

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЇ ВОГНЕТРИВІВ КОВШУ
ПРИ ВДУВАННІ ГАЗУ ВГЛИБ ВАННИ КРІЗЬ ОБЕРТОВУ ФУРМУ**

Із застосуванням ізотермічного моделювання отримані нові дані стосовно впливу переміщення газових струменів із сопел наконечника загальної обертової фурми на гідродинаміку та інтенсивність масообмінних процесів у ковшовій ванні. Досліджені особливості ерозійного зношування робочого шару футерівки великовантажного чавунозаливального ковшу під час десульфурзації вдуванням порошкоподібних реагентів крізь сопла Т-подібних наконечників загальних фурм. На основі результатів порівняльного аналізу профілю зношення робочого шару вогнетривів ковшу при використанні нерухомої та обертової конструкції фурм та чисельного моделювання динаміки зношування визначені раціональні витрати газу-носія та швидкість обертання фурми для мінімізації інтенсивності ерозії футерівки.

Ключові слова: вогнетрив, газ, гідродинаміка, ерозія, ківш, руйнування, стійкість, футерування.

Ye.M. Sigarev, D.V. Yeskov, G.Yu. Kryachko, I.M. Matina. Study of the erosion of ladle refractories when gas is injected deep into the bath through a rotating lance. With the use of isothermal modeling, new data were obtained regarding the influence of the movement of gas jets from the nozzles of the tip of the submersible rotating lance on the hydrodynamics and the intensity of mass transfer processes in the ladle bath. It was established that mixing the bath during the rotation of gas jets increases the mass transfer rate, since the tangential stress arising in the liquid causes the gas bubbles to be crushed, which in turn leads to an increase in the volume of the bubbling zones and the reaction surface of the phases. The increase in the total volume of the bubbling zones is 25-35% of the volume of the bath, compared to 8-10% for a stationary nozzle. Peculiarities of erosive wear of the ladle lining during desulfurization by blowing powdered reagents through the nozzles of T-shaped nozzles of lances were investigated. The highest intensity of wear with increasing gas consumption is observed in the upper part of the bucket. With an increase in the rotation speed of the lance and gas consumption, the intensity of wear decreases in the middle horizons from 0.7 to 0.4 mm/min. For the upper areas of the bucket, increasing the gas consumption from 1.0 l/min to 2.2 l/min and the rotation speed to 120 rpm leads to a decrease in intensity by 36.7%, for the middle – by 55.6%, for lower – by 28.5%. Based on the results of a comparative analysis of the wear profile of the working layer of refractories when using stationary and rotating lances and numerical modeling of the dynamics of wear, the rational consumption of the carrier gas and the rotation speed of the lance were determined to minimize the intensity of lining erosion. From the point of view of dispersing the desulfurizing reagents with a simultaneous increase in the gas saturation of the bath, it is advisable to increase the gas consumption and the rotation speed of the lance to the maximum possible values. On the other hand, from the point of view of preventing uneven wear of the lining, it is advisable to limit the speed of rotation of the gun at the level of 60-

¹ д-р техн. наук, професор, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0000-0002-8229-7877, en_sigarev@ua.fm

² здобувач вищої освіти третього (освітньо-наукового) рівня, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, eskovD80@i.ua

³ канд. техн. наук, доцент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, ORCID: 0000-0002-8773-508X, nauka_m4m@ukr.net

⁴ здобувач вищої освіти третього (освітньо-наукового) рівня, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, igor.matyna66@gmail.com

75 rpm, and gas consumption – by the need to ensure a stable mode of formation of the gas powder flow without clogging the nozzles of the T-shaped tip of the lance.

Key words: refractory, gas, hydrodynamics, erosion, ladle, destruction, stability, lining.

Постановка проблеми. Дослідження закономірностей і розвиток наукових уявлень щодо взаємодії шлаку і рідкого металу з вогнетривами металургійних агрегатів, що призводять до руйнування вогнетривкового шару, є актуальною темою з часів отримання перших металів та сплавів.

Згідно з вимогами служби футерівка ковшів повинна бути терmostійкою, мати знижену теплопровідність, теплоємність і усадку, бути стійкою до корозійного та ерозійного руйнування рідкими шлаком та металом, у тому числі шлаками перемінного складу, що формуються у ході рафінування розплаву.

Стратегія сучасного проектування вогнетривкої футерівки великовантажного чавунозаливального ковша, що одночасно служить і агрегатом для позадоменної десульфурації чавуну, повинна враховувати такі фактори як термомеханічні напруження, що виникають при відхиленні температури чавуну від оптимальних значень, у періодах простою та під час заливання чавуну у ківш; механічну ерозію робочого шару вогнетривів, що обумовлено гідродинамікою металевго розплаву під час глибинного вдування реагентів-десульфураторів; умови хімічної корозії внаслідок взаємодії вогнетривів з оксидами шлаку (FeO, MnO), склад якого перманентно змінюється по ходу вдування реагентів вглиб ковшової ванни [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наповнення ковшів і переливання металу, коливання поверхні при транспортуванні ковшів і барботажі металу при продуванні ванни призводить до зношування робочого шару футерівки за ерозійним механізмом. Описи механізму та закономірностей впливу термодинамічних і кінетичних факторів на зношування вогнетривів ковшів внаслідок проникнення розплаву, корозії, ерозії та термічних ударів широко представлені у технічній літературі [2-7].

Згідно з усталеними уявленнями фізичне проникнення у вогнетриви, мікротріщини та шви викликане капілярним потоком розплаву. Так, швидкість проникнення шлаку умовно описується законом Пуазейля [5], згідно з яким вона залежить від радіуса r капіляра (відкритої пори або мікротріщини), тиску капілярного всмоктування ΔP , динамічної в'язкості рідини η , глибини її проникнення l у вогнетрив і тривалості контакту τ :

$$dl / d\tau = r^2 \cdot \Delta P / (8\eta l), \quad (1)$$

де $\Delta P = 2\sigma \cdot \cos\theta / r$ визначається властивостями проникаючого розплаву; σ – поверхневий натяг розплаву, θ – кут змочування.

