

НЕДБАЙЛО М.М., аспірант  
СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор  
БАЙДУЖ Ю.В., аспірант

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОГАЗОДИНАМІЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗДУВАННЯ ШЛАКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ДВОЯРУСНОЇ ФУРМИ

**Вступ.** Для стабілізації динаміки фаз у кисневому конвертері та дуттьового режиму плавки необхідною умовою є забезпечення симетричності робочого простору незалежно від періоду кампанії агрегату по футерівці. Практично на всіх металургійних підприємствах України вже застосовуються сучасні способи гарячого ремонту футерівки конвертерів, у тому числі шляхом роздування кінцевого модифікованого шлаку з використанням спеціальних гарнісажних фурм [1, 2].

У той же час, як встановлено дослідженнями топографії зносу футерівки по ходу кампанії 260-т конвертерів в умовах конвертерного цеху ПАТ «ДМК» [3], ускладнення у формуванні рівномірного за товщиною шару захисного шлакового гарнісажу та відповідно неможливість забезпечення симетричності робочого простору виникають у межах областей циліндрової частини агрегату, розташованих на меридіанах 50, 150, 215, 310 град. (між цапфовими зонами та зонами випуску та завалки) (рис.1).

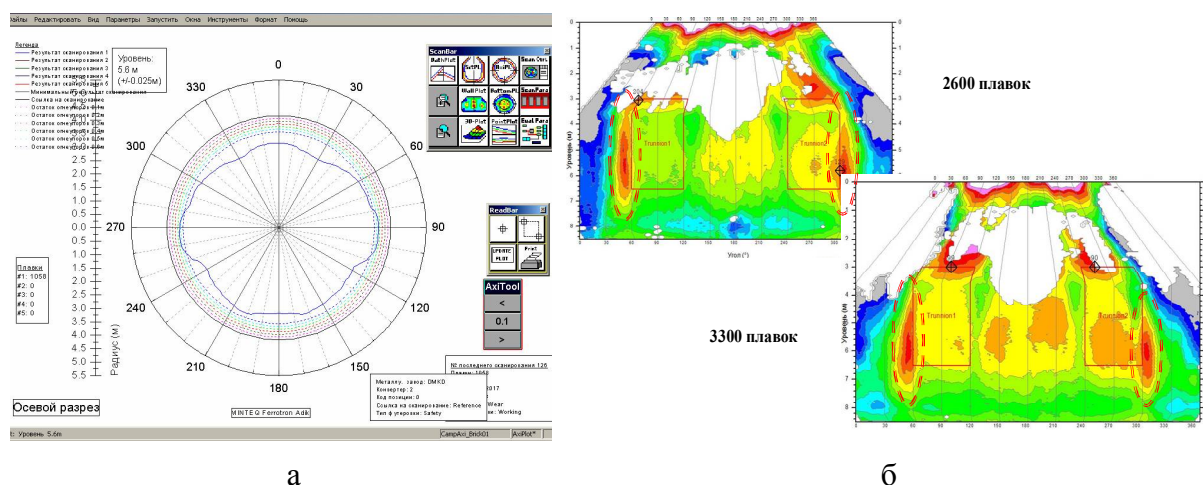


Рисунок 1 – «Проблемні» зони (1) на сканограмі осевого зрізу (а) та розгортці конвертера (б) у різні періоди кампанії конвертера по футерівці

Методика визначення тривалості роздування ванни для нанесення на футерівку гарнісажного шару заданої товщини, рівномірного по висоті агрегату, представлена у роботі [4]. Показано, що площа «плями» шлакового гарнісажу на поверхні футерівки обмежується площею  $S_C$  та визначається кількістю сопел Лавалю у наконечнику фурми, а висота «плями»  $\Delta H$  у відповідному секторі – кутом нахилу сопел Лавалю. Але навіть при використанні визначеної розрахунками траєкторії переміщення фурми по висоті покриття гарнісажем «проблемних» зон 1 (рис.1) та досягнення симетричності робочого простору не забезпечуються.

