

## РОЗДІЛ «МЕТАЛУРГІЯ»

УДК 669.162

DOI 10.31319/2519-2884.32.2018.158

СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор  
КОЧМОЛА Д.С., аспірант  
СІГАРЬОВ М.К., к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**ФОРМУВАННЯ ВІДКРИТОЇ ЗОНИ НА МІЖФАЗОВІЙ ГРАНИЦІ  
ПРИ КОВШОВОМУ РАФІНУВАННІ РОЗПЛАВУ**

**Вступ.** В ході високотемпературних досліджень та відпрацювання удосконалених технологій попередньої ковшової десульфурзації та дефосфорації переробного чавуну [1-3] перед сталеплавильним переділом встановлено, що на умови протікання процесів та кінцеві результати видалення сірки та фосфору з чавуну впливає фізико-хімічний стан покривного шлаку.

**Постановка задачі.** Для встановлення раціональних параметрів ковшового рафінування розплаву переробного чавуну (витрат газу-носія, кількості сопел у наконечнику та швидкості обертання заглибної фурми) [1-3] та ступеня впливу товщини шару покривного шлаку на утворення відкритої, незахищеної від впливу оточуючого середовища, контактної зони на границі «шлак-метал» (так званого «ока») необхідно проведення досліджень з урахуванням наявності у системі трьох фаз та переміщення реакційних зон у ванні по ходу обробки.

**Результати роботи.** З метою з'ясування особливостей формування відкритої зони на міжфазовій поверхні «шлак-метал», гідрогазодинамічних та масообмінних особливостей використання оберткової заглибної фурми провели серію експериментів на холодній моделі великовантажного (220-т) заливального ковша. Для експериментів використано модель з плексигласу [4] у масштабі 1:12 по відношенню до 230-т заливального ковша ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат». У якості модельної рідини для металевого розплаву використовували воду (20<sup>0</sup>С), газу-носія – компресорне повітря, а для моделювання шару покривного шлаку – синтетичне моторне масло (5W-30). Модельні фурми зі змінними наконечниками занурювали в рідку ванну глибиною 300-320 мм та шаром «шлаку» на поверхні товщиною від 6-ти до 30-ти мм. Основні параметри об'єкта та моделі наведено у табл.1.

З метою запобігання утрудненням у формуванні струменів і пузирів газу на виході із сопел торець наконечника фурми розташовували на відстані 20-30 мм від днища ковша. При моделюванні використовували одно- та двосоплові наконечники заглибних фурм з циліндровими соплами [2] діаметром 0,0013 та 0,001 мм відповідно. Швидкість обертання заглибної фурми навколо вертикальної осі змінювали в межах від 0 до 240 об/хв.

Процес формування «ока» та гідрогазодинамічні особливості поведінки поверхні ванни по ходу вдування газу через заглибну фурму при зміні товщини шару покривного шлаку фіксували за допомогою цифрової камери «CASIO EX-FH25» з використанням високошвидкісної зйомки (до 240 кадр/сек.). Відеоряд розбивали на кадри (1/30 - 1/240 сек.) для подальшого аналізу.

Для визначення ступеня впливу основних параметрів процесу обробки рідкої ванни на умови формування «ока» використали методику планування експерименту. Для врахування одночасного впливу швидкості обертання фурми ( $X_1(n)$ , об/хв.), товщини шару покривного шлаку ( $X_2(\delta)$ , мм) та витрати газу-носія ( $X_3(Q)$ , л/хв.) сплановано та реалізовано дробний факторний експеримент.

У відповідності до матриці планування провели по вісім основних експериментів у кожному з визначальних, прийнятих у відповідності до раніше отриманих результатів [2, 3], діапазонів швидкості обертання фурми: 0-90 об/хв.; 90-120 об/хв. та 120-240 об/хв. відповідно.

Таблиця 1 – Параметри об'єкта та моделі заливального ковша

№	Параметр	Об'єкт	Модель
1	Висота робочого простору заливального ковша, м	4,65	0,358
2	Діаметр донної частини робочого простору заливального ковша, м	3,25	0,250
3	Діаметр верхньої частини робочого простору заливального ковша, м	3,75	0,290
4	Глибина рідкої ванни, м	3,20	0,280
5	Товщина шару покривного шлаку на поверхні ванни, м	0,10-1,0	0,006-0,030
6	Площа міжфазової поверхні, м <sup>2</sup>	11,03	0,066
7	В'язкість покривного шлаку, Па·с	0,11-0,40	0,53
8	Щільність покривного шлаку, кг/м <sup>3</sup>	2600-3400	0,87
9	Глибина занурення заглибної фурми у ванну, м	2,90	0,260
10	Тиск газу-носія, МПа	0,55-0,60	0,50-0,55
11	Витрата газу-носія, м <sup>3</sup> /с	0,017-0,033	0,0003-0,00068
12	Характеристика наконечника заглибної фурми: - кількість циліндрових сопел, шт. - внутрішній діаметр сопла, м	1-2 0,012-0,020	1-2 0,001-0,0013

У відповідності до матриці планування (табл.2, 3) провели три серії досліджень, які включали вісім основних дослідів кожна.

Таблиця 2 – Значення факторів на нульовому, верхньому та нижньому рівнях, інтервали варіювання (для діапазону швидкості обертання фурми 0-240 об/хв.)

Інтервал варіювання, рівень	$X_1(n)$ – швидкість обертання фурми, об/хв.	$X_2(\delta)$ – товщина шару покривного шлаку, мм	$X_3(Q)$ – витрата газу-носія, л/хв.
Верхній рівень	240	30,0	2,2
Нижній рівень	0	6,0	1,0
Основний рівень	120	18,0	1,6
Інтервал варіювання	±120	±12,0	±0,6

У повній відповідності до теоретичного обґрунтування [4] встановлено основні залежності між довжиною газового струменя на виході з сопла та площею «ока» на поверхні ванни. Встановлено (рис.1, 2), що параметри вводу газу-носія у ванну суттєво впливають на відношення площі «ока» до загальної площі ванни ( $S_{\text{відн.}}$ ), яке змінюється не тільки за величиною, але і за знаком (табл.3). Так, наприклад, максимальне значення  $S_{\text{відн.}} = 49,36\%$  забезпечується при швидкості обертання фурми у 240 об/хв. при мінімальній (у досліджених діапазонах) товщині шару шлаку (6 мм), а мінімальне  $S_{\text{відн.}} = 6,03\%$  – при 240 об/хв. та товщині шлаку у 30 мм відповідно.

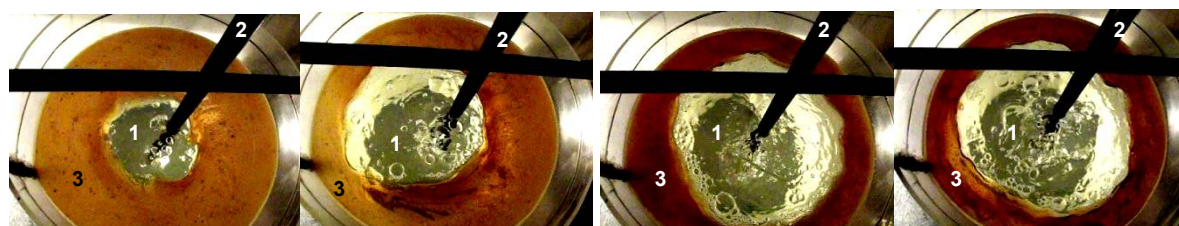
Таблиця 3 – Матриця планування (як приклад, для діапазону швидкості обертання фурми 0-90 об/хв.) та отримані результати

№	Фактор						$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$	Діам. «ока»*, см	$S_{\text{відн.}}^{**}$ , %
	$X_1(n)$		$X_2(\delta)$		$X_3(Q)$							
	код.	нат.	код.	нат.	код.	нат.						
1	+	90	+	30	+	2,2	+	+	+	+	14,87	26,3
2	-	0	+	30	+	2,2	-	-	+	-	14,50	25,0
3	+	90	-	6	+	2,2	-	+	-	-	19,75	46,38
4	-	0	-	6	+	2,2	+	-	-	+	18,12	39,06
5	+	90	+	30	-	1,0	+	-	-	-	10,67	13,55
6	-	0	+	30	-	1,0	-	+	-	+	12,25	17,84
7	+	90	-	6	-	1,0	-	-	+	+	12,25	17,84
8	-	0	-	6	-	1,0	+	+	+	-	13,12	20,48

\* Усереднений діаметр «ока»

\*\* Відношення площі «ока» до загальної площі поверхні ковшової ванни

Тобто, зменшення кількості покривного шлаку призводить до збільшення розмірів «ока» більш ніж у 8 разів.



а

б

в

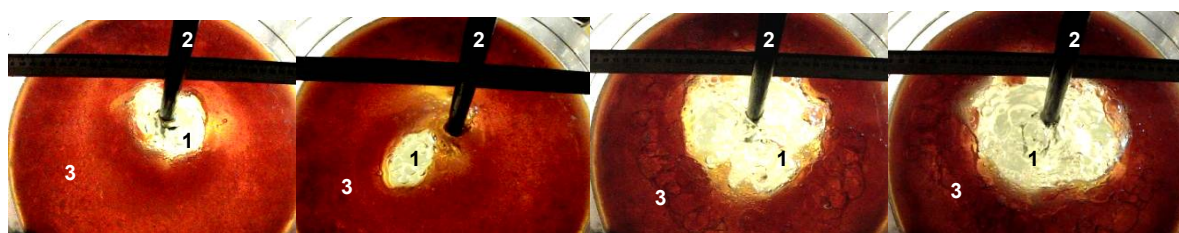
г

тут і на рис.2: 1 – «око»; 2 – стовбур заглибної фурми; 3 – шар шлаку

а –  $Q=1,0$  л/хв.;  $n=120$  об/хв.; б –  $Q=1,0$  л/хв.;  $n=240$  об/хв.;

в –  $Q=2,2$  л/хв.;  $n=120$  об/хв.