При цьому l для горизонтального проникнення шлакового розплаву у пори, після інтегрування (1) з врахуванням ΔP , визначається за виразом:

$$l^2 = (\sigma \cdot 2r \cdot \cos\theta / (2\eta)) \cdot \tau, \quad (2)$$

і суттєво залежить від τ , а для вертикального проникнення за виразом:

$$l = 2\sigma \cdot \cos\theta / (r \cdot \rho \cdot g), \quad (3)$$

де ρ – густина шлаку, кг/м³; g – гравітаційна постійна, м/с².

Після зливання металу із ковша при охолодженні футерівки на повітрі градієнт температур між футерівкою і зовнішнім середовищем досягає 600-800°C для чавунозаливальних та 1400-1500°C [8] до 800-1000°C [9] для сталерозливальних ковшів відповідно. Зовнішній температурний напір формує у робочому шарі вогнетривів внутрішню температурну неоднорідність, яка призводить до різнонаправлених термічних напружень. Особливо небезпечними для вогнетривів є розтягувальні напруження, які призводять до розтріскування вогнетривкового шару і збільшення швидкості проникнення розплавів та інтенсивності руйнування футерівки.

Напруження, що перевищують межу міцності вогнетривкового матеріалу, призводять до виникнення мікротріщини, а подальший температурний вплив викликає їх подальший розвиток із наступним руйнуванням футерівки:

$$\gamma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт лінійного розширення вогнетривкового матеріалу; ΔT – градієнт температур у шарах футерівки; E – модуль пружності вогнетривкового матеріалу.

Так, згідно із дослідженнями [9], термічні та механічні напруження у MgO-C вогнетривах призводять до виникнення локального (діркового) зношення у робочому шарі футерівки.

Відомі результати досліджень ерозійного зношення футерівки сталерозливальних ковшів із застосуванням ізотермічного [10] та математичного [11] моделювання, присвячені вивченню впливу на інтенсивність зношення геометричних параметрів ковшів [10] та розміщення дуттьових вставок у днищі [11]. У вказаних вище дослідженнях не враховується наявність шлакової фази на поверхні ковшової ванни і знос вогнетривів внаслідок хімічного проникнення шлаку.

Хімічне проникнення, яке включає хімічну взаємодію між розплавом шлаку та вогнетривом, у свою чергу, може призвести до ущільнення та хімічного або структурного розколювання останнього [3]. Градієнт хімічного потенціалу, який зазвичай асимілюється із градієнтом хімічного складу, є рухомою силою корозійного процесу. Інтенсивність та результати корозії прогнозують і пояснюють зі застосуванням термодинамічних розрахунків та за допомогою фазових діаграм із використанням програмного забезпечення (наприклад FactSage, Thermocalc та ін.). Сучасні дослідження включають методи аналізу, в яких фазові співвідношення та механізми корозії пов'язані зі змінами розмірів вогнетривких матеріалів, а також їхніми термомеханічними властивостями [12].

При використанні вітчизняних матеріалів стійкість сталерозливних ковшів з шамотними футерівками складає 10-19 плавов (питома витрата вогнетривів 5-12 кг/т сталі), монолітних футерівок із кремнеземистих мас – 10-20 плавов (2-4 кг/т сталі) [8]. Перехід до використання периклазовуглецевих вогнетривів забезпечив зниження питомих витрат вогнетривів до 4-5 кг/т сталі, з підвищенням стійкості до 50-100 наливів. У подальшому використання монолітного корундового футерування забезпечило стійкість ковшів до 350, а низькоцементного бетону – до 500 плавов відповідно [13].

Конструкція футерівки чавунозаливальних ковшів з початку впровадження ковшової десульфурації чавуну перетерпіла ряд суттєвих змін. Так, при використанні ковшів тільки для транспортування чавуну, робочу футерівку днищ та стін виготовляли із шамотного вогнетриву різної товщини ($Al_2O_3 > 40\%$). Середня стійкість ковшів у 150 плавов, після впровадження технологій десульфурації, скоротилася до 100 плавов, що призвело до проблем із забезпеченням логістики конвертерного цеху [14]. Пошук раціональних рішень та поетапний перехід до використання андалузиту, муліту, бокситу, Al_2O_3 –SiC–C та комбінованих (сандвіч) футерівок забезпечив збільшення строку служби від 974 до 1489 плавов, при максимально досягнутому значенні у 1718 плавов. Підвищення частки Al_2O_3 у наступних поколіннях ковшових вогнетривів забезпечило підвищення корозійної стійкості, введення до їх складу вуглецю – стійкості до розтріскування і проникненню шлаку, а SiC – попередження окислення вуглецю вогнетриву.

На відміну від досліджень, присвячених зношенню футерівки сталерозливних ковшів, кількість публікацій стосовно досліджень зношення футерівки чавунозаливальних ковшів обмежена. Загальному аналізу тенденцій напрямків розвитку способів футерування сталерозливних ковшів присвячено робота [13], а закономірностям зношення футерівки – робота [15].

Особливості зношення футерівки чавунозаливальних ковшів та лопатей імпелера в умовах десульфурації за KR-процесом описані у роботі [16]. Показано, що причиною сильної ерозії є температурні умови та турбулентність, спричинена обертанням лопатей. Зі застосуванням чисельного моделювання для кількісної оцінки напруження зсуву та швидкості стирання виявлено нерівномірності і локалізацію місць ерозійного зношення. Отримано кількісні кореляції швидкості стирання як функції розміру лопатей та швидкості обертання імпелера.

