

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.162

DOI 10.31319/2519-2884.33.2018.188

СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор
ПОХВАЛІТИЙ А.А., ст. викладач
ДОВЖЕНКО О.В., аспірант
ІСАКОВ В.Н., зав. лабораторії

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**ЗАКОНОМІРНОСТІ МАСООБМІНУ МІЖ КОВШОВОЮ ВАННОЮ
ТА ПОКРИВНИМ ШЛАКОМ**

Вступ. Питомі витрати реагентів, ступінь засвоєння десульфураторів на сірку та втрати чавуну з корольками у покривному шлаку, який скачують з поверхні розплаву після завершення обробки, визначають загальну ефективність ковшової десульфурації переробного чавуну перед сталеплавильним переділом.

За оцінками різних дослідників [1-4] при наявності перед десульфурацією на поверхні ванни міксерного або доменного шлаку маса покривного шлаку по ходу вдування реагентів подвоюється, що призводить до втрат чавуну з корольками під час обов'язкового видалення шлаку після десульфурації у межах від 0,96 до 11 кг/т чавуну.

Постановка задачі. З метою зменшення вмісту корольків чавуну у шлаку розробниками установок десульфурації та кінцевими користувачами на металургійних підприємствах запропоновано та випробувано різні методи [2-4]. До них відносять: використання потрійної суміші реагентів («мультиінжекція»), при якій після вводу десульфураторів углиб ковшової ванни вдувають третій компонент для модифікування властивостей шлаку; додавання у десульфуруючі суміші компонентів, що сприяють розрідженню або навпаки загущенню шлаку; оптимізація дуттьового режиму обробки, конструкції заглибної фурми та т. ін.

Необхідно відмітити, що як десульфурація чавуну вдуванням магнію без добавок [1], так і при використанні сумішей на основі CaO і/або CaC₂ супроводжується підвищенням в'язкості ковшових шлаків [2-4] із відповідним збільшенням вмісту Fe_{мет} в шлаках до 50-60%.

За результатами аналізу промислових даних в умовах ковшової десульфурації чавуну на ПАТ «Дніпровський меткомбінат» [5] встановлено, що вміст заліза у шлаках, які скачують після обробки, коливається у діапазоні 60-78%. Перед вдуванням десульфуруючої суміші флюїдизованого вапна та магнію у потоці азоту-носія углиб ковшової ванни доменний або міксерний шлак з поверхні чавуну не скачують. Встановлено, що у незалежності від міста відбору проб шлаку за висотою шару покривного шлаку в останніх знаходиться не менш ніж 25% корольків чавуну різних фракцій.

Кінцевий вміст корольків чавуну у шлаку залежить від технологічного варіанта та ряду перемінних параметрів процесу, у тому числі: потужності перемішування та ступеня турбулентності ванни; товщини шару, фізико-хімічного стану та в'язкості покривного шлаку; глибини затягування шлаку з границі «шлак-метал» до розплаву тощо. Надійного та загально визнаного способу зменшення втрат заліза зі шлаками після ковшової десульфурації чавуну на сьогодні не запропоновано.

Результати роботи. На першому етапі досліджень впливу різних факторів на глибину затягування покривного шлаку до ковшової металевої ванни та втрат чавуну за таким механізмом [6] розроблено методику визначення потужності перемішування розплаву у ковшовій ванні з врахуванням зміни розмірів, кількості, швидкості спливання пазирів, у тому числі при застосуванні обертової заглибної фурми.

Показано, що кількість дисипованої енергії газового або газопорошкового струменя з сопел заглибної фурми пропорційна розмірам барботаژної зони та зростає з підвищенням швидкості обертання фурми. Для збільшення потужності перемішування ковшової ванни необхідною умовою є підвищення розміру бульбашок, але це, у свою чергу, негативно впливає на ступінь засвоєння реагентів на сірку та сприяє збільшенню ступеня затягування крапель металу до об'єму покривного шлаку.

З підвищенням швидкості обертання заглибної фурми газонасиченість ванни пропорційно зменшується, що пов'язано з формуванням «канального» режиму продувки, зменшенням розмірів барботаژної зони, винесенням потоків розплаву на поверхню ванни у вигляді своєрідного «буруна», утворенням незахищеної шлаком поверхні ванни та призводить до втрат незасвоєного на сірку магнію при окисленні атмосферним киснем.

