

## РОЗДІЛ «МЕТАЛУРГІЯ»

УДК 669.184.125

СІГАРЬОВ Є.М., д.т.н., професор  
 БАЙДУЖ Ю.В., аспірант  
 ЧЕРНЯТЕВИЧ І.В.\* , к.т.н.  
 СЕМЕНОВА Д.А., аспірантка

Дніпродзержинський державний технічний університет  
 \* ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

### ДО РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ НАНЕСЕННЯ ГАРНІСАЖНОГО ПОКРИТТЯ НА ФУТЕРІВКУ

**Вступ.** Впровадженням газових струменів, які сформовані соплами Лаваля штатної або спеціальної гарнісажної фурми, в об'єм ванни рідкого конвертерного шлаку, забезпечується утворення реакційних зон, розміри та конфігурація яких визначається кутом нахилу сопел та висотою розташування наконечника фурми над днищем конвертера. Ежекція частини шлакових крапель потоком газу, що відходить з об'єму реакційних зон, та викидання з ванни крапель шлаку під впливом тиску струменів у робочий простір конвертера призводить до формування на футерівці гарнісажного шару.

**Постановка задачі.** У зв'язку з технічними та організаційними ускладненнями визначення фактичної товщини гарнісажного шару, сформованого внаслідок роздування шлакової ванни газовими струменями, у дослідженнях [1-4] запропоновані методики розрахунку, що враховують теплофізичні особливості формування гарнісажного шару [1, 2] або гідрогазодинаміку [3, 4] роздування ванни.

Наведені у [2-4] відомості про розподіл сформованого гарнісажного шару по висоті робочого простору конвертера свідчать на користь зміни товщини гарнісажу з 5-8 мм біля горловини до 35-200 мм в нижній частині агрегату. Наведені дані мають широкий діапазон значень товщини гарнісажного шару у різних зонах конвертера та потребують уточнення методики розрахунку параметрів операції роздування кінцевого шлаку на футерівку.

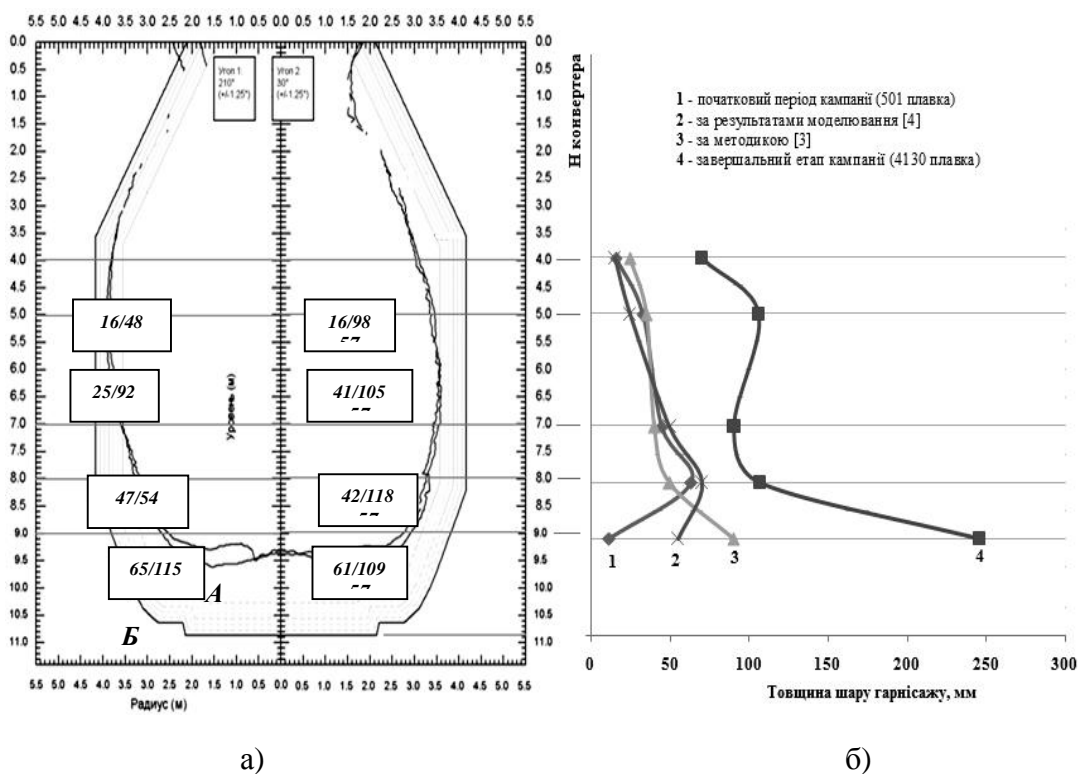
У роботі поставлено завдання розробити методику розрахунку основних параметрів роздування шлакової ванни газовими струменями на футерівку конвертера і визначити ступінь впливу конструкції фурми (кута нахилу, кількості та діаметра сопел Лавалю) та її розташування над поверхнею ванни на результати операції.