При використанні обертових заглибних фурм для вдування реагентів-десульфураторів у ковшову ванну з відповідною зміною гідродинамічної картини [17] слід очікувати і зміни у профілі ерозійного руйнування вогнетривів потоками металевого розплаву.

Мета роботи – дослідження впливу переміщення газових струменів, що формуються на виході із сопел Т-подібного наконечника заглибної обертової фурми, на інтенсивність масообмінних процесів у ковшовій ванні та особливості зношення робочого шару футерівки великовантажного чавунозаливального ковшу по ходу вдування порошкоподібних реагентів вглиб ванни.

Виклад основного матеріалу. Ковшову десульфурацію чавуну в конвертерному цеху ПрАТ «Камет-Сталь» здійснюють у 230-т чавунозаливальних ковшах (далі ківш) за коінжекційною схемою глибинного вдування сумішей на основі флюїдизованого вапна та гранульованого магнію [18]. Вогнетривке футерування ковшів тришарове і складається із теплоізоляційних плит, арматурного та робочого шарів. Окремі фізико-хімічні показники вогнетривких виробів, що

використовують для футерування ковшів, представлені у табл. 1. Стійкість вогнетривів робочого шару, при гарантованій постачальниками стійкості у 800 плавок (у середньому до 80 операцій по десульфурації чавуну), протягом останніх років склала від 818 до 1281 плавок (при питомих витратах вогнетривів 1,16–1,25 кг/т чавуну).

Таблиця 1

Фізико-хімічні характеристики вогнетривкої футерівки
чавунозаливальних 230-т ковшів ПрАТ «Камет-Сталь»

Варіант 1		Варіант 2	
Теплоізоляційний шар			
Теплоізоляційні плити		Теплоізоляційна цегла	
Al ₂ O ₃ + SiO ₂ , %	≥95	Al ₂ O ₃ , %	≥40
K ₂ O+Na ₂ O, %	≤0,8	SiO ₂ , %	≥40
Fe ₂ O ₃ , %	≤1,5	Об'ємна густина, г/см ³	≤1,0
Уявна густина, г/см ³	≤0,85	Лінійне розширення (при 1350 °C), %	≤2
Арматурний шар			
Високоглиноземна цегла		Пірофілітова цегла	
Al ₂ O ₃ , %	≥65	Al ₂ O ₃ , %	≤23
Fe ₂ O ₃ , %	≤5	SiO ₂ , %	≥73
Відкрита пористість, %	≤28	Fe ₂ O ₃ , %	≤1,8
Об'ємна густина, г/см ³	≈ 2,45	Об'ємна густина, г/см ³	≥2,17
Робочий шар			
Алюмокарборундовуглецевисті вироби		Алюмокарбідокремнієві вироби	
Al ₂ O ₃ , %	≥55	Al ₂ O ₃ , %	≥60
SiC+C, %	≥16	SiC, %	≥12
C, %	≤10	C, %	≥9
Відкрита пористість, %	≥2,75	Відкрита пористість, %	≤10
Об'ємна густина, г/см ³	≥4,0	Об'ємна густина, г/см ³	≥2,85

Дослідження гідрогазодинамічної картини у ковшовій ванні при вдуванні газу крізь сопла обертової фурми проводили з використанням авторської методики на установці ізотермічного моделювання, схема якої, основні параметри об'єкта та моделі заливального ковшу представлені у роботі [19].

З метою запобігання утрудненням у формуванні струменів на виході із сопел Т-фурми торця її наконечника розташовували на відстані 20-25 мм від днища моделі ковшу. При моделюванні використовували одно- та двосоплові Т-наконечники фурм із циліндровими соплами діаметром 0,0012 та 0,001 мм відповідно. Швидкість обертання фурми навколо вертикальної осі змінювали в межах від 0 до 120 об/хв при витратах газу (компресорного повітря, тиск 5,2-5,5 МПа) на продування ванни від 1,0 до 2,2 л/хв відповідно.

На першому етапі, з метою уточнення впливу швидкості обертання сопел наконечника заглибної фурми і витрат газу на інтенсивність перемішування рідкої ванни, у різні зони ванни за її глибиною вводили рідкий індикатор. Оптимізацію плану експерименту здійснювали за критерієм ортогональності. В якості факторів впливу прийняли витрату газу (Q , л/хв), швидкість обертання фурми (V , об/хв) та відношення висоти вводу індикатора до глибини рідкої ванни (H , м).

Перемішування ванни при обертанні газових струменів підвищує швидкість масовіддачі, оскільки дотичне напруження, що виникає в рідині, викликає подрібнення газових пупирів, що у свою чергу призводить до збільшення об'єму барботаєжних зон та поверхні реагування фаз. При незначній газонасиченості переміщення потоків в рідкій ванні відбувається при крупномасштабній структурі. Із зростанням газонасиченості ванни відносна швидкість підвищується (формується кільцева структура або структура туману).

За результатами експериментів встановлено, що в дослідженому діапазоні витрат газу при обертанні фурми як з одним, так і з 2-ма соплами, розташованими під кутом 90 град до

вертикальної осі, найкраще розосередження і подрібнення газових бульбашок забезпечується при швидкості обертання у 120 об/хв пропорційно збільшенню витрат газу. При мінімізації Q мінімальна тривалість усереднення ванни τ_{yc} (11 с) забезпечується вдуванням газу крізь сопла нерухомої загальної фурми. Пропорційно підвищенню величини Q збільшується і тривалість досягнення 95% усереднення ванни (до 19-22 с), що обумовлено переходом від бульбашкового до струменевого («пробійного») режиму продування.

Використання обертової фурми призводить до зменшення τ_{yc} . Так, мінімальних значень τ_{yc} (<9,5 с) було досягнуто в умовах продування ванни з $Q = 2,2$ л/хв крізь сопло фурми, що обертається зі швидкістю 120 об/хв. При мінімальній (у досліджених діапазонах) витраті газу τ_{yc} зменшується пропорційно підвищенню швидкості обертання фурми. У східних, з точки зору місця вводу індикатору, умовах при використанні нерухомої фурми τ_{yc} склало 20,5 с, а при обертанні фурми зі швидкістю 50 об/хв – менш ніж 13 с, що свідчить на користь обґрунтованості переходу до застосування обертових фурм.

