

УДК 669,184:666,762

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.3>

Величко О.Г., Бойченко Б.М., Мазов М.М., Стоянов О.М., Синегін Є.В., Васильєв Д.П.

## ВИМОГИ ДО ПЕРИКЛАЗОВУГЛЕЦЕВИХ ВОГНЕТРИВІВ ДЛЯ ФУТЕРОВКИ КОНВЕРТЕРІВ Й ОСОБЛИВОСТІ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Velichko O.H., Boichenko B.M., Mazov M.M., Stoianov O.M., Synehin Y.V., Vasylev D.P.

### REQUIREMENTS FOR MAGNESIUM-CARBON REFRACTORIES FOR BOF LINING AND FEATURES OF STEELMAKING TECHNOLOGIES IN ITS USE

Метою роботи є розробка комп'ютерної моделі конвертерних плавок, яка враховує взаємозв'язок параметрів виплавки сталі з процесами зносу вогнетривів і спрямована на поліпшення показників конвертування металу. Для досягнення поставленої мети автори виконали теоретичний аналіз закономірностей асиміляції вогнетривів шлаковою фазою сформованою в ході конвертерної плавки, застосовували методи рентгеноструктурних, спектральних і мікроскопічних досліджень зразків периклазовуглецевих вогнетривів, відібраних з різних ділянок футеровки конвертера. Методом регресійного аналізу масиву паспортів плавок, отримані математичні моделі, які описують особливості руйнування периклазовуглецевих вогнетривів. За результатами досліджень встановлені основні фактори, що впливають на внутрішній масопереніс у вогнетриві за умов його контакту з рідким шлаковим розплавом. Обґрунтовані вимоги до фізико-хімічних властивостей периклазовуглецевих вогнетривів робочого шару конвертерів і до умов виробництва. Науковою новизною роботи є створення математичної моделі описання процесу внутрішнього масопереносу між рідкою шлаковою фазою конвертерної плавки і вогнетривом, що має місце в порах останнього. Визначено вплив пористості вогнетриву, діаметра пор, концентрації складових компонентів шлаку, міжфазного натягу, змочуваності вогнетриву рідкою шлаковою фазою на швидкість внутрішніх масообмінних процесів для умов експлуатації футеровки конвертерів. Практичною значущістю виконаних досліджень є розроблена на ПК й адаптована до умов ПРАТ «Дніпровський металургійний завод» модель конвертерної плавки, що враховує взаємозв'язок параметрів конвертування металу з процесами руйнування периклазовуглецевих вогнетривів, яка дає можливість прогнозувати і оптимізувати результати процесу.

The aim of the work is to develop a computer model of BOP-process that takes into account the interrelation of the parameters of steel smelting with the processes of refractories wear and is aimed at improving the conversion efficiency of metal. To achieve this goal, the authors has carried out a theoretical analysis of the patterns of assimilation of refractories by the slag phase formed during BOF smelting, used X-ray structural, spectral and microscopic studies of samples of magnesium-carbon refractories selected from different zones of the converter lining. By the method of regression analysis of the heats, mathematical models have been obtained that describe the features of the destruction of magnesium-carbon refractories. According to the research results, the main factors affecting the internal mass transfer in refractories under the conditions of its contact with the liquid slag melt have been defined. The requirements for the physical and chemical properties of magnesium-carbon refractories of the BOF working layer and for the production conditions have been substantiated. Scientific novelty of the work is the creation of a mathematical model for describing the process of internal mass transfer between the liquid slag phase of BOF and refractory, which takes place in its pores. The influence of the refractory porosity, pore diameter, concentration of the slag components, interfacial tension, wettability of the refractory with the liquid slag phase on the rate of internal mass transfer processes in BOF lining has been determined. The practical significance of the studies is a BOF model developed on a PC and adapted for PJSC "Dniprovsky Metallurgical Plant", taking into account the interrelation of the parameters of metal conversion with the processes of magnesium-carbon refractories destruction, which allows to predict and optimize the process results.

#### Вступ

Специфіка ситуації в Україні така, що розвиток чорної металургії й рішення екологічних проблем у значному ступені визначається станом киснево-конвертерного виробництва сталі. Важливу роль у розвитку конвертерних процесів відіграє зниження витрат на вогнетриви – вагової енерго- і ресурсномісткої статті у витратах по переділі. Це особливо актуально для українських заводів у зв'язку з відсутністю в країні власних запасів магнезиту.

У світовій практиці широке поширення одержує

використання периклазовуглецевої футеровки сталеплавильних агрегатів. Однак пряме перенесення світових досягнень у стійкості футеровки в конкретні умови конвертерного виробництва України неможливе, оскільки інформація про технології виплавки сталі з периклазовуглецевою футеровкою розрізнена й у ряді важливих підходів суперечлива. Тому вивчення й опис закономірностей зношування в конвертерах вогнетривів для визначення шляхів подальшого підвищення їхньої стійкості, уточнення й освоєння технології конвертер-

Величко Олександр Григорович – д.т.н., проф., чл.-кор. НАНУ, ректор НМетАУ

Бойченко Борис Михайлович – д.т.н., проф., НМетАУ

Мазов Максим Михайлович – ПРАТ «Дніпровський металургійний завод»

Стоянов Олександр Миколайович – к.т.н., доц., НМетАУ

Синегін Євген Володимирович – к.т.н., НМетАУ

Васильєв Дмитро Петрович – ПРАТ «Дніпровський металургійний завод»

Velychko Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Member-Corr. NAS of Ukraine, Rector NMetAU.

Boichenko Borys – doctor of technical science, prof., NMetAU.

Mazov Maksym – PJSC "Dniprovsky Metallurgical Plant"

Stoianov Oleksandr – CTS assistant professor NMetAU

Synehin Yevhen – CTS assistant professor NMetAU

Vasylev Dmytro – PJSC "Dniprovsky Metallurgical Plant"

ного процесу з використанням периклазовуглецевої футеровки є актуальним науковим й інженерним завданням.

### Аналіз літературних даних

В аналітичних підходах до процесів зносу в ході плавки сучасних конвертерних вогнетривів присутня лише загальна схема [1-3].

### Мета і завдання досліджень

Автори здійснили спробу описати закономірності процесів переходу матеріалу футеровки конвертера в шлак з метою визначення шляхів їх гальмування.

### Результати досліджень

Перехід матеріалу вогнетривів у рідкий шлак є наслідком одночасного протікання ланок зовнішнього й внутрішнього масообмінних процесів. До внутрішнього масообміну відноситься рух розчинників і речовин, що розчиняються, у порах, капілярах, тріщинах, уздовж зерен наповнювача вогнетриву, які в умовах конвертерної плавки завершуються фізичною й хімічною адсорбцією розчинника. Зовнішній масообмін визначається характером руху рідини, що обтікає тверде тіло. Автори виходять зі знання про те, що протягом всієї конвертерної плавки перехід вогнетривів у шлак лімітується внутрішнім масообміном [2]. У першу чергу це стосується, як встановлено в експериментах [2-4], взаємодії саме периклазовуглецевих вогнетривів зі шлаками.

Рушійною силою внутрішнього масопереносу є градієнт концентрації:

$$j = -\beta_{\text{еф}} \times \text{grad}C, \quad (1)$$

де  $j$  – потік маси проникаючої речовини, кг/(м<sup>2</sup>с);

$\beta_{\text{еф}}$  – коефіцієнт масообміну, м/с;

$C$  – об'ємна концентрація проникаючої речовини в деякій точці усередині пористого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>.

Розглянемо загальний масовий вміст контрольованого шару вогнетриву товщиною  $l_0$  (рис. 1). Фазова неоднорідність у цьому шарі пов'язана з тим, що частина об'єму глибиною  $l_n$  (незмінена зона) містить у собі тверді компоненти, що розчиняються надалі в рідині або реагують з нею, і пори (тріщини).