**Результати роботи.** Для організації винесення потоку шлакових крапель, орієнтованого у напрямку зон найбільш інтенсивного зносу футерівки конвертера, в конвертерному цеху ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф.Е.Дзержинського» (ПАТ «ДМКД») використовують 6-тисоплову фурму із згрупованими по три соплами Лавалю двох діаметрів [5]. Наконечник фурми, спроектований і впроваджений в практику Ю.І.Шишом, має наступні основні характеристики: 2 основних, розміщених симетрично в напрямку цапф конвертера, сопла Лавалю з критичним ( $d_{кр}$ ) і вихідним ( $d_{вих}$ ) діаметрами сопел 43 мм і 49 мм відповідно; 4 додаткових сопла Лавалю з  $d_{кр}=37$  мм і  $d_{вих}=43$  мм відповідно; кут нахилу сопел до вертикальної осі фурми  $\alpha_1=17^\circ 30'$  і в плані між осями сусідніх сопел по  $\gamma_1=50^\circ$  (між соплами  $d_{кр}=37$  мм і  $d_{кр}=43$  мм); між групами сопел –  $\gamma_2=80^\circ$ .

З метою визначення фактичної товщини сформованого роздуванням шлакової ванни гарнісажного шару авторами роботи проведено послідовне сканування профілю

робочого простору конвертера з використанням інтерферометра *LaCam M007* (фірми *Ferrotron Technologies GmbH*, Німеччина) як на початковому етапі кампанії конвертера по футеровці (501 плавка), так і на завершальному етапі кампанії (4131 плавка). Послідовне вимірювання проводили до та після роздування шлакової ванни на футерівку. При цьому з метою підвищення точності оцінки після попередніх плавок (500 та 4130-ї відповідно) роздування шлаку на футерівку не проводили.

Отримані за результатами прямого вимірювання ізолінії, що відображають профіль робочого простору і товщину нанесеного на стіни шлакового шару (рис.1, а) та характер розподілу останнього по висоті робочого простору конвертера у початковий період кампанії, в цілому відповідають результатам досліджень [2-4] (рис.1, б). В той же час, значення товщини гарнісажу у завершальний період кампанії суттєво відрізняються від наведених у [2-4] (рис.1, б), що потребує проведення додаткового аналізу.



цифри на рис. а) – товщина гарнісажного шару у початковий / завершальний період кампанії відповідно, мм

Рисунок 1 – Ізолінії висхідного (А) та профілю робочого простору конвертера після роздування (Б) кінцевого шлаку (а) (на 4030 та 4031 плавках відповідно) та розподіл за товщиною гарнісажного шару (б), сформованого у різних зонах робочого простору агрегату

У цій роботі прийнято припущення, що загальний обсяг сформованого на стінах гарнісажного шару відповідає сумарному обсягу крапель шлаку, які виносяться з шлакової ванни і досягають поверхні футерівки конвертера радіусом  $R_k$ . Прийнято, що при розташуванні торця наконечника на відповідній (докритичній) відстані від рівня шлакової ванни струмінь газу, який виходить з сопла Лавалю з швидкістю  $V_0$ , утворює в об'ємі ванни реакційну зону у формі кратера з осьовою симетрією та параметрами: глибиною  $h_{кр}$ , радіусом підшви  $R_{кр}$  і радіусом кривизни поверхні в нижній точці

$R_{hx}$ . Потоки відхідного газу, що рухаються уздовж поверхні кратера, захоплюють частину рідини і формують кромку над недеформованою поверхнею, що відповідає режиму «без пробою» ванни [6].