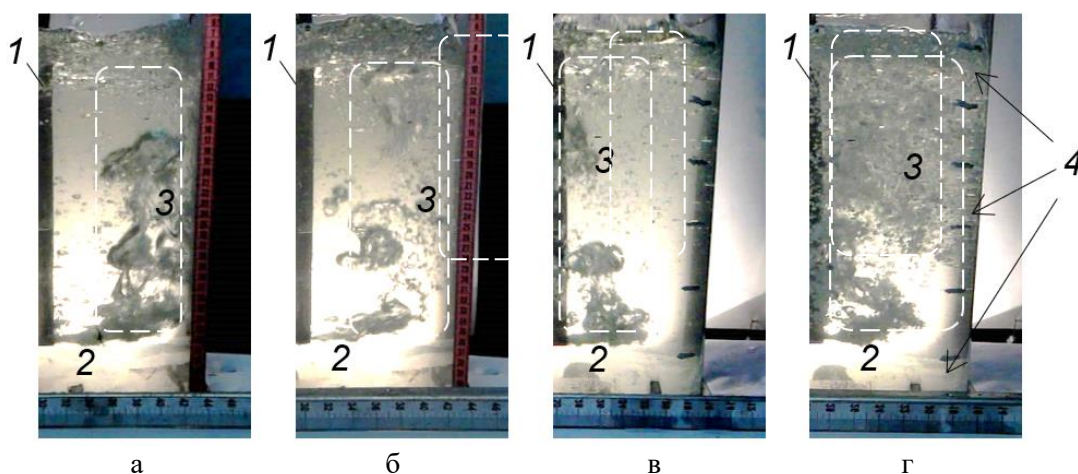


Рис. 1 – Картина диспергування газових об'ємів при вдуванні газу крізь сопло загальної фурми з Т-подібним наконечником із витратою 2,2 л/хв (а, г) та 1,6 л/хв (б, в). а, б) – нерухома фурма; в, г) – обертова фурма. Швидкість обертання фурми – 30 об/хв (в) та 120 об/хв (г) відповідно. 1 – фурма; 2 – газовий струмінь; 3 – барботажна зона; 4 – місце введення індикатору

На відміну від утворення двох великомасштабних циркуляційних потоків, що спостерігаються при вдуванні газу крізь сопла Т-подібного наконечника нерухомої фурми (рис. 1, а, б), при використанні обертової фурми у об'ємі ванни можна виділити характерні зони:

- первинну, в межах якої відбувається заглиблення газових струменів у ванну;
- вторинну, барботажну, в нижній частині якої газові струмені, що вигинаються вгору під дією сили Архімеда і одночасно під дією сили опору вбік, протилежний напрямку обертання сопел, подрібнюються на бульбашки, і в межах якої останні спливають до поверхні ванни при малих значеннях V ;
- ряд розосереджених по об'єму ванни циркуляційних зон, число яких зростає пропорційно збільшенню V ;
- розосереджені зони виходу газових об'ємів на поверхню ванни.

Розмір спливаючих газових бульбашок зменшується пропорційно підвищенню V , а швидкість їх спливання відповідно зменшується. З врахуванням збільшення газонасиченості ванни зростання загального об'єму барботажних і циркуляційних зон складає 25-35 % від загального об'єму ванни, у порівнянні із 8-10% для нерухомої фурми (рис. 1).

Встановлені особливості зміни у гідродинаміці ванни при обертанні сопел наконечника фурми мають вплинути і на характер профілю (глибину зношення у різних зонах по висоті ($\Delta h_{фут}$)) та інтенсивність зношення робочого шару футерівки ковша.

Для вивчення одночасного впливу швидкості обертання фурми ($X_1(V)$, об/хв) та витрати газу-носія ($X_2(Q)$, л/хв) і порівняння з умовами використання нерухомої фурми, сплановано та реалізовано експеримент (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця планування та результати експериментів

№	Фактор впливу					А тов- щина* , мм	В товщи на, мм	С тов- щина, мм	b ₀ зони А/В/С	b ₁ зони А/В/С	b ₂ зони А/В/С	b ₁₂ зони А/В/С	Δh _{ФУТ} зони А/В/С
	X ₁ (Q)		X ₂ (V)		X ₁ · X ₂								
	код	нат.	код	нат.									
1	+	2,2	-	30	-	26,1/ 21,1	26,2/ 22,8	26,2/ 22,6	6,25/ 4,85/ 18,8	-0,25/ -1,15/ -0,4	2,25/ 1,65/ 1,30	-1,25/ -1,35/ -0,6	5/3,4/ 3,6
2	-	1,0	+	120	-	16,2/ 6,2	20,1/ 11,1	19,0/ 12,0					10/9/7
3	+	2,2	+	120	+	20,1/ 13,1	21,1/ 17,1	23,1/ 18,1					7/4/5
4	-	1,0	-	30	+	29,5/ 26,5	30,5/ 27,5	29,0/ 25,8					3/3/3,2

* у чисельнику – вихідне значення, у знаменнику – після продування ванни

Для вивчення особливостей ерозійного зношення у якості моделі робочого шару футерівки ковшу використали пластини з гімалайської солі ($\rho = 2,185 \text{ г/см}^3$). Для порівняльного аналізу і визначення профілю зношення на поверхні пластин було виділено три контрольні зони: А – верхня частина футерівки ковшу, В – середня і С – нижня частина відповідно. У якості газу для продування рідкої ванни (води, підігрітої до температури 45°C) використали стиснене компресорне повітря (тиск 5,5 атм). З метою візуалізації потоків та врахування наявності у ванні нерозчинених частинок реагентів-десульфураторів у ванну вводили індикатори з «нульовою» плаваючістю. Після закінчення кожного експерименту проводили механічне сканування поверхні пластин із використанням шаблону і штангенциркуля (точність вимірювання 0,1 мм). Проведено серію експериментів у кожному із діапазонів швидкості обертання фурми: від 0 об/хв для нерухомої і до 120 об/хв – для обертової. Тривалість продування ванни у всіх експериментах складала 600 с.

