

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.

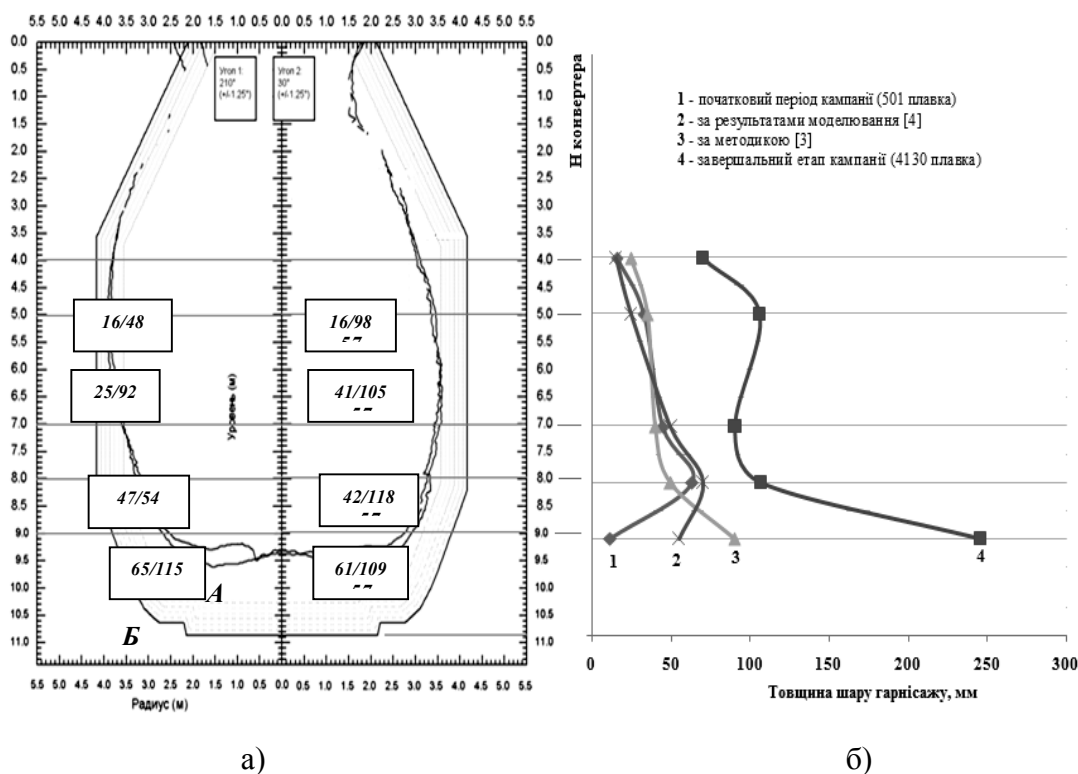
У роботі поставлено завдання розробити методику розрахунку основних параметрів роздування шлакової ванни газовими струменями на футерівку конвертера і визначити ступінь впливу конструкції фурми (кута нахилу, кількості та діаметра сопел Лавалю) та її розташування над поверхнею ванни на результати операції.

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 підшови $R_{кр}$ 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 пробую» 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, м³/с; V_x – швидкість струменя на рівні поверхні зіткнення з рідкою ванною, м/с; ρ_2 – щільність струменя, кг/м³.

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_ϕ 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

$$h_{кр} = \sqrt{\frac{\rho_2}{g \cdot \rho_{ш}}} \cdot V_x \cdot \sqrt{2r_x}, \quad (4)$$

де $r_x = r_0 + h_{\phi} \cdot tg \frac{\alpha_1}{2}$, м; α_1 – кут розкриття струменя, град.

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

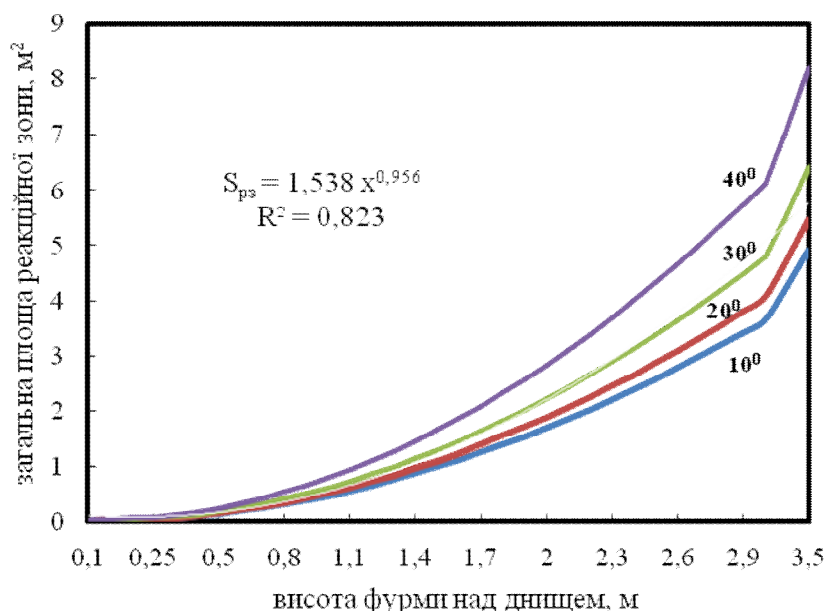
$$d_1 = d_0 \sqrt{\frac{\rho_0 \cdot V_0^2}{\rho_2 \cdot V_x^2}}. \quad (5)$$

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 (ΔH) у відповідному секторі – кутом нахилу сопел Лавалю фурми.