Для встановлення характеру зв'язку між  $h_{кр}$  і  $V_0$  різними авторами [7-9] запропоновано використовувати: енергетичний баланс [7]; рівність тисків газової і рідкої фаз на поверхні їх розділу [8]; баланс сил на поверхні розподілу фаз [9]. Для прийнятих умов роздування рідини можливість використання енергетичного балансу вимагає обґрунтування, так як після досягнення сталого режиму роздування, при якому форма поверхні ванни залишається постійною, кінетична енергія струменя вже не переходить у потенційну енергію деформації поверхні.

Можливість використання рівності тисків газової і рідкої фаз на поверхні розділу [8] в разі турбулентних струменів також вимагає додаткової оцінки, тому що не узгоджується з теоремою про збереження кількості руху. Швидкість  $V_0$  газу при турбулентному режимі течії зменшується по осі струменя пропорційно віддаленню від сопла і зменшення тиску струменя на перешкоду. При цьому кількість руху в струмені залишається постійним, і інтенсивність впливу не повинна змінюватися.

Єдиним підходом, що не суперечить основам теорій газових струменів та гідравліки [9], є використання балансу сил на поверхні розподілу фаз.

Силу тиску газового струменя на поверхню шлакової ванни можна визначити за виразом:

$$F = k \cdot \rho_2 \cdot V_x \cdot Q, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що залежить від умов зіткнення струменя із рідиною ( $k = 2$ );  $Q$  – об'ємна витрата газу, м<sup>3</sup>/с;  $V_x$  – швидкість струменя на рівні поверхні зіткнення з рідкою ванною, м/с;  $\rho_2$  – щільність струменя, кг/м<sup>3</sup>.

При впливі струменя газу на рідину енергія газу головним чином витрачається на утворення нової поверхні; подолання сил в'язкості при зміні форми рідини та втрати, які обумовлені неефективною передачею енергії.

Подальші розрахунки у даній роботі виконані стосовно до умов роботи гарнісажної фурми [5] при роздуванні кінцевого конвертерного шлаку у 260-т конвертері конвертерного цеху ПАТ «ДМКД».

Відповідно до розрахунків при кінетичній енергії струменів, що витікають через сопла Лавалю гарнісажної фурми, яка складає 38883,18 Дж та 9915,5 Дж для сопел з  $d_{кр} = 0,043$  м та  $d_{кр} = 0,037$  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 винесення крапель з утворених реакційних зон.

Швидкість струменя азоту на рівні зіткнення із поверхнею ванни залежить від висоти розташування наконечника фурми над днищем конвертера  $h_\phi$  та визначається за виразами [10]

$$V_x = 8,26 \cdot V_0 / \left( \frac{h_\phi}{2r_0} \right)^{1,137} \quad \text{при} \quad \frac{h_\phi}{2r_0} > 12, \quad (2)$$

$$V_x = V_0 \cdot \left[ 1 - 0,008 \cdot \left( \frac{h_\phi}{2r_0} \right)^{1,67} \right] \quad \text{при} \quad \frac{h_\phi}{2r_0} < 12, \quad (3)$$

де  $r_0$  – вихідний радіус сопла Лавалю, м.

У свою чергу, глибину занурення струменя азоту в шлакову ванну можна визначити за виразом

$$h_{кр} = \sqrt{\frac{\rho_z}{g \cdot \rho_{ш}}} \cdot V_x \cdot \sqrt{2r_x}, \quad (4)$$

де  $r_x = r_0 + h_{\phi} \cdot tg \frac{\alpha_1}{2}$ , м;  $\alpha_1$  – кут розкриття струменя, град.

Діаметр струменя азоту на межі контакту з поверхнею шлакової ванни визначається як