Вигляд футерівки промислового чавунозаливального ковшу після 1718 плавок (в), моделі робочого шару футерівки до та після продування ванни, розміщення контрольних зон (А-С) на моделі футерівки (а, б) і футерівки на стіні ковшу (г), представлені на рис. 2.

За результатами обробки отриманих експериментальних даних встановлено основні залежності між інтенсивністю вдування газу, швидкістю обертання фурми та глибиною зношення футерівки ковшу у контрольних зонах, у тому числі при роботі Т-фурми у нештатному режимі (із закупорюванням одного із сопел наконечника [18]).

Отримані математичні моделі, придатні для прогнозування змін профілю робочого шару футерівки ковшу (зміни товщини футерівки $\Delta h_{\text{фут}}$ у проміжку від границі шлак-метал до днища ковшу) при використанні обертової фурми:

Зона А

$$\Delta h_{\text{фут}}^{\text{натА}} = -2,392 + 3,057 \cdot Q + 0,1239 \cdot V - 0,0463 \cdot Q \cdot V \quad (5)$$

Зона В

$$\Delta h_{\text{фут}}^{\text{натВ}} = -0,835 + 1,835 \cdot Q + 0,117 \cdot V - 0,0499 \cdot Q \cdot V \quad (6)$$

Зона С

$$\Delta h_{\text{фут}}^{\text{натС}} = 0,932 + 1,010 \cdot Q + 0,0644 \cdot V - 0,0222 \cdot Q \cdot V \quad (7)$$

Встановлено, що параметри вводу газу у ванну суттєво впливають на глибину та інтенсивність зношення робочого шару футерівки. Найбільша глибина і інтенсивність зношення (I) спостерігається у верхніх горизонтах футерівки (зона А), найменша – у нижніх (зона С). При використанні нерухомої заглибної Т-фурми при мінімальних (у дослідженому діапазоні) витратах газу I зменшується від верхніх горизонтів до нижніх, що пояснюється особливостями гідродинаміки ковшової ванни [17, 19]. Зі збільшенням витрат газу до максимальних (2,2 л/хв)

спостерігається мінімізація величини I у середніх горизонтах на футерівці з подальшим її збільшенням по мірі опускання до днища ковшу. Так, при витратах газу у 2,2 л/хв у зоні B футерівки величина I на 38-44% менше, ніж у верхніх. Найбільші величини I – у зоні A при максимізації витрат газу. Збільшення витрат газу на 55% призводить до збільшення I на 36%.

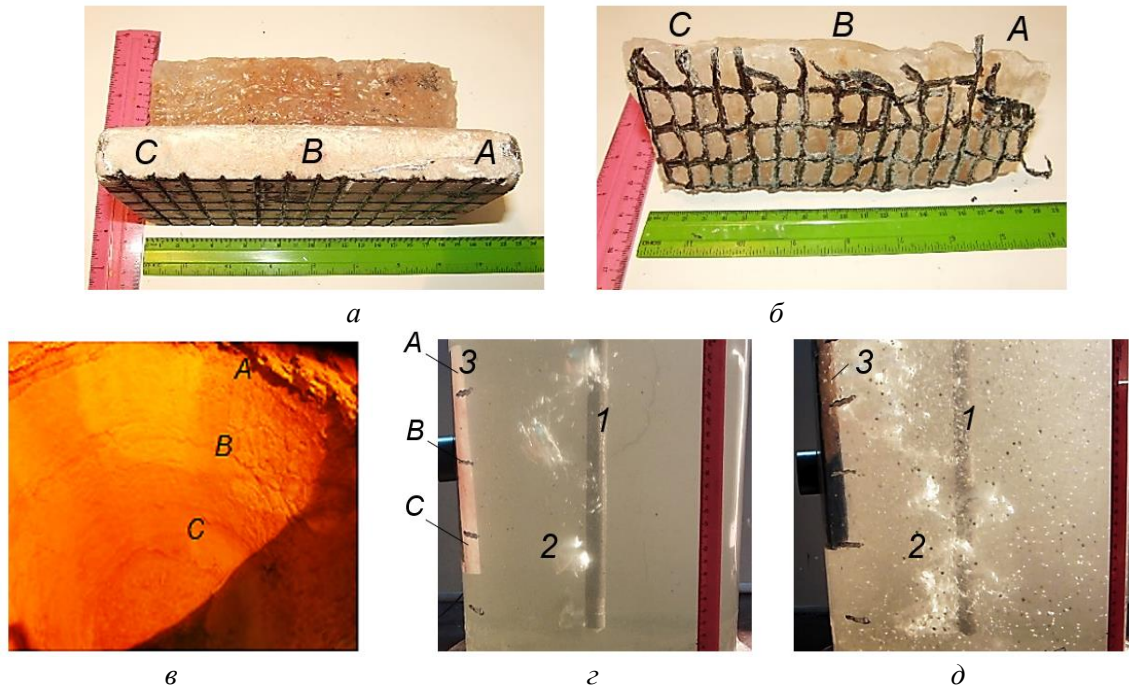


Рис. 2 – Вигляд моделі робочого шару футерівки до (а) та після продування ванни (б), футерівки промислового чавунозаливального ковшу після 1718 плавов [14] (в), розміщення моделі футерівки на стіні ковшу (г) та картина формування барботажних зон у ванні під час її продування газом крізь сопло наконечника фурми, що обертається зі швидкістю 60 об/хв (д): 1 – фурма; 2 – газові бульбашки; 3 – модель робочого шару вогнетриву на стіні ковша