Інша частина об'єму, обмежена областю  $l_n < l < l_0$ , характеризується заповненням пор розчинником, безпосереднім розчиненням (реагуванням), насиченням рідини компонентами, що розчиняються (або продуктами їх реакцій з рідиною) і максимальною пористістю на відстані  $l_0$  внаслідок переходу матеріалу стінок пор у розчин. Третя частина об'єму – область  $l_0 < l < L$ , де  $L$  – товщина робочого шару вогнетриву з “оболонкою” прикордонного дифузійного шару. Ця частина відіграє роль магістралі, якою здійснюється виніс речовин із глибинної області.

Початковим явищем, що спостерігається при контакті твердих тіл з рідиною, є проникнення останньої у вільну від твердої, рідкої або газової фаз частину пористого простору на деяку глибину.

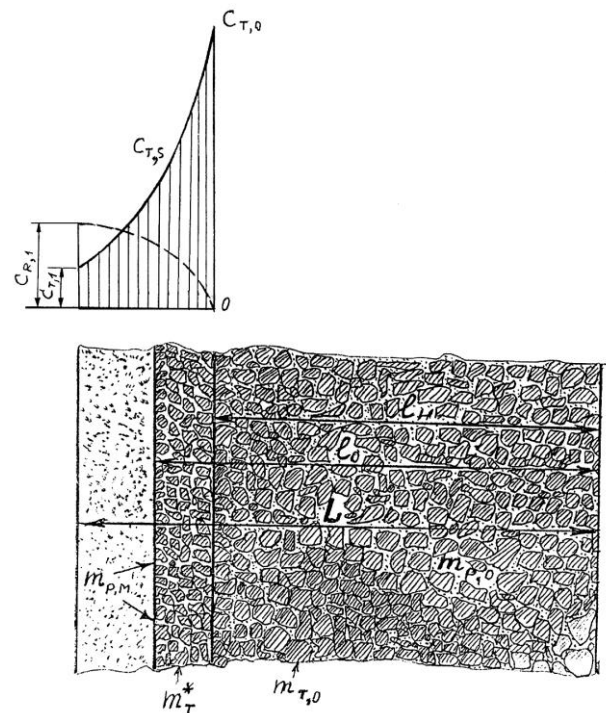


Рисунок 1. Схема масообмінних процесів при розчиненні вогнетриву в рідкому шлаку  $l_n$  – товщина незміненої зони вогнетриву;  $m_T$  – частка об'єму, зайнята твердою речовиною, що розчиняється;  $m_{P,0}$  – об'ємна частка пор, що можуть бути заповнені рідиною;  $m_{T,S}$  – об'ємна частка твердої речовини після заповнення пор розчинником;  $m_{P,M}$  – пористість максимальна наприкінці розчинення;  $C_T, C_R$  – концентрація в рідині відповідно речовини, що розчиняється, і розчинника, кг/м<sup>3</sup>; індекси «0», «S» та «1» означають приналежність до станів: вихідного, насичення й за межами вогнетриву

Внаслідок відносно невеликої кількості рідини, що проникла в пори, тріщини й границями зерен периклаза, рідина швидко насичується продуктами її взаємодії з матеріалом вогнетриву. Через деякий проміжок часу настане стан просочення (на глибину  $l_0 - l_n$ ), який характеризується перерозподілом матеріалу вогнетриву між твердою й рідкою фазами (див. рис. 1). Відзначимо цей стан індексом «\*». З огляду на відмінності розглянутого процесу розчинення від процесів екстрагування в хімічній технології, пов'язані з поступовим повним розчиненням рідкими шлаками матеріалу вогнетриву й інтерпретуючи відповідно до цього положення з робіт [5-8], опишемо цей стан для області  $l_n < l < l_0$ , (використаємо позначення, наведені на рис. 1):

$$\begin{cases} (m_T^* \rho_T + m_P^* C_{T,S}) - (m_{T,O} \cdot \rho_T + m_{P,O} \cdot C_{T,1}) = \Delta V C_{T,1} \\ (m_T^* \rho_T + m_P^* \rho_S) - (m_{T,O} \rho_T + m_{P,O} \rho)_1 = \Delta V \rho_1 \\ m_T^* + m_P^* = m_{T,O} + m_{P,O} \end{cases} \quad (2)$$

де  $\Delta V$  – об’єм рідини, що додатково надійшла в пори твердого тіла на одиницю його об’єму,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$\rho_S$  і  $\rho_1$  – її густина відповідно в стані насичення речовиною, що розчиняється, і поза вогнетривом,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho_T$  – густина речовини, що розчиняється,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Перше рівняння виражає баланс маси речовини, що розчиняється, друге – баланс маси речовини й рідини, третє – баланс об’єму.

Вирішуючи систему (2) відносно  $m_P^*$  і  $m_T^*$ , одержуємо:

$$\begin{cases} m_P^* = \frac{m_{P,O}}{1-\lambda} \\ m_T^* = m_{T,O} - m_{P,O} \frac{\lambda}{1-\lambda} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{\rho_1 C_{T,S} - \rho_S C_{T,1}}{\rho_T (\rho_1 - C_{T,1})}, \quad (4)$$

$$\text{або } \lambda \approx \frac{C_{T,S} - C_{T,1}}{\rho_T}$$

при  $\rho_1 \gg C_{T,1}$

З рівнянь (3) отримуємо, що настання стану просочення пов’язане з різким зменшенням вмісту розчинника у твердій фазі, особливо за збільшення початкової пористості  $m_{P,O}$ . При цьому пористість  $m_P^*$  також збільшується. Ці зміни не відбуваються, якщо  $C_{T,1} = C_{T,S}$ . У результаті проникнення рідини в пори й тріщини твердого тіла об’ємний вміст речовини зростає на величину  $m_P^* C_{T,1}$  або  $m_{P,O} C_{T,1} / (1-\lambda)$ . Він не зміниться за  $C_{T,1} = 0$ .

Починаючи від початкового стану, вміст твердої речовини в розглянутій області  $l_h < k l_0$ , та й у всьому твердому тілі буде знижуватися. Одночасно  $l_h$  зменшується, тому що фронт просочення постійно просувається на наступну глибину  $h$  відносно початкового стану  $l_0$  [2]:

$$h^2 = \frac{r \sigma \times \cos \theta}{2\mu} t, \quad (5)$$

де  $h$  – довжина просоченої ділянки капіляра, м;

$r$  – радіус капіляра, м;

$\sigma$  – поверхневий натяг,  $\text{Дж}/\text{м}^2 (\text{кг}/\text{с}^2)$ ;

$\theta$  – кут змочування;

$\mu$  – динамічна в’язкість рідини,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$t$  – час, с.

Зонами змінних концентрацій є області  $l_h < k l_0$  та  $l_0 < k L$ . Процеси в останній (зовнішньодифузійний масообмін), як нами встановлено у виробничих дослідженнях [3-4], можуть не розглядатися при

розчиненні вогнетривів в ході конвертерної плавки, оскільки зношування вогнетривів визначається внутрішнім масообміном. Для практики важливо знати (у низці завдань, що розв’язуються) масовий вміст речовини, що розчиняється, у зоні, обмеженій розміром  $(l_0 - l_h)$ . Він запишеться у вигляді:

$$x_V = U_T + m_P C_{T,S} \quad (6)$$

де  $x_V$  – об’ємний вміст речовини, який дорівнює

$$x_V = \frac{M}{V}, \quad (7)$$

$V$  – об’єм твердого тіла,  $\text{м}^3$ , у якому міститься маса речовини, що розчиняється  $M$ , кг;

$U_T, C$  – відповідно його маса й концентрація в одиниці об’єму,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

У рівнянні (6) величина  $m_P$  не є сталою, а безупинно зростає впродовж розчинення:

$$m_P = m_P^* + \frac{U_T^* - U_T}{\rho_T}. \quad (8)$$

На відстані  $l_0$   $U_T = 0$ , і пористість  $m_P$  досягає максимальної величини  $m_{P,M}$ :

$$m_{P,M} = m_P^* + \frac{U_T^*}{\rho} = m_P^* + m_T^* = m_{P,O} + m_{T,O}, \quad (9)$$

а окремі зерна, що не розчинилися (включення), які були у вогнетриві внаслідок відходу маси, що їх цементує, розосереджуються в розчині.