У такому випадку $\Delta H = H_{max}^{всmp} - H_{min}^{всmp}$, де $H_{max}^{всmp} = (R_k - h_\phi \cdot \operatorname{tg} \alpha_i) \cdot \operatorname{tg} \beta_i$; β_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, м²:

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

Після відповідних перетворень та врахування малою величиною 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 магnezіальних 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 ($We_{кр}$).

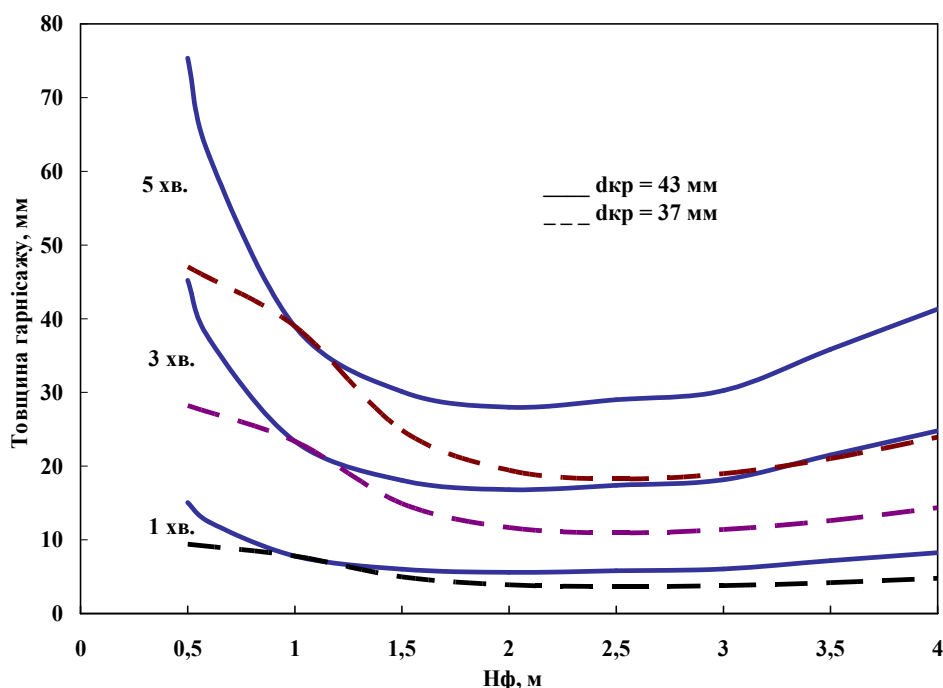


Рисунок 3 – Залежність товщини гарнісажного шару, сформованого у відповідному секторі на футерівці, від тривалості роздування шлакової ванни та висоти фурми (H_{ϕ}) над днищем

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

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

де $We_{кр} = 13,5 - 0,442 \ln \frac{d \cdot \rho \cdot \sigma}{\mu^2}$; σ – поверхневий натяг шлаку, Н/м; μ – 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/м³, $\sigma = 0,5-0,6$ Н/м (при T=1400-1600°C), $\mu = (0,05-0,20)$ Па·с діапазон зміни $We_{кр}$ складатиме: $We_{min} = 14,08$, $We_{max} = 16,80$.

