

9.2 Підвищення ефективності формування шлакового гарнісажу

Ефективним способом підвищення стійкості футерівки металургійних агрегатів залишається використання модифікованого добавками рідкого шлаку, який наноситься на поверхню вогнетривів. При охолодженні шлак кристалізується та утворює на поверхні вогнетривів термостійкий захисний гарнісажний шар.

Відомо [432, 433], що в умовах використання конвертерного шлаку для формування гарнісажного шару на футерівці кисневого конвертера, легкоплавкі фази з підвищеним вмістом FeO забезпечують адгезію між шлаком і вогнетривом, а тугоплавкі фази - опір ерозії та тепловий. Дослідженнями з визначення адгезії шлаків різного складу, показана можливість адгезії шлаку до частинок MgO у периклазовуглецевих (MgO-C) вогнетривах, при цьому не виявлені реакції між частинками MgO і шаром нанесеного шлаку. Проте виявлений газовий проміжок на поверхні розділу між цим шаром шлаку і MgO-C матрицею футерівки.

Основний вплив на розчинність MgO має склад шлаку і особливо показник його основності $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$. Вплив (Fe_xO_y) на розчинність MgO неоднозначний. Fe_2O_3 пов'язує MgO в ферити, тим самим знижуючи активність оксиду магнію і підвищуючи його розчинність. (FeO) , з одного боку, збільшує частку вільного кисню і, відповідно, a_{MgO} , що має знижувати розчинність. Але, з іншого боку, іони Fe^{2+} концентруються, головним чином, в RO -підсистемі, зменшуючи іонну частку катіонів магнію і, відповідно, активність MgO .

Підвищення адгезійної здатності гарнісажного шлаку до вогнетриву досягається регулюванням співвідношення низько- та високотемпературних фаз. Внаслідок гарного змочування конвертерним шлаком поверхні MgO-C вогнетриву робота його адгезії до зерен периклазу наближається до подвоєного поверхневого натягу шлаку і складає від 460 до 495 МДж/м².

Окиснення графіту матриці вогнетриву за реакцією $(\text{FeO}) + \text{C}_{\text{ТВ}} = \text{Fe}_{\text{мет}} + \{\text{CO}\}$ підвищує пористість робочого шару футерівки, внаслідок чого шлак

проникає крізь тріщини або пори до об'єму вогнетриву та сприяє подальшому вимиванню зерен MgO у шлак. У свою чергу, залізо, що відновлюється, дифундує в зерна MgO і прискорює утворення магнієвого вюститу, забезпечуючи непряме розчинення його зерен та так званої «пасивної» корозії.

Істотно підвищується в'язкість шлаку за присутності в ньому, у зваженому стані, нерозчинених часток розміром 10^{-3} - 10^{-2} мм, які викликають збільшення внутрішнього тертя та зменшують швидкість руху шлакової плівки по футерівці. У високоосновному конвертерному шлаку такими твердими частками можуть бути кристали MgO , CaO , Cr_2O_3 та інші.

Метою досліджень було визначення можливості прецизійного регулювання співвідношення низько- та високотемпературних фаз у кінцевому конвертерному шлаку шляхом внесення додаткової кількості CaO та MgO , а також впливу тугоплавких твердих добавок (на основі MgO) різних фракцій на зміну крайового кута змочування шлаком вогнетриву.

Дослідження поверхневих явищ у системі «шлак-вогнетрив» проводили з використанням комплексу на основі печі Таммана, оптичного пірметра ЕОП-66 та контрольно-вимірювальних приладів в умовах сталеплавильної лабораторії кафедри МЧМ Дніпровського ДТУ. Використані основні положення методики визначення поверхневого натягу методом лежачої краплі, методики планування експерименту та результати досліджень [434-438].

