав 52—56 мм.

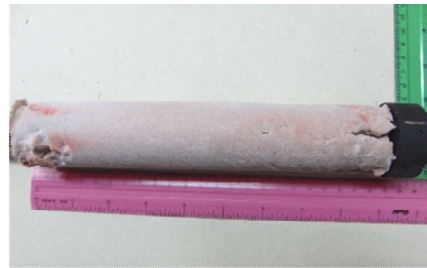
В ході експериментів використовували T-подібні наконечники (для обертової та стаціонарної фурм) та наконечники з двома соплами, розміщеними під кутом 45° до осі фурми (для стаціонарної фурми). У рідку ванну моделі ковша перед початком вдування газу вводили індикатори з «нульовою» плавучістю для вивчення гідродинаміки ванни та візуалізації потоків. Використали методику повного факторного експерименту. Швидкість обертання заглибної фурми (*V*) змінювали в межах від 1 до 100 об/хв (0 об/хв — для стаціонарної фурми), витрату газу на продування ванни (*Q*) — від 0,1 до 1,0 м<sup>3</sup>/хв, кут нахилу сопел наконечника до вертикальної осі фурми (*α*) складав 45° та 90°. Футерування на стовбурі моделі фурми було умовно поділено за її висотою на п'ять характерних зон. Перша зона відповідає шару ванни під границею «шлак—метал», п'ята — границя з наконечником фурми.

За результатами експериментів визначені характерні траєкторії руху газо-рідинних мас вздовж стовбура фурми та у стін заливального ковша, особливості утворення реакційної та барботаажних зон, інтенсивність руйнування футерування фурми у кожній із виокремлених зон. Отримані математичні моделі для кожної із зон на поверхні футерування фурми (табл. 1), виконано перевірку статистичної значущості вибіркового коефіцієнтів регресії.

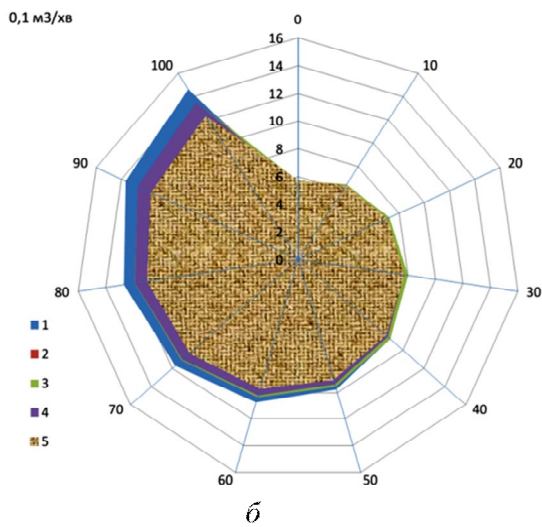
На основі чисельного моделювання з використанням отриманих моделей (табл. 1) виконані прогнози розрахунки та побудовані відповідні поверхні відгуку. Приклади загального вигляду шару CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> після закінчення експерименту та топографію зносу шару футерування за результатами моделювання впливу змін витрат газу на продувку ванни при одночасній зміні швидкості обертання заглибної фурми (у діапазоні від 10 до 100 об/хв), представлено на рис. 2, *a* та 2, *b*, *в* відповідно.

Таблиця 1. Моделі для визначення інтенсивності зносу футерування стаціонарної та обертової заглибних фурм