Спливаючі до верхніх горизонтів ванни газові бульбашки, на поверхні яких проходить реакція утворення $MgS_{ТВ}$, оточені плівкою металевого розплаву. Колапс бульбашки призводить до формування металевих крапель, які виносяться потоками металу у шар шлаку. З врахуванням рівності сил поверхневого натягу та підйомної сили Архімеда радіус бульбашки, що спливає до границі «шлак-метал», дорівнюватиме:

$$r = \left(\frac{3 \cdot r_{KP} \cdot \sigma}{2 \cdot g(\rho_M - \rho_G)} \right), \text{ м}, \quad (1)$$

де r_{KP} – радіус критичний; σ – поверхневий натяг розплаву, Н/м; ρ_M – густина розплаву, кг/м³; $\rho_G = \frac{P \cdot \mu}{R \cdot T}$ – густина газової суміші парів магнію та азоту, кг/м³; μ – молярна маса сірки, кг/кмоль.

До можливого механізму потрапляння крапель чавуну до шлаку необхідно віднести також їх захоплення шлаком, який затягується циркуляційними потоками до металеві ванни. Винесені у шлак краплі чавуну коалесцують та за умови досягнення критичного розміру (3-5 мм), коли дія сили тяжіння стає більшою, ніж сила поверхневого натягу, осідають у нижні шари шлаку до границі з металом, а за умов достатньої витримки – повертаються до металеві ванни.

З метою дослідження закономірностей затягування покривного шлаку до об'єму металеві ванни з міжфазової границі «шлак-метал», захоплення шлаком металевих крапель, у тому числі при використанні для вдування суміші реагентів обертової заглибної фурми, проведено серію низькотемпературних експериментів на моделі великовантажного заливального ковша.

Для експериментів використано модель ковша з плексигласу у масштабі 1:12 по відношенню до 230-т заливального ковша ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» [7]. У якості модельної рідини для металевого розплаву використовували воду (20⁰С), газу-носія – компресорне повітря, для моделювання шару покривного шлаку – синтетичне моторне масло (5W30). Модельні фурми зі змінними наконечниками занурювали в рідку ванну глибиною 280 мм та шаром «шлаку» на поверхні товщиною від 6-ти до 30-ти мм.

При моделюванні використовували одно- та двосоплові наконечники заглибних фурм з циліндровими соплами діаметром 0,0013 та 0,001 мм відповідно. Швидкість обертання заглибної фурми навколо вертикальної осі змінювали в межах від 0 до 240 об/хв. Особливості взаємодії поверхневого «шлаку» та рідкої ванни по ходу вдування газу фіксували з використанням високошвидкісної камери «CASIO EX-FH25».

Для визначення впливу основних параметрів процесу вдування газу на масообмінні процеси та глибину затягування покривного «шлаку» до рідкої ванни використали методику планування експерименту. До факторів впливу відносили: швидкість обертання заглибної фурми ($X_1(n)$, об/хв.), висоту шару покривного «шлаку» ($X_2(\delta)$, мм), ви-

трату газу-носія ($X_3(Q)$, л/хв.). Провели серію експериментів у кожному з граничних, прийнятих у відповідності до раніше отриманих результатів [6-8], режимів продувки ванни у діапазонах швидкості обертання заглибної фурми 0...90 об/хв.; 90...120 об/хв. та 120...240 об/хв. відповідно.

Реалізовано повний факторний експеримент (табл.1).

Таблиця 1 – Значення факторів на нульовому, верхньому та нижньому рівнях, інтервали варіювання

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	$\pm 12,0$	$\pm 0,6$

За результатами експериментів (табл.2) встановлено, що інтенсивність диспергування газових струменів та параметри барботажної зони визначаються, в основному, співвідношенням витрат газу (Q) та швидкістю обертання фурми (n) та не залежать від товщини шару покривного «шлаку». При цьому у об'ємі рідкої ванни під покривним шлаком можна виділити декілька характерних зон (рис.1):

- активна, у межах якої завершується занурення газових струменів до ванни та дисипація їх кінетичної енергії;
- газорідина, у нижній частині якої, вигинаючись доверху під впливом сили Архімеда та сили опору, газовий струмінь подрібнюється на бульбашки, та у межах якої останні спливають до границі «шлак-метал»;
- зона гідродинамічних потоків, які забезпечують масоперенесення у об'ємі ванни і, у значному ступені визначають міжфазовий масообмін на границі «шлак-метал».