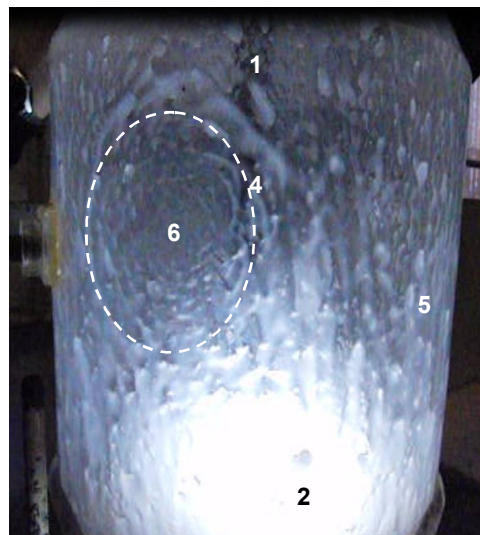
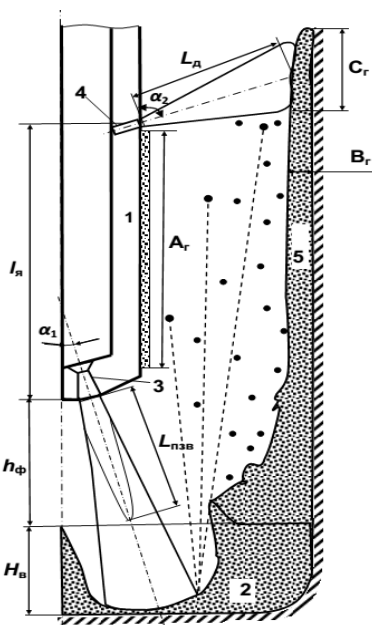
**Постановка задачі.** Для вирішення описаної вище проблеми виготовлена та впроваджена у промислову експлуатацію в умовах конвертерного цеху ПАТ «ДМК» двоярусна гарнісажна фурма [1] із додатковими соплами на боковій поверхні стовбура фурми на визначені відстані від наконечника. Додаткові сопла призначені для перенаправлення частини потоку шлакових крапель у «проблемні» зони 1 (рис.1) конвертера.

Як показано у [4], при кінетичній енергії струменів, що витікають скрізь сопла Лавалю, яка складає 38883,18 Дж та 9915,5 Дж для сопел з критичним діаметром 0,043 м та 0,037 м відповідно, витрата енергії на утворення поверхні розподілу «газ-шлак» не перевищує 1,5 Дж. Таким чином, переважна частка енергії витрачається на дроблення шлакового розплаву та формування зворотного газошлакового потоку з винесенням крапель на поверхню футерівки, стовбур фурми та за межі конвертера скрізь горловину.

Метою даного дослідження є визначення впливу взаємного розташування основних та додаткових сопел та положення двоярусної гарнісажної фурми над шлаковою ванною по ходу роздування останньої на закономірності формування гарнісажного шлакового покриття та ефективність використання підготовленого шлаку.

**Результати роботи.** Дослідження проводили із використанням методики та лабораторної установки на прозорій моделі 260-т кисневого конвертера, наведеної у роботі [5].

Для роздування рідкої ванни з направленим бризковиносом на стіни конвертера та перенаправлення частини потоку крапель рідини у «проблемні» зони (рис.2) використовувалися модельні одноярусні фурми, які містили чотири та шість сопел Лавалю (із згрупованими по 3 соплами у напрямку цапфових зон) у наконечнику, та двоярусні фурми. Двоярусні фурми додатково мали чотири зорієнтованих у напрямках «проблемних» зон (рис.1) циліндрових сопла на боковій поверхні стовбура з можливістю зміни їх положення відносно торця наконечника з соплами Лавалю.