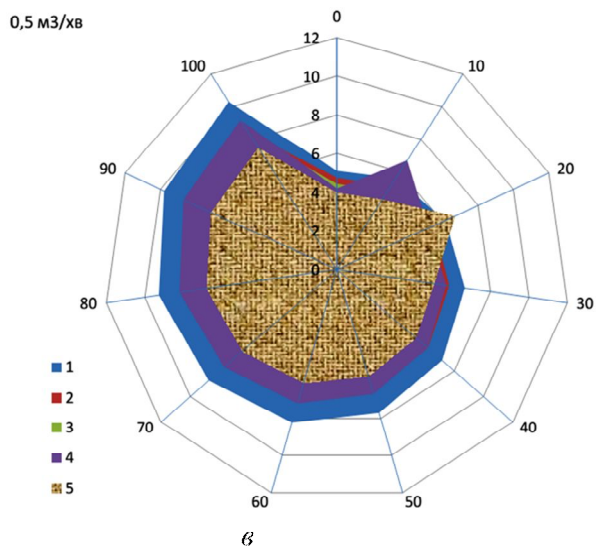
№ зони	Стаціонарна конструкція фурми	Обертова конструкція фурми
		
1	$\Delta_{1\text{нат}} = -4,458 + 0,16 \cdot \alpha - 7,555 \cdot Q + 0,213 \cdot \alpha \cdot Q$	$\Delta_{1\text{об}} = 4,759 + 0,0998 \cdot V + 0,62 \cdot Q - 0,116 \cdot V \cdot Q$
2	$\Delta_{2\text{нат}} = 4,78 + 0,042 \cdot \alpha - 18,775 \cdot Q + 0,293 \cdot \alpha \cdot Q$	$\Delta_{2\text{об}} = 5,8272 + 0,08595 \cdot V - 2,16455 \cdot Q - 0,09845 \cdot V \cdot Q$
3	$\Delta_{3\text{нат}} = 12,109 - 0,121 \cdot \alpha - 21,109 \cdot Q + 0,369 \cdot \alpha \cdot Q$	$\Delta_{3\text{об}} = 6,013 + 0,0864 \cdot V - 3,164 \cdot Q - 0,0869 \cdot V \cdot Q$
4	$\Delta_{4\text{нат}} = 11,223 - 0,1169 \cdot \alpha + 10,78 \cdot Q + 0,0074 \cdot \alpha \cdot Q$	$\Delta_{4\text{об}} = 5,944 + 0,105 \cdot V - 3,4965 \cdot Q - 0,11 \cdot V \cdot Q$
5	$\Delta_{5\text{нат}} = 8,566 - 0,0879 \cdot \alpha + 13,44 \cdot Q + 0,022 \cdot \alpha \cdot Q$	$\Delta_{5\text{об}} = 6,185 + 0,074 \cdot V - 4,3845 \cdot Q - 0,07755 \cdot V \cdot Q$



а



б



в

Рис. 2. Вигляд зон (а) та топографія зносу футерування обертової заглибної фурми в залежності від витрат газу та швидкості обертання фурми (10—100 об/хв): б) і в) — витрати газу 0,1 та 0,5 м<sup>3</sup>/хв відповідно

Встановлено, що при витратах газу до  $0,5 \text{ м}^3/\text{хв}$  характер зносу футерування по висоті фурми (профіль зносу) практично незмінний, крім ділянки між 3-ю та 5-ю зонами (є пік при збільшенні швидкості обертів фурми у 4-й зоні). Зі збільшенням витрат газу понад  $0,5 \text{ м}^3/\text{хв}$  виникає «пік» у діапазоні обертання фурми 10—30 об/хв. у зоні 4, який зберігається і при подальшому підвищенні витрат газу.

Для фурми, що обертається навколо осі, до найбільш впливового на глибину та інтенсивність зносу футерування фурми фактору (у досліджених умовах), можна віднести швидкість обертання фурми. У глибині барботажної зони розвивається сильна турбулентність з відповідними швидкостями масопереносу та масообміну; пульсації швидкості розплаву сягають 42—44 % від середніх значень швидкості у потоці. Водночас, максимізація зносу шару футерування фурми спостерігається при максимальних витратах газу-носію, у поверхні ковшової ванни, підвищеної інтенсивності — у зонах виходу газу із сопел наконечника. Найменший знос спостерігається при мінімальних витратах газу, у зоні 5, наближеній до зони виходу газу.