У зразки порошкоподібного кінцевого конвертерного шлаку вихідного хімічного складу, %: CaO 45,1; MgO 3,9; SiO_2 16,5; $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 26,3, присаджували порції CaO та MgO , у відповідності з планом експерименту. З метою визначення впливу тугоплавких частинок на розтікання краплі шлаку, додавали частинки різних фракцій (від 0,63 до 3,60 мм) у обсязі 8% від маси шлаку.

Зразки модифікованого шлаку у вигляді циліндру діаметром 8 мм та висотою 10 мм встановлювали на підкладку, виготовлену із периклазовуглецевого вогнетриву (марки *PC-14F*). У печі Таммана по ходу експерименту забезпечили нейтральну атмосферу. Визначення характеру

розтікання шлаку по поверхні вогнетриву проводили з використанням знімків, де фіксували у часі різні стадії процесу. Крайовий кут змочування вимірювали з точністю до $0,5^\circ$, а лінійні розміри краплі шлаку – з точністю до $0,1$ мм.

Величини значущості коефіцієнтів, визначені за виразом $a_i = |b_i \cdot \Delta\theta_i|$, підтвердили відомі припущення, що для конвертерного шлаку у дослідженому діапазоні хімічного складу, найбільш впливовим на зміну крайового кута змочування фактором є вміст CaO ($a_i = 46,125$).

Міграція хімічного складу модифікованого шлаку зі збільшенням вмісту CaO та MgO у область з підвищеною температурою плавлення (рис. 1) свідчить на користь запропонованого авторами способу [439] введення добавок-модифікаторів по ходу роздування шлакової ванни.

Макро- та мікроструктури границі «шлак – вогнетрив» для шлаку, модифікованого тугоплавкими частинками MgO фракцій $0,63 \dots 1,0$ мм (*a*) та $3,0 \dots 3,6$ мм (*б, в*) відповідно, наведені на рисунку 2.

Газового проміжку між модифікованим шлаком та вогнетривом не виявлено. За результатами обробки експериментальних даних отримана математична модель для визначення впливу розміру фракції (*D*) тугоплавких частинок на зміну крайового кута змочування:

$$\begin{aligned} \theta = & 101,29 - 2,37 \cdot \text{CaO} - 2,67 \cdot \text{MgO} - 27,68 \cdot D + 0,27 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} + \\ & + 1,67 \cdot \text{CaO} \cdot D + 2,98 \cdot \text{MgO} \cdot D - 0,19 \cdot \text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot D \end{aligned} \quad (1)$$