- а
- б
- 1 – фурма; 2 – шлакова ванна; 3 – сопла Лавалю наконечника фурми;  
 4 – циліндрові сопла додаткового ярусу; 5 – гарнісажний шар;  
 6 – «пляма», яку сформовано під впливом струменів з додаткових сопел 4

Рисунок 2 — Схема (а) та результати (б) нанесення шлакового гарнісажу шляхом роздування шлакової ванни із використанням двоярусної фурми

Для визначення характеру та ступеня впливу глибини шлакової ванни ( $X_1$ ), висоти розташування наконечника фурми над ванною ( $X_2$ ) та відстані між наконечником фурми та боковими циліндровими соплами ( $X_3$ ) на розміри зони «зашлакованості» стовбура фурми ( $A_r$ ), товщину шару шлаку на стінах конвертера ( $B_r$ ) та ширину зони шлакового гарнісажу у «проблемних» зонах ( $C_r$ ) використано методику планування експерименту. Сплановано та реалізовано повний факторний експеримент (табл.1) за схемою, наведеною на рис.2.

Таблиця 1 – Матриця планування та результати експериментів з роздування рідкої ванни газовими струменями із застосуванням двоярусної фурми

№	$X_1$ , см		$X_2$ , см		$X_3$ , см		$A_r$ , см	$B_r$ , см	$C_r$ , см	$X_1X_2$	$X_1X_2$	$X_1X_2$	$X_1X_2X_3$
1	-	1	-	3	-	8	28,0	0,42	3,3	+	+	+	-
2	+	3	-	3	-	8	15,0	0,21	11,1	-	-	+	+
3	-	1	+	9	-	8	19,0	0,33	2,2	-	+	-	+
4	+	3	+	9	-	8	35,0	0,12	7,1	+	-	-	-
5	-	1	-	3	+	11	29,0	0,82	3,3	+	-	-	+
6	+	3	-	3	+	11	20,0	0,21	10,1	-	+	-	-
7	-	1	+	9	+	11	30,0	1,05	2,1	-	-	+	-
8	+	3	+	9	+	11	22,0	0,42	6,0	+	+	+	+

За результатами проведених порівняльних експериментів встановлено, що при використанні одноярусних фурм для роздування рідкої ванни на стіни конвертера нанесення рівномірного за товщиною шару гарнісажного покриття за будь-яких варіантів конструкції наконечника (4 або 6 сопел Лавалля, положення фурми над ванною тощо) не досягається.

В умовах збільшення кількості сопел з 4-х до 6-ти для збереження значень імпульсу струменів витрату газу на роздування збільшили з 0,24 м<sup>3</sup>/хв. до 0,36 м<sup>3</sup>/хв. За рахунок такої зміни забезпечили підвищення густини покриття гарнісажем у навколоаппаратних зонах робочого простору. В той же час збільшився і ступінь «зашлакованості» стовбура фурми та втрати рідини з виносом за межі агрегату, що є свідченням зменшення загальної ефективності операції.

З переходом до використання для роздування ванни двоярусної фурми на наступному етапі експериментів при використанні як 4-х, так і 6-ти соплових наконечників, спостерігали зменшення інтенсивності бризковиносу за межі конвертера та ступеня «зашлакованості» стовбура фурми.

Необхідно відмітити, що застосування додаткових сопел 4 (рис.2) призвело до формування характерних «плям», сформованих під впливом тиску струменів з останніх за рахунок перенаправлення частини зворотного газорідкого потоку у визначені зони на стінах конвертера. Площа  $S_C$  та  $\Delta H$  «плями» 6 (рис.2) у відповідному секторі на стінах конвертера залежали від відстані наконечника фурми від рівня ванни та взаємного розташування між ярусами сопел.