Тренд на зменшення I зі зростанням швидкості обертання та витрат газу зберігається на всіх горизонтах футерівки. Найбільші зміни у інтенсивності зношення при зростанні швидкості обертання фурми та витрат газу спостерігаються у зонах, наближених до зони B . Так, із підвищенням швидкості обертання фурми і найбільших, у дослідженому діапазоні, витратах газу (2,2 л/хв) величина I зменшується у середніх горизонтах футерівки по висоті з 0,7 до 0,4 мм/хв. В цілому, для верхніх горизонтів збільшення витрат газу з 1,0 л/хв до 2,2 л/хв і швидкості обертання до 120 об/хв призводить до зменшення I на 36,7 %, для середніх – на 55,6%, для нижніх – на 28,5 % відповідно, що може бути пов'язано зі збільшенням кількості локалізованих барботажних зон у середній частині ковшової ванни, як показано раніше [17, 19].

До визначеного граничного значення швидкості обертання фурми, окремо для кожної із досліджених зон (A - C), збільшення витрат газу призводить до підвищення I («перехідна» зона). Так, незалежно від витрат газу, «перехідна» зона для верхніх горизонтів футерівки досягається при збільшенні обертів фурми до 65 об/хв, для середнього – до 37 об/хв, для нижніх – до 46 об/хв відповідно. Після досягнення вказаних значень зменшення I пропорційне зростанню Q та V . Так, наприклад, максимізація I (у досліджених діапазонах) спостерігається при швидкості обертання фурми у 120 об/хв при мінімальній витраті газу (1,0 л/хв), а мінімальна I для усього діапазону значень Q – при 55-60 об/хв (рис. 3).

Найбільша інтенсивність зношення та ширина діапазону її зміни при збільшенні Q спостерігається у верхній частині ковшу (зона A), наближеній до границі розділу «шлак-метал».

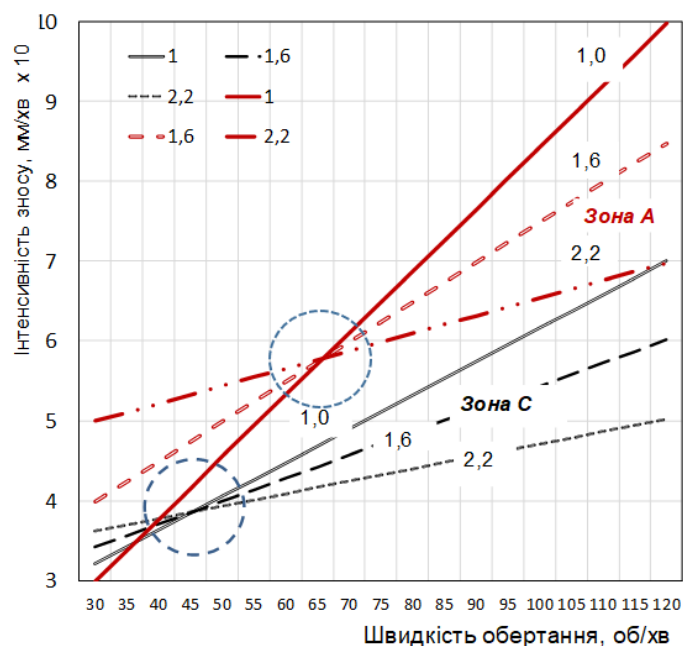


Рис. 3 – Вплив зміни швидкості обертання заглибної фурми на інтенсивність зношення робочого шару футерівки ковшу у верхній (А) та нижній (С) зонах. «Перехідні зони» на рисунку позначені пунктиром і служать орієнтиром для встановлення раціональної швидкості обертання фурми зі забезпеченням рівномірності зношення футерівки ковшу по висоті

Діапазон швидкості обертання фурми у 60-75 об/хв доцільно вважати таким, що забезпечує умови для рівномірного зношення робочого шару футерівки по висоті (рис. 4).

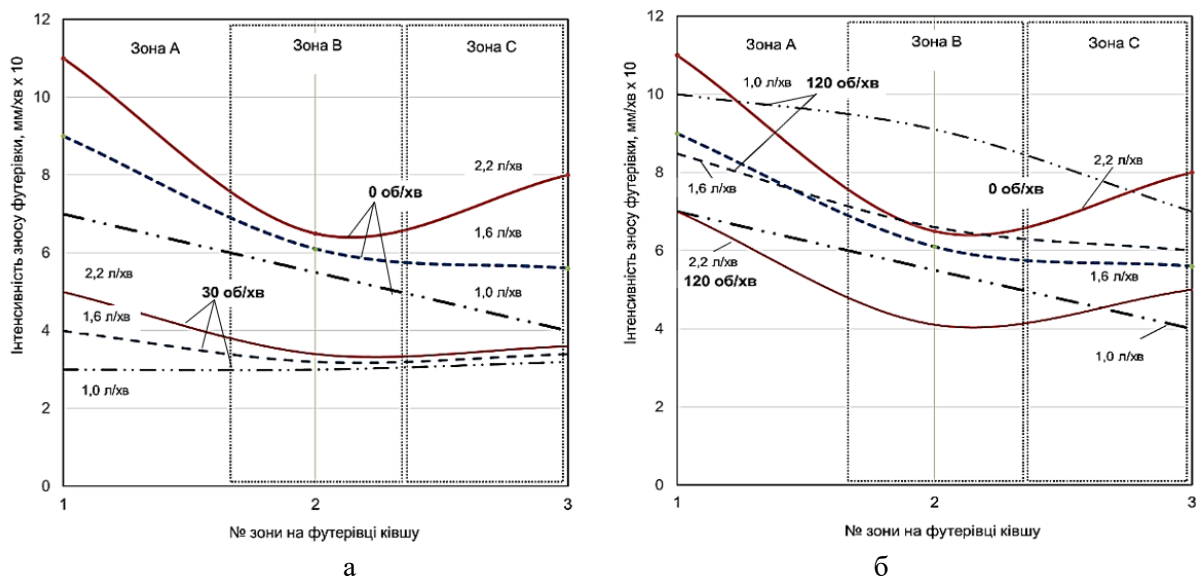


Рис. 4 – Залежність інтенсивності зношення робочого шару футерівки ковшу у різних зонах від витрат газу на продування ванни при переході до використання обертової заглибної фурми: а – 30 об/хв; б – 120 об/хв. 0 об/хв – нерухома фурма