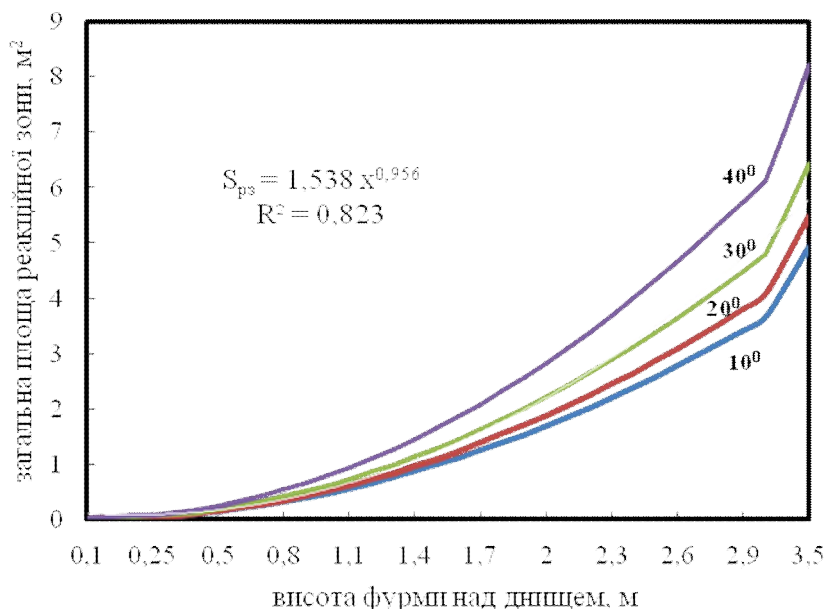
$$d_1 = d_0 \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot V_0^2}{\rho_z \cdot V_x^2}}. \quad (5)$$

У такому випадку діаметр кратера реакційної зони становить

$$D = 4a \sqrt{1 - \left(\frac{a}{R_0}\right)^2}, \quad (6)$$

де  $a = d_1 \left(\frac{V_0}{V_x} - 1\right) \cdot \sqrt{\frac{3\rho_0}{2\rho_r}} = 1,43$  м. Тут  $R_0 = \frac{1}{2} \left( h - a + \sqrt{(h - a)^2 + 8a^2} \right)$ .

Загальна площа поверхні взаємодії шлакової ванни з газовим струменем у реакційній зоні може бути визначена як  $S = 8\pi\alpha^2 \ln \frac{R_0^2}{a}$ . Результати розрахунків відношення сумарної (загальної) площі поверхні реакційної зони ( $S_{pz}$ ), утвореної газовими струменями, що витікають з сопел Лавалю гарнісажної фурми, до площі шлакової ванни ( $S_{ш}$ ) для умов використання наконечників із різними кутами нахилу сопел Лавалю до осі фурми наведені на рис.2.



цифри біля кривих – кут нахилу сопел Лавалю

Рисунок 2 – Залежність загальної площі реакційних зон при зміні кутів нахилу сопел Лавалю до вертикальної осі фурми

Визначення тривалості роздування ванни, яка є необхідною для нанесення на футерівку гарнісажного шару визначеної товщини, проводили з урахуванням припущення, що з поверхні утвореної реакційної зони може змиватися шар шлакової плівки товщиною  $\delta_{пл}$  від 0,4 до 3 мм [3]. Остання розбивається у потоці відхідного газу на краплі різного діаметра та пере-

носиться на обмежену сектором  $S_C$  поверхню футерівки конвертера. При цьому  $S_C$  визначається кількістю сопел, а висота «плями» нанесення крапель шлаку на футерівку ( $\Delta H$ ) у відповідному секторі – кутом нахилу сопел Лавалю фурми.

У такому випадку  $\Delta H = H_{max}^{всmp} - H_{min}^{всmp}$ , де  $H_{max}^{всmp} = (R_k - h_\phi \cdot \operatorname{tg} \alpha_i) \cdot \operatorname{tg} \beta_i$ ;  $\beta_i$  – кут відбиття краплі від поверхні реакційної зони.

Позначимо кути нахилу сопел Лавалю та відбиття крапель шлаку на периферії потоку як  $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$  без урахування і з урахуванням кута розширення газового струменя відповідно. Висоту відповідного сектора  $S_C$  нанесення шлакових крапель по висоті футерівки можна визначити за виразом, м:

$$\Delta H = (R_k - h_\phi \cdot \operatorname{tg} \alpha_1) \cdot \operatorname{tg} \beta_1 - (R_k - h_\phi \cdot \operatorname{tg} \alpha_2) \cdot \operatorname{tg} \beta_2, \quad (7)$$

а площу  $S_C$  як, м<sup>2</sup>:

$$S_C = \frac{\pi}{2} R_k \left[ R_k (\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_2) - h_\phi (\operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \alpha_2 \cdot \operatorname{tg} \beta_2) \right]. \quad (8)$$

Після відповідних перетворень та врахування малою величини другої складової рівняння (8) вираз для визначення  $S_C$  як результату взаємодії зі шлаковою ванною газового струменя може бути представлений у вигляді залежності  $S_C = \frac{\pi}{2} R_k \cdot A$ , де  $A = R_k (\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_2)$ .