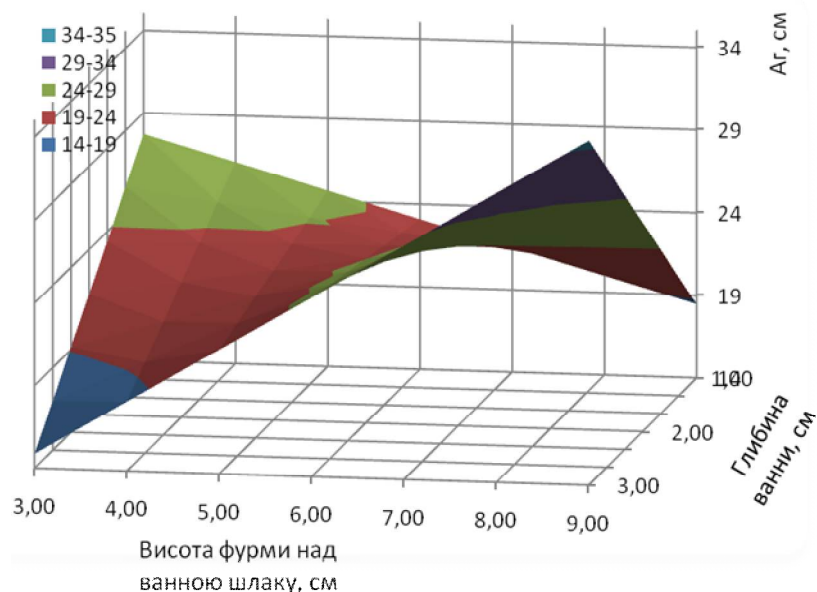
Математичні моделі, отримані за результатами обробки експериментальних даних, у натуральних значеннях (рис.2) мають вигляд:

$$A_r = 80,895 - 37,835 \cdot H_B - 14,579 \cdot h_\Phi - 4,355 \cdot l_\Delta + 8,622 \cdot H_B \cdot h_\Phi + 3,015 \cdot H_B \cdot l_\Delta + 1,326 \cdot H_B \cdot l_\Delta - 0,7739 \cdot H_B \cdot l_\Delta; \quad (1)$$

$$B_r = -0,642 + 0,43 \cdot H_B - 0,1476 \cdot h_\Phi + 0,1507 \cdot l_\Delta - 0,067 \cdot H_B \cdot l_\Delta + 0,0166 \cdot h_\Phi \cdot l_\Delta; \quad (2)$$

$$C_r = -2,5825 + 6,0825 \cdot H_B + 0,0825 \cdot h_\Phi + 0,168 \cdot l_\Delta - 0,2475 \cdot H_B \cdot h_\Phi - 0,1675 \cdot H_B \cdot l_\Delta. \quad (3)$$

Використання отриманих залежностей (1)-(3) для чисельного експерименту дозволило встановити особливості використання двоярусної фурми для роздування ванни у дослідженому діапазоні характеристик операції.



тут і на рис. 4, 5 – для відстані між ярусами у 9,6 кал.

Рисунок 3 – Вплив висоти фурми та глибини шлакової ванни на довжину зони «зашлакованості» стовбура двоярусної фурми

ром. Таким чином, існує раціональний рівень шлакової ванни та співвідношення між  $A_T$  та висотою розташування фурми над ванною.

Різномісний характер впливу відстані між ярусами на величину  $B_T$  встановлено для діапазонів у 9,6 та 12 кал. (рис.4). Так, при 9,6 кал. між ярусами по мірі підйому наконечника фурми над ванною товщина гарнісажного шару на стінах зменшується, а для 12 кал. спостерігаємо збільшення вказаного показника у всьому дослідженому діапазоні глибини ванни.

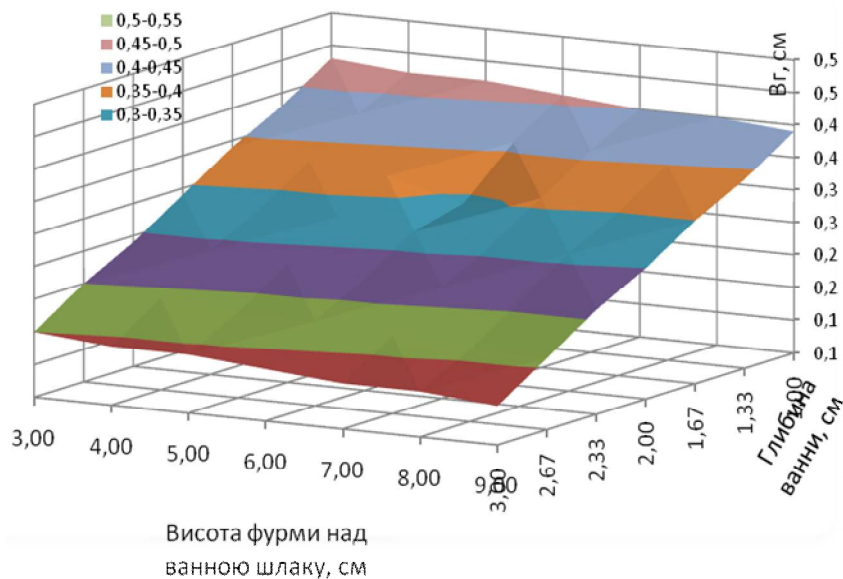


Рисунок 4 – Залежність товщини шлакового гарнісажу на стінах конвертера від висоти фурми та глибини шлакової ванни