Рисунок 1 – Поверхня ванни при використанні односплового наконечника заглибної фурми при різних витратах газу-носія ( $Q$ ) та товщині покривного шлаку 6 мм



а

б

в

г

Рисунок 2 – Поверхня ванни при використанні односплового наконечника заглибної фурми при різних витратах газу-носія ( $Q$ ) та товщині покривного шлаку 30 мм

Необхідно відмітити, що вплив товщини шару покривного шлаку та швидкості обертання фурми у діапазонах 0-90 та 90-120 об/хв. менш суттєвий. Так, відношення максимального розміру «ока»  $S_{\text{відн}} = 46,38\%$  (90 об/хв. при 6 мм шлаку) до мінімального  $S_{\text{відн}} = 13,55\%$  (90 об/хв. при 30 мм шлаку) складає вже 3,4 та 4,5 для діапазону 90-120 об/хв. відповідно.

Для оцінки впливу досліджуваних факторів на геометричні параметри «ока» обробкою результатів експериментів отримано наступні рівняння регресії у кодованих змінних ( $X_i$ ):

– для діапазону 0-90 об/хв.

$$S_{\text{відн}}^k = 25.8 + 0.218 \cdot X_1 - 5.116 \cdot X_2 + 8.378 \cdot X_3 - 0.958 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1.943 \cdot X_1 \cdot X_3 - 3.4 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.546 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (1)$$

– для діапазону 90-120 об/хв.

$$S_{\text{відн}}^k = 24.748 + 0.846 \cdot X_1 - 4.188 \cdot X_2 + 9.94 \cdot X_3 - 0.014 \cdot X_1 \cdot X_2 + 3.506 \cdot X_1 \cdot X_3 - 3.251 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.396 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (2)$$

– для діапазону 120-240 об/хв.

$$S_{\text{відн}}^k = 27.22 + 1.632 \cdot X_1 - 7.97 \cdot X_2 + 8.16 \cdot X_3 - 3.808 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1.733 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.847 \cdot X_2 \cdot X_3 + 1.997 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3)$$

Переведення отриманих залежностей до використання натуральних значень  $N_i$  факторів здійснювали за виразом:

$$X_i = (N_i - N_{i0}) / \Delta N, \quad (4)$$

де  $N_{i0}$  – значення фактора на основному рівні;  $\Delta N$  – значення інтервалу варіювання.

Після переведення до натуральних значень отримані математичні моделі мають вигляд (для кожного дослідженого діапазону швидкості обертання фурми):

– для діапазону 0-90 об/хв.

$$S_{\text{відн}} = 3.14 - 0.1237 \cdot n + 0.2927 \cdot \delta + 17.954 \cdot Q + 0.0007 \cdot n \cdot \delta + 0.1 \cdot n \cdot Q - 0.4 \cdot \delta \cdot Q - 0.0015 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (5)$$

– для діапазону 90-120 об/хв.

$$S_{\text{відн}} = 1.677 - 0.172 \cdot n + 0.36 \cdot \delta + 18.871 \cdot Q + 0.000004 \cdot n \cdot \delta + 0.0997 \cdot n \cdot Q - 0.448 \cdot \delta \cdot Q - 0.00001 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (6)$$

– для діапазону 120-240 об/хв.

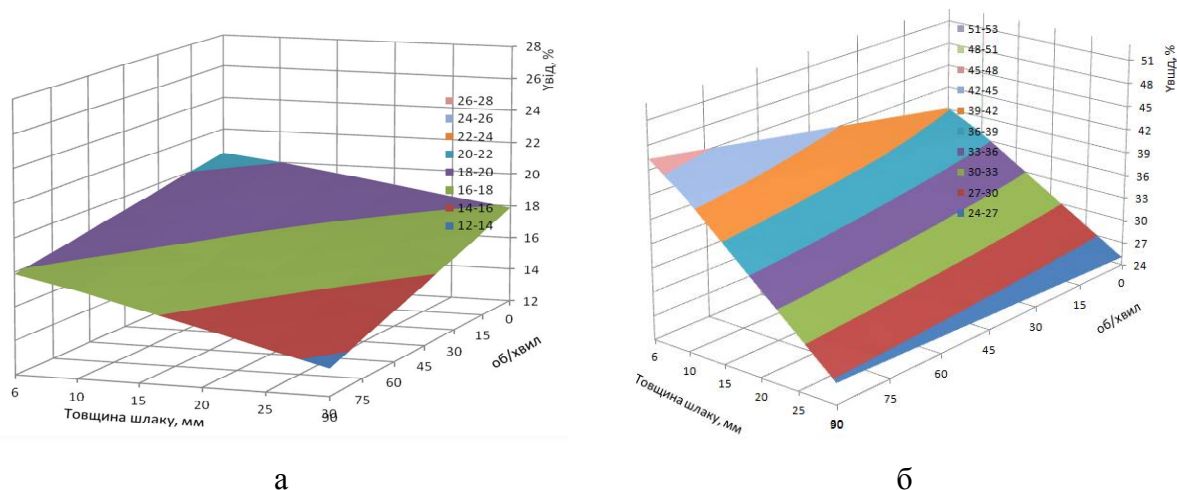
$$S_{\text{відн}} = 3.294 + 0.0855 \cdot n + 0.2825 \cdot \delta + 17.818 \cdot Q + 0.006 \cdot n \cdot \delta - 0.0167 \cdot n \cdot Q - 0.3918 \cdot \delta \cdot Q - 0.002 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (7)$$

Для визначення статистичної залежності коефіцієнтів регресії розраховали їх довірчий інтервал. Після оцінки значимості коефіцієнтів регресії проводили перевірку гіпотези щодо адекватності отриманих рівнянь за критерієм Фішера ( $F$ -критерієм). Останній – менший, ніж табличне його значення, що доводить адекватність отриманих виразів та можливість їх використання для пошуку напрямків до оптимуму.

Необхідно відмітити неоднозначну залежність розмірів «ока», що утворюється на поверхні ванни, від параметрів вдування газу та швидкості обертання фурми. Так, у діапазоні 0-90 об/хв. на розміри «ока» більший вплив має витрата газу-носія, при подальшому підвищенні обертів до 120 об/хв. вплив витрати газу-носія майже рівноцінний

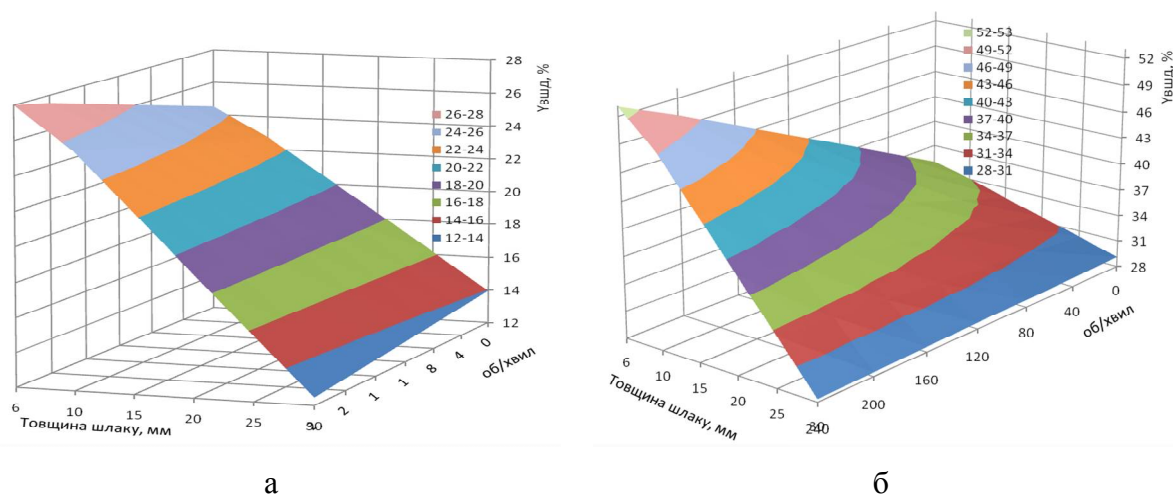
зі швидкістю обертання фурми, а у діапазоні 120-240 об/хв. найбільш визначальними факторами стають швидкість обертання та товщина шару шлаку на поверхні ванни. Таким чином, при збільшенні товщини покривного шлаку, витрати газу-носія та швидкості обертання заглибної фурми геометричні параметри «ока» на поверхні ванни змінюються різнонаправлено.

Результати чисельного моделювання із використанням отриманих математичних моделей (5-7) наведено на рис.3 та 4.



а –  $Q = 1$  л/хв.; б –  $Q = 2,2$  л/хв.

Рисунок 3 – Залежність  $S_{\text{відн.}}$ , % від швидкості обертання фурми у діапазоні 0-90 об/хв. при витратах газу-носія ( $Q$ )



а –  $Q = 1$  л/хв.; б –  $Q = 2,2$  л/хв.

