

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 обертової 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 (20⁰С), 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 ²	11,03	0,066
7	В'язкість покривного шлаку, Па·с	0,11-0,40	0,53
8	Щільність покривного шлаку, кг/м ³	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 ³ /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.

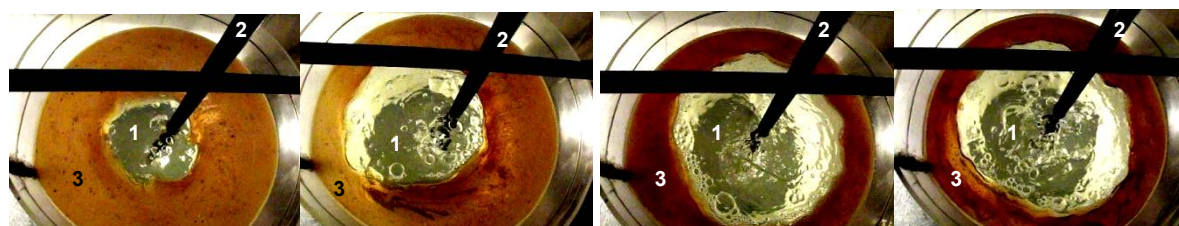
Таблиця 3 – Матриця планування (як приклад, для діапазону швидкості обертання фурми 0-90 об/хв.) та отримані результати

№	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

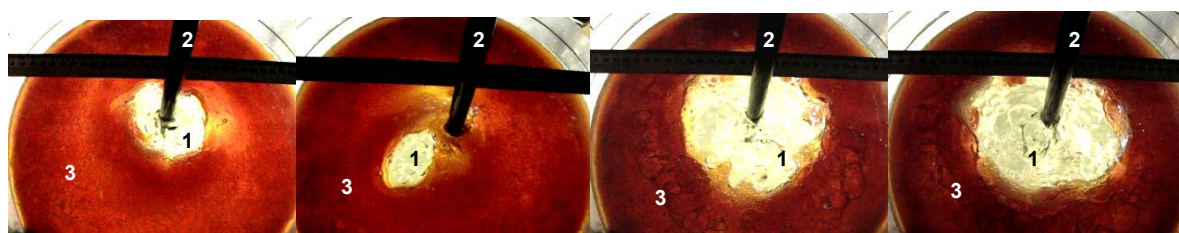
г

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 односоплового 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 односоплового 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; ΔN – 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.

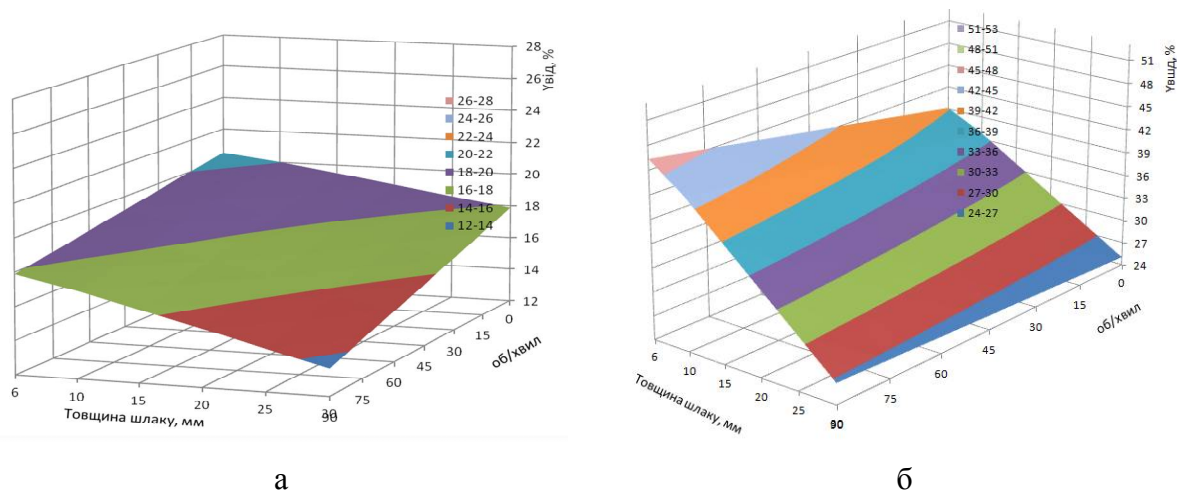
$$S_{\text{відн}} = 3.294 + 0.0855 \cdot n + 0.2825 \cdot \delta + 17.818 \cdot Q + 0.006 \cdot n \cdot \delta - 0.0167 \cdot n \cdot Q - 0.3918 \cdot \delta \cdot Q - 0.002 \cdot n \cdot \delta \cdot Q \quad (7)$$

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

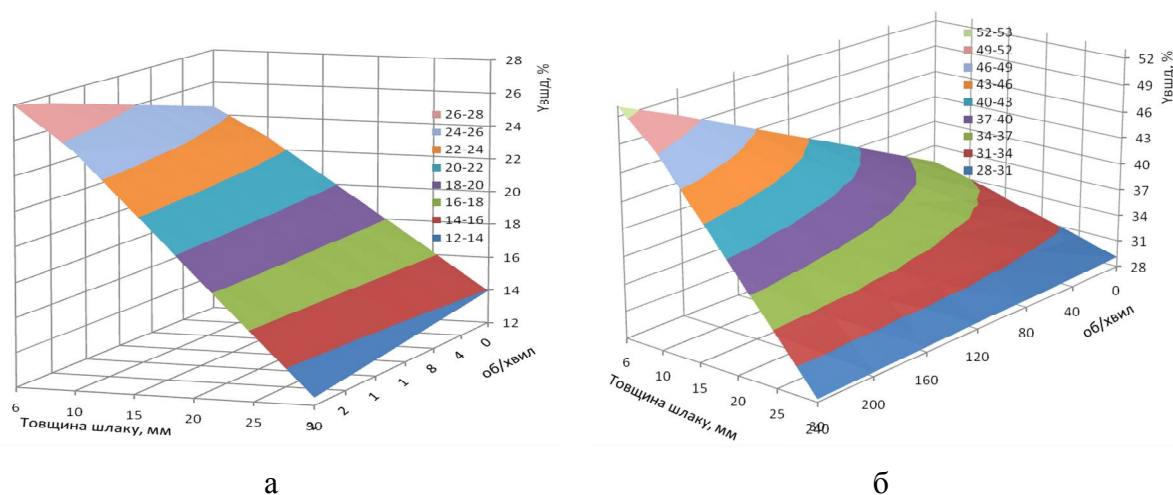
зі швидкістю обертання фурми, а у діапазоні 120-240 об/хв. найбільш визначальними факторами стають швидкість обертання та товщина шару шлаку на поверхні ванни. Таким чином, при збільшенні товщини покривного шлаку, витрати газу-носія та швидкості обертання заглибної фурми геометричні параметри «ока» на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