

В.Г. Герасименко, Л.С. Молчанов, Є.В. Синегін, Р.П. Андрюхін

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИПЛАВКИ СТАЛІ У КИСНЕВИХ КОНВЕРТЕРАХ ВЕРХНЬОЇ ПРОДУВКИ НА ОКИСЛЕНІСТЬ МЕТАЛУ

*У статті наведено результати статистичного аналізу паспортів плавки з метою оцінки впливу технологічних параметрів виплавки сталі в кисневому конвертері з верхньою продувкою на окисленість сталі перед випуском з конвертеру. За результатами кореляційного аналізу визначені параметри виплавки сталі, які мають найбільший вплив на вміст кисню в сталі. Із використанням регресійного аналізу створено математичну модель для прогнозування вмісту кисню в сталі перед випуском сталі.*

**Ключові слова:** окисленість сталі, кисневий конвертер, верхня продувка, розкислення, легування.

### Вступ

Процес виробництва сталі базується на видаленні надлишкової кількості домішок з розплаву [1]. Основним методом рафінування є окислення хімічних елементів з подальшим видаленням продуктів взаємодії з зони протікання хімічної реакції. При цьому у промислових масштабах у якості джерела кисню використовуються або тверді окиснювачі (матеріали, що містять оксиди заліза та/або марганцю), або газоподібний кисень (кисень газової фази агрегату, технічно чистий або газові суміші кисню з інертними газами) [2].

Швидкість окислення домішок у розплаві у значній мірі залежить від їх концентрації, тому значне її зменшення призводить до стрімкого збільшення вмісту кисню у розплаві вище рівноважної концентрації [3]. Найбільше вказана особливість виявляється при киснево-конвертерному способі виробництва сталі оскільки йому властиві високі швидкості окислення домішок й циркуляції металевого розплаву.

### Постановка мети і завдань дослідження

Технологічний цикл виготовлення рідкої сталі передбачає у якості самостійної операції використання технологій розкислення та легування. Процес розкислення базується на видаленні з розплаву надлишкового вмісту кисню, а процес легування – на введенні елементів, що надають сталі спеціальних службових якостей. Здебільшого у якості ефективних

розкислювачів та легуючих використовують високовартісні матеріали. Тому з метою зниження їх витрати бажано мати відомості стосовно окислення металевого розплаву [4].

В практиці світового металургійного виробництва найбільш поширеним методом визначення окисленості металевого розплаву є прямий замір вказаного показника з використанням заглибних аналізаторів типу CELOX [5]. Проте їх використання потребує додаткових матеріальних витрат (аналізатори відносяться до устаткування разового використання) та ускладнення технологічного циклу виробництва сталі (з’являється додаткова технологічна операція, яку необхідно обов’язково виконувати). Таким чином, метою даного дослідження є системний аналіз технологічних параметрів виплавки сталі марки ЗПС у 60-т конвертерах з верхньою продувкою; виявлення впливу параметрів виплавки сталі на величину окисленості металевого розплаву перед випуском з конвертера та побудова багатofакторної математичної моделі, яка дозволяла б прогнозувати рівень окисленості металевого розплаву з високим рівнем достовірності.

#### **Методика проведення досліджень**

Для визначення параметрів, що мають найбільший вплив на окисленість металу, було проведено множинний кореляційний аналіз, за результатами якого було отримано кореляційну матрицю. Серед технологічних параметрів, що аналізувалися були наступні: питома витрата феросиліцію ( $m_{\text{FeSi}}$  45%), шматкового ( $m_{\text{SiMn}}$ ) та брикетованого ( $m_{\text{SiMn}}$  брикет) силікомарганцю, термоантрациту ( $m_{\text{термоантрацит}}$ ), чушкового алюмінію ( $m_{\text{Al}}$  чушков), феромарганцю ( $m_{\text{FeMn}}$ ), коксового просіву ( $m_{\text{кокс. просів}}$ ), рідкого ( $m_{\text{чав}}$ , кг/т) і твердого чавуну ( $m_{\text{тв чав}}$ , кг/т), металевого лому ( $m_{\text{лом}}$ , кг/т), плавикового шпату ( $m_{\text{CaF}_2}$ ), магнезитових брикетів ( $m_{\text{MgO}}$ ), вапна ( $m_{\text{вапна}}$ ) та кисню на продувку (Витрата  $\text{O}_2$ ,  $\text{м}^3/\text{т}$ ), а також хімічний склад чавуну ( $[\% \text{Mn}]_{\text{чав}}$ ,  $[\% \text{Si}]_{\text{чав}}$ ,  $[\% \text{S}]_{\text{чав}}$ ), шлаку ( $(\% \text{CaO})$ ,  $(\% \text{SiO}_2)$ ,  $(\% \text{MgO})$ ,  $(\% \text{FeO})_{\text{заг}}$ ,  $(\% \text{CaO})/(\% \text{SiO}_2)$ ) та сталі ( $[\% \text{C}]$ ,  $[\% \text{Mn}]$ ,  $[\% \text{S}]$ ,  $[\% \text{P}]$ ) перед випуском та температура ( $T_{\text{сталі}}$ ) останньої. На рисунку 1 наведено абсолютні величини коефіцієнтів кореляції для досліджуваних параметрів.