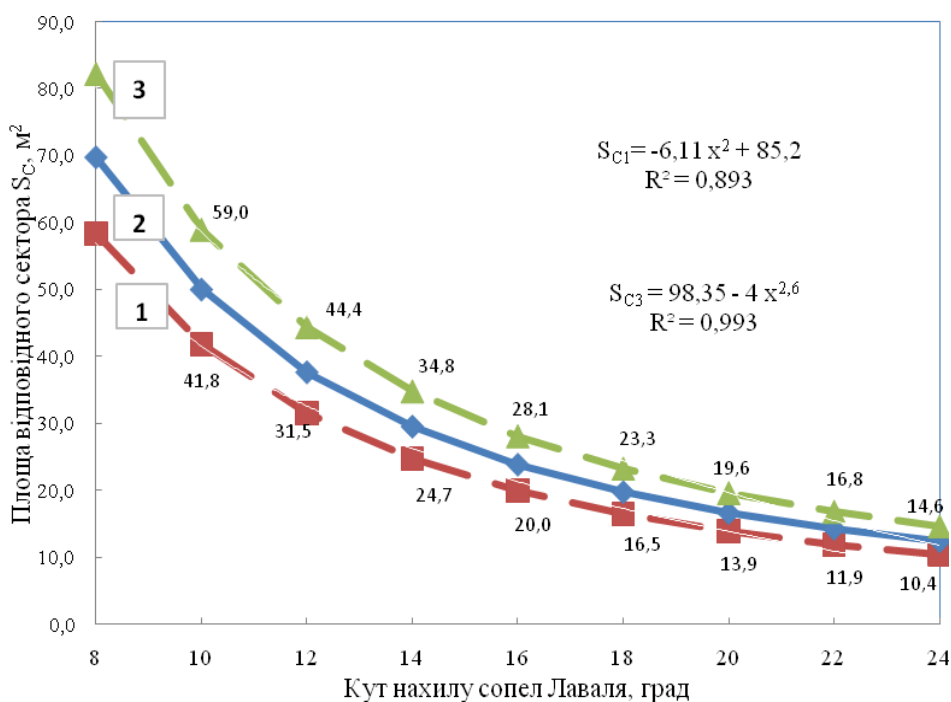
Приймаємо швидкість винесення шлакової краплі з реакційної зони як $U = \frac{V_x}{2}$, м/с, а масу краплі визначимо за виразом

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

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 плавок; 3 – після 3500 плавок

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-покрытия 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.

Днепродзержинский государственный технический университет
*ПАО «Днепровский металлургический комбинат»

ПЛАВКОСТЬ ШЛАКА И НАГРЕВ ЧУГУНА ПРИ ВДУВАНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ДОМЕННУЮ ПЕЧЬ

Введение. На ряде доменных печей Украины переход на вдувание пылеугольного топлива (ПУТ) сопровождался существенным снижением физического нагрева чугуна, что отрицательно отразилось на последующем переделе. Первой, наиболее вероятной причиной этого снижения может быть изменение шлакового режима в сторону образования легкоплавких шлаков с хорошей текучестью. В свою очередь изменение шлакового режима при вдувании ПУТ было продиктовано двумя обстоятельствами.

Первое из этих обстоятельств связано с особенностями теоретического подхода к технологии вдувания ПУТ. Так, согласно теории компенсации отрицательного воздействия угольной пыли на некоторые процессы доменной плавки [1] компенсационным ресурсом является снижение основности шлака. Действительно, снижение температур плавления и плавкости шлаков, обусловленное уменьшением основности, является положительным фактором, улучшающим подвижность расплавов в коксовой насадке.

Второе обстоятельство вызвано стремлением технологов улучшить сырьевые условия плавки при вдувании ПУТ. Это касается, прежде всего, качества кокса, содержание серы в котором во многом определяет эффективность и результативность доменной плавки. Если содержание серы в коксе снижается, то отпадает необходимость работы на шлаках повышенных основности и обессеривающей способности.

Одним из важных свойств шлака является плавкость, определяемая количеством тепла, необходимого для расплавления 1 кг шлака. Это свойство шлака влияет на расход топлива и температуру горна [2]. В свою очередь от температуры горна зависит физический и химический нагревы чугуна, имеющие значение при последующей переработке в сталь. Представляет интерес выяснить, в какой мере изменения шлакового режима при вдувании ПУТ отразились на плавкости шлаков и температуре чугуна.

Постановка задачи. Целью настоящего исследования есть количественная оценка изменения плавкости шлаков при переходе на технологию плавки с вдуванием ПУТ в конкретных сырьевых и эксплуатационных условиях.

Методика и условия исследований. Изучение плавкости шлаков при изменениях в технологии доменной плавки, обусловленных применением различных заменителей кокса, проводили на доменной печи «В» Днепровского металлургического комбината.

Доменная печь «В» с диаметром горна 8,2 м отличается от типового проекта высотой горна 3400 мм против 3200 мм, высотой зумпфа 1100 мм против 450 мм. Количество воздушных фурм увеличено с 16 до 18. Печь оснащена двумя чугунными летками и типовым двухконусным засыпным аппаратом.

Показатели качества кокса и работы доменной печи в базовый и опытный периоды представлены в табл.1 и 2. При переходе на технологию плавки с вдуванием ПУТ использовали кокс с улучшенными металлургическими характеристиками (табл.1).

Для оценки изменения плавкости шлаков использовали трехосную диаграмму Гиббса, более конкретно диаграммы Г.Гау и Л.Бабу, а также В.Г.Воскобойникова [3, 4]. С этой целью произвели перерасчет реальных доменных шлаков на 100% для системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Энтальпию шлака определяли по формуле [4]:

$$Q = m \cdot c \cdot t,$$

где Q – энтальпия шлака, кДж/кг;

m – масса, кг;

c – средняя удельная теплоемкость в интервале температур от 20°C до t ;

t – температура, для которой определена энтальпия.