Товщина гарнісажного шлакового шару, нанесеного на  $S_C$  у відповідній зоні агрегату за час польоту шлакової краплі діаметром  $d_{ск}$  від реакційної зони до поверхні футерівки складе

$$\delta_{нач} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d_{ск}^2}{R_k}. \quad (9)$$

З урахуванням загального обсягу крапель шлаку, що виносяться з реакційної зони, товщина гарнісажу, нанесеного на поверхню відповідного сектора  $S_C$  за період роздування в 1 сек, може бути розрахована за виразом, м:

$$\delta_{шл} = \frac{2r_{кр} \cdot \delta_{пл} \cdot U \cdot \left( \sqrt{h_{кр}^2 + r_{кр}^2} \right)}{R_k^2 \cdot (\operatorname{tg} \beta_1 - \operatorname{tg} \beta_2) \cdot (R_k \cdot \operatorname{tg} \beta_1 - h_\phi)}. \quad (10)$$

Відповідно до розрахунків при розташуванні наконечника фурми на висоті 4 м від днища конвертера для нанесення на сектор  $S_C$  шару гарнісажу товщиною у 50 мм тривалість роздування повинна складати 3,3 хв. (рис.3). При розташуванні фурми на висоті 0,5 м товщина покриття у 50 мм досягається роздуванням ванни тривалістю вже 5,9 хв. (рис.3).

Таким чином, з використанням рівняння (10) можливою є розробка режиму переміщення фурми по висоті по ходу операції роздування шлаку для забезпечення формування раціонального профілю робочого простору конвертера. В той же час, необхідно відмітити, що у запропонованих виразах (7)-(10) не враховується зміна стану, гідродинаміка шлакової ванни та гарнісажного шару.

Визначимо вплив конструкції, розташування фурми над днищем конвертера та стану шлакового розплаву на характеристики потоку шлакових крапель, що виносяться з утворених газовими струменями реакційних зон.

В'язкість кінцевого конвертерного шлаку визначається хімічним складом, температурою, ступенем засвоєння магнезійних добавок, що присаджують для коригування складу шлаку. Як відомо [11], в загальному випадку для рідини із невеликою в'язкістю перехід від одного режиму взаємодії газового струменя із ванною до іншого визначається, в основному, досягненням критичного значення критерію Вебера ( $We_{кр}$ ).

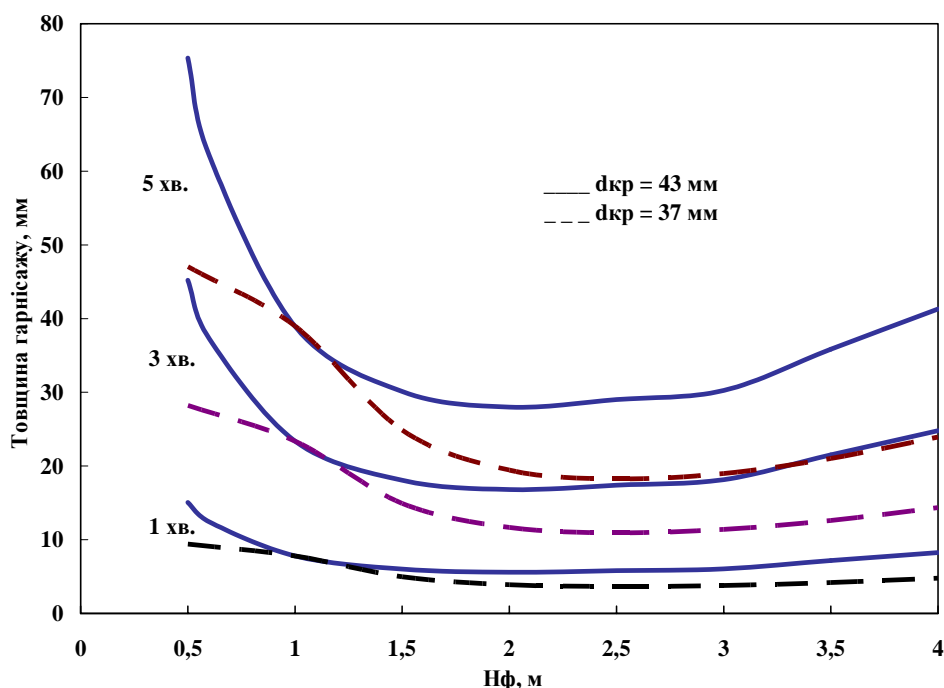


Рисунок 3 – Залежність товщини гарнісажного шару, сформованого у відповідному секторі на футерівці, від тривалості роздування шлакової ванни та висоти фурми ( $H_{\phi}$ ) над днищем