Висновки

Мінімізація ширини діапазону зношення футерівки та рівномірність зношення по висоті ковшу, у порівнянні із нерухомою фурмою, забезпечується при 55-60 об/хв у всьому дослідженому діапазоні витрат газу. З точки зору розосередження реагентів-десульфураторів із одночасним збільшенням газонасиченості ванни, доцільно збільшувати витрати газу і швидкість обертання фурми до максимально можливих значень. З іншого боку, з точки зору попередження нерівномірного зношення футерівки, доцільним є обмеження швидкості обертання фурми на рівні 60-75 об/хв, а витрат газу – необхідністю забезпечення сталого режиму формування газопорошкового потоку без закупорювання сопел Т-подібного наконечника фурми. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації конструкції футерівки чавунозаливального ковшу в умовах використання обертових конструкцій заглибних фурм для десульфурзації чавуну.

Перелік використаних джерел:

1. Сульфідна смісність та властивості модифікованих ковшових шлаків / Сігарьов Є.М., Єськов Д.В., Крячко Г.Ю., Матина І.М. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2024. До 95 річчя кафедри металургії ім. професора В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету. С. 76-88. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.tm.2024.7>.
2. Смирнов А. Н., Жемеров С. Г., Штепан Е. В. Исследование стойкости огнеупорного слоя при продувке металла в сталеразливочном ковше инертным газом. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2011. Вип. 12(177). С. 130-136.
3. Bennett J. P., Smith J. D. Fundamentals of Refractory Technology. The American Ceramic Society, 2001. 316 p.
4. Schacht C. A. Refractories Handbook. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA. 2004. 516 p.
5. Lee W. E., Zhang S. Melt Corrosion of Oxide and Oxide-Carbon refractories. *International Materials Reviews*. 1999. Vol. 44. Iss. 3. Pp. 77-104. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066099101528234>.
6. Lee W. E. Theory, Experiment and Practice of Slag Attack on Refractories. *Tehran International Conference on Refractories*, 4-6 May 2004. Pp. 13-27.
7. Buhr A. Refractories for Secondary Steelmaking Metallurgy. *CN-Refractories*. 1999. No. 6(3). Pp. 19-30.
8. Умови служби футеровки сталерозливних ковшів і вимоги, пропоновані до вогнетривких матеріалів / Плохих П. А., Вожол М. А., Хавалиць Ю. В., Плохих А. П. *Метал та лиття України*. 2021. Том 29. № 3(326). С. 21-25. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>.
9. Corrosion Mechanism of a Density-Reduced Steel Ladle Lining Containing Porous Spinel-Calcium Aluminate Aggregates / Ch. Wohrmeyer et al. *Ceramics*. 2020. No. 3. Pp. 155-170. doi: <https://doi.org/10.3390/ceramics3010015>.
10. Molchanov L. S., Lantukh O. S., Synehin Y. V. Physical Modeling of Erosion Destruction of Teeming Ladle Lining in the Process of Its Exploitation. *Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute*. 2019. No. 1. Pp. 65-71. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-142-1-65-71>.
11. Krasnikov K., Lyzhov M., Fatykhova T. Computer Analysis of Influence of Melt Blowing Modes on Ladle Lining Mechanical Erosion. *Математичне моделювання*. 2023. № 1(48). С. 132-137. DOI: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(48\)2023.280789](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(48)2023.280789).
12. Zushu L., Kusuhiro M., Zainan T. Reactions Between MgO-C Refractory, Molten Slag and Metal. *ISIJ International*. 2000. Vol. 40. Iss. Suppl. Pp. 101-105. DOI: https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.Suppl_S101.
13. Застосування вогнетривких матеріалів для сталерозливного ковша / Стоянов О. М., Нізяєв К. Г., Малій Х. В., Кухар В. В. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 46. С. 69-78. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288166>.
14. Milan C. Application of Refractory Materials in the BOF Steel Plant in TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY. *The 7th European Oxygen Steelmaking Conference*, Trinec, Czech Republic, September 9-11, 2014.

15. Охотский В. Б., Зражевский А. Д. Закономерности износа ковшевой футеровки. Результаты исследований. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 3. С. 24-28.
16. Computational Evaluation of Flow-Induced Abrasion of Blade and Ladle in Kanbara Reactors for Hot Metal Desulfurization / Li Q et al. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2022. Vol. 74. Pp. 1588-1600. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-021-05120-z>.
17. Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating tuyere / Sigarev E. N., Chernyatevich A. G., Chubin K. I., Zarandiya S. A. *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41(6). Pp. 487-497. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091211060155>.
18. Єськов Д. В., Сігарьов Є. М. Параметри вдування реагентів та закупорювання Т-подібних наконечників фурм. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2024. Вип. 1(44). С. 16-26. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.44.2024.2>.
19. Розподіл металевих крапель між газовою та шлаковою фазами при продуванні ковшової ванни / Сігарьов Є. М., Єськов Д. В., Похвалітий А. А., Манукян Т. А. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2022. Вип. 2(41). С. 9-18. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.41.2022.1>.