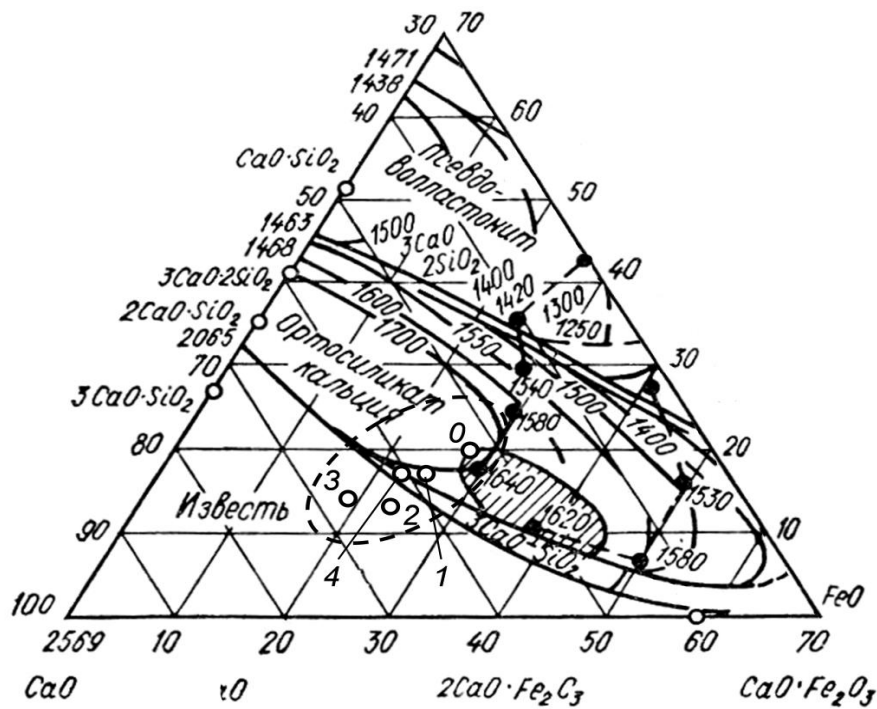


Рисунок 1. Міграція складу шлаку при додаванні CaO та MgO. Точка «0» на діаграмі - вихідний шлак. Цифри у точок відповідають номерам експериментальних складів модифікованого шлаку

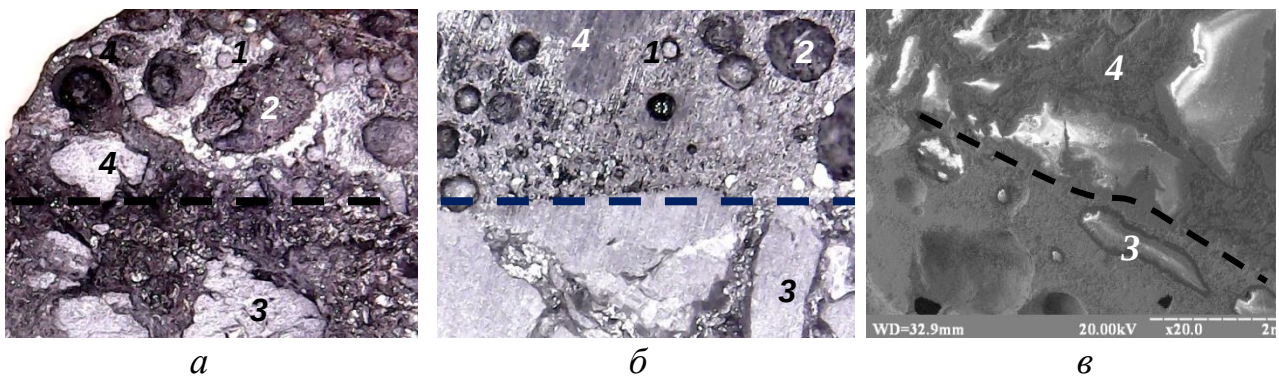


Рисунок 2. Макро- (а, б) та мікроструктура (в) зразків модифікованого шлаку: 1 – тугоплавкі частинки; 2 – пори у шарі шлаку; 3 – зерна MgO у вогнетривкій підкладці; 4 – шлак; ----- границя контакту «шлак – вогнетрив»

Результати розрахунків за виразом (1), у вигляді поверхні відгуку, наведені на рис. 3.