Для умов використання стаціонарної фурми, як і очікувалось, інтенсифікація зносу шарів футерування, при куті нахилу сопел у наконечнику фурми як у  $90^\circ$ , так і у  $45^\circ$ , спостерігається при підвищенні витрат газу-носію до верхньої межі (більш ніж  $0,5 \text{ м}^3/\text{хв}$ ) (рис. 3).

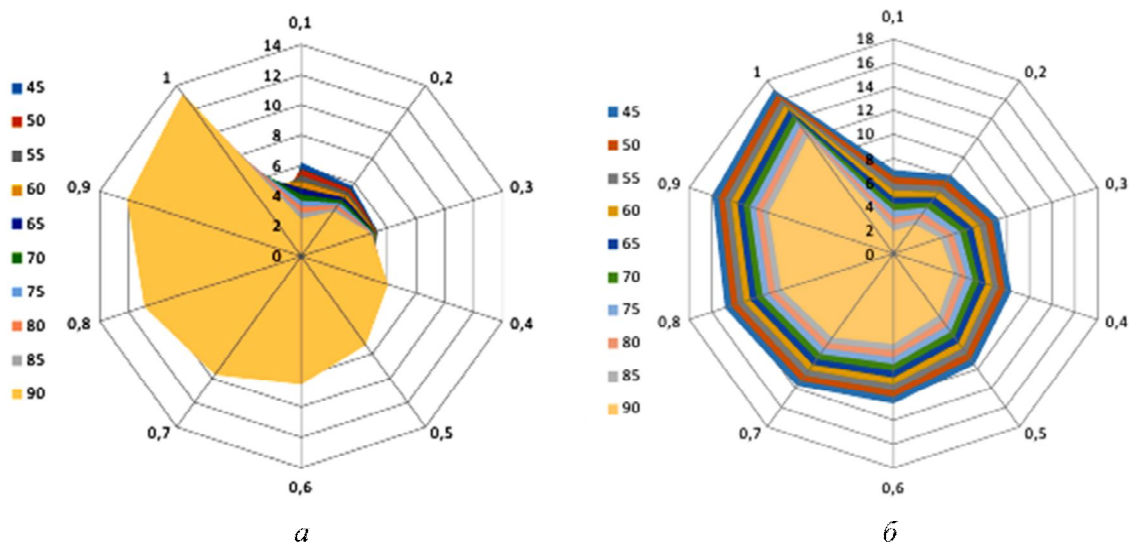


Рис. 3. Топографія зносу футерування стаціонарної заглибної фурми в залежності від витрат газу ( $0,1—1,0 \text{ м}^3/\text{хв}$ ) та кута нахилу сопел наконечника ( $45^\circ—90^\circ$ ): *a* — для зони 3; *б* — для зони 4

В той же час, при куті нахилу сопел у  $45^\circ$  по мірі збільшення відстані від зони виходу газу по висоті стовбура фурми, величина зносу, у порівнянні з  $90^\circ$ , зменшується і складає від 6 до 15 % (від глибини зносу шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  футерування для фурми із соплами з кутом у  $90^\circ$  у середніх зонах (2—4), до 23 % — у поверхні ванни під границею «шлак—метал» (зона 1) відповідно.

Найменший знос замороженого шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  при куті нахилу сопел наконечника фурми у  $90^\circ$  град спостерігається у зоні 5 при мінімальних витратах газу. Встановлено, що при мінімальній витраті газу на продувку ванни та куті нахилу сопел наконечника стаціонарної фурми у  $90^\circ$  град. (Т-подібний наконечник) максимальна глибина руйнування шару футерування спостерігається у поверхні ковшової ванни, що напевне пов'язано з гідродинамікою ванни у таких режимах продувки. При максимальній витраті газу для такої конструкції наконечника максимальний знос шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  спостерігали у поверхні ванни та підвищений — у зоні виходу газу з сопел.