Усереднений у об’ємі вогнетриву вміст речовини, що розчиняється, описується формулою (див. рис. 1):

$$\overline{x_V} = U_{T,O} \times \varphi_o^3 + (U_T^* + \overline{m_P} \times C_S) \times (1 - \varphi_o^3), \quad (10)$$

де  $\overline{m_P}$  – усереднена пористість в області  $l_h < l < l_0$ ,

$$\varphi_o = \frac{l_h}{l_0}$$

У початковий момент  $\varphi_o = 1$ , тому у будь-який момент часу:

$$\frac{\overline{x_V}}{x_{V,O}} = \varphi_o^3 + \frac{(U_T^* + \overline{m_P} \times C_S)}{U_{T,O}} (1 - \varphi_o^3), \quad (11)$$

де  $x_{V,O}$  визначаємо з рівняння при  $\varphi_o = 1$ .

У випадку швидкого протікання процесу розчинення матеріалу вогнетриву в період його просо-

чення рідиною, коли  $m_T^* = \frac{U_T^*}{\rho_T}$  різко зменшується

порівняно з  $m_{T,O} = \frac{U_{T,O}}{\rho_T}$  (див. рівняння 3) і

$$\frac{U_T^* + \overline{m_p} \times C_S}{U_{T,O}} \ll 1, \quad (12)$$

$$\text{тоді } \frac{\overline{x_V}}{x_{V,O}} = \varphi_o^3 \quad (13)$$

Ефективний коефіцієнт дифузії визначимо із використанням результатів досліджень процесу переходу матеріалу з твердого тіла в розчин, отриманих у хімічній промисловості [5].

Візьмемо до уваги, що за даними наших досліджень [4] просочення рідкими шлаками конвертерної плавки периклазовуглецевого вогнетриву супроводжується фізичною, а потім й хімічною адсорбцією розчинників поверхнею пор з утворенням газу CO і безперервної низки твердих розчинів і з'єднань. У міру вимивання бульбашок CO й одночасного насичення твердого тіла розчинником тверді розчини й з'єднання стають легкоплавкими, розплавляються й транспортуються в рідину.

Тому застосуємо до нашого випадку той поодинокий варіант хімічної технології з [5-8], коли процес витягу пов'язаний з дифузією реагенту усередину капіляра, реакцією на поверхні твердого матеріалу, що заповнює капіляр, типу



і наступною дифузією продуктів реакції в рідке середовище поза капіляром. У рівнянні (14)  $T$  – твердий матеріал у капілярі;  $R$  – рідкий реагент;  $Z$  і  $W$  – розчинні продукти взаємодії.

У нашому випадку (при масі речовини  $W$  рівної 0) маємо:

$$\frac{h}{\sqrt{D_{ef,R} t}} = \sqrt{\frac{2}{n_{R,T} \times U_T^* - m_T^*}} \times \frac{1}{C_{R,1}}, \quad (15)$$

де  $n_{R,T}$  – коефіцієнт для перерахунку, що дорівнює масі адсорбенту, яка витрачається на одиницю маси твердого матеріалу  $T$ ;  $m_T^*$  – з рівняння (3).

Перетворимо це рівняння й врахуємо, що  $U_T^* = m_T^* \times \rho_T$ . Одержимо:

$$D_{ef,R} = \frac{Ah^2}{2t}, \quad \text{м}^2/\text{с}, \quad (16)$$

$$\text{де } A = \frac{n_{R,T} \times m_T^* \times \rho_T}{C_{R,1}} - m_T^*. \quad (17)$$

Відповідно до (5):

$$t = \frac{2h^2 \times \mu}{\sigma \times \cos \theta \times r} = \frac{4h^2 \times \mu}{\sigma \times \cos \theta \times d_{ef}}, \quad \text{с}, \quad (18)$$

де  $d_{ef}$  – ефективний діаметр пори (капіляра), м.

Таким чином:

$$D_{ef,R} = \frac{A \times \sigma \times \cos \theta \times d_{ef}}{8\mu}, \quad \text{м}^2/\text{с}. \quad (19)$$

За наявності одночасних дифузії і взаємодії (результуючого проникнення розчинників у кристалічні ґратки тіла), що має місце в розглянутому випадку, швидкість сумарного процесу  $j^1$  пропорційна середньому геометричному зі швидкості дифузії  $D_{ef,R} \times C_{R,1}$  і швидкості взаємодії  $k \times C_{R,1}^n$ , де  $n$  – порядок реакції [9]:

$$j^1 = \sqrt{\frac{2}{n+1} D_{ef,R} \times k C_{R,1}^{n+1}}, \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \quad (20)$$

Ефективна глибина проникнення взаємодії в шар пористого матеріалу  $H$  тим більше, чим менше швидкість реакції

$$H = \sqrt{\frac{D_{ef,R}}{k \times C_{R,1}^{n-1}}}, \quad \text{м}. \quad (21)$$

Зокрема, для реакцій першого порядку, як у досліджуваних умовах

$$H = \sqrt{\frac{D_{ef,R}}{k}}, \quad \text{м}, \quad (22)$$

$$\text{звідки } k = \frac{D_{ef,R}}{H^2}, \quad 1/\text{с}. \quad (23)$$

Оскільки  $H \approx h$  [4], то

$$k \approx \frac{D_{ef,R}}{h^2}, \quad 1/\text{с}. \quad (24)$$

З рівнянь (19, 20, 24) для розглянутих умов маємо:

$$j^1 = C_{R,1} \frac{A \times \sigma \times \cos \theta \times d_{ef}}{8\mu h}, \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (25)$$

Рівняння (25) побудовано для одиничної пори. При його застосуванні до всього пористого тіла:

$$D_{ef,R} = m_p D_{ef,R},$$

Тобто

$$j = m_p C_{R,1} \frac{A \times \sigma \times \cos \theta \times d_{ef}}{8\mu h}, \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}). \quad (26)$$

З (11) і (26) маємо, що основними факторами, які впливають на внутрішній масопереніс у твердому тілі, є його пористість й ефективний діаметр пор, концентрація розчинника  $C_{R,1}$  перед зоною просочення, градієнт концентрації розчинника  $C_{R,1}/h$  у зоні просочення, міжфазний натяг і змочування тіла проникаючою рідиною.

Для уточнення наведеної математичної моделі та узагальнення механізму зносу периклазовуглецевих вогнетривів в конвертерах, а також перевірки придатності для розрахунків на практиці рівнянь (26) і (11) виконані мікро-, макро-, рентгеноструктурні й спектральні дослідження зразків периклазовуглецевих вогнетривів, відібраних з різних ділянок конвертерної футерівки після її експлуатації протягом 2000 плавок. Методика та деталі досліджень

надані нами в роботах [3, 4]. Узагальнені їх результати наступні.

Шлакова кірка на робочій поверхні конусної частини конвертера в результаті термоциклічних навантажень покривається сіткою тріщин, які надалі закупорюються вторинним периклазом і вуглецем у вигляді досить монолітної маси, причому маса другого більше маси першого.

Роль шлакової кірки (гарнісажу) у захисті вогнетривів горловини від механічного руйнування, як бачимо, дуже велика. Шлакова кірка досить міцно зв'язана з основним вогнетривом – між ними є перехідний шар товщиною 0,5-1,5 мм, що складається з голок вторинного периклаза, між якими спостерігаються лусочки графіту.

У цьому шарі вторинного периклаза вже більше, ніж лусочок графіту. Зв'язування шару з вогнетривом здійснюються за допомогою крупних зерен первинного периклаза – на них утримується коркова зона вогнетриву.