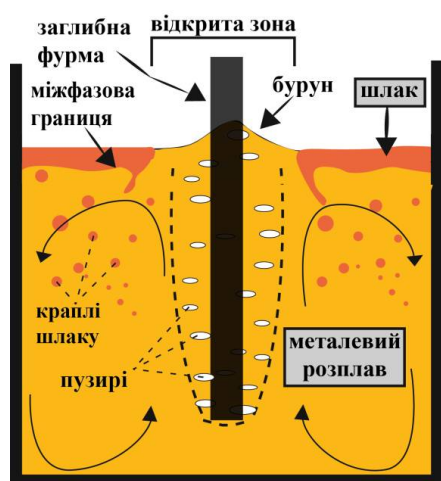


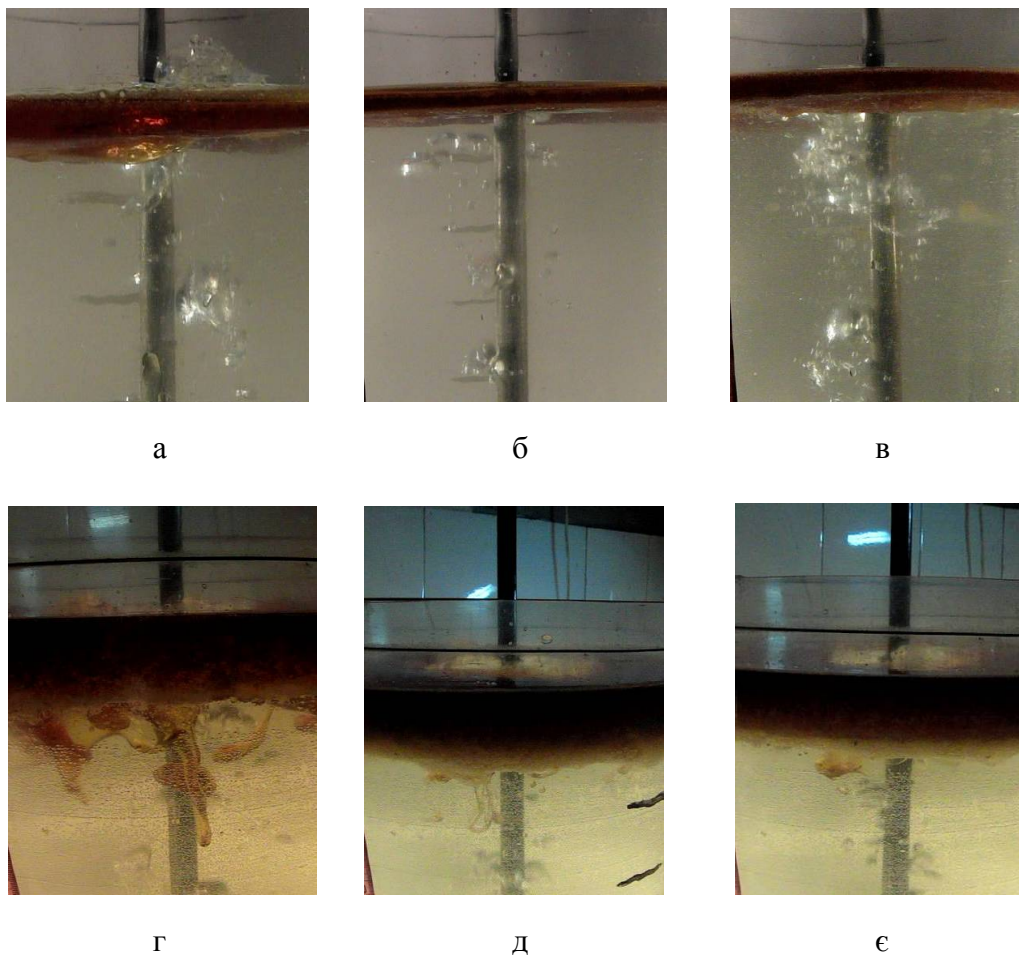
Рисунок 1 – Схема затягування шлаку до ковшової ванни