Так, мінімізація протяжності зони «зашлакованості» стовбура фурми забезпечується при висоті розташування наконечника фурми над ванною у діапазоні від 2,5 до 4,2 кал. (рис.3) та відстані між ярусами сопел у 9,6 кал.

Характер впливу рівня ванни на «зашлакованість» стовбура при переміщенні фурми по висоті різномісний. Перехід до відстані у 12 кал. між ярусами сопел при одночасному збільшенні глибини шлакової ванни призводить до сталого покриття стовбура фурми шлаковим шаром.

У той же час, у повній відповідності до існуючих уявлень [2-5], максимальна товщина гарнісажу на

стінах забезпечується при максимальній глибині шлакової ванни. Встановлено існування характерних зон з «піковими» значеннями показників у діапазонах глибини ванни у 1,33-2,0 см при 5 кал. висоти фурми та 9,6 кал. між ярусами (рис.4) та 2,33-3,0 см при 7 кал. висоти та 12 кал. між ярусами відповідно.

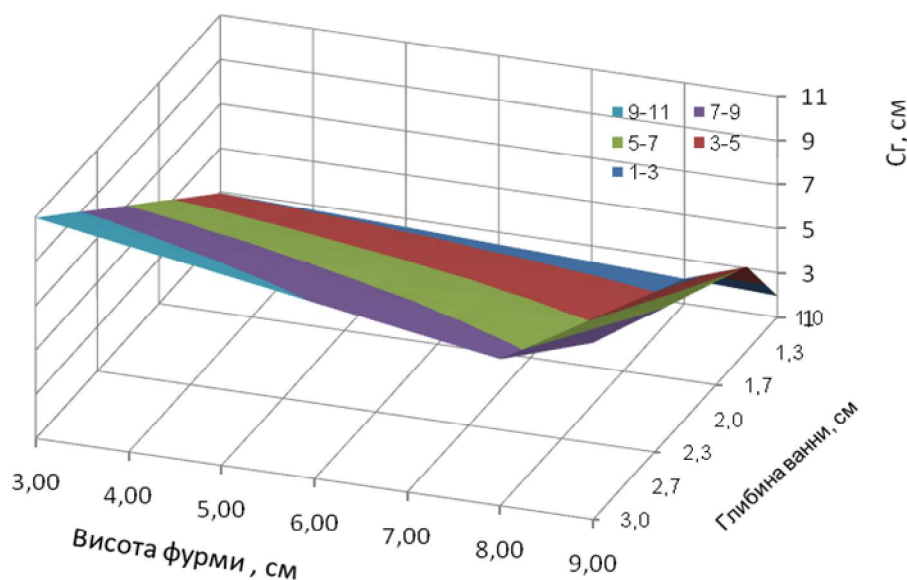


Рисунок 5 – Ширина зони шлакового гарнісажу, сформованої під впливом струменів з додаткових бокових сопел фурми

кал. для 9,6 кал. відстані між ярусами сопел відповідно спостерігається стале збільшення величини  $C_r$ , а при зменшенні глибини шлакової ванни по ходу її роздування на стіни значення  $C_r$  різко зменшується (рис.5), що відповідає виконаному авторами роботи теоретичному обґрунтуванню та уявленням щодо характеру впливу потоків з бокових сопел на можливість перенаправлення частини газошлакового потоку у визначені зони. При збільшенні відстані між ярусами сопел до 12 кал. вплив висоти розташування наконечника фурми на величину  $C_r$  стабілізується (рис.3). З точки зору забезпечення максимальних значень  $C_r$  у такому випадку раціональним є підтримання максимального рівня ванни при мінімально можливій висоті наконечника фурми.