Рисунок 4 – Залежність  $S_{\text{відн.}}$ , % від швидкості обертання фурми у діапазоні 120-240 об/хв. при витратах газу-носія ( $Q$ )

На підставі отриманих залежностей можна зробити наступні висновки. Для забезпечення належних умов глибокої ковшової десульфурації чавуну вдуванням диспергованих реагентів у потоці газу-носія через заглибну фурму необхідним є наявність максимально можливої товщини покривного шлаку та підвищена швидкість

обертання заглибної фурми. Це сприятиме захисту поверхні розплаву металу від впливу кисню оточуючої ківш атмосфери та створить умови для попередження ресульфурзації за відомою [3] схемою.

У той же час, для забезпечення сприятливих умов попередньої ковшової дефосфорації [5] переробного чавуну раціональним є забезпечення максимальних розмірів «ока» на поверхні ванни для спрощення регулювання окисленості покривного шлаку. Ця умова виконується шляхом мінімізації (у визначених межах) кількості покривного шлаку та у визначеному діапазоні швидкості обертання фурми.

**Висновки.** З використанням методів планування експериментів визначено залежності між параметрами ковшового рафінування переробного чавуну (витрати газу-носія, кількості сопел у наконечнику та швидкості обертання заглибної фурми, товщини шару покривного шлаку) та умовами утворення відкритої контактної зони («ока») на границі «шлак-метал». Встановлено неоднозначну залежність геометричних параметрів відкритої зони від досліджених факторів впливу. Показано, що при збільшенні товщини покривного шлаку, витрат газу-носія та швидкості обертання заглибної фурми геометричні параметри «ока» на поверхні ванни змінюються різнонаправлено. Показано, що для забезпечення належних умов глибокої ковшової десульфурзації чавуну при вдуванні диспергованих реагентів у потоці газу-носія через заглибну фурму необхідним є підтримання максимально можливої товщини рідкорухомого покривного шлаку та підвищення швидкості обертання заглибної фурми до 160-180 об/хв. Показано також, що для створення належних умов ковшової дефосфорації переробного чавуну доцільним є забезпечення максимальних розмірів «ока» на поверхні ванни, що забезпечується при мінімізації кількості окисленого основного покривного шлаку.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Chernyatevich A.G. Hot metal refining in the ladle with simultaneous removal of silicon and sulfur / Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V. // *Advances in Metallurgical Processes: 2-nd International Conference, June 2015y.: materials.* – Kiev, 2015. – P.24-27.
2. Сігарьов Є.М. Енергоефективність інтенсифікації ківшової десульфурзації чавуну Є.М.Сігарьов // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2015. – №2/1(74). – С.38-42.
3. Сигарев Е.Н. Оптимизация состава шлака для комплексного рафинирования железуглеродистого расплава / Е.Н.Сигарев // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки).* – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2012. – Вип. 3 (20). – С.23-31.
4. Сигарев Е.Н. Газораспределение в ковше с вращающейся фурмой / Сигарев Е.Н., Сигарев Н.К., Гуржий Д.О. // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки).* – Дніпродзержинськ: ДДТУ. –2014. – Вип. 2(25). – С.3-8.
5. Комплексне ковшове рафінування переробного чавуну / Чернятевич А.Г., Сігарьов Є.М., Чубіна О.А., Гуржий Д.О. // *Stategy of Quality in Industry and Education: XI International Conference, June 1-5, 2015.* – Varna, Bulgaria. – *Международный научный журнал International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus.* – 2015. – Special number. – P.176-178.

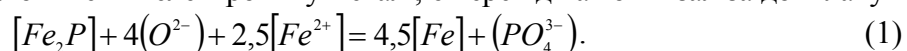
*Надійшла до редколегії 22.01.2018.*

СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор  
 ЧЕРНЯТЕВИЧ А.Г., д.т.н., професор  
 ГУРЖИЙ Д.О., аспірант  
 ЧУБІНА О.А., к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

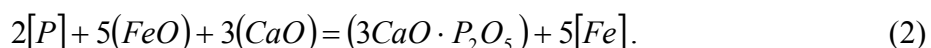
## КОНЦЕПЦІЯ ПЕРЕХОДУ ДО МАЛОШЛАКОВОЇ КОНВЕРТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ (ПОВІДОМЛЕННЯ 2)

**Вступ.** Процес видалення фосфору можна описати як перехід останнього до шлаку за рахунок зв'язування його атомів з киснем. Компенсуючим процесом, що ліквідує безперервне накопичення електронів у металі, є перехід катіонів заліза до шлаку



Тому для здійснення реакції (1) необхідно мати в шлаку іони  $O^{2-}$  та  $Fe^{2+}$ .

Прийнято вважати [1], що найбільш значний вплив на дефосфорацію виявляють оксиди заліза шлаку як джерело кисню і оксиди кальцію, що володіють найбільшою здатністю до офлюсування оксиду фосфору. Випереджальне видалення фосфору в порівнянні з вуглецем у цих умовах досягається тільки при швидкому наведенні високоосновного рідкорухомого окисленого шлаку, на границі якого з металом розвивається реакція дефосфорації



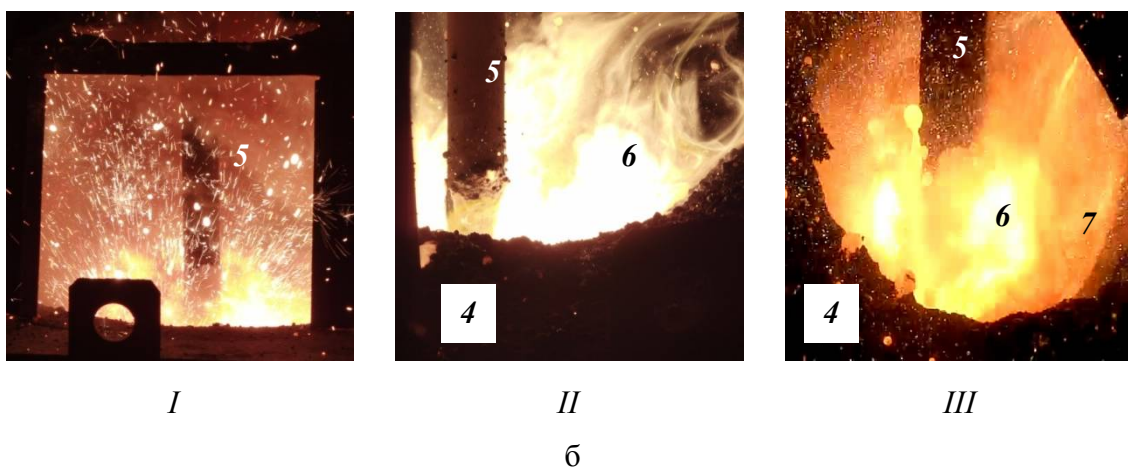
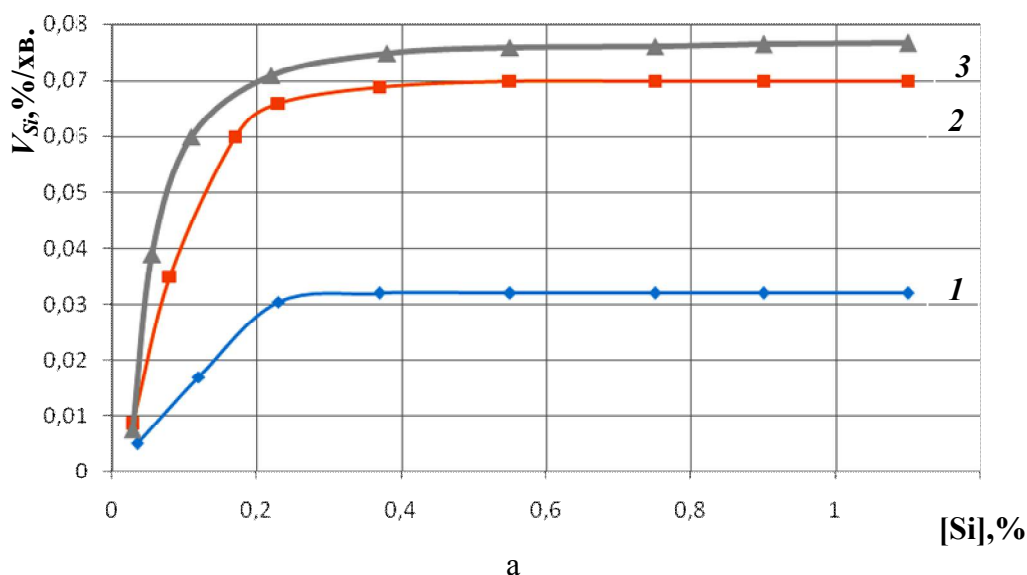
Для інтенсифікації реакції дефосфорації необхідно сприяти ранньому утворенню  $[CaO \cdot Fe(Mn)_xO]_p$  з високою концентрацією  $Fe_xO$ , що досягається на практиці попереднім знекремнюванням до 0,15% Si чавуну і подачею в кисневому або азотнокисневому струмені сумішей на основі вапна, залізної руди, прокатної окалини з добавками розріджувачів із одночасним вдуванням кисню через додаткову верхню фурму на поверхню ванни. Для досягнення високої ефективності дефосфорації основність шлаку зазвичай підтримують на рівні 5,0, що забезпечує отримання найбільш високих значень відношення  $(P)/[P]$  [1].