Добре простежується рекристалізація зерна первинного периклаза в результаті частішої термоциклічності, що супроводжує службу вогнетривів конусної зони конвертера. Великі кристали руйнуються на дрібні самостійні, їхній розмір приблизно в 20 разів менше, ніж початковий і того ж порядку, що й у кристалів периклаза, розподілені у зв'язці. Зв'язок їх один з одним слабкий. Самі зерна стають неміцними.

У зразках із цапфових ділянок футеровки конвертера по лінійному маршруті “робоча; поверхня вогнетриву – його незмінена зона” рентгенівським зондом визначили якісний і кількісний склад фаз, що прореагували.

На границі робочої й найменш зміненої зони є дрібні корольки металу. Це – перша фаза зношування периклазовуглецевого вогнетриву по реакції:  $(\text{FeO}) + [\text{C}] = [\text{Fe}] + \{\text{CO}\}$ . Навіть маленька пора дозволяє зародитися й виділитися бульбашці CO. Тому пористість вогнетриву повинна бути мінімальною, щоб гальмувати зародження й розвиток бульбашок CO. Не менш важливим є відсутність наскрізних пор, що забезпечує “запирання” газом каналів й уповільнення надходження ними нових порцій рідкого шлаку.

На підставі викладених питань теорії й практики механізм зношування периклазовуглецевого вогнетриву в шлаковому поясі конвертера можна представити наступним чином. Присутність кожного з розчинників матеріалу вогнетриву (оксиди заліза, марганцю, кремнію, алюмінію) виявляється в різних кількостях у всіх ділянках зміненої зони цегли, за винятком просвітленої зони, що безпосередньо контактує з незміненою. Останнє вказує на те, що в авангарді мігруючих у вогнетрив розчинників розташовуються оксиди заліза й, частково, марганцю, іони яких мають невеликі розміри:  $R_{\text{Fe}^{2+}} = 0,083$  нм;  $R_{\text{Fe}^{3+}} = 0,067$  нм;  $R_{\text{O}^{2-}} = 0,132$  нм (для порівняння  $R_{\text{SiO}_4^{4-}} = 0,279$  нм).

Вони взаємодіють, у першу чергу, з дрібними (що мають більшу питому поверхню) частками

графіту, антиоксиданту, що розташовуються між зернами периклаза, потім – з кістяком, що перебуває там же, – залишком зв'язки. Шлак, який проникає у вогнетрив, розкислюється, і його рух порами, мікротріщинами, границями зерен периклаза сповільнюється в результаті підвищення в'язкості рідкої фази й випадіння кристаликів тугоплавких орто- і трикальцієвого силікатів зі шлаків на внутрішній поверхні цих каналів. Одночасний рух розчинників у капілярах сповільнює й підведення CO, що утворюється при розкисненні ( $\text{FeO}$ ) і ( $\text{MnO}$ ) вуглецем. Це явище найбільше помітно за відсутності у вогнетриві наскрізних каналів для виходу газів на стику робочого й арматурного шарів футеровки. Наскрізні канали практично відсутні у вогнетривах, отриманих на пресах “куванням”.

Завдяки зазначеним явищам товщина просвітленої зміненої зони периклазовуглецевого вогнетриву з початковою пористістю 3-5 % дуже невелика (0,5-1,1 мм). Ця зона на зламі цегли виглядає дійсно просвітленою внаслідок відсутності в ній вуглецю й наявності “білої” фази. Але змінена (просвітлена) зона при цьому ще повністю виконує свої вогнетривкі функції, оскільки описані продукти взаємодії в ній тугоплавкі.

Лише з поступовим вимиванням з неї бульбашок CO по капілярах, що збільшилися в діаметрі через виділення вуглецю, надходять нові порції  $\text{FeO}$  ( $\text{MnO}$ ). Починає розчинятися  $\text{MgO}$  з появою “білої” фази складу, %:  $\text{FeO} = 70-75$ ;  $\text{MgO} = 15-25$ ;  $(\text{SiO}_2 + \text{MnO} + \text{CaO})$  – інше. Оксид магнію з переходом у новий стан отримує можливість з'єднуватися із кремнеземом з утворенням легкоплавких (у порівнянні із дво- і трикальцієвим силікатом) мервиніту й монтичеліту.

Чим ближче до шлакового шару й далі – від незміненої зони вогнетриву, тим у більшому ступені зерна периклаза насичуються розчинниками з утворенням твердих розчинів зміненого складу ( $\text{Fe}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Ca}$ )O (або RO-фази), легкоплавких відносно температур виплавки сталі; тим дрібніші незасвоєні залишкові часточки периклаза.

У результаті в контактній зі шлаками зоні вогнетриву в ході плавки периклаз або перебуває в складі з'єднань, температура плавлення яких наближається до температури ванни, або його дрібні зерна роз'єднані рідким розплавом – і надходять у шлаки, збагачуючи його оксидом магнію біля границі з вогнетривом. У зонах вогнетривів, що протистоять шлакам, вміст вуглецю у вогнетривах варто витримувати високим, вживаючи заходів з рівномірного розподілу графіту між зернами периклаза, тонкої його дисперсності для того, щоб шлак, який проникає у капіляри вогнетриву, тривалий час (після розкислення його вуглецем) їх закупорював. Але в зонах вогнетривів, де графіт й, у цілому, вуглець кладки в більшому або меншому ступені може бути окислений газовою фазою, вміст вуглецю необхідно витримувати пропорційно частці впливу на вогнетрив конвертерних шлаків.

Результати проведених мікродосліджень повністю узгоджуються з розрахунками за рівнянням (26) і дозволяють стверджувати про визначальну роль активності оксидів заліза в зношуванні периклазовуглецевої футеровки в процесі конвертерної плавки.

Конвертерний цех ПрАТ "ДМЗ", постійно вдосконалюючи експлуатаційні параметри вогнетривів, першим у країні визначив актуальність й освоїв роботу конвертерів з периклазовуглецевою футеровкою. Досвід "ДМЗ", накопичений протягом 25 років (з 1993 року) при особистій участі авторів дійсної роботи, становить певний інтерес для інших підприємств при виборі постачальників і виробників матеріалу футеровок для сталеплавильних агрегатів.

На підставі розроблених моделі й механізму зношування футеровки у шлаковій і конічній зонах конвертера, результату відвідування ряду фірм-виробників вогнетривів, та конвертерних цехів, що їх використовують, за кордоном й в країні основні вимоги конвертерників до футеровки доцільні наступні: висока чистота за  $\text{SiO}_2$  й, особливо, за оксидами заліза; щільні зерна; щільне їхнє впакування, для чого виготовляти її треба з чотирьох-п'яти фракцій порошоків; у вогнетривах для горловини вміст вуглецю витримувати в межах 5-7 %, для шлакової зони 15-18 %; низька пористість і відсутність наскрізних пор; дрібні фракції (<100 мкм) використаного графіту й антиоксиданту для того, щоб пори, які утворюються при окисненні на їх місці, мали мінімальний діаметр; низька змочуваність рідкими фазами плавки.

Із цих позицій кращими варто вважати вогнетриви, зроблені з високоякісних плавлених магнезитів із вмістом  $\text{MgO}$  до 98-99 % на зв'язці з синтетичних смол.

При виборі постачальників розглядали наступні питання:

1) сировина: частка плавленого магнезиту, вміст  $\text{MgO}$ , домішок  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  і особливо оксидів  $\text{Fe}$ ;

2) підготовка мас для формування вогнетривів: тип змішувачів і бігунів;

3) спосіб формування: ізостатичний, ударний багаторазовий, зусилля пресування при цьому;

4) тип зв'язки.

З урахуванням інформації постачальників з цих питань завод відібрав й випробував продукцію 7 вогнетривких фірм з 12 отриманих пропозицій. Обрані вогнетриви і технології їх виробництва мали кращі якісні характеристики, серед них вогнетриви, охарактеризовані в рядках 3 й 5 у таблиці 1, мали явні переваги.