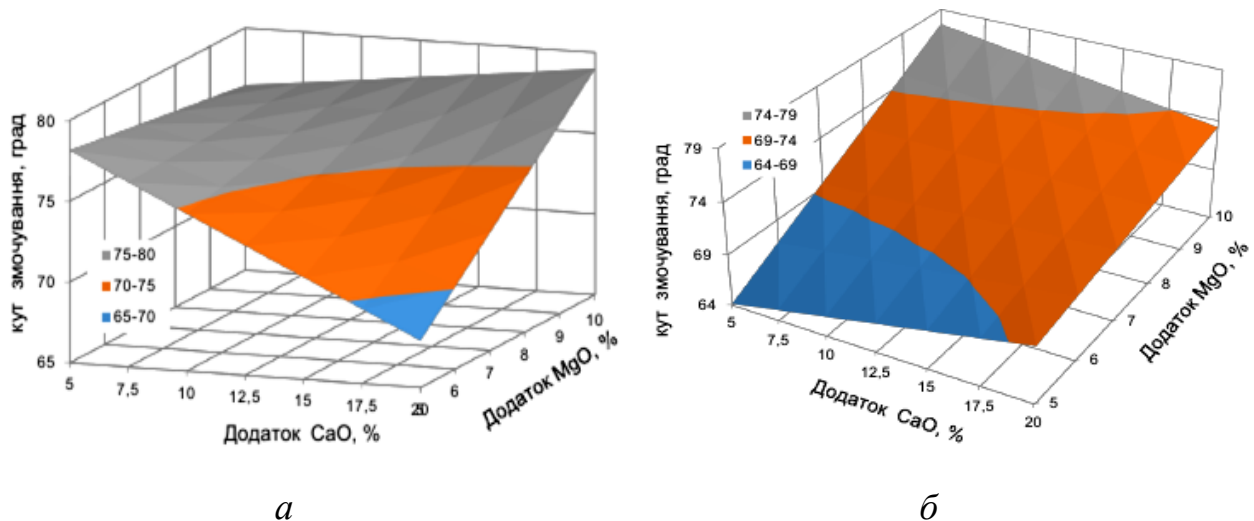


Рисунок 3. Поверхні відгуку, які характеризують вплив твердих частинок MgO фракції 0,63...1,0 мм (а) та 3,0...3,6 мм (б) на зміну кута змочування вогнетриву модифікованим шлаком

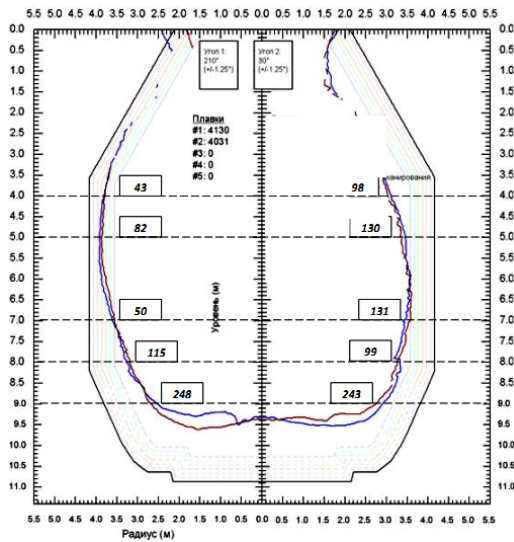
За результатами виконаних досліджень підтверджено, що вміст CaO, MgO та співвідношення низько- ($\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) та високотемпературних ($\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) фаз у модифікованому шлаку суттєво впливає на зміну крайового кута змочування. Але найбільший вплив має розмір тугоплавких часток. Введення до об'єму шлаку тугоплавких часток фракції більше 3,0 мм призводить до перманентного зростання величини крайового кута змочування та може негативно вплинути на розтікання рідкого шлаку по поверхні вогнетривів; підвищення вмісту (MgO) понад 12 % призводить до зростання величини кута змочування до 75-80 град., що також не сприяє досягненню щільного рівномірного покриття гарнісажним шаром поверхні вогнетриву.

Величину роботи адгезії модифікованого шлаку оцінили з використанням рівняння $A_{адг} = \sigma_{p-г} \cdot (1 + \cos\theta)$, з врахуванням змін θ , а роботу когезії - за виразом: $A_{ког} = 2 \cdot \sigma_{p-г}$, де σ – міжфазова енергія, Дж/м².

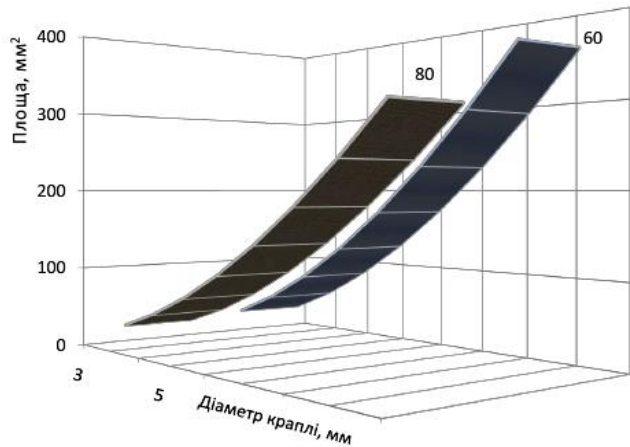
Встановлено, що використання у якості добавки тугоплавких частинок MgO, призводить до коливань величини роботи адгезії шлаку від 0,2 до 0,8 Н/м, у залежності від співвідношення (CaO/MgO).