**Постановка задачі.** З метою уточнення особливостей та закономірностей видалення фосфору з переробного чавуну в умовах інжекції реагентів вглиб розплаву у ковші через заглибну фурму, доцільності використання верхньої кисневої фурми для регулювання вмісту ( $Fe_xO$ ) у шлаку на поверхні ванни, впливу основності шлаку на хід та результати рафінування проведено серію високотемпературних досліджень [2].

**Результати роботи.** Динаміка та характерна картина знекремнювання попередньо рафінованого за сіркою [3] переробного чавуну при вдуванні газоподібного кисню через заглибні стаціонарну або обертову фурми типу «труба в трубі» [4] представлено на рис.1. Встановлено, що зменшення вмісту кремнію в чавуні з 1,20% до 0,010% забезпечується у ході 25...12-ти хвилинної обробки розплаву з відповідним підвищенням інтенсивності вдування кисню з 0,60 до 1,010 м<sup>3</sup>/т·хв. та швидкості обертання фурми (при сталій інтенсивності вдування кисню). Одночасно відбувається видалення частки вуглецю до 0,4% і марганцю до 0,2%.

Підвищення інтенсивності вдування кисню призводить до закономірного спінювання в'язкого кислого шлаку (72,0...78,3%  $SiO_2$ , 4,2...6,8%  $FeO$ , 3,8...5,4%  $MnO$ ). Газоподібні продукти окислення вуглецю чавуну прориваються крізь шар шлаку на по-

верхню ванни у формі своєрідних «свищів» (рис.1, б), які без певної закономірності для стаціонарної та відносно впорядковано для обертової фурми змінюють своє положення відносно стовбура фурми. При використанні обертової фурми спостерігається розосередження виходу «свищів» по периферії ванни.



витрата  $O_2$ : стаціонарна фурма: 1 – 0,6 м<sup>3</sup>/т·хв.; 2 – 1,01 м<sup>3</sup>/т·хв.;  
 обертова фурма: 3 – 1,01 м<sup>3</sup>/т·хв.;  
 I – на початковому етапі обробки чавуну; II – у основний період обробки;  
 III – наприкінці обробки

4 – ківш; 5 – заглибна фурма; 6 – вихід газів на поверхню ванни; 7 – шлак

Рисунок 1 – Залежність швидкості знекремнювання чавуну ( $V_{Si}$ ) від вмісту кремнію при витратах кисню (а) та характерна картина розвитку процесу знекремнювання (б)

Підтверджено, що швидкість видалення кремнію при вмісті  $[Si] > 0,2\%$  не залежить від концентрації кремнію і визначається (рис.1, а) тільки витратою кисню, тобто швидкість реакції десиліконізації лімітується поставкою (масоперенесенням) кисню до місця реакції.

Як показали результати лабораторних експериментів зі знекремнювання низькомарганцевого чавуну, особливу увагу необхідно приділяти елементам технології, що сприяють формуванню рідкорухомого шлаку із запобіганням викидів останнього з ковшу.



До елементів технології, що запобігають викиданню розплаву, як встановлено у ході досліджень, відноситься знекремнювання чавуну продуванням через обертову фурму кисневими струменями, що несуть у зваженому стані суміш вапняку з содою у співвідношенні 58...62%  $CaCO_3$  + 38...42%  $Na_2CO_3$ . Сода у такому випадку виконує роль як додаткового окислювача домішок чавуну, так і розріджувача покривного шлаку. Так, у разі формування в ході обробки рідкорухомого шлаку, що містив 32,5...47,9%  $CaO$ , 38,7...53,1%  $SiO_2$ , 6,7...12,4%  $Al_2O_3$ , 0,15...0,23%  $MnO$ , 4,3...5,8%  $FeO$ , рафінування чавуну по кремнію не викликало ускладнень.

Для зменшення тривалості операції видалення кремнію з чавуну та кількості кисню, що йде на реакцію, перш за все, з вуглецем чавуну, витрату кисню на продування розплаву необхідно збільшити при вмісті кремнію  $Si > 0,2\%$  і зменшити при  $Si < 0,2\%$ . У випадку використання обертової заглибної фури швидкість її обертання у вказані вище періоди доцільно підтримувати для досліджених умов у межах 70-75 об/хв. та 110-120 об/хв. відповідно.

Після скачування шлаку з поверхні ванни проводили операцію видалення фосфору з попередньо десульфурованого та знекремненого чавуну на лабораторному стенді [2]. У якості порошкоподібних дефосфораторів використовували суміші різних типів (табл.1).

Таблиця 1 – Склад сумішей для дефосфорації чавуну

Компонент суміші	Склад порошкоподібних сумішей, %		
	«А»	«Б»	«В»
Конвертерний шлак	80...85	-	-
Вапно	-	25...50	-
$CaF_2$	15...20	-	-
Вапняк	-	-	60...80
Содовмісні відходи (90-95% $Na_2CO_3$ )	-	50...75	20...40
Питома витрата, кг/(тхв.)	0,29...0,34	1,05...4,0	2,1...4,6

Усі суміші (табл.1) забезпечили видалення фосфору з розплаву, але з різною ефективністю. У цілому, за результатами випробування режимів комплексної обробки чавуну показники десульфурації, знекремнювання та дефосфорації розплаву (із використанням сумішей «А», «Б» та «В») коливаються в межах 78,3...87,5%, 61,7...78,9%, 45,6...50,0% відповідно. Необхідно відмітити, що використання суміші «А» (табл.1) забезпечило найкращі результати дефосфорації чавуну.

Так, наприклад, вдування вглиб попередньо десульфурованого та знекремненого розплаву чавуну порошкоподібного конвертерного шлаку у суміші із  $CaF_2$  (суміш «А») на протязі 18,2...18,6 хв. супроводжувалося зниженням концентрації фосфору до 0,025...0,027% (табл.2). Після проведення процесу дефосфорації шлак містив: 17,5...21,2%  $CaO$ , 28,9...35,6%  $SiO_2$ , 4,2...5,0%  $Al_2O_3$ , 21,5...27,5%  $FeO$ , 2,7...3,5%  $Fe_2O_3$ , 1,8...2,5%  $MnO$ , 1,9...2,5%  $P_2O_5$ . В той же час, необхідно враховувати, що використання кінцевого конвертерного шлаку із підвищеним вмістом ( $P_2O_5$ ) у відповідних умовах може призвести до рефосфорації.

Таблиця 2 – Результати експериментів за технологічним режимом комплексної обробки чавуну із використанням суміші «А» (табл.1)

№№ експ.	Тривалість обробки, хв.		Витрата реагентів для послідовного видалення <i>S/Si, P</i>				Вміст у чавуні, % до / після видалення <i>S/P</i>					$T_{\text{чав}}$ , до / після °C	$\Delta S$ , %	$\Delta Si$ , %	$\Delta P$ , %
	<i>S</i>	<i>Si, P</i>	Суміш «А», кг/т	<i>Mg</i> , кг/т	$O_2$ , нм <sup>3</sup> /т	$N_2$ , нм <sup>3</sup> /т	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>				
29	12,8	19,8	- / 6,15	0,90 / -	- / 9,90	0,76 / 1,38	4,28 / 4,11	0,56 / 0,18	0,19 / 0,15	0,037 / 0,008	0,051 / 0,027	1325 1295	78,3	67,8	47,0
32	12,4	19,4	- / 6,02	0,85 / -	- / 9,23	0,74 / 1,35	4,35 / 4,12	0,60 / 0,15	0,24 / 0,19	0,040 / 0,007	0,045 / 0,025	1330 1285	82,5	75,0	44,4
34	13,1	20,1	- / 6,24	0,92 / -	- / 9,76	0,78 / 1,42	4,23 / 4,05	0,58 / 0,16	0,22 / 0,19	0,040 / 0,006	0,050 / 0,025	1320 1300	85,0	72,4	50,0
Середнє значення	12,8	19,8	- / 6,13	0,89 / -	- / 9,63	0,76 / 1,38	4,28 / 4,09	0,58 / 0,16	0,22 / 0,18	0,039 / 0,007	0,048 / 0,026	1325 1293	81,9	71,7	47,1

У ході досліджень було також встановлено, що у якості дефосфораторів раціонально обирати добавки, що забезпечують основність шлаку після обробки чавуну на рівні 0,8...2,0 та загальний вміст залізу в ньому на рівні 40%. При перевищенні граничного значення 4,0 основність шлаку починає негативно впливати на показники рафінування.

Можливо, цей ефект обумовлений тим, що при дуже високій основності шлаку оксидів заліза виявляється недостатньо для розрідження вапна, що утворюється при дисоціації вапняку (суміш «В»). При цьому в'язкість шлаків підвищується, і умови його перемішування з розплавом погіршуються.

Підтверджено, що найбільший вплив на кінетичні показники дефосфорації має температура ванни. Із підвищенням температури розплаву по ходу рафінування вище визначеної межі та недостатній кількості стабілізаторів у покривному шлаку пентаоксид фосфору нестабільний та здатен відновлюватися до фосфору під впливом відновлювачів у рідкому чавуні. Найкращі результати досягаються при температурах нижчих, ніж 1400°C.