Розмір крапель, що утворюються за рахунок аеродинамічного дроблення, залежить як від властивостей рідини, так і від швидкості газового потоку, який виносить краплі з реакційної зони, та може бути визначений за виразом

$$d_{ск} = \frac{\sigma We_{кр}}{\left(\frac{V_x}{2}\right)^2 \rho_2}, \quad (11)$$

де  $We_{кр} = 13,5 - 0,442 \ln \frac{d \cdot \rho \cdot \sigma}{\mu^2}$ ;  $\sigma$  – поверхневий натяг шлаку, Н/м;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

У нашому випадку при діаметрі крапель шлаку, що виносяться з реакційної зони газовим потоком (азотом), від 0,1 до 3,0 мм [3], середній щільності конвертерного шлаку 3000 кг/м<sup>3</sup>,  $\sigma = 0,5-0,6$  Н/м (при  $T=1400-1600^{\circ}C$ ),  $\mu = (0,05-0,20)$  Па·с діапазон зміни  $We_{кр}$  складатиме:  $We_{min} = 14,08$ ,  $We_{max} = 16,80$ .

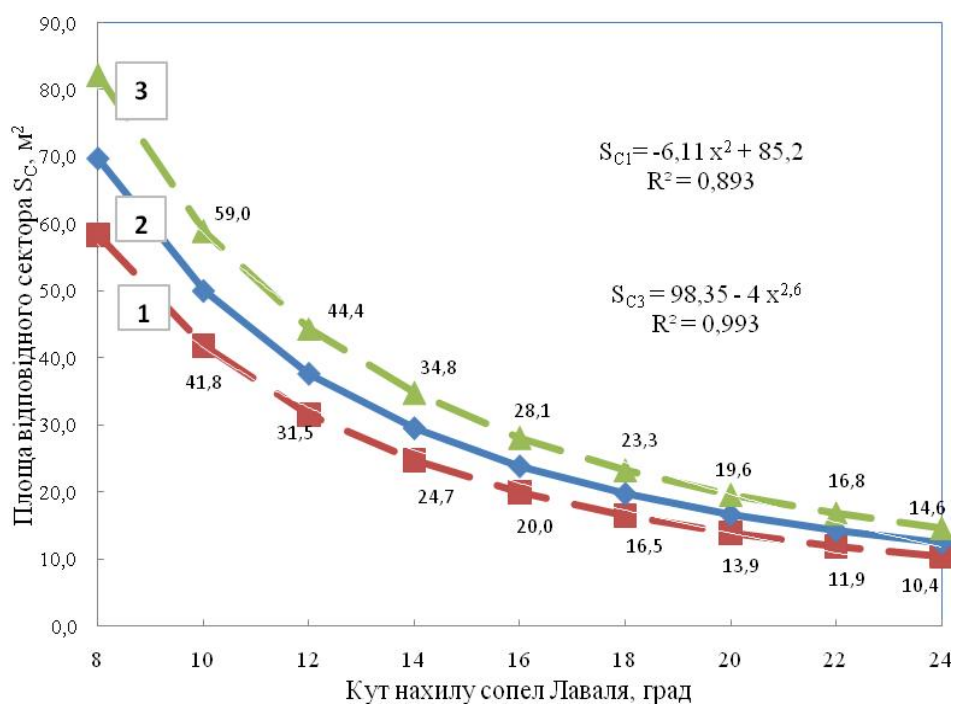
Приймаємо швидкість винесення шлакової краплі з реакційної зони як  $U = \frac{V_x}{2}$ , м/с, а масу краплі визначимо за виразом

$$m_k = \frac{\pi}{6} \rho_{ш} \left( \frac{\sigma W e_{кр}}{U^2 \rho_2} \right)^3 \quad (12)$$

При цьому маса шлакової плівки, що зривається з поверхні реакційної зони газовим потоком, визначається за виразом

$$m_{пл} = \frac{\pi d_{ск}^2}{4} \rho_{ш} \sigma_{пл} \quad (13)$$

Згідно з виконаними розрахунками для умов роздування ванни конвертерного шлаку азотними струменями у 260-т конвертері ККЦ ПАТ «ДМКД» площа сектору  $S_C$  не залежить від висоти розташування фурми над рівнем ванни, а визначається кутом нахилу сопел Лавалю до осі фурми (рис.4).