Згідно з запропонованою авторами даної роботи методикою розрахунку необхідної для формування гарнісажу заданої товщини $\delta_{\text{шл}}$ (рис. 4, а) тривалості роздування шлакової ванни шириною (ΔH) на відповідному секторі (S_C) на вогнетривах можна визначити за виразом:

$$\Delta H = (R_k - h_\phi \cdot \operatorname{tg} \alpha_i) \cdot \operatorname{tg} \beta_i - (R_k - h_\phi \cdot \operatorname{tg} \alpha_2) \cdot \operatorname{tg} \beta_2, \quad (2)$$



а



б

Рисунок 4. Профіль 250-т конвертера з розподілом шлакового гарнісажу по висоті агрегату після 4000 плавки (а) та залежність площі покриття краплями шлаку поверхні вогнетриву від діаметру крапель шлаку та крайового кута змочування (б)

Товщина гарнісажного шару, який буде нанесено на S_C протягом 1 сек роздування шлаку, визначається за виразом [435]:

$$\delta_{\text{шл}} = \frac{2r_{\text{кр}} \left(\sqrt{h_{\text{кр}}^2 + r_{\text{кр}}^2} \right)}{R_k^2 (\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_2) \cdot (R_k - h_\phi \operatorname{tg} \alpha_1) \cdot \operatorname{tg} \beta_1} \quad (3)$$

де α_1 - кут нахилу сопел Лавалля фурми; β_1, β_2 - кути відбиття крапель шлаку на периферії зворотнього потоку, без урахування і з урахуванням кута розширення газового струменя відповідно.

У відповідності з виконаними розрахунками $\delta_{\text{шл}}$ по висоті відповідного сектору S_C не є сталою величиною. До прикладу, при розташуванні наконечника

гарнісажної фурми на висоті 4 м від шлаку шар товщиною 50 мм у верхній точці сектору S_C буде сформований протягом 4,52 хв., а в нижній частині футерівки 250-т конвертера – менш ніж за 2,1 хв.

У свою чергу, площа покриття краплями шлаку (S) поверхні вогнетриву залежить від діаметру шлакових крапель (d), що виносяться з ванни, та крайового кута змочування (рис. 4, б):

$$S = 0,785 \cdot (d \cdot (4/(1,5 \cdot \operatorname{tg} \alpha/4 + 0,5 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha/4))^{1/3})^2 \quad (4)$$

де α – центральний кут, град.

Керувати фактором адгезії, в умовах невеликого діапазону коливань величини $A_{\text{ког}}$, можливо шляхом зміни величини поверхневої енергії робочого шару вогнетриву. Це забезпечується по ходу вигорання графіту матриці вогнетриву з утворенням $\{\text{CO}\}$ та підвищенням пористості, що призводить до збільшення $A_{\text{адг}}$.

Визначити товщину шару гарнісажного шлаку, за умов досягнення якої стає можливим затікання шлаку у пори і тріщини вогнетриву (радіусом r), можна з використанням виразу: $h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{r \cdot \rho \cdot g}$, де ρ - густина шлаку, кг/м^3 .

Таким чином, показана доцільність керування величиною роботи адгезії шлаку шляхом введення тугоплавких частинок, зміною співвідношення низько- та високотемпературних фаз та поверхневої енергії робочого шару вогнетриву. Отримані у ході досліджень дані та моделі можуть бути використані для прецизійного регулювання хімічного складу та співвідношення фаз у кінцевому конвертерному шлаку перед роздуванням останнього на футерівку конвертера.