Підтверджено також, що реакція дефосфорації йде не за рахунок взаємодії із киснем, що вдувається, а з оксидом заліза в шлаку і  $CaO$ , тому режим з підвищеним змістом оксиду заліза у шлаку дає переваги. В той же час, також визначено, що ефективність реакції дефосфорації має тенденцію до зменшення після максимуму в районі 23...25% ( $FeO$ ). При цьому із зростанням температури цей максимум зміщується до менших значень.

Встановлено, що у досліджених умовах для забезпечення дефосфорації достатньо мати рівень окисленості шлаку на рівні 18...20%. З аналізу результатів експериментів можна зробити висновок, що вже при основності шлаків на рівні 1,4...1,7 коефіцієнт розподілу фосфору має величину порядку  $10^2$ .

За результатами досліджень виконано обґрунтування промислового варіанта комплексної технології ковшової послідовної десульфурзації, знекремнювання та дефосфорації чавуну, у тому числі з врахуванням можливості використання переваг обертової заглибної фурми та проведення всіх операцій у одному великовантажному ковші.

Вихідні умови, прийняті при розробці промислового варіанта:

- знекремнювання та дефосфорація чавуну проводиться у 230-т заливальному ковші з використанням модернізованої установки ковшового рафінування (рис.2);

- заповнення ковша розплавом передільного чавуну на 300...400 мм нижче від рівня зливного носка;
- тривалість обробки одного ковша не повинна перевищувати 20...30 хв.;
- рафінуванню піддається передільний чавун, що містить, %: 0,70...1,20  $Si$ ; 0,020...0,060  $Mn$ ; 0,040...0,080  $P$ ; 0,003...0,005  $S$ ;
- температура чавуну перед обробкою 1260...1320<sup>0</sup>С;
- заданий кінцевий вміст фосфору у рафінованому чавуні 0,015...0,025%;
- зниження температури чавуну у процесі обробки не більш, ніж на 50<sup>0</sup>С.

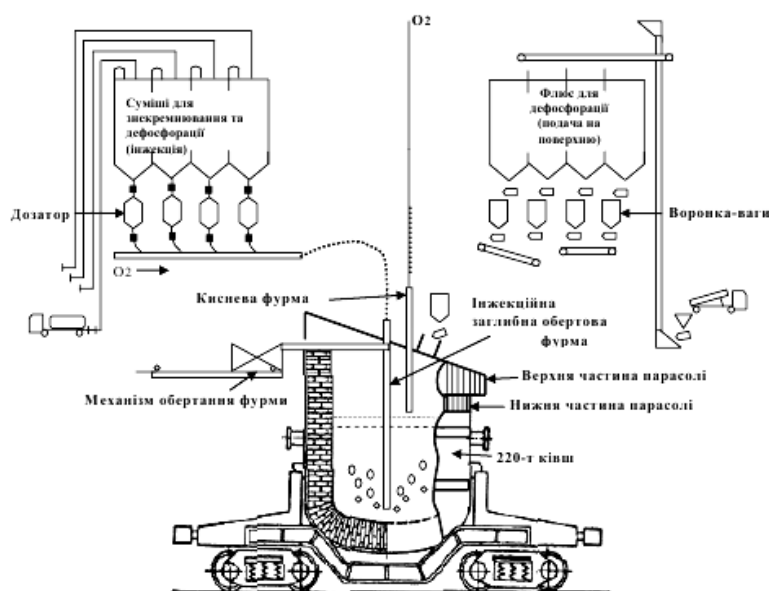


Рисунок 2 – Схема установки для комплексного рафінування передільного чавуну для послідовного видалення сірки, кремнію та фосфору

об/хв.) вглиб розплаву кисню. Передбачається основність шлаку ( $B_{\kappa}$ ), який формується у ковші на рівні не вище 1,2...1,4, за якої шлак набуває схильності до інтенсивного спінювання.

2. У другому періоді після скачування з поверхні розплаву кислого шлаку, що утворився під час знекремнювання, проводиться дефосфорація чавуну:

- за варіантом 1 (табл.3): шляхом присадження на поверхню ванни кускових шлакоутворюючих матеріалів ( $CaO$ ,  $CaF_2$ ) та окислювачів (агломерат) з одночасним вдуванням вглиб розплаву порошкоподібного флюсу ( $CaO$  + залізорудний концентрат) та продувкою зверху через водоохолоджувану фурму технологічним киснем.

Таблиця 3 – Рекомендовані витрати твердих та газоподібних реагентів для дефосфорації передільного чавуну у ковші за варіантом 1

Маса чавуну, т	Витрата газоподібного кисню		Витрата залізорудного концентрату		Витрата вапна		Витрата $CaF_2$	
	нм <sup>3</sup>	нм <sup>3</sup> /т	кг	кг/т	кг	кг/т	кг	кг/т
50	458	9,16	1664	33,3	1616	32,3	183	3,66
100	821	8,21	2984	29,8	2101	21,0	327	3,27
200	1469	7,35	5341	26,7	2730	13,7	585	2,93

Розрахунок витрат реагентів для дефосфорації чавуну проведено з врахуванням необхідності забезпечення концентрації кремнію у чавуні перед початком дефосфорації на рівні 0,10...0,15%. Враховано також видалення, у середньому, 0,010%  $Mn$ , 0,005%  $P$  та 0,2%  $C$  у ході знекремнювання.

Рекомендовано наступний порядок проведення комплексного рафінування чавуну:

1. У першому періоді проводять попереднє знекремнювання чавуну (до 0,10...0,15%  $Si$ ) шляхом вдування через стаціонарну або обертову заглибну фурму (90...120

- за варіантом 2 (табл.4): шляхом вдування вглиб розплаву через заглибну фурму порошкоподібної суміші вапняку та содовмісних відходів із одночасною продувкою зверху через водоохолоджувану фурму технологічним киснем. Передбачається формування основного ( $CaO/SiO_2 = 3,3...3,7$ ) окисленого (16...20%  $FeO$ ) шлаку, який має високу поглинаючу схильність по відношенню до фосфору.

Таблиця 4 – Рекомендовані витрати твердих та газоподібних реагентів для дефосфорації передельного чавуну у ковші за варіантом 2

Маса чавуну, т	Витрата газоподібного кисню		Витрата вапняку		Витрата содовмісних відходів	
	нм <sup>3</sup>	нм <sup>3</sup> /т	кг	кг/т	кг	кг/т
50	1125	22,5	2876	57,5	719	14,3
100	2142	21,4	3740	37,4	935	9,4
200	3855	19,2	4859	24,3	1214	6,1

З практики відомо, що при обробці чавуну в ковшах відкритого типу оголення поверхні ванни при вдуванні в нього порошкоподібних сумішей та викликане цим барботування ванни істотно збільшує втрати тепла. Зменшення тепловтрат в процесі обробки чавуну забезпечує використання ізольованої кришки (парасолі) (рис.2), яка одночасно захищає футеровку ковша від контакту з активним шлаком за рахунок її спеціальної конструкції. В конструкції установки передбачено зону для відбирання проб і вимірювання температури, механізми підйому та обертання заглибної газопорошкової фурми і переміщення зонду, фурму для вдування кисню на поверхню ванни та парасолі для уловлювання пилу з газів, що відходять.

**Висновки.** Запропоновано новий напрямок в реалізації ресурсо- та енергоефективної комплексної технології ковшової обробки переробного чавуну з видаленням сірки, кремнію та фосфору перед конвертерною плавкою. Отримано нові експериментальні дані щодо закономірностей видалення фосфору з переробного чавуну із використанням інжекції порошкоподібних сумішей реагентів різного складу.

Зменшення тривалості ковшового рафінування переробного чавуну за запропонованою технологією і підвищення температури розплаву перед заливанням у кисневий конвертер сприяє покращенню теплового балансу конвертерної плавки та забезпечує можливість використання добавок марганцевмісної сировини.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Дефосфорация и десульфурация при предварительной обработке чугуна / Ш.Кавасаки, М.Аоки, А.Камимори [и др.] // Инжекционная металлургия' 86: IV Междунар. конф., 11-13 июня 1986 г.: Труды. – М.: Металлургия, 1990. – С.220–229.
2. Концепція переходу до малошлакової конвертерної технології (повідомлення 1) / Є.М.Сігарьов, А.Г.Чернятевич, Д.О.Гуржий, О.А.Чубіна // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету: (технічні науки). – Кам'янське: ДДТУ. – Вип. 2(31). – 2017. – С.3-9.
3. Сігарьов Є.М. Енергоефективність інтенсифікації ківшової десульфуратії чавуну / Є.М.Сігарьов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №2/1(74). – С.38-42.
4. Chernyatevich A.G. Hot metal refining in the ladle with simultaneous removal of silicon and sulfur / Chernyatevich A.G., Sigarev E.N., Chernyatevich I.V. // Advances in Metallurgical Processes and Materials: 2nd International Conference, 4-5 June 2015 y.: Materials. – Kiev, 2015. – P.24-27.

Надійшла до редколегії 22.01.2018.

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).