Як помітно з рисунку 1, високий вплив на вміст кисню в металі перед випуском з конвертера мають питомі витрати розкислювачів, коксового просіву та твердого чавуну. Проте, через коливання хімічного складу розкислювачів, термоантрациту і коксового просіву та ступінь їх засвоєння металом, їх використання для подальшого регресійного аналізу не є доцільним. Використання твердого чавуну у ньому також не є доцільним через

неконтрольований хімічний склад та нерегулярність використання. Використання при регресійному аналізі загального вмісту заліза в шлаку не доцільне через те, що аналіз хімічного складу шлаку здійснювався лише двічі на зміну і достовірність впливу цього параметру на цільову функцію вочевидь буде вкрай низькою.

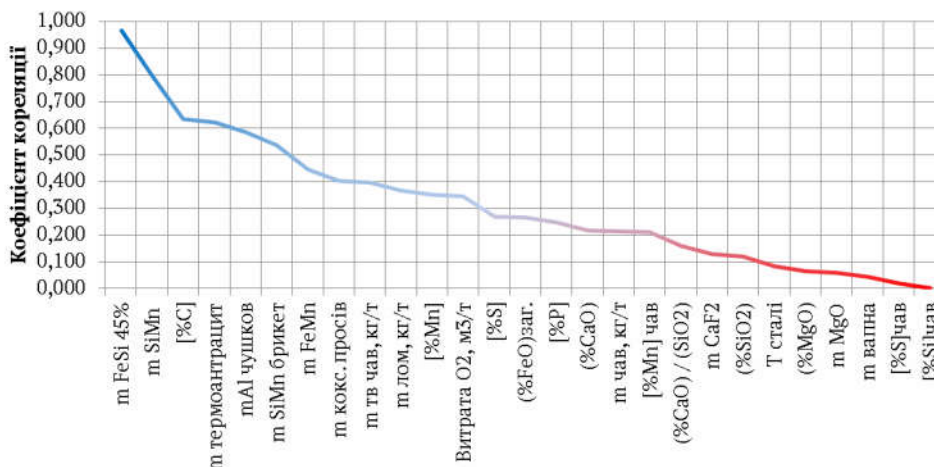


Рисунок 1 – Абсолютні величини кореляційних коефіцієнтів досліджуваних параметрів

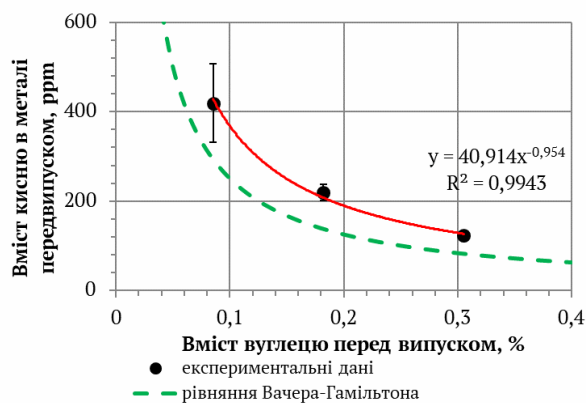


Рисунок 2 – Залежність вмісту кисню в металі від вмісту вуглецю перед випуском

Оскільки априорі відомо, що вплив на цільову функцію деяких параметрів може мати нелінійний характер, попередньо було побудовано графіки залежності цільової функції від досліджуваних параметрів. На рисунках 2-7 наведено залежність вмісту кисню в металі від параметрів плавки, що були обрані за результатами кореляційного аналізу для подальшого регресійного аналізу.

На рисунку 1 помітно, що фактичний вміст кисню в металі перед випуском дещо перевищує рівноважний, за рівнянням Вачера-Гамільтона, що пояснюється нерівноважними термодинамічними умовами у конвертерній ванні. Залежності