Таблица 1 – Качество кокса на доменной печи «В» Днепровского металлургического комбината в периоды исследований

Периоды	Технический анализ, %			Показатели качества, %	
	Зола	Сера	Влага	CRI	CSR
Базовый 01-30.01.2014	10,8	0,76	4,3	35,0	50,0
Опытный 01-31.05.2015	10,4	0,62	2,8	30,4	57,4

Таблица 2 – Показатели работы доменной печи «В» Днепровского металлургического комбината в исследуемые периоды

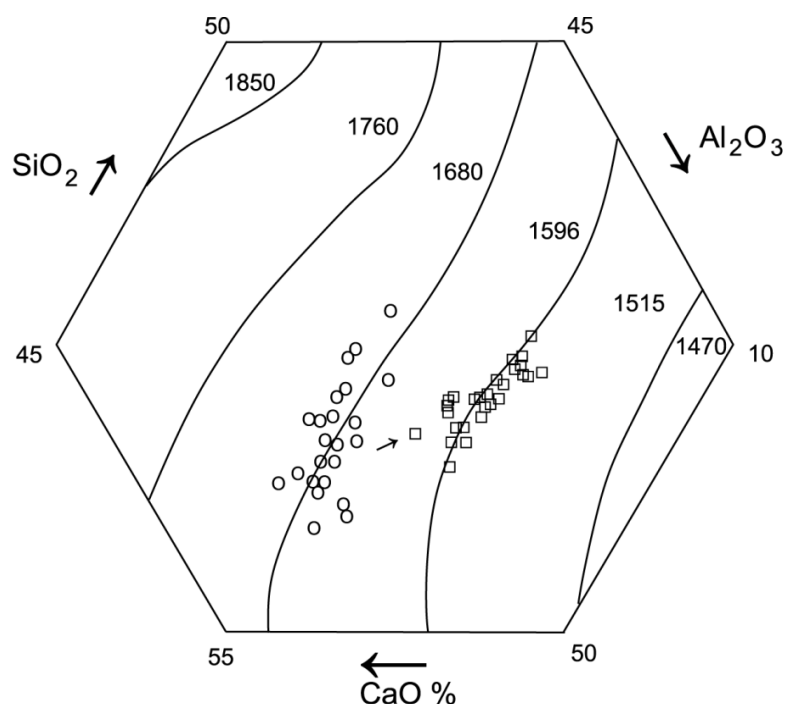
Показатели	Периоды	
	Базовый 01-31.01.2014	Опытный 01-31.05.2015
1	2	3
Производительность, %	100	115
Рудная нагрузка т/т кокса	3,12	4,71
Расход, кг/т чугуна:		
агломерата	1779	1742
окатышей	6	-
брикетов БЖС-Д	-	12
шлака конвертерного	-	8
известняка	-	21
кокса	559	400
антрацита	17	-
ПУТ	-	156
Дутьё:		
температура, °С	744	962
расход природного газа:		
% к дутью	0,65	-
м ³ /т чугуна	12,4	-
концентрация O ₂ , %	20,8	24,6
Давление газа на колошнике (избыточное), кПа	128	126
Перепад давлений фурмы – колошник, кПа	111	116
Чугун:		
содержание, %:		
Si	0,74	0,63
Mn	0,24	0,11
S	0,026	0,019
P	0,100	0,078
температура, °С	1479	1450

Продолжение таблицы 2

1	2	3
Шлак:		
содержание, %:		
CaO	47,6	45,5
SiO ₂	39,4	40,5
MgO	5,0	6,1
Al ₂ O ₃	6,5	6,3
S	1,37	1,2
MnO	0,27	0,15
FeO	0,37	0,33
основность :		
CaO/SiO ₂	1,21	1,12
CaO+MgO/SiO ₂	1,34	1,27
Выход, кг/т чугуна	390	379
Коэффициент распределения серы L _s	59,8	58,9

Удельную теплоемкость шлака (для диапазона температур 1350-1600°C) определяли по формуле В.Г.Воскобойникова:

$$C_{20}^t = 0,63 \cdot 10^{-2} \cdot t - 2,0 \cdot 10^{-6} t^2 - 3,67 + 0,067 \cdot \left(1 - \frac{CaO}{\Sigma \text{оксидов}}\right), \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$



○ – шлаки основностью 1,21, период работы 01.01-31.01.2014;
 □ – шлаки основностью 1,12, период работы 01.05-30.05.2015;
 → – направление изменения плавкости шлаков;
 цифры у кривых изокалей – плавкость, кДж/кг

Рисунок 1 – Участок диаграммы плавкости шлаков в системе CaO-SiO₂-Al₂O₃

Значение энтальпии определяли для нижнего шлака с температурой $t = t_y + 25$, где t_y – инструментально определенная температура чугуна на выпуске; 25 – принятый перегрев нижнего шлака по сравнению с температурой чугуна.

Длительность сравниваемых периодов – один календарный месяц, продолжительность единичного периода (одна фигуративная точка на диаграммах) – одни сутки.