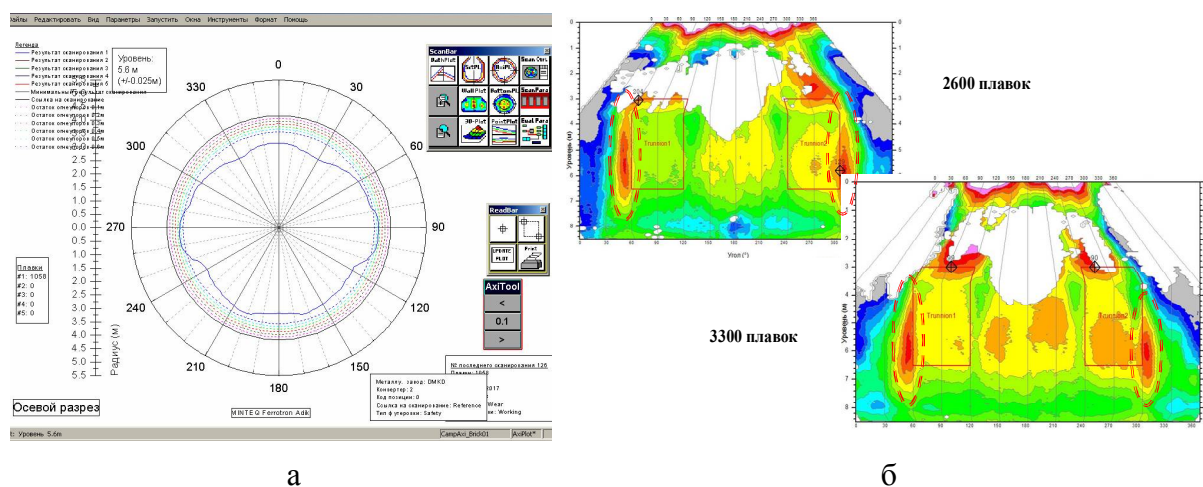


Рисунок 1 – «Проблемні» зони (1) на сканограмі осевого зрізу (а) та розгортці конвертера (б) у різні періоди кампанії конвертера по футерівці

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.

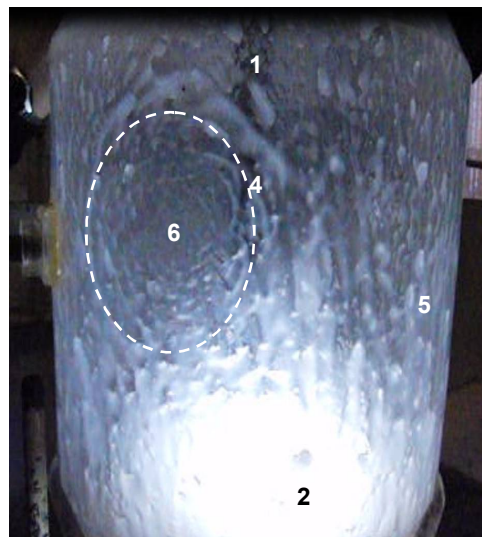
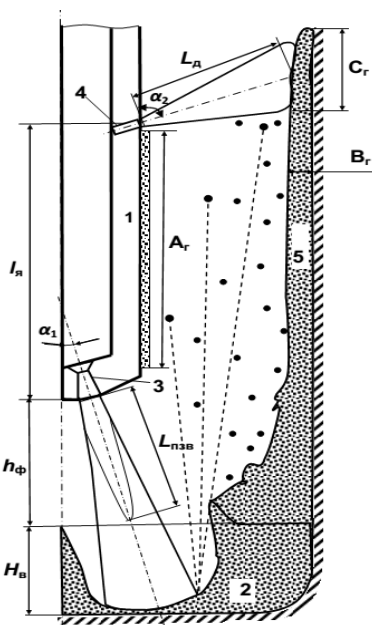
**Постановка задачі.** Для вирішення описаної вище проблеми виготовлена та впроваджена у промислову експлуатацію в умовах конвертерного цеху ПАТ «ДМК» двоярусна гарнісажна фурма [1] із додатковими соплами на боковій поверхні стовбура фурми на визначені відстані від наконечника. Додаткові сопла призначені 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 газорідного 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.

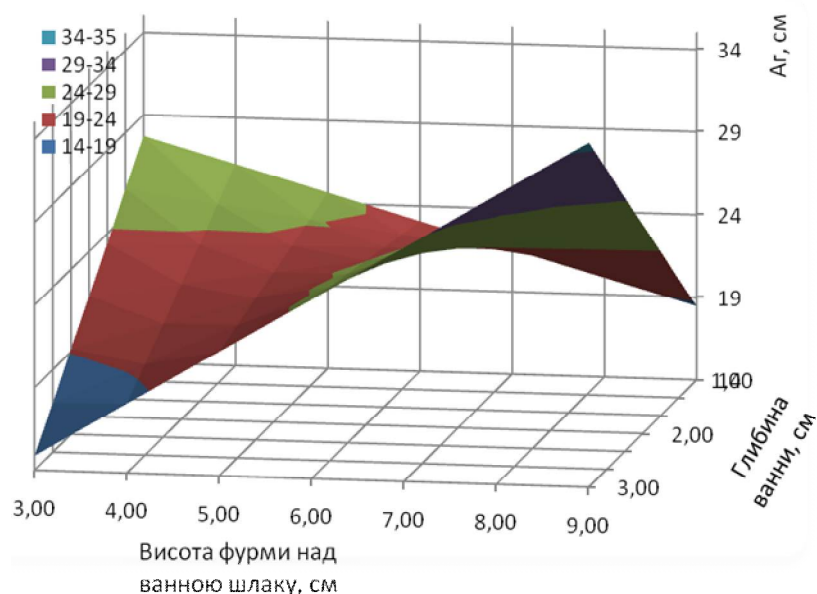
Математичні моделі, отримані за результатами обробки експериментальних даних, у натуральних значеннях (рис.2) мають вигляд:

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

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

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

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.

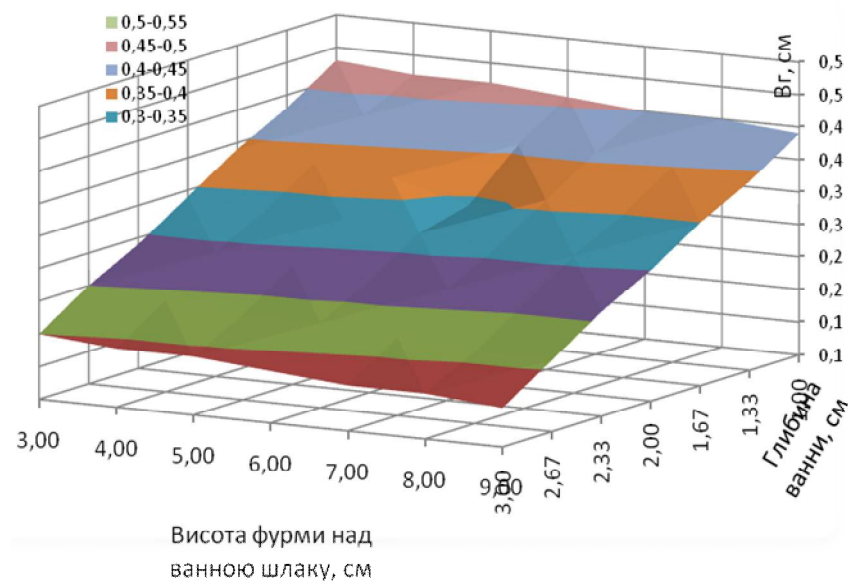


Рисунок 4 – Залежність товщини шлакового гарнісажу на стінах конвертера від висоти фурми та глибини шлакової ванни

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.

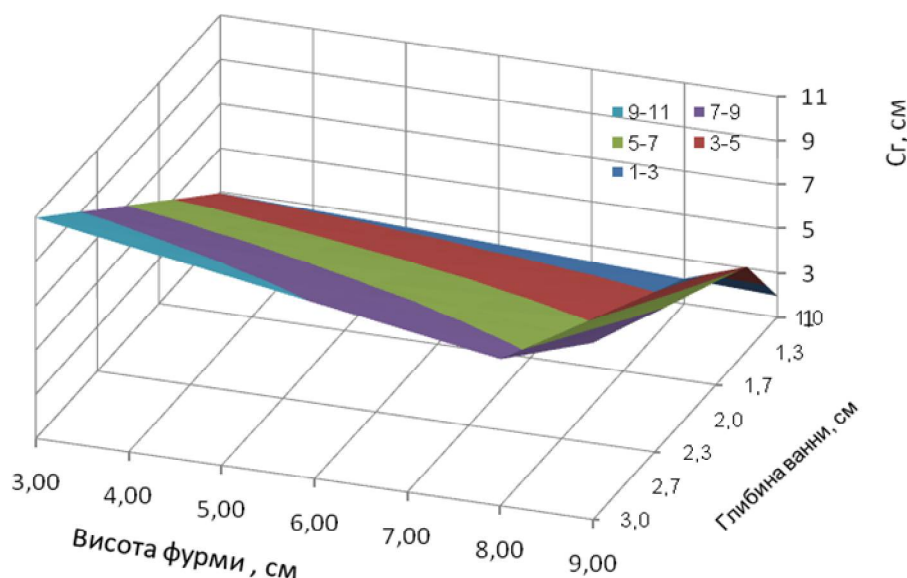


Рисунок 5 – Ширина зони шлакового гарнісажу, сформованої під впливом струменів з додаткових бокових сопел фурми

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

розлади ходу плавки. Застосування високозакисного агломерату для промивання горна при вказаних порушеннях його роботи практикувалося і раніше [3].