Зупинимось докладніше на розроблених вимогах виробників сталі до виготовлювачів вогнетривів. Практикою останніх років на "ДМЗ" встановлено, що при зниженні вмісту домішок (особливо  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) у магнезиті (до концентрацій менш 1,5%) і у графіті вдвічі, за інших сталих умов стійкість футеровки підвищується більш, ніж втричі. Підкреслимо

ще раз, що одна з перших вимог – чистота вогнетривкової сировини. Значною є роль у службі вогнетривів частки в їхній шихті плавленого магнезиту: у ньому кристали  $\text{MgO}$  великого розміру й менша поверхня контакту їх з розчинниками, самі кристали дуже щільні. Продукція кращих вогнетривких фірм виготовлена з 100 % електроплавненого магнезиту.

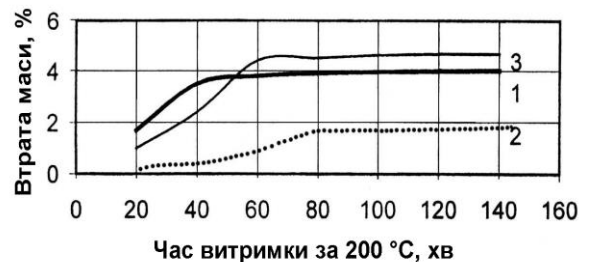


Рисунок 2. Втрати летких з вогнетривів різних виробників: 1 – європейських, 2 – китайських, 3 – російських (Сатка)

Способи підготовки мас для формування вогнетривів повинні забезпечити: однорідність їхнього складу; ізотропію властивостей; високі фізико-керамічні показники, подібно до наведених у табл. 1, наприклад, у рядках 3 й 5. Спосіб формування кращий ударний багаторазовий, якщо він передбачає вакуумне відсмоктування газів з вогнетривкової шихти перед і впродовж пресування; зусилля пресування виробів довжиною понад 900 мм доцільні більше 1500 т.

Європейські підприємства використовують як зв'язку середньотемпературні пеки [10] із вмістом шкідливих летких типу бензопирен понад 10000 ppm.

Ці зв'язки досить технологічні й дешеві. При цьому після формування в підігрітому стані до 80°C вироби розміщують у спеціальні камери для видалення летких з їх допалюванням. Цей технологічний прийом дозволяє знижувати вміст шкідливих речовин у вогнетривах, але дещо погіршує фізико-керамічні показники вогнетривів – підвищується пористість і зменшується механічна міцність на 25-30 %. Підвищену пористість усувають короткочасним просоченням вогнетривів кам'яновугільною смолою на останньому етапі виготовлення. Вогнетриви на пековій зв'язці потребують обов'язкового випалу в конвертері до температури 1000-1200°C до заливки чавуну, інакше (без випалу) бензопирен потрапляє в зону робочої площадки цеху, а робочий шар при продувці чавуну, одразу за кладкою, розпушується на глибину 20-80 мм і сколюється внаслідок короткочасного інтенсивного виділення великої маси летких (рис. 2, крива 1). Втрата маси при нагріванні вогнетривів, як показали наші лабораторні експерименти, в одиницю часу й у цілому найменша у випадку використання у вогнетривкій шихті фенолформальдегідних зв'язок (рис. 2, крива 2), що пов'язано з їхнім хімічним отвердінням при нагріванні.

Таблиця 1  
Основні фізико-керамічні показники периклазовуглецевих вогнетривів, що використовуються для кладки конвертерів ПрАТ "ДМЗ"

№	Постачальник	Густина, г/см <sup>3</sup>		Пористість, %		Механічна міцність, МПа		Вміст С, %		Вміст MgO, %	
		за НТД**	фактично	за НТД**	фактично	за НТД**	фактично	за НТД**	фактично	за НТД**	фактично
1	Словмаг (Словаччина)	≥2,95	2,97-2,98	≤3-5	3-5	≥35,0	35-39,0	10-14	10-14	92-95	93-95
2	Сатка (Росія)	≥2,75	2,83-2,92	≤9	3,0-7,0	≥35,0	21,0-37,5	8-15	8-12	≥91,0	92-92,5
3	Чан-Хонг (Китай)	≥3,0-3,1	3,00-3,06	≤3-4	1-2,2	≥30,0	36,0-47,2	14-16	14-16	≥76,0	90,3-98,2
4	Фематек (Німеччина)	3,0-3,17	3,00-3,08	≤3-5	3,5-5,0	≥25,0-30,0	22,0-51,0	5->12	7-15	≥95-97	95-97,5
5	Інкоу-Кушу (Китай)	≥3,0-3,1	3,00-3,11	≤3-4	1,3-2,0	≥35-40	41,0-52,0	14-16	14-21	≥76	86-95,5
6	Запоріжжя (Україна)	≥2,86	2,94-2,99	≤6	3,8-5,5	≥30,0	36,5-48,5	10-14	10-14	≥92,0	92-95
7	Майертон (Китай)	≥2,96-2,98	2,99-3,04	≤3	1,4-2,6	≥35,5	33,2-41,4	10-18	13-18	≥97-98 у сировині	90-94 у цеглинці
8	Магнохром (Югославія)*	2,95-3,05		≤6		≥30-35		6-10		≥96,5	
9	Радекс (Австрія)*	3,02-3,08		≤3,5-4		≥35-55		5-12		≥97,0	
10	Ловінобана (Словаччина)*	2,83-2,88		≤8		≥30		≥15		≥96-96,7	

\*) зазначені вогнетриви не експлуатувалися в кладці конвертерів; по них й іншим, не наведеним у таблиці, були лише комерційні пропозиції на адресу заводу;

\*\* НТД – нормована технічна документація.

Дорожчі синтетичні (фенолформальдегідні) смоли, які використовуються східними фірмами (Японія, КНР), створюють оптимальну в'язкість вогнетривкої шихти для одержання щільного сирцю. Вони мають високий ступінь полімеризації, утворюють тривимірну структуру вуглецевистого каркасу, забезпечуючи цим найвищу термостійкість і великий вихід коксово-

го залишку [1]. Такі смоли надають вогнетривким виробам у процесі коксування високу міцність завдяки їхній сітчастій структурі. Цим вони відрізняються від пеку. У той же час за наявності у вогнетривах синтетичних зв'язок у металургів можуть виникати додаткові вимоги по залишковому вмісту фенолу й формальдегіду (табл. 2).

Таблиця 2  
Якісні характеристики фенолформальдегідних смол

Показники	Європейські вимоги	Вимоги КНР
Зовнішній вигляд	Червоно-коричнева рідина	Червоно-коричнева рідина
Динамічна в'язкість робочого розчину смоли, МПа·с	9-50	9-50
Вміст вільного фенолу, %	0,05	9,5
Вміст вільного формальдегіду, %	0,05	0,2
Максимальна тривалість зберігання, днів	60	90

Таким чином:

для конвертерного процесу кращими є вогнетриви, які виготовлені з високочистих плавненого магнетиту й графіту на синтетичній зв'язці;

способи підготовки мас для формування цеглин повинні забезпечувати однорідність їхньої структури й властивостей;

кращим є ударний багаторазовий спосіб формування, якщо при цьому передбачений вакуумний відвід газів з шихти, зусилля пресування повинне перевищувати 1500 т.

При проведенні описуваних досліджень склад і фізико-механічні властивості периклазовуглецевих вогнетривів робочого шару відповідали вимогам до них: межа міцності при стиску перевищувала 35 МПа, відкрита пористість становила менш 4%, вдавана густина – більше 2,95 г/см<sup>3</sup>, виготовлені вони були з плавненого магнетиту й дрібнодисперсного графіту з синтетичною зв'язкою. У вогнетриви шлакового поясу вводили антиоксиданти.