References:

1. Ye.M. Sigarev, D.V. Yeskov, G.Yu. Kryachko, and I.M. Matina, «Sulfidna yemnist ta vlastyvoli modyfikovanykh kovshovykh shlakiv» [«Sulfide capacity and properties of modified bucket slags»], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, To the 95th anniversary of the Department of Metallurgy named after Professor V.I. Loginov of the Dniprovsky State Technical University, pp. 76-88, 2024. doi: **10.31319/2519-2884.tm.2024.7**. (Ukr.)
2. A.N. Smirnov, S.G. Zhemerov, and E.V. Shtepan, «Yssledovanye stoikosty ohneupornoho sloia pry produvke metalla v stalerazyvochnom kovshe ynertnim hazom» [«Investigation of the resistance of the refractory layer during blowing of metal in a steel ladle with inert gas»], *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Scientific papers of Donetsk national technical university*, № 12(177), pp. 130-136, 2011. (Rus.)
3. J. P. Bennett, and J. D. Smith, *Fundamentals of Refractory Technology*. USA: The American Ceramic Society, 2001.
4. C.A. Schacht, *Refractories Handbook*. USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2004.
5. W.E. Lee, and S. Zhang. «Melt Corrosion of Oxide and Oxide-Carbon refractories», *International Materials Reviews*, № 44(3), pp. 77-104, 1999. doi: **10.1179/095066099101528234**.
6. W.E. Lee, «Theory, Experiment and Practice of Slag Attack on Refractories», in Proc. Tehran International Conference on Refractories, 2004, pp. 13-27, 2004.
7. A. Buhr, «Refractories for Secondary Steelmaking Metallurgy», *CN-Refractories*, № 6(3), pp. 19-30, 1999.
8. P.A. Plokhiih, M.A. Vozhol, Yu.V. Khavalits, and A.P. Plokhiih, «Umovy sluzhby futerovky stale-rozlyvnykh kovshiv i vymohy, proponovani do vohnetryvkykh materialiv» [«Service conditions of steel-pouring ladle lining and conditions for refractory materials»], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, № 29(326), pp. 21-25, 2021. doi: **10.15407/steelcast2019.10.064**. (Ukr.)
9. Ch. Wohrmeyer, J. Gao, Ch. Parr, M. Szepizdyn, R.-M. Mineau, and Z. Junhui, «Corrosion Mechanism of a Density-Reduced Steel Ladle Lining Containing Porous Spinel-Calcium Aluminate Aggregates», *Ceramics*, no. 3, pp. 155-170, 2020. doi: **10.3390/ceramics3010015**.
10. L.S. Molchanov, O.S. Lantukh, and Y.V. Synehin, «Physical Modeling of Erosion Destruction of Teeming Ladle Lining in the Process of Its Exploitation», *Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute*, № 1, pp. 65-71, 2019. doi: **10.31649/1997-9266-2019-142-1-65-71**.
11. K. Krasnikov, M. Lyzhov, and T. Fatykhova, «Computer Analysis of Influence of Melt Blowing Modes on Ladle Lining Mechanical Erosion», *Mathematical modeling*, № 1(48), pp. 132-137, 2023. doi: **10.31319/2519-8106.1(48)2023.280789**.

12. L. Zushu, M. Kusuhira, and T. Zainan, «Reactions Between MgO-C Refractory, Molten Slag and Metal», *ISIJ International*, vol. 40, iss. Suppl, pp. 804-815, 2000. doi: 10.2355/isijinternational.40.Suppl_S101.
13. O.M. Stoianov, K.H. Niziaev, Kh.V. Malii, and V.V. Kukhar, «Zastosuvannia vohnetryvkykh materialiv dlia stalerozlyvnoho kovsha» [«Application of refractory materials for steel ladles»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, № 46, pp. 69-78, 2023. doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288166. (Ukr.)
14. C. Milan, «Application of Refractory Materials in the BOF Steel Plant in TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY», in Proc. The 7th European Oxygen Steelmaking Conference, Trinec, Czech Republic, 2014.
15. V.B. Okhotskii, and A.D. Zhrazhevskii, «Zakonomernosty yznosa kovshevoi futerovky. Rezultati yssledovaniy» [«Patterns of bucket lining wear. Results of studies»], *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promishlennost – Metallurgical and mining industry*, № 3, pp. 24-28, 2014. (Rus.)
16. Q. Li, S. Ma, X. Shen, M. Li, and Z. Zou, «Computational Evaluation of Flow-Induced Abrasion of Blade and Ladle in Kanbara Reactors for Hot Metal Desulfurization», *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, vol. 74, pp. 1588-1600, 2022. doi: 10.1007/s11837-021-05120-z.
17. E.N. Sigarev, A.G. Chernyatevich, K.I. Chubin, and S.A. Zarandiya, «Desulfurization of hot metal by the injection of disperse magnesium through a submerged rotating tuyere», *Steel in Translation*, № 41(6), pp. 487-497, 2011. doi: 10.3103/S0967091211060155.
18. D.V. Yeskov, and Ye.M. Sigarev, «Parametry vduvannia reahentiv ta zakuporiuvannia T-podibnykh nakonechnykh furm» [«Reagents injection parameters and clogging t-shaped lance»], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, № 1(44), pp. 16-26, 2024. doi: 10.31319/2519-2884.44.2024.2. (Ukr.)
19. Ye.M. Sigarev, D.V. Yeskov, A.A. Pokhvalitii, and T.A. Manukian, «Rozpodil metalevykh krapel mizh hazovoiu ta shlakovoi fazamy pry produvanni kovshovoi vanny» [«Distribution of metal droplets between gas and slag phases during bucket bath blowing»], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky) – Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*, № 2(41), pp. 9-18, 2022. doi: 10.31319/2519-2884.41.2022.1. (Ukr.)

Стаття надійшла 27.11.2024

Стаття прийнята 10.12.2024