1 – початковий період кампанії конвертера по футерівці;  
 2 – по завершенні 2000 плавов; 3 – після 3500 плавов

Рисунок 4 – Залежність площі сформованого роздуванням шлаку гарнісажного шару на поверхні футерівки від кута нахилу сопла Лавалю до осі фурми та періоду кампанії конвертера по футерівці

При цьому по ходу кампанії конвертера величина  $S_C$  збільшується пропорційно зменшенню товщини футерівки та збільшенню площі поверхні ванни.

Необхідно окремо відмітити, що розрахункова товщина сформованого на футерівці гарнісажного шару по висоті відповідного сектору  $S_C$  не є сталою величиною.

Так, наприклад, відповідно до розрахунків при розташуванні фурми на висоті 4 м шар товщиною 50 мм у верхній точці сектору буде сформований роздуванням ванни

на протязі 4,52 хв., а в нижній частині сектору – не більш ніж за 2 хв. Таким чином, як визначено вимірюванням і у реальних умовах (рис.1), товщина сформованого шару гарнісажу в нижній частині відповідного сектору  $S_C$  за один і той же часовий відрізок операції буде більшою, ніж у верхній.

**Висновки.** З використанням прямих вимірів встановлені особливості розподілу гарнісажного шару за товщиною по висоті конвертера, який сформовано шляхом роздування шлакової ванни газовими струменями у різні періоди кампанії агрегату по футерівці. Запропоновано методику розрахунку необхідної тривалості роздування шлакової ванни та зміни розташування фурми з метою забезпечення раціонального профілю робочого простору конвертера. Методика розрахунку основних параметрів роздування шлакової ванни може бути використана для удосконалення конструкції гарнісажних фурм та внесення доповнень у технологічну інструкцію.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Лисняк Р.В. Физико-технологические процессы взаимодействия газовых и газопорошковых струй со шлаковой ванной во время нанесения шлакового гарнисажа на футеровку кислородного конвертера / Р.В.Лисняк, И.С.Долгополов, Е.Н.Сигарев // Теория и практика металлургии. – 2012. – № 5/6. – С.41-45.
2. Суворов С.А. Динамика образования гарнисажного слоя на поверхности футеровки конвертера и ресурс его эксплуатации / Суворов С.А. // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 7-8. – С.3-6.
3. Охотский В.Б. Гидродинамика набрызгивания шлака на футеровку конвертера / Охотский В.Б. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – №7. – С.89-91.
4. Протопопов Е.В. Математическая модель образования шлакового гарнисажа на поверхности футеровки и верхней фурмы конвертера при продувке шлакового расплава газовыми струями / Протопопов Е.В., Айзатулов Р.С., Чернятевич А.Г. // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1997. – № 4. – С.14-17.
5. 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 – Вип.1(24). – 2014. – С.7-13.
6. Моделирование гидрогазодинамических та теплофизических параметров нанесения шлакового гарнисажа і торкрет-покрыття на футерівку конвертера / [А.Г.Чернятевич, С.Є.Самохвалов, Є.М.Сігарьов та ін.] // Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1-2 (74-75). – С.82-89.
7. Rosler R.S., Stewart G.H. // J. Fluid. Mech. – 1968. – Vol. 31. Pt. 1. – P.163-174.
8. Labus T.L., Aydelott J.C. NASA technical note TN D-6368.1971 // NASA technical reports server. URL:<http://ntrs.nasa.gov/search.jsp>.
9. Гребенникова Н.М. Диагностика вязкости жидких шлаков / Гребенникова Н.М., Мордасов М.М. // Вестник ТГТУ. – 2005. – Т.11. – №1А. – С.81-87.
10. Сидоренко М.Ф. Теория и технология электроплавки стали / Сидоренко М.Ф. – М.: Металлургия, 1985. – 270с.
11. Подвысоцкий А.М. Критические условия разрушения капель газовым потоком / Подвысоцкий А.М., Дубровский В.В. // Физика аэродисперсных систем. – Одесса: «АстраханьПринт». – 1998. – Вып. 37. – С.32-38.

Надійшла до редколегії 10.05.2016.