Однак стійкість якісної периклазовуглецевої футеровки сама по собі не забезпечується високою – це відразу виявило серійне її використання на заводі в перші місяці, інтервал змін склав 966-2610 плавок. Це вказує на те, що зазначені розходження в стійкості (при однакових складі й фізико-хімічних параметрах вогнетривів) визначаються розходженнями в технологічних параметрах продувки.

Дослідили визначальні залежності стійкості периклазовуглецевої конвертерної футеровки від сталеплавильних параметрів й уточнили режими переділу при таких вогнетривах. Це – приклад роботи, що може допомогти будь-якому заводу поліпшити показники.

Для побудови моделей конвертерних плавок з периклазовуглецевою футеровкою, що дозволяють для кожного виробничого замовлення по марках сталей знаходити оптимальні витрати шлакоутворюючих, охолоджувачів, розріджувачів шлаку, потрібний режим дуття і спрямованих на забезпечення

сприятливих умов служби вогнетривів, виконали на ПК статистичну обробку накопиченої на ~ 5 тис. плавок інформації. Результати основних залежностей стійкості футеровки від параметрів технології представлені на рис. 3-7. Як бачимо, висока стійкість ПВВ забезпечується основнію кінцевих шлаків CaO/SiO<sub>2</sub> понад 3,1 та наявністю в ньому більше 8% MgO за рахунок зовнішніх (не з футеровки) джерел MgO. Умови ПрАТ "ДМЗ" зобов'язують металургів також одночасно домагатися більшого використання надлишкового тепла процесу на переробку металобрухту: у малих конвертерах завжди має місце перевитрата чавуну.

Остання обставина при побудові моделей плавок входила в суперечність із першими двома, оскільки обмежувала застосування матеріалів, що містять CaO і MgO (які є одночасно сипучими охолоджувачами).

Складні умови роботи заводу, а саме: непостійна концентрація в чавуні кремнію, що змінюється в значно широкій межі (0,5-1,5%), низькі відношення вмісту в чавуні Mn/Si < 0,5 і його температура, дефіцит і недостатньо висока якість вапна, простої конвертерів, перегрів сталеплавильної ванни й інші труднощі – не дозволили, як виходить з матеріалів рис. 3-7, одержати сталу високу стійкість вогнетривів. Особливо небажані з погляду служби ПВВ: робота конвертерів на чавуні з вмістом Si > 0,9 % (на футеровку тривалий час впливають низькоосновним шлаком, неминуче скачування шлаків і подовження циклу плавки – рис. 5); прискорена робота конвертерів (більше 27 плавок на добу – рис. 6), що не дозволяє при звичайно значній тривалості інших операцій залишати 2,5-3,0 хв. на нанесення шлакового гарнісажу; підвищення числа додувок (як результат подовження часу окислювання зв'язки вогнетривів шлакової зони киснем з фурми, що опускається й піднімається – рис. 7). Для умов роботи конвертерів заводу, що характеризуються також застосуванням ваграночного вапна невисокої якості, як ми вже по-



казали, уточнено оптимум основності кінцевого шлаку (див. рис. 3) і вмісту в ньому оксиду магнію (див. рис. 4). Перевищення цих оптимумів ускладнює формування шлаків у результаті його гетерогенізації й

викликає необхідність його роздування піднятою кисневою фурмою з усіма негативними наслідками для вогнетривів.

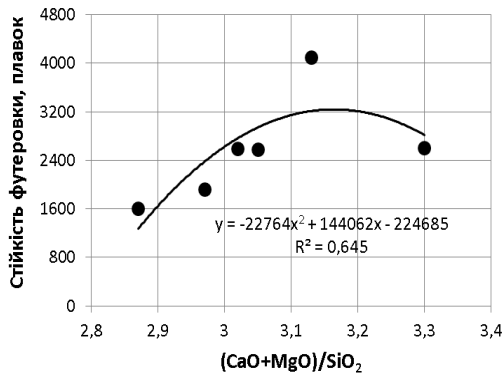


Рисунок 3. Вплив основності шлаку на стійкість футеровки

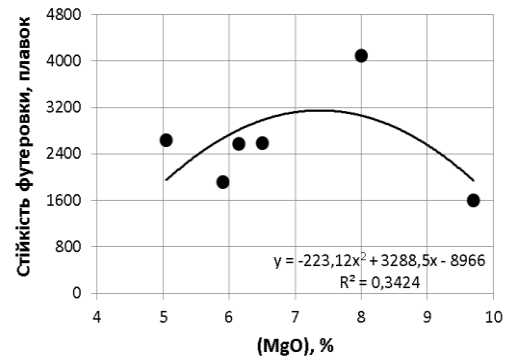


Рисунок 4. Вплив вмісту MgO у шлаку на стійкість футеровки

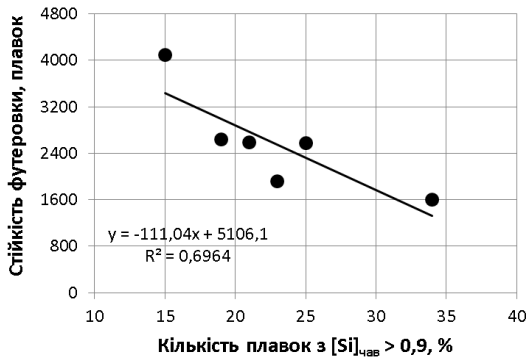


Рисунок 5. Вплив якості чауну на стійкість футеровки

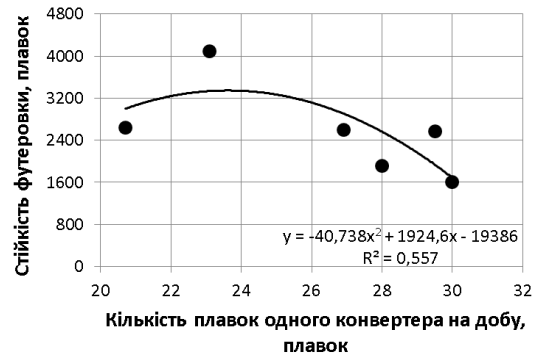


Рисунок 6. Вплив інтенсивності роботи конвертерів на стійкість футеровки

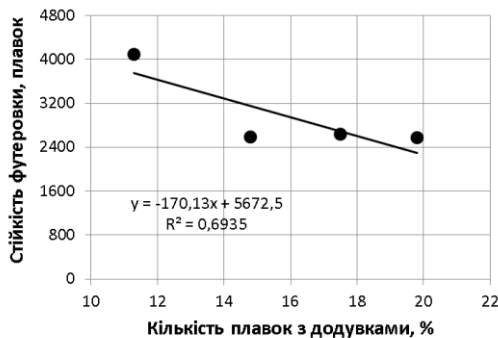


Рисунок 7. Вплив додувок плавков на стійкість футеровки

Розроблено на ПК в програмі *Microsoft Excel* й адаптовано до умов заводу модель конвертерних плавков, що враховує головні вимоги до їхнього проведення. В основу моделі закладені представлені на рис. 3-7 закономірності й висловлені вище міркування.

Склади шлакоутворюючих матеріалів наведені в табл. 3. Результати моделювання для різних варіантів шихти як приклади ілюструються рис. 8-11, рівняннями (27-31) і матеріалами таблиць 4 й 5.