Встановлено, що з точки зору забезпечення сталих значень  $C_r$  найбільш доцільним є розташування наконечника фурми на висоті 2,5-5 кал. у всіх діапазонах глибини шлакової ванни.

**Висновки.** Таким чином, за результатами експериментів можна зробити висновки про доцільність подальшого удосконалення запропонованої конструкції гарнісажної двоярусної фурми [1] у наступних напрямках: заміна шестисоплового наконечника на чотирисопловий із згрупованими у напрямках цапфових зон соплами Лаваля збільшеного діаметру; виготовлення наконечника фурми зі звичайної сталі та переведення фурми на газове охолодження; використання стовбура газоохолоджуваної фурми із можливістю зміни відстані між ярусами по ходу кампанії конвертера по футерівці.

З використанням методів планування експерименту досліджено вплив взаємного розташування ярусів сопел та положення двоярусної фурми над ванною по ходу роздування останньої на гідрогазодинамічні закономірності формування гарнісажного покриття та ефективність використання підготовленого шлаку. Отримано математичні мо-

Встановлено також існування декількох рівнів розташування наконечника фурми над шлаковою ванною з характерними змінами ширини зони шлакового гарнісажу  $C_r$ , сформованого під впливом струменів з додаткових бокових сопел (рис.5).

Так, при висоті розташування наконечника фурми у 5,8 кал. та глибині ванни 1,4-2,5

делі та проведено чисельний експеримент з їх використанням. Встановлено раціональні параметри операції роздування шлакової ванни з використанням двоярусної фурми за принципом перенаправлення частини зворотного газшлакового потоку у визначені «проблемні» зони на стінах конвертера.

Визначено напрямки подальшого удосконалення конструкції двоярусної гарнісажної фурми.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Сигарев Е.Н. Модернизация гарнисажной фурмы для ошлакования футеровки / Е.Н.Сигарев, Н.Н.Недбайло, Р.В.Борщевский // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2014. – Вип.1(24). – С.7-13.
2. New system for Applying a slag Coating to the converter lining / A.G.Chernyatevich, E.N.Sigarev, I.V.Chernyatevich [and el.] // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47, № 6. – P.394-398.
3. Топографирование поверхности футеровки конвертера / Е.Н.Сигарев, Н.К.Сигарев, Д.А.Семенова, Ю.В.Байдуж // Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2015. – Вип. 1(26). – С.19-24.
4. Определение параметров раздувки шлаковой ванны на футеровку конвертера / Е.Н.Сигарев, К.Г.Низяев, Н.К.Сигарев [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – №3. – С.31-36.
5. Дослідження гідрогазодинамічних закономірностей нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера комбінованого дуття / Сігарьов Є.М., Чернятевич А.Г., Недбайло М.М., Чернятевич І.В. // Теория и практика металлургии. – 2015. – № 1,2 (102-103). – С.204-206.

Надійшла до редколегії 21.05.2018.

УДК 669.162

DOI 10.31319/2519-2884.32.2018.161

ЛЕБІДЬ Ю.К., інженер-технолог 1 категорії  
КРЯЧКО Г.Ю.\*, к.т.н., доцент

ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»

\*Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

### ВПЛИВ ВМІСТУ ОБКОТИШІВ В ШИХТІ НА РОБОТУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ТА ВИТРАТУ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

**Вступ.** Дефіцит відомих [1] компенсаційних ресурсів для створення умов для вдування підвищених кількостей пиловугільного палива (ПВП) в горн доменних печей України змушує шукати інші, доступні способи впливу на витрату ПВП. Один з таких способів запропоновано в роботі [2]. Суть способу полягає в тому, що для збільшення витрати ПВП пропонується підвищувати прихід FeO з компонентами шихти. Технологічний прийом використання залізородних матеріалів з підвищеним вмістом FeO повинен, на думку авторів [2], виконуватися при появі ознак, що підтверджують необхідність обмеження подачі ПВП. До таких ознак віднесені, перш за все, погіршення якості коксу і залізородної сировини, збільшення виходу шлаку, захарачення горна і інші