Таблиця 2 – Результати експериментів з визначення глибини затягування шлаку до ванни

$X_1(n)$	$X_3(Q)$	$X_2(\delta)$ (0,6 / 3,0 см шлаку)	
		односоплова фурма	двосоплова фурма
0	1,0	0,8 / 1,4	1,0 / 2,3
	2,2	3,2 / 3,8	1,9 / 7,5
90	1,0	0,5 / 0,8	2,2 / 1,2
	2,2	1,2 / 3,4	2,8 / 4,8
120	1,0	0,7 / 1,1	2,5 / 1,6
	2,2	2,8 / 3,6	3,1 / 4,5
240	1,0	0,9 / 0,3	1,9 / 1,8
	2,2	3,8 / 2,2	3,2 / 3,1

Встановлено неоднозначний характер впливу як конструкції наконечника фурми, питомих витрат газу, що вдувають крізь сопла наконечника, так і товщини «шлаку» на глибину затягування останнього до ванни (рис.2). За результатами обробки отриманих

даних запропоновано математичні моделі, придатні для визначення впливу досліджених факторів на глибину зтягування «шлаку» до ванни ($Z_{шл}$, см).



а, г – нерухома фурма, б, д – швидкість обертання фурми 90 об/хв.; в, е – 240 об/хв.; а-в – висота шару «шлаку» 6 мм, г-е – 30 мм відповідно

Рисунок 2 – Картина зтягування «шлаку» до рідкої ванни при вдуванні газу (з витратою 2,2 л/хв.) крізь сопла заглибної фурми з односопловим (а-в) та двосопловим наконечником (г-е)

Так, для умов використання односоплового наконечника заглибної фурми відповідні математичні моделі мають вигляд:

– для діапазону швидкості обертання заглибної фурми 0...90 об/хв.

$$Z_{шл} = -0,28 + 0,0215 \cdot n + 0,407 \cdot \delta + 0,4802 \cdot Q - 0,0082 \cdot n \cdot \delta - 0,0004 \cdot n \cdot Q + 0,5891 \cdot \delta \cdot Q + 0,00075 \cdot n \cdot \delta \cdot Q; \quad (2)$$

– для діапазону швидкості обертання заглибної фурми 90...120 об/хв.

$$Z_{шл} = -0,28 + 0,0024 \cdot n + 0,4068 \cdot \delta + 0,4806 \cdot Q + 0,0021 \cdot n \cdot \delta - 0,0023 \cdot n \cdot Q + 0,589 \cdot \delta \cdot Q - 0,0032 \cdot n \cdot \delta \cdot Q; \quad (3)$$

– для діапазону швидкості обертання заглибної фурми 120...240 об/хв.

$$Z_{шл} = -0,2798 + 0,0028 \cdot n + 0,4068 \cdot \delta + 0,48 \cdot Q - 0,0001 \cdot n \cdot \delta - 0,0028 \cdot n \cdot Q + 0,5891 \cdot \delta \cdot Q + 0,0009 \cdot n \cdot \delta \cdot Q. \quad (4)$$

Для умов використання двосоплового наконечника заглибної фурми відповідні математичні моделі представлено виразами:

- для діапазону швидкості обертання заглибної фурми 0...90 об/хв.

$$Z_{шл} = 0,6328 - 0,0068 \cdot n + 0,0257 \cdot \delta + 0,1673 \cdot Q + 0,0077 \cdot n \cdot \delta + 0,9702 \cdot \delta \cdot Q - 0,0068 \cdot n \cdot \delta \cdot Q; \quad (5)$$

- для діапазону швидкості обертання заглибної фурми 90...120 об/хв.