Результаты работы. На рис.1 приведен фрагмент диаграммы плавкости шлаков в системе CaO-SiO₂-Al₂O₃ с нанесением фигуративных точек, отражающих расчетные составы шлака в исследуемые периоды. Из диаграм-

мы видно, что переход на вдувание ПУТ с изменением шлакового режима вызвал смещение поля фигуративных точек с изокаля 1680 кДж/кг на изокаль 1596 кДж/кг, что в среднем примерно на 5% меньше исходного расхода тепла на расплавление шлаков базового периода. Указанная разница в затратах тепла является в полнее ощутимой для теплового баланса нижней высокотемпературной зоны доменной печи.

Изменение шлакового режима в базовом периоде характеризовалось существенным снижением основности – CaO/SiO_2 уменьшилось с 1,21 до 1,12 и увеличением содержания магнезии с 5,0 до 6,1%. Улучшение текучести шлака и увеличение концентрации в нем MgO обусловили вполне приемлемый уровень десульфурации чугуна – коэффициент распределения серы составил 58,9 против 59,8 в базовом периоде при существенно большей основности шлака.

Для оценки поведения расплавов в коксовой насадке важное значение имеет удельный расход тепла на сообщение шлаку хорошей текучести, так как не всегда шлак, имея низкую температуру плавления, становится подвижным при пониженных температурах.

Информация, приведенная на рис.2, свидетельствует о том, что перегрев шлаков до нормальной текучести в опытный период снизился. Если в базовом периоде поле фигуративных точек на диаграмме находилось между изокалями 1890 кДж/кг и 1680 кДж/кг, то при использовании ПУТ перегрев шлаков до нормальной текучести снизился до 1680 кДж/кг и существенно ниже.

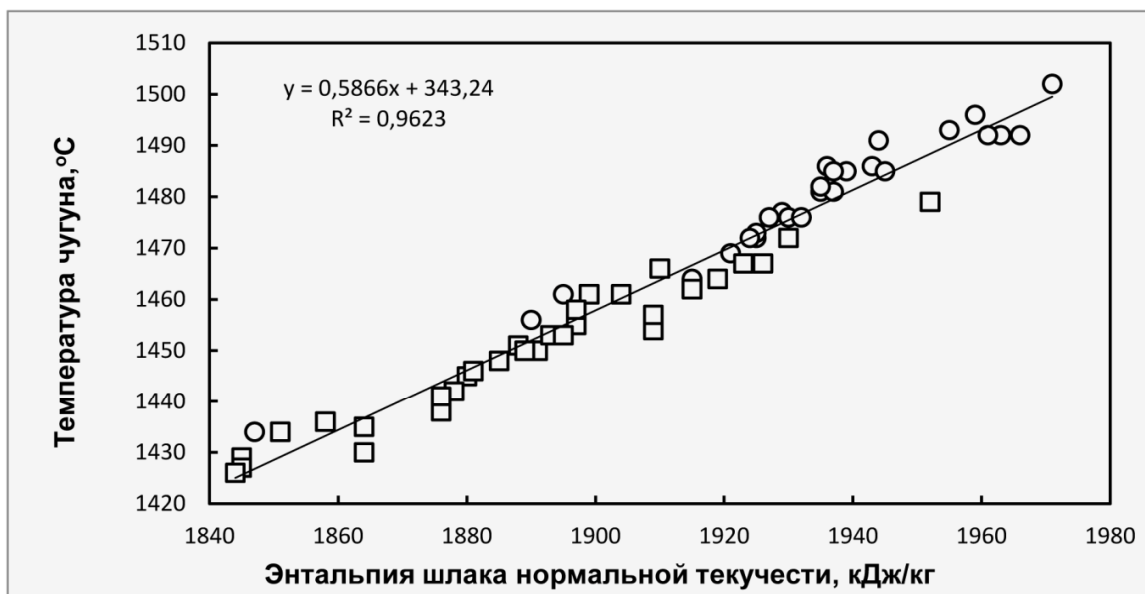
Уменьшение выхода шлака и перегрева его до нормальной текучести вызвало снижение прихода тепла в горн с 733,2 МДж/кг до 697,36 МДж/кг. В соответствии с этим снизились физический и химический нагревы чугуна соответственно с 1479 до 1450°C и с 0,74 до 0,63% Si. Причем, несмотря на улучшение условий восстановления кремния (некоторое снижение давления газа в рабочем пространстве печи и уменьшение основности шлака), концентрация кремния в металле снизилась. Факторами, определяющими степень перехода кремния в чугун, оказались приход тепла в горн и вдувание холодной угольной пыли.