За вказаних вище умов, при куті нахилу сопел наконечника фурми у  $45^\circ$ , знос шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  більше на 24—35 % у зонах фурми № 4—5, і менше, на 26—65 % — у верхніх горизонтах ванни (зони № 1—2).

У свою чергу, при мінімальній витраті газу та куті нахилу сопел фурми у  $45^\circ$  мінімальний знос шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  спостерігається у поверхні ванни, а підвищений, але відносно рівномірний (у середньому глибиною 5—6 мм), виникає на невеликій відстані від торця фурми (у зоні 5, наближеній до зони виходу газу). При максимальній витраті газу та куті нахилу сопел наконечника фурми у  $45^\circ$  максимальний знос шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  — у зоні виходу газу із сопел, а нерівномірний, підвищеної у порівнянні з іншими зонами на стовбурі фурми інтенсивності знос, спостерігається у поверхні ковшової ванни.

### Висновки

За результатами обробки отриманих даних отримані математичні моделі для кожної із виокремлених зон на поверхні футерування заглибної фурми, виконано перевірку статистичної значущості вибіркового коефіцієнтів регресії. Встановлені відповідні змінам умов продування ванни характер та особливості руйнування шару футерування у кожній із зон.

Отримані нові дані стосовно інтенсивності та глибини зносу футерування обертової заглибної фурми в залежності від швидкості її обертання та витрат газу-носію. Встановлено, що у досліджених умовах продування ванни, до найбільш впливового на глибину та інтенсивність зносу футерівки фурми фактору можна віднести швидкість обертання фурми.

Для стаціонарної фурми, максимальний знос вогнетривкого шару, як при куті нахилу сопел у  $90^\circ$ , так і у  $45^\circ$ , спостерігається також при максимальних витратах газу-носію. Найменший знос шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  спостерігається при мінімальних витратах газу, у зоні, наближеній до сопел фурми з Т-подібним наконечником. В той же час, при куті нахилу сопел у  $45^\circ$  по мірі збільшення відстані від зони виходу газу по висоті стовбура фурми, величина зносу, у порівнянні з  $90^\circ$  град., зменшується і складає від 6 до 15 % (від глибини зносу шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ) футерування фурми з соплами з кутом у  $90^\circ$  у середній частині фурми, до 23 % — у поверхні ванни відповідно. Найменший знос шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  спостерігається при мінімальних витратах газу, у зоні, наближеній до зони виходу газу при куті сопел фурми у  $90^\circ$ . За аналогічних умов, при куті сопел фурми у  $45^\circ$ , знос шару  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  більше на 24—35 % у нижніх зонах фурми, і менше, на 26—65 % — у верхніх горизонтах ванни.

Таким чином, з метою досягнення рівномірного зношення робочого шару вогнетривкого футерування в умовах використання фурми з Т-подібним наконечником у процесах ковшової десульфурації, доцільно організувати процес вдування реагентів з максимізацією густини газопорошкового потоку при одночасній мінімізації витрати газу-носію.

### Список використаної літератури

1. Сігарьов Є.М., Єськов Д.В., Похвалітій А.А. та ін. Розподіл металевих крапель між газовою та шлаковою фазами при продуванні ковшової ванни. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. Кам'янське, 2022, вип.2 (41). С. 9–18.
2. Сігарьов Є.М., Крячко Г.Ю., Довженко О.В. та ін. Особливості формування зони хвиль та сплесків на поверхні ковшової ванни. *Збірник наукових праць ДДТУ (технічні науки)*. Кам'янське, 2021, вип.2 (39). С. 3–10.
3. Evaluation of Thermal and Mechanical Properties of Refractories – Fundamentals and Applications 7. Fracture Mechanics – Fundamentals / Mototsugu Sakai // *Journal of the Technical Association of Refractories, Japan*. 2006. 26. №3. С. 247–255.
4. Робей Р., Уайтхед М. Внедоменная обработка чугуна с учетом конкретных производственных условий. *Металлургическое производство и технология*. 2014. № 1. С. 16–22.
5. Ламухин А.М., Зинченко С.Д., Ордин В.Г. и др. Перспективы десульфурации чугуна на ОАО «Северсталь» с использованием реагентов на основе магния // *Сб. научных трудов VIII международного симпозиума по десульфурации чугуна и стали*, Австрия. 26–27 сентября 2002 г. С. 32–33.
6. С.Л. де Соуза Коста, Е.П. Меирелес де Араухо, И.Л. Алвес, Д. Лима де Сиквейра. Промышленный опыт применения вращающихся фурм. // *IX Международный симпозиум по десульфурации чугуна и стали*, 18–21 сентября 2006, Галати, Румыния, С. 27–35.

7. Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Чубин К.И., Зарандия С.А.. Ковшешая десульфурация чугуна вдуванием диспергированного магния через погруженную вращающуюся фурму. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. №7(265). С. 106–110.
8. Fracture properties of monolithic refractories by multiscale steel fiber addition / Yasuhiro Eguchi, Makoto Ishikawa // *Journal of the Technical Association of Refractories, Japan*. 2006. 26. № 2. pp. 116—118.
9. Большаков В.И., Шевченко А.Ф., Лю Дун Ие и др. Создание и развитие рациональных технологий внепечной десульфурации. *Сталь*. 2009. № 4. С. 13–20.
10. Сигарев Е.Н., Чернятевич А.Г., Чубин К.И., Мастеровенко Е.Л. Разработка конструкций двухпоточных погружных фурм для ковшешой десульфурации чугуна магнием. *Новини науки Придніпров'я. (Інженерні дисципліни)*. № 3–4. 2008. С. 87–90.
11. Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating / E. N. Sigarev, A. G. Chernyatevich, K. I. Chubin and S.A. Zarandiya // *Steel in Translation* 2011. Volume 41. Number 6. pp. 487–491.

## OPERATING CONDITIONS AND STABILITY FIRE RESISTANT LINING SUBMERGED LANCE

### Abstract

To ensure the reliable and long—term operation of submersible lances used in the processes of bucket desulfurization of cast iron before converter processing, reliable means and appropriate conditions for supplying powdered desulfurizing reagents through nozzles of the lance tip, a rational scheme of refractory lining of the submersible lance and improvement of its operation modes are necessary. The purpose of the work is to study the characteristics of the destruction of the refractory lining of submersible lances, intended for desulfurization of iron—carbon melts by blowing powdery reagents deep into the ladle bath. To realize the goal, we used practical information on the researched question and the method of isothermal modeling of the hydrogas dynamics of a bucket bath using variable designs of the tips of stationary and rotating submersible lances. A comparative analysis and study of the features of the destruction of the lining of submerged stationary and rotating lances in the area of contact with the metal melt (below the "slag—metal" border) during gas injection into the bath was carried out using a 230—t pouring ladle model. During the experiments, T—shaped tips were used (for rotating and stationary lances) and tips with two spray pipe placed at an angle of 45 degrees to the axis of the lance (for stationary lances). Based on the results of data processing, mathematical models were obtained for each of the isolated zones on the lining surface of the submersible lance, and the statistical significance of the sample regression coefficients was checked. The nature and features of the destruction of the lining layer in each of the zones corresponding to the changes in the bath blowing conditions were established. New data were obtained regarding the intensity and depth of wear of the lining of the rotating submersible lance, depending on its speed of rotation and carrier gas consumption. It was established that under the investigated conditions of blowing the bath, the speed of rotation of the lance can be attributed to the factor most influencing the depth and intensity of wear of the lance lining.