Таблиця 3  
Характеристика шлакоутворюючих матеріалів, %

Матеріал	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CaF <sub>2</sub>
Вапно	3	0,5	79	0	0	0	17,6	0	-
Доломіт сирий	3	0	35	18	0	-	44	0	-
Доломіт м'яко обпалений	3	1	48,5	25,5	0	-	22	0	-
Плавиківий шпат	10	1	10	0	-	-	0	0	79
Магнезіальні брикети	5	1	12	63	0	1	18	0	-

Таблиця 4

Рекомендовані режими плавки, із присадками двох магнезійних матеріалів в конвертерах ПрАТ "ДМЗ" за умов:  $T_{\text{чав}}^* = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{сталі}} = 1620 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $C_{\text{пов}} = 0,12 \text{ \%}$ ;  $M_{\text{садки}} = 67 \text{ т}$ ;  $Si_{\text{чав}} = 0,6-0,8 \text{ \%}$ ;  $M_{\text{дол}} = 0,4-0,6 \text{ т}$ ;  $M_{\text{бр}} = 0,4-0,6 \text{ т}$

№	Si <sub>чав</sub> , %	M <sub>брухту</sub> , Т	M <sub>чав</sub> , Т	M <sub>дол</sub> , Т	M <sub>бр</sub>	M <sub>вап</sub> , Т	S <sub>пов</sub> , %	CaO/SiO <sub>2</sub>	(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	MgO, %	Вихід придатного, од
1	0,8	10,7	56,3	0,4	0,4	5	0,028	2,77	3,14	6,75	0,910
2	0,8	10,1	56,9	0,6	0,4	5	0,027	2,80	3,20	7,08	0,909
3	0,8	10,4	56,6	0,4	0,6	5	0,027	2,77	3,22	8,15	0,910
4	0,8	9,8	57,2	0,6	0,6	5	0,027	2,80	3,27	8,45	0,909
5	0,6	10,5	56,5	0,4	0,4	4	0,030	2,82	3,26	7,65	0,916
6	0,6	9,9	57,1	0,6	0,4	4	0,029	2,87	3,33	8,03	0,915
7	0,6	10,1	56,9	0,4	0,6	4	0,029	2,82	3,36	9,30	0,915
8	0,6	9,5	56,5	0,6	0,6	4	0,029	2,86	3,43	9,63	0,914
Осер.	0,7	10,6	56,4	0,5	0,5	4,5	0,028	2,81	3,27	8,08	0,913

\* Тут і далі T<sub>чав</sub>, T<sub>сталі</sub>, C<sub>пов</sub>, M<sub>садки</sub>, M<sub>дол</sub>, M<sub>брухту</sub>, M<sub>вап</sub>, M<sub>бр</sub> – відповідно температура чавуну й сталі, °C; вміст вуглецю в сталі на повалці, %; маса садки, присадок доломіту, брухту, вапна й магнезійних брикетів, т

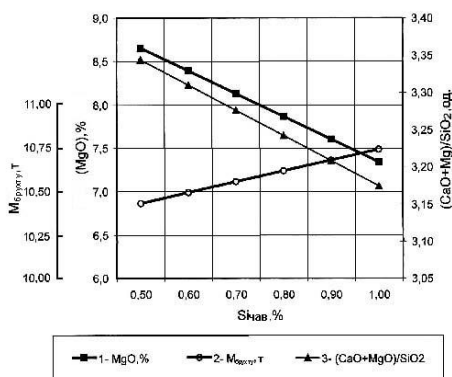


Рисунок 8. Рекомендовані залежності між вмістом кремнію в чавуні й витратою металобрухту (M<sub>брухту</sub>) (2), вмістом MgO у шлаку (1) і його основністю (CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub> (3)

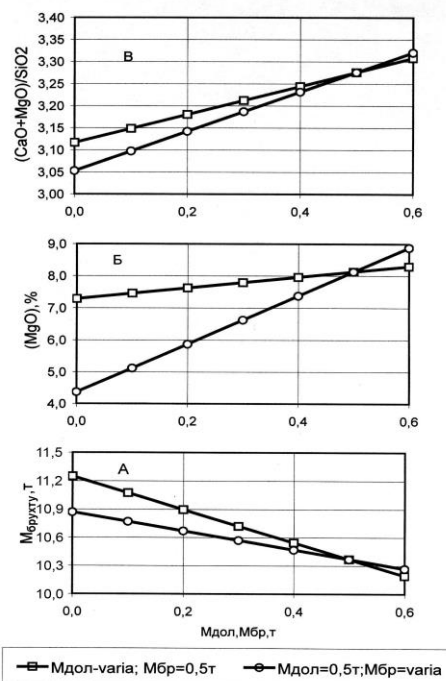


Рисунок 9. Рекомендовані залежності між присадками магнезійних матеріалів – доломіту, брикетів (M<sub>дол</sub>, M<sub>бр</sub>) і витратою металобрухту (A), вмістом MgO у шлаку (Б) і його основністю (B)

Рівняння для розрахунку шихтового режиму й прогнозування результатів конвертерної плавки при роботі на периклазовуглецевій футеровці з присадками сирого доломіту й магнезійних брикетів:

$$M_{\text{лом}} = 10,4 - 2,94(M_{\text{дол}} - 0,5) - 1,67(M_{\text{бр}} - 0,5) + 1,25(Si_{\text{чав}} - 0,7), \text{ т}, \quad (27)$$

$$M_{\text{чав}} = 59,9 - 2,94(M_{\text{дол}} - 0,5) + 1,67(M_{\text{бр}} - 0,5) - 1,25(Si_{\text{чав}} - 0,7), \text{ т}, \quad (28)$$

$$M_{\text{вап}} = 4,5 + 5(Si_{\text{чав}} - 0,7), \text{ т}, \quad (29)$$

$$(MgO) = 8,13 - 1,68(M_{\text{дол}} - 0,5) + 7,53(M_{\text{бр}} - 0,5) - 5,25(Si_{\text{чав}} - 0,7), \text{ \%}, \quad (30)$$

$$\frac{(CaO + MgO)}{SiO_2} = 3,28 + 0,32(M_{\text{дол}} - 0,5) + 0,45(M_{\text{бр}} - 0,5) - 0,68(Si_{\text{чав}} - 0,7). \quad (31)$$

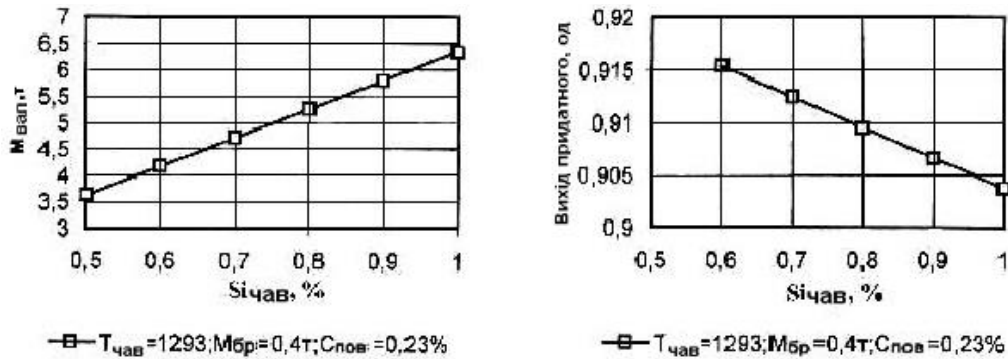


Рисунок 10. Рекомендовані залежності між вмістом кремнію в чавуні й показниками конвертерної плавки при роботі на периклазовуглецевій футеровці

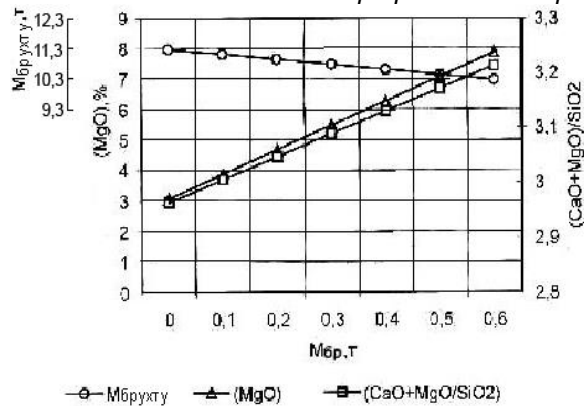


Рисунок 11. Рекомендовані залежності між витратою магнезійних брикетів і деякими показниками конвертерної плавки при роботі на периклазовуглецевій футеровці за відсутності присадок доломіту

Таблиця 5  
Рекомендовані режими плавки і показники, що ними забезпечуються при роботі конвертерів “ДМЗ” на периклазовуглецевій футеровці з використанням звичайного вапна і магнезійних брикетів

№	Si <sub>чав</sub> , %	T <sub>чав</sub> , °C	M <sub>брухту</sub> , т	M <sub>чав</sub> , т	M <sub>вап</sub> , т	M <sub>бр</sub> , т	C <sub>пов</sub>	S <sub>пов</sub> , %	(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	MgO, %	M <sub>ст</sub> , т	Вихід придатного, од.
1	0,6	1285	10,5	56,5	4,2	0,3	0,26	0,031	3,14	5,92	61,30	0,915
2	0,6	1285	10,2	56,8	4,15	0,5	0,26	0,030	3,21	7,76	61,27	0,914
3	0,9	1285	10,2	56,8	5,8	0,5	0,26	0,027	3,12	6,43	60,68	0,906
4	0,6	1285	11,0	56,0	4,15	0,3	0,20	0,031	3,11	5,90	61,33	0,915
5	0,6	1285	10,6	56,4	4,15	0,5	0,20	0,030	3,21	7,69	61,28	0,915
6	0,9	1285	10,7	56,3	5,8	0,5	0,20	0,027	3,13	6,37	60,70	0,906
7	0,6	1300	10,6	56,4	4,15	0,3	0,26	0,031	3,11	5,94	61,32	0,915
8	0,6	1300	10,2	56,8	4,16	0,5	0,26	0,030	3,21	7,75	61,27	0,914
9	0,9	1300	10,2	56,8	5,8	0,5	0,26	0,027	3,12	6,43	60,68	0,906
10	0,6	1300	11,0	56,0	4,15	0,3	0,20	0,031	3,11	5,90	61,33	0,915
11	0,6	1300	10,6	56,4	4,15	0,5	0,20	0,030	3,21	7,69	61,28	0,915
12	0,9	1300	10,7	56,3	5,8	0,5	0,20	0,027	3,13	6,37	60,70	0,906
Осеп.	0,7	1293	10,5	56,5	4,7	0,43	0,23	0,029	3,15	6,68	61,09	0,910

**Обговорення результатів**

Якщо за умовами роботи цеху вдавалося виконати розроблені рекомендації з шихтового, шлакового й температурного режимів, то створювалися умови оптимальної служби ПВВ на плавках при мінімально можливій витраті передільного чавуну.

Із цих позицій становить інтерес частка використання цих рекомендацій на кожній з кампаній конвертерів по футеровці, результати яких відображені на рис. 3-7. Аналіз підтвердив достовірність рекомендацій. Якщо ступінь їхнього використання на кампанії зі стійкістю понад 4000 складав близько 60 %, то

на інших кампаніях вона була істотно нижче й становила відповідно: 2650 плавки – 38, 2580 – 37; 2340 – 33; 2030 – 28, 1600 – 21 %, тобто виявлена практично пряма пропорційність розглянутих параметрів.

Розроблені шихтовий, шлаковий і тепловий режими стали основою технології проведення плавки на ПрАТ “ДМЗ” і були враховані при впровадженні периклазовуглецевої футеровки в конвертерах іншими металургійними підприємствами.

Конвертери ПрАТ “ДМЗ” внаслідок малої ємності в порівнянні з широко застосовуваними конвертерами садкою 180 т і більше піддаються значним тер-

мозмінам протягом циклу плавки, мають більші питомі тепловтрати в навколишнє середовище. Досвід заводу при його переносі на умови експлуатації більших конвертерів може забезпечувати стійкості їх футеровок на рівнях, значно вище описаного в цьому дослідженні.

#### **Висновки**

1. Виконано теоретичний аналіз закономірностей асиміляції вогнетривів шлаковою фазою, яка сформована в ході конвертерної плавки.

2. Результати теоретичного аналізу підтверджено мікро-, рентгеноспектральними дослідженнями відпрацьованих вогнетривів та обґрунтовані вимоги до периклазовуглецевих вогнетривів робочого шару конвертерів і до їх виробників.

3. Розроблена на ПК й адаптована до умов ПрАТ "ДМЗ" модель конвертерних плавок, що враховує взаємозв'язок їх параметрів із процесами зносу вогнетривів і спрямована на поліпшення показників переділу.

#### **Бібліографічний опис**

1. Кашеев И.Д. Оксидно-углеродистые огнеупоры. М.: Интернет инжиниринг. – 2000. – 265 с.
2. Металургия стали. Конвертерное производство / О.Г. Величко, Б.М. Бойченко, П.С. Харлашин [та ін.]. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2015. – 434 с.
3. Структурные изменения периклазоуглеродистых огнеупоров при службе в горловине кислородного / Б.М. Бойченко, К.Г. Низяев, Е.В. Синегин, Б.В. Гармаш, Д.П. Васильев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2017. – № 6. – С. 6-10.
4. Пишида В.И., Бойченко Б.М., Низяев К.Г., Кравец С.Н. Служба периклазоуглеродистых огнеупоров в шлаковом поясе конвертера // М.: Новые огнеупоры. – 2005. – №1. – С. 29-31.
5. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование (система твёрдое тело-жидкость). – Л.: Химия. – 1974. – 256 с.
6. Лыков А.В. Теплообмен (Справочник). – М.: Энергия. – 1972. – 560 с.
7. Cadly L.C., Williams J.W. Diffusion into solid materials // *Physical Chemistry*. – 1935. - v.39. - №2. - p.87-90.
8. Романков П.Г. Массообменные процессы химической технологии. – Л. Химия.: 1975г. – 280 с.
9. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинематике. – М.: Наука. – 1987. – 502 с.
10. Borzov D., Ulbricht J., Schulle W. Technological and environmental comparison of different carbon – binders for MgO-C refractories // 44-th International Colloquium on Refractories, 26-27.09.2001. *Stahl und Eisen*. - 2001. Special. - p.50-52.

#### **Reference**

1. Kasheev I.D. Oksidno-uglerodistyie ogneupory. M.: Internet inzhiniring. – 2000. – 265 s.
2. Metalurgiya stali. Konverterne virobnictvo / O.G. Velichko, B.M. Bojchenko, P.S. Harlashin [ta in.]. – Dnipropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2015. – 434 s.
3. Strukturnye izmeneniya periklazouglerodistyih ogneuporov pri sluzhbe v gorlovinе kislоро-dnogo / B.M. Bojchenko, K.G. Nizyaev, E.V. Sinegin, B.V. Garmash, D.P. Vasilev // *Metallurgiche-skaya i gornorudnaya promyshlennost*. – 2017. – № 6. – S. 6-10.
4. Pishida V.I., Bojchenko B.M., Nizyaev K.G., Kravec S.N. Sluzhba periklazouglerodistyih ogneu-porov v shlakovom poyase konvertera // M.: Novye ogneupory. – 2005. – №1. – S. 29-31.
5. Akselrud G.A., Lysyanskij V.M. Ekstragirovanie (sistema tvordoe telo-zhidkost). – L.: Hi-miya. – 1974. – 256 s.
6. Lykov A.V. Teplomassoobmen (Spravochnik). – M.: Energiya. – 1972. – 560 s.
7. Cadly L.S., Williams J.W. Diffusion into solid materials // *Physical Chemistry*. – 1935. - v.39. - №2. - p.87-90.
8. Romankov P.G. Massoobmennye processy himicheskoy tehnologii. – L. Himiya.: 1975g. – 280 s.
9. Frank-Kameneckij D.A. Diffuziya i teploperedacha v himicheskoy kinematike. – M.: Nauka. – 1987. – 502 s.
10. Borzov D., Ulbricht J., Schulle W. Technological and environmental comparison of different carbon – binders for MgO-C refractories // 44-th International Colloquium on Refractories, 26-27.09.2001. *Stahl und Eisen*. - 2001. Special. - p.50-52.

*Стаття поступила 7.11.2018*