Поскольку энтальпию шлака нормальной текучести рассчитывали на основе данных о температуре чугуна, то связь между указанными показателями была близкой

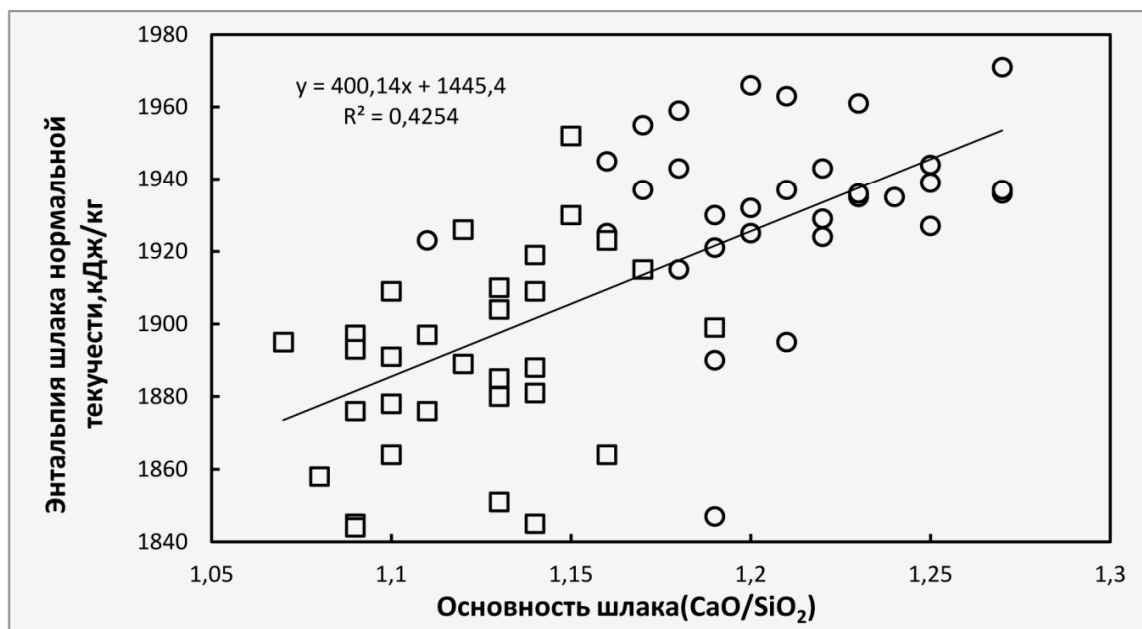
→ – направление изменения энтальпии шлаков, обеспечивающей нормальную текучесть расплава; цифры у кривых изокалей – энтальпия шлаков при нормальной текучести, кДж/кг; остальные обозначения те же, что и на рис.1

к функциональной (рис.3, а). Объединяя расчетные данные по теплосодержанию шлаков нормальной текучести для базового и опытного периодов, получили значимую связь между основностью шлака и этим теплосодержанием (рис.3, б). Было установлено, что в исследованном диапазоне колеблемости основности шлака ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1,07-1,27$) на каждые 0,1 ед. изменения основности прямо пропорционально меняется энтальпия шлака – в среднем на 44 кДж/кг. Эта величина составляет 2,4% от минимального значения энтальпии в массиве данных и 2,3% от максимального значения.

(а)



(б)



обозначения те же, что и на рис.1

Рисунок 3 – Влияние энтальпии нормальной текучести на температуру чугуна (а) и основности шлака на энтальпию обеспечения нормальной текучести (б)

Выводы. Показано, что изменение шлакового режима в сторону уменьшения основности при вдувании в горн доменной печи пылеугольного топлива сопровождается снижением плавкости шлаков, снижением уровня перегрева шлаков до обеспечения нормальной текучести. Это изменение приводит к уменьшению прихода тепла в горн и является предпосылкой снижения нагрева чугуна в горне и на выпуске. Поэтому мнение о целесообразности использования сниженной основности шлака в качестве компенсирующего ресурса при вдувании ПУТ нуждается в корректировке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярошевский С.Л. Пылеугольное топливо – реальная и эффективная альтернатива природному газу в металлургии / Ярошевский С.Л. // Металл и литье Украины. – 2006. – №3. – С.15-20.
2. Плискановский С.Т. Оборудование и эксплуатация доменных печей: учебник / Плискановский С.Т., Полтавец В.В. – Днепропетровск: Пороги. – 2004. – 496с.
3. Металлургия чугуна / Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н. [и др.]; под ред. Ю.С.Юсфина. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – М.: ИКЦ «Академ-книга». – 2004. – 774с.
4. Свойства жидких доменных шлаков / Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевич А.Г. [и др.]. – М.: Металлургия. – 1975. – 184с.

Поступила в редколлегию 10.05.2016.