Протилежний підхід до вибору раціонального вмісту FeO в агломераті спостерігається в Японії, Південній Кореї та ряді інших країн. Перевага віддається виробництву і застосуванню агломерату зі зниженим вмістом FeO в агломераті, що має меншу оплавленість, більш високу міцність, кращу пористість і відновлюваність. Проте один з лідерів за обсягом вдування ПВП нідерландська фірма Ijmuiden використовує агломерат з підвищеним вмістом FeO, за даними [4], до 15%. Особливістю сировинних умов роботи доменних печей фірми є велика витрата обкотишів – > 50%. Ймовірно обрана в Нідерландах комбінація якісно різних видів доменної шихти має значення для підвищення витрати пиловугільного палива.

**Постановка задачі.** З метою відпрацювання технології плавки з вдуванням підвищеної кількості ПВП дослідити вплив вмісту обкотишів в шихті (ВОШ) на роботу печі і витрату вугільного пилу зокрема.

**Результати роботи.** Доменна піч А Дніпровського металургійного комбінату об'ємом 1500 м<sup>3</sup> в період досліджень працювала на коксі з імпортного вугілля із середніми показниками: сірка 0,54%; зола 11,5%; індекс CSR 54,5%. В якості пиловугільного палива використовувалася суміш з середніми показниками за сіркою 0,26%, золою 7,6% і леткими речовинами 21,2%. Вміст заліза в агломераті склав 53,2%, в обкотишах ПівнГЗК – 63,2%. Тривалість одиничного періоду – календарна доба. Масив вибірки без розривів (за винятком діб з простоями) склав 158 діб (спостережень). Показники роботи печі в досліджуваному періоді представлені в табл.1.

Таблиця 1 – Техніко-економічні показники роботи доменної печі А ПАТ «ДМК» на шихті, що містить обкотиші

Техніко-економічні показники	Значення показників
1	2
Продуктивність, т/м <sup>2</sup> ·добу	54,1
Витрата, кг/т чавуну:	
- коксу	403
- ПВП	157
- вапняку	10
Доля в шихті, %:	
- агломерату	84,1
- обкотишів	15,8
Інтенсивність горіння коксу, кг/м <sup>3</sup> ·добу	804
Рудне навантаження, т/т	4,29
Дуття:	
- витрата, м <sup>3</sup> /хв	2915
- вміст кисню, %	25,2
- надмірний тиск, кПа	253
- температура, °С	1017
Колошниковий газ:	
- надмірний тиск, кПа	130
- температура, °С	340
- склад, %:	
- CO <sub>2</sub>	17,9
- CO	27,3
- H <sub>2</sub>	3,7
Перепад тисків, кПа	123

Продовження таблиці 1

1	2
Ступінь використання CO, %	39,6
Склад чавуну, %:	
- Si	0,72
- Mn	0,08
- S	0,025
Основність шлаку:	
- CaO/SiO <sub>2</sub>	1,09
- (CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	1,21

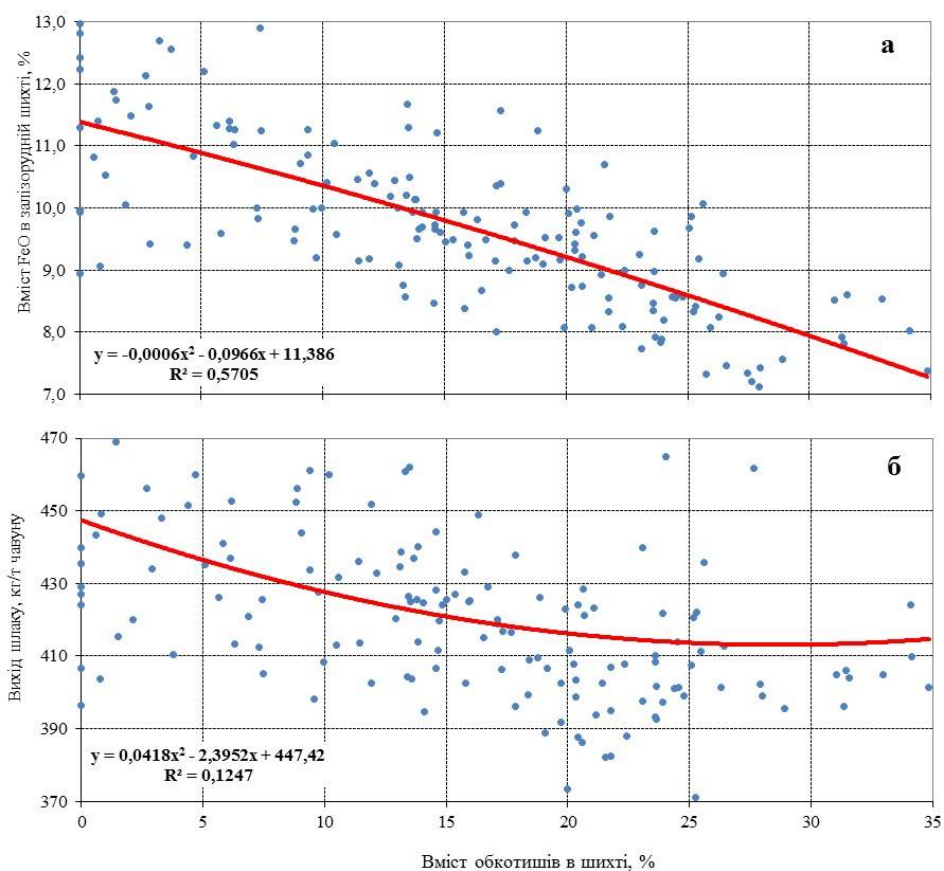


Рисунок 1 – Вплив вмісту обкотишів в шихті на вміст монооксиду заліза в шихті (а) і вихід шлаку (б)

Перш за все було зроблено оцінку впливу ВОШ на прихід в піч монооксиду заліза з шихтою. Оскільки оксиди заліза в обкотишах представлені, в основному, гематитом, то збільшення ВОШ в загальній масі залізорудної частини шихти до 35% супроводжувалося зниженням вмісту FeO в середньому на 4% (рис.1, а). Представляє інтерес те, що на виході існувала тенденція зниження вмісту FeO в шлаку в міру збільшення ВОШ ( $FeO_{ш} = -0,000005 (VOШ)^2 - 0,0024 (VOШ) + 0,5491$ ). Правда зв'язок між змінними за шкалою Чеддока виявився дуже слабким ( $R = 0,155$ ).

Як помірний можна кваліфікувати зв'язок між ВОШ та виходом шлаку (рис.1, б). Проте в конкретних шихтових умовах збільшення ВОШ до 20% призводило до істотно-

го скорочення виходу шлаку – в середньому на 15 кг/т чавуну на кожні додаткові 10% обкотишів в шихті. По всій видимості це той же компенсаційний ресурс при вдуванні вугільного пилу, оскільки поліпшення дренажу розплавів і газів тісно пов'язане зі зменшенням кількості шлаків в коксовій насадці. Крім того, зменшення виходу шлаку покращує умови газифікації ПВП у фурмовій зоні.

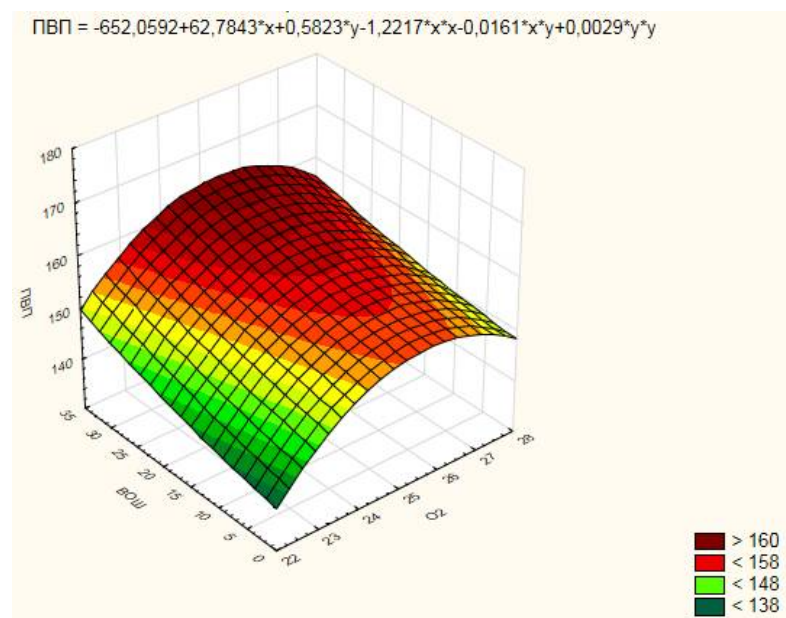


Рисунок 2 – Тривимірні графіки поверхонь для залежностей витрати пиловугільного палива (ПВП, кг/т чавуну) від вмісту кисню в дутті ( $x - O_2$ , %) та обкотишів в шихті ( $y - VOШ$ , %)

Розгляд впливу ВОШ разом з концентрацією кисню в дутті – головним компенсаційним ресурсом для застосування ПВП – показав наступне (рис.2). Збільшення ВОШ при всіх концентраціях кисню супроводжувалось зростанням витрати ПВП. Поява екстремуму на кривих залежності витрати ПВП від концентрації кисню в дутті потребує додаткового вивчення. Можливо, що збагачення дуття киснем зверх 25-26% призводить до дефіциту тепла і відновників в шахті, зрозуміло в конкретних сировинних умовах.