$$Z_{шл} = 0,755 - 0,004 \cdot n + 0,032 \cdot \delta + 0,089 \cdot Q + 0,0072 \cdot n \cdot \delta + 0,0014 \cdot n \cdot Q + 0,969 \cdot \delta \cdot Q - 0,0069 \cdot n \cdot \delta \cdot Q; \quad (6)$$

- для діапазону швидкості обертання заглибної фурми 120...240 об/хв.

$$Z_{шл} = 0,6265 - 0,0091 \cdot n + 0,0309 \cdot \delta + 0,1763 \cdot Q + 0,004 \cdot n \cdot \delta + 0,0049 \cdot n \cdot Q + 0,9645 \cdot \delta \cdot Q - 0,0048 \cdot n \cdot \delta \cdot Q. \quad (7)$$

Результати чисельного моделювання впливу досліджених факторів (табл.1) на глибину зтягування шлаку відносно загальної глибини рідкої ванни ($Y_{від}$, %) при швидкості обертання фурми 0...90 об/хв. та 120...240 об/хв. у вигляді поверхні відгуку представлені на рис.3, 4.

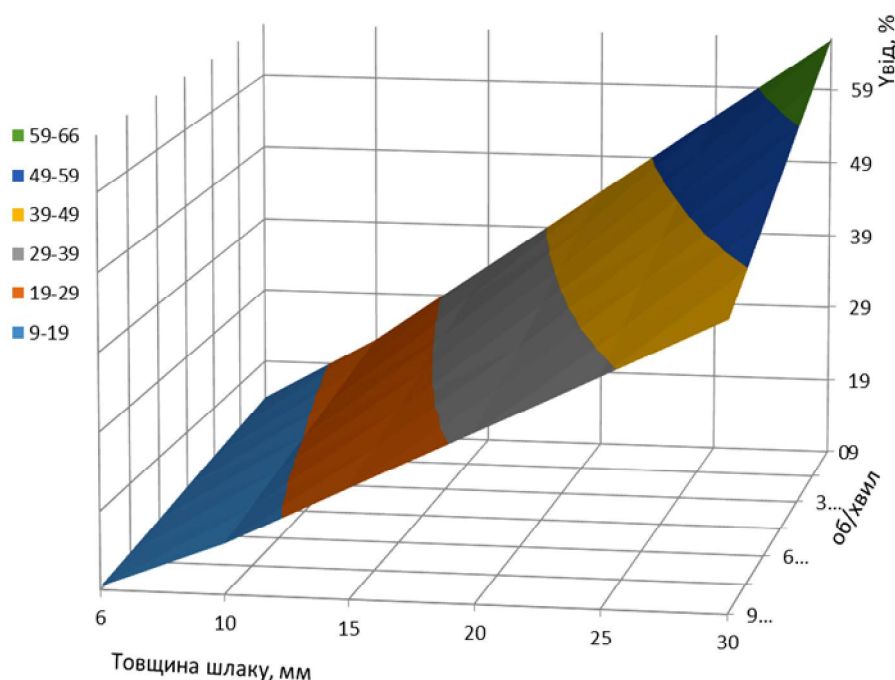


Рисунок 3 – Поверхня відгуку впливу швидкості обертання заглибної двосоплової фурми у діапазоні 0...90 об/хв. та товщини шару шлакового покриття на глибину зтягування шлаку ($Y_{від}$) до рідкої ванни. Витрата газу на продувку ванни – 2,2 л/хв.

Згідно з результатами проведених чисельних експериментів з використанням виразів (2)-(7) до найбільш визначальних факторів впливу на глибину зтягування шлаку у рідку ванну можна віднести (рис.3, 4):

- при швидкості обертання заглибної фурми до 90 об/хв. – швидкість обертання фурми та товщину шару покривного шлаку (рис.3);
- від 90 до 120 об/хв. – товщину шару покривного шлаку;
- від 120 до 240 об/хв. – швидкість обертання фурми (рис.4).