УДК 504.064.4:669.181.28

НЕВЕДОМСКИЙ В.А.*, канд. техн. наук
ЧЕРНЫШОВ А.В., ст. преподаватель
ЧЕРНЫШОВ А.А.**, инженер 1-й категории
ГУБСКАЯ Т.А., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

*ООО «ТехноСКАРМ», г. Никополь

**ПАО «Днепровский металлургический комбинат»

ПРИНЦИП «ZERO WASTE» ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ШЛАКОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Введение. Выход шлаков ферросплавного производства на территории стран СНГ превышает 3,5 млн. т в год, в том числе на предприятиях Украины приближается к 0,9 млн. т в год. Затвердевшие шлаки дробят, сортируют, перерабатывают на щебень и песок для дорожного строительства. Жидкие шлаки подвергают грануляции и используют в строительстве и собственном производстве как сырьевые материалы. По химическому составу шлаки товарного силикомарганца представляют собой насыщенный по кремнезему расплав сложного состава, который может быть отнесен к системе $\text{SiO}_2 - \text{MnO} - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na,K})_2\text{O}$. Среднестатистическое содержание компонентов в шлаках силикомарганца ПАО „Никопольский завод ферросплавов” составило: 50,56% SiO_2 , 14,9% CaO , 4,39% MgO , 15,12 MnO ; пределы содержаний остальных компонентов: 1,7-10,5% $(\text{Na,K})_2\text{O}$, 8-10% Al_2O_3 , 2-3% FeO , 0,6-1,2% S^{2-} . Среднеквадратичное отклонение при статистической обработке около 1300 серийных рентгеноспектральных анализов составляло (мас.%) 0,29 SiO_2 , 1,34 CaO , 0,55 MgO , 1,65 MnO . Минеральная составляющая продуктов переработки используется для устройства оснований дорожных одежд, служит инертным наполнителем для закладки в горные выработки. Металлопродукт, извлеченный из отвального шлака, направляется на переплав [1].

Одним из эффективных направлений использования огненно-жидких шлаков силикомарганца является получение шлаколитой продукции. Шлаковое литье по своим прочностным свойствам соответствует бетону марки 550-700, может работать при температурах до 900°C. В качестве литых изделий шлаковое литье может заменять металл, огнеупорные материалы, бетон. Срок службы оборудования, покрытого этим материалом, увеличивается. Производство изделий из шлаковых расплавов выгодно и экономично, поскольку не требует дополнительных энергозатрат [1-2].

Постановка задачи. С целью отработки технологических параметров в период заливки жидкого ферросплавного шлака в открытые формы исследовать температурные поля в объеме формируемых изделий, структуру и фазовый состав образующегося шлакового литья.

Результаты работы. Для стандартных изделий, плит дорожных размером (3000×2000×200 мм) были определены технологические параметры: температуры заливки кристаллизации, распределение температурных полей по сечению отливок.

Плиточные изделия от 400×600×50 мм до 4600×240×250 мм формировались на поде выкатных тележек камерных печей. Во избежание резкого перепада температуры по сечению отливки пространство печей нагревалось до 500°C в течение 2 часов, после чего в печь заливался расплав шлака с температурой 1420-1320°C. Кристаллизация расплава обеспечивалась его выдержкой при температурах максимального выделения пироксена – 1000-900°C. Продолжительность кристаллизации обусловлена габаритами, толщиной изделий и теплофизическими свойствами расплава.

Проведенные исследования [1, 2, 4] позволили установить режимы кристаллизации различных изделий, формируемых в закрытых формах, а также в процессе «гарни-сажной наплавки» на внутренние поверхности металлических деталей (труб, циклонов, гидроциклонов, течек и др.). В интервале 1420-1220°C в объеме расплава происходит ликвационный процесс и начало выделения основных кристаллических фаз.

Режим кристаллизации в печах осуществлялся выдержкой при температуре 1150-1100°C в течение 0,5 час., интенсивного пироксенообразования при температуре 1000-950°C в течение 2 час. Выдержка при температурах 750°C и 500°C по 1-1,5 часа предусмотрена для снятия термических напряжений в стеклофазе по объему отливки [2, 4].

Изделия, производимые в цехе шлакового литья ПАО НЗФ, имеют сертификат качества, разрешающий применение их во всех видах строительства без ограничения.

Материал изделий характеризуется мелкозернистой структурой и обладает представленными ниже свойствами (табл.1).

Таблица 1 – Физико-химические свойства шлаков силикомарганца

Объемная масса		2900-3000 кг/м ³
Предел прочности	при сжатии	500-600 МПа
Предел прочности	при изгибе	50-70 МПа
Истираемость		0,01-0,02 г/см
Термостойкость		900°C
КТР		6,3-6,8×10 ⁻⁶ град ⁻¹
Влагостойкость		0-0,2%
Кислотостойкость		98%
Щелочестойкость		94%

Уникальные свойства материала, разработанная технология литья изделий и футеровок различных геометрий и объемов на основе огненно-жидких шлаков силикомарганца позволяют решать поставленные задачи.

В настоящее время изделия и конструкции из шлаколита нашли широкое применение в металлургии, энергетике, химической, коксохимической и керамической промышленности, сельском хозяйстве и дорожном строительстве. Благодаря высокой твердости (7-8 единиц по Моосу), шлаколит используется в условиях экстремально сильных абразивных нагрузок, которые зачастую не выдерживают сгибы металлических труб при транспортировке пульпы и золы ТЭЦ и электростанций.