До негативних наслідків застосування низькоосновних обкотишів в шихті відносять високий вихід спеків, який зумовлює зростання опору газового потоку [5], потовщення пластичної зони, що підсилює також газодинамічну напруженість в стовпі шихти [6], завантаження центру окатишами [7]. В нашому дослідженні також спостерігалося погіршення газопроникності стовпа шихти при ВОШ до 20%. Так індекс  $\Delta P/Q_d$ ,  $\text{кПа/м}^3/\text{хв.}$ , зріс з 0,040 при роботі на агломераті до 0,043 при роботі з 20-відсотковою часткою обкотишів в шихті. Залежність між ВОШ та індексом газопроникності характеризувалася помірною величиною  $R = 0,368$ .

Для перевірки впливу обкотишів на газовий потік в досліджуваній доменній печі розглянули залежності температур колошнику  $t_k$ , периферії  $t_p$  і співвідношення цих температур від вмісту обкотишів в шихті. Співвідношення температур  $t_p/t_k$  свого часу було запропоновано співробітниками ВНДІМТ як критерій оцінки радіального газорозподілу.

Як вельми помітний зв'язок можна кваліфікувати дані аналізу залежності температури колошнику від величини ВОШ (рис.3, а).

Зменшення температури колошникових газів слід пояснити впливом двох факторів – завантаженням холодних обкотишів (місцевий агломерат завантажувався в піч гарячим) і безпосереднім впливом обкотишів на процес в цілому.

Температура периферійних газів (рис.3, б) є більш «консервативним» показником інерційності процесу вимірювання. Тому зв'язок між змінними спостерігається

дуже слабкий ( $R = 0,191$ ). Проте простежується тенденція зростання температури периферії в міру збільшення витрати обкотишів в шихті.

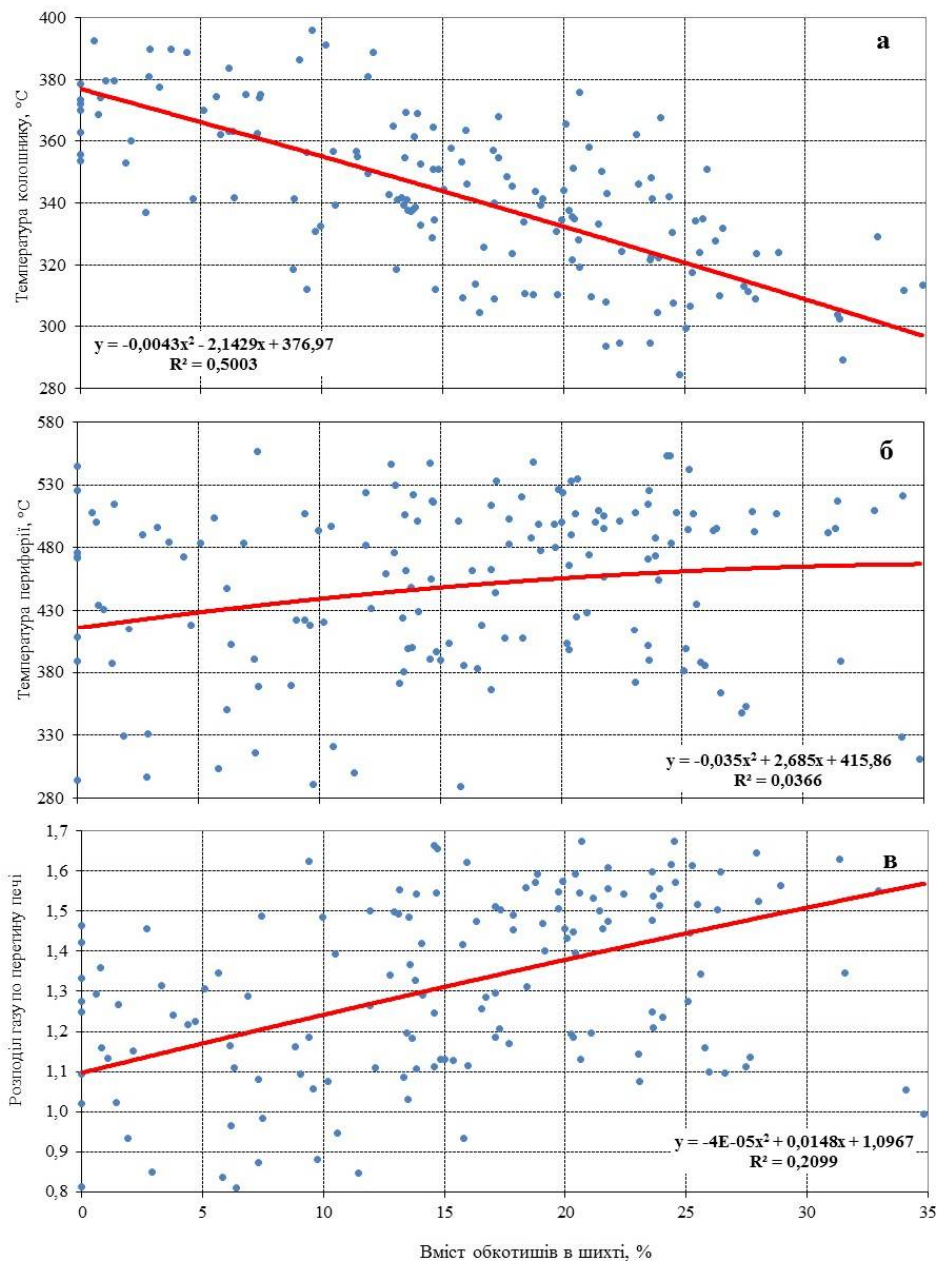


Рисунок 3 – Вплив вмісту обкотишів в шихті на середні температури колошнику  $t_K$  (а), периферії  $t_{\Pi}$  (б) та розподіл газу по перетину печі  $t_{\Pi}/t_K$  (в)

Результати аналізу, наведені на рис.3, в, вказують на помірний зв'язок ( $R = 0,458$ ) між змінними. Однак підстав заперечувати факт посилення периферійного потоку газів при збільшенні частки обкотишів немає. Отримані дані кореспондуються з результатами роботи [6], в якій повідомлялося про розкриття периферії при збільшенні ВОШ. Відмінність полягала в тому, що на печі [6] використовувалось БЗП, тому поряд з розкриттям периферії розкривався і центр. Само по собі розкриття периферії, обумовлене специфікою розподілу обкотишів на колошнику, може сприяти підвищенню витрати ПВП, однак за умови достатньої газопроникності центру. Не випадково на до-

менній печі №3 заводу «Kobe Steel» при збільшенні частки залізрудних обкотишів в шихті з 26 до 75% збільшили завантаження коксу в центр [7, 8].

Таким чином для ефективного використання обкотишів як більш багатой залізом сировини, ніж агломерат, слід розвантажувати центральну зону печі подаванням коксу в центр, якщо піч оснащена безконусним засипним пристроєм, або змінювати відповідно режим завантаження конусним пристроєм.

**Висновки.** Введення в залізрудну частину доменної шихти низькоофлюсованих обкотишів в межах, що збільшують збагачення шихти залізом і знижують вихід шлаку, сприяє збільшенню витрати пиловугільного палива. В даному випадку «прихованим» компенсаційним ресурсом є зниження виходу шлаку, яке полегшує умови газифікації вугільного пилу у фурмовій зоні і покращує стан коксової насадки.

Збільшення частки обкотишів в залізрудній частині шихти до 35% супроводжувалося посиленням периферійного газового потоку, що знижує ефективність використання обкотишів як різновиду залізрудних матеріалів з підвищеним вмістом заліза. При збільшенні вмісту обкотишів в шихті доцільно використовувати заходи для покращення газопроникності центральної частини печі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ярошевский С.Л. Пылеугольное топливо – реальная и эффективная альтернатива природному газу в металлургии / С.Л.Ярошевский // Металл и литье Украины. – 2006. – № 3. – С.15-20.
2. Влияние компенсирующего ресурса увеличения содержания FeO в шихте при вдувании пылеугольного топлива в горн доменной печи / В.Н.Захарченко, Ю.Р.Руденко, Н.Р.Руденко, Ю.К.Лебедь // Металл и литье Украины. – 2017. – № 2-3. – С.3-8.
3. Промывка горна доменных печей высокозакисным агломератом / В.И.Тимошенко, В.И.Кучеров, Б.Д.Осипов [и др.] // Сталь. – 1989. – № 2. – С.11-14.
4. Ярошевский С.Л. Перспективы и эффективность применения пылеугольного топлива в доменных печах Украины / С.Л.Ярошевский // Бюллетень «Черная металлургия». – 2011. – № 4. – С.29-35.
5. Отработка технологии доменной плавки с использованием в шихте окатышей пониженной основности / Л.Д.Никитин, В.А.Долинский, Ю.М.Денисов [и др.] // Металлург. – 2003. – № 9. – С.30-32.
6. Контроль и оптимизация параметров зоны плавления с помощью двухмерной математической модели в составе АСУ ТП доменной печи / В.М.Паршаков, А.А.Полинов, А.В.Павлов [и др.] // Металлург. – 2017. – № 7. – С.30-36.
7. Shift All Pellets Operation at Kobe 3 Blast Furnace / T.Ohyama, S.Kitayama, M.Okuichi et al. // CAMP-ISIJ. – 2002.15. – № 1. – С.129. – Яп. Зм. на англ.
8. Burden distribution control for radius concentration of pellets by time series dischargings / A.Sato, Y.Matsui, K.Ito et al. // CAMP-ISIJ. – 2002.15. – № 1. – С.130. – Яп. Зм. на англ.

*Надійшла до редколегії 23.04.2018.*