### References

- [1] Sigarev E.N., Yeskov D.V., Pokhvalityi A.A. [et al.] (2022) Rozpodil metalevykh krapel' mizh hazovoyu ta shlakovoyi fazamy pry produvanni kovshovoyi vanny [Distribution of metal drops between the gas and slag phases during blowing of the ladle bath]. *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu (tekhnichni nauky)*. Vypusk 2(41). 9–18. [in Ukrainian].
- [2] Sigarev E.M., Kryachko H.Yu., Dovzhenko O.V. [et al.] (2021) Osoblyvosti formuvannya zony khvyl ta splaskiv na poverkhni kovshovoyi vanny [Features of the formation of the zone of waves and splashes on the surface of the bucket bath]. *Zbirnyk naukovykh prats' Dniprovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu (tekhnichni nauky)*. Vypusk 2(39). 3–10. [in Ukrainian].



- [3] Mototsugu Sakai (2006) Evaluation of Thermal and Mechanical Properties of Refractories – Fundamentals and Applications – 7. Fracture Mechanics – Fundamentals. *Journal of the Technical Association of Refractories*. 26. №3. 247–255.
- [4] Robey R., Whitehead M. (2014) Vnedomennaya obrabotka chuguna s uchetom konkretnykh proizvodstvennykh usloviy [External processing of cast iron taking into account specific production conditions]. *Metallurgicheskoye proizvodstvo i tekhnologiya*. №1. 16–22. [in Russian].
- [5] Lamukhin A.M., Zinchenko S.D., Ordin V.G. [et al.] (2002) Perspektivy desul'furatsii chuguna na OAO «Severstal» s ispol'zovaniyem reagentov na osnove magniya [Prospects for the desulfurization of cast iron at OJSC «Severstal» using magnesium-based reagents]. Proceedings from: *Sbornik nauchnykh trudov VIII mezhdunarodnogo simpoziuma po desul'furatsii chuguna i stali*. (pp. 32–33). Austria. [in Russian].
- [6] S. L. de Souza Costa, E.P. Meireles de Araujo, I.L. Alves, D. Lima de Siqueira (2006) Promyshlennyy opyt primeneniya vrashchayushchikhsya furn [Industrial experience in the use of rotating lances]. Proceedings from: *IX Mezhdunarodnyy simpozium po desul'furatsii chuguna i stali*. (pp. 27–35). Galati. [in Russian].
- [7] Sigarev E.N., Chernyatevich A.G., Chubin K.I. [et al.] (2010) Kovshevaya desul'furatsiya chuguna vduvaniyem dispergirovannogo magniya cherez pogruzhennuyu vrashchayushchuyusya furnu [Ladle desulfurization of cast iron by injection of dispersed magnesium through a submerged rotating lance]. *Metallurgical and Mining Industry*. №7(265). 106–110. [in Russian].
- [8] Yasuhiro Eguchi, Ishikawa Makoto (2006) Fracture properties of monolithic refractories by multiscale steel fiber addition. *Journal of the Technical Association of Refractories*. №2(26). 116–118.
- [9] Bolshakov V.I., Shevchenko A.F., Liu Dong Ye [et al.] (2009) Sozdaniye i razvitiye ratsional'nykh tekhnologiy vnepechnoy desul'furatsii chuguna [Creation and development of rational technologies for extra-furnace desulfurization of cast iron]. *Steel*. № 4. 13–20. [in Russian].
- [10] Sigarev E.N., Chernyatevich A.G., Chubin K.I. [et al.] (2008) Razrabotka konstruktsiy dvukhpotochnykh pogruzhnykh furn dlya kovshevoy desul'furatsii chuguna magniyem [Development of designs of double-flow submersible tuyeres for ladle desulfurization of cast iron with magnesium].// *Novyny nauky Prydniprov'ya. (Inzhenerni dystsypliny)*. №3–4. 87–90. [in Russian].
- [11] Sigarev E.N., Chernyatevich A.G., Chubin K.I. [et al.] (2011) Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating. *Steel in Translation*. Volume 41. Number 6. 487–491.

Надійшла до редакції 10.10.2023