Трубы и отводы, футерованные шлаковым литьем, были вмонтированы в действующие трубопроводы, по которым самотеком или с помощью гидро- или пневмотранспорта транспортировались уголь, кокс, концентрат, глинозем, различные шлаки. Размеры транспортируемых частиц находились в пределах 0-50 мм, давление при гидротранспортировке составляло 0,2-0,3 МПа.

В результате проведенных испытаний установлено, что стальные трубы при толщине стенки 8-12 мм находились в эксплуатации не более года, а в местах поворотов – от 1,5 до 4 месяцев. Трубы и повороты, циклоны и гидроциклоны диаметром от 245 до 2000 мм, футерованные шлаковым литьем толщиной от 40 до 120 мм (рис.1, 2), эксплуатировались от 5 до 15 лет и по настоящее время продолжают работать. Футеровка шлаковым литьем различных технологических агрегатов, металлоконструкций и трубопроводов, работающих в условиях абразивных, газоабразивных нагрузок и повышенных температур до 500°C, повышает стойкость, долговечность оборудования в 7-12 раз. Результаты испытаний на предприятиях горно-металлургического комплекса Украины, России, Узбекистана подтвердили, что каждая тонна футеровки из шлакового литья экономит до 14 тонн металлопроката, огнеупоров и бетона.



Рисунок 1 – Футерованный отвод



Рисунок 2 – Футерованная труба

Прочность исходного материала позволяет правильно уложенной дорожной плите 3000×2000×200 мм держать нагрузку 200 тонн на м при ударной нагрузке 40 тонн на м² с высоты 1 метр (рис.4, а), б)). Поэтому плиты из шлакового литья используются при строительстве напольных складов, полов литейных и механических цехов заводов, для которых характерны экстремальные нагрузки на полы, что позволяет перемещать по поверхности крупногабаритные изделия, гусеничную технику, а также предусмотреть падение на пол крупногабаритных, массивных предметов. В этом значительное превосходство покрытий из шлаколитых плит перед бетонными и наливными полами [5, 6]. Благодаря своей износостойкости, термостойкости наплавка из шлаколита широко применяется в трубопроводах разных диаметров для транспортировки абразивных материалов (песка, угля, щебня, шлака, соли и др.). Известно [1], что износостойкость шлаколита в 5 раз превышает аналогичное свойство специального чугуна, и в 20 раз – стали.

Кроме этого, предлагаемый материал устойчив к кислотным, щелочным, биологическим и радиоактивным средам при рабочей температуре до 750°C. Для шлаколита



а)



б)

Рисунок 4 – Заливка плит дорожного покрытия

характерно нулевое водопоглощение, что позволяет применять его для хранения не только химически агрессивных составов, радиоактивных отходов (РАО), но и питьевой воды.

Проведенные исследования [7] доказали экологическую и гигиеническую безвредность материала. Шлаковое литье практически не подвергается радиолизу. Оно устойчиво к ионизирующему облучению. Низкая проницаемость для радионуклидов обусловлена крайне малыми значениями коэффициентов диффузии. Оценка коэффициента диффузии D-ионов стронция и цезия при 25°C дает значение порядка 10-18 см²/с., что позволяет использовать шлаковое литье в качестве футеровки контейнеров для захоронения токсичных и радиоактивных отходов предприятий и электростанций.

Выводы. Проведенные исследования позволили разработать технологию изготовления различных изделий из шлакового литья, таких как дорожные плиты, футерованные трубы, отводы, гидроциклоны, контейнеры для захоронения ядерных отходов, пестицидов и гербицидов и много других изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неведомский В.А. Энергосберегающая технология стеклокристаллических изделий из огненно-жидких шлаков / Неведомский В.А. // Сталь. – 1996. – №2. – С.21-22.
2. Неведомский В.А. Специальные виды литья из огненно-жидких шлаков для хранения радиоактивных и токсичных отходов / В.А.Неведомский, Н.С.Михайленко // Экология и промышленность. – 2008. – № 4. – С.77-83.
3. Смирнов Л.А. Современное состояние переработки шлаков ферросплавного производства / Л.А.Смирнов, А.А.Грабеклис, Б.Л. Демин // Сталь. – 2000. – №1. – С.86-89.
4. Большаков В.И. Механизм структурообразования шлаковых строительных материалов из шлаковых расплавов / В.И.Большаков, В.А.Неведомский // Проблемы современного материаловедения (Материаловедение, строительство и отраслевое машиностроение): сб. научных трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Днепропетровск. – 1998. – Вып. 7. – С.190-195.
5. Липовский И.Е. Камнелитейное производство / И.Е.Липовский, В.А.Дорофеев. – М.: Металлургия, 1962. – 200с.
6. Лебедева Г.А. Каменное литье как радиационно-стойкий материал / Г.А.Лебедева, Г.П.Озерова // Строительные материалы. – 1998. – № 5. – С.14-15.
7. Неведомский В.А. Стеклокристаллические материалы и покрытия на основе огненно-жидких шлаков силикомарганца / Неведомский В.А. // Строительные материалы. – 1989. – №11. – С.14-15.

Поступила в редколлегию 04.03.2016.