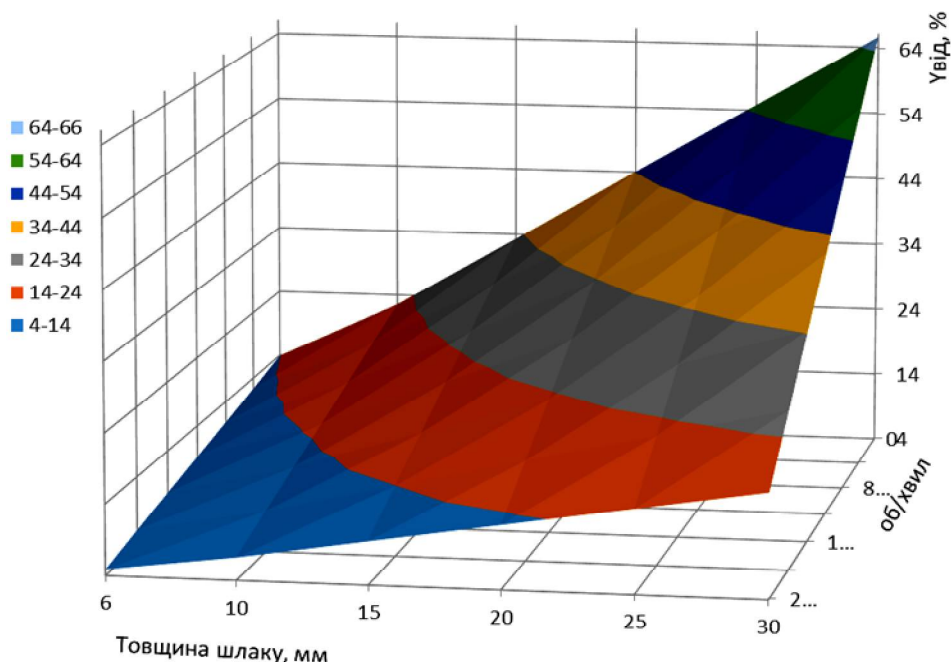


Рисунок 4 – Поверхня відгуку впливу швидкості обертання заглибної двосоплової фурми у діапазоні 120...240 об/хв. та товщини шару шлакового покриву на глибину затягування шлаку ($Y_{\text{від}}$) до рідкої ванни. Витрата газу на продувку ванни – 2,2 л/хв.

Висновки. З використанням методів повного факторного експерименту визначено вплив витрати газу на продувку ковшової ванни, конструкції наконечника та швидкості обертання заглибної фурми, а також товщини шару покривного шлаку на розвиток масообмінних процесів на міжфазовій границі. Встановлено неоднозначний характер впливу як конструкції наконечника фурми, питомих витрат газу, що вдувають крізь сопла наконечника, так і товщини покривного «шлаку» на глибину затягування останнього до ванни. Запропоновано математичні моделі, придатні для визначення впливу досліджених факторів на глибину затягування шлаку до металеві ванни.

ЛІТЕРАТУРА

1. Новый комплекс особо глубокой десульфурации чугуна в большегрузных зали-
вочных ковшах / В.И.Большаков, А.Ф.Шевченко, А.М.Башмаков [и др.] // Метал-
лург. – 2010. – № 11. – С.34-37.
2. Опыт работы Череповецкого металлургического комбината по достижению ульт-
ранизкого содержания серы в чугуне с использованием крупнотоннажной уста-
новки десульфурации чугуна / А.Н.Луценко, А.А.Немтинов, С.Д.Зинченко и др. //
Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. – 2009. – № 7. – С.61-63.
3. Десульфурация чугуна в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Алчевский метал-
лургический комбинат» / А.М.Зборщик, С.В.Куберский, Г.Я.Довгалюк [и др.] // Ме-
талл и литье Украины. – 2010. – №7. – С.9-12.
4. Перспективы десульфурации чугуна на ОАО «Северсталь» с использованием реа-
гентов на основе магния / А.М.Ламухин, С.Д.Зинченко, В.Г.Ордини [и др.] // VII меж-
дунар. симпозиум по десульфурации чугуна и стали, 26-27 сентября 2002 г.: сб. науч.
трудов. – Австрия: Анин, 2002. – С.32-33.
5. Сігарьов Є.М. Напрямки удосконалення ковшової десульфуратії чавуну /
Є.М.Сігарьов, М.М.Недбайло, І.В.Кривцун // Збірник наукових праць Дніпродзер-
жинського технічного університету: (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ –
2016. – Вип. 2(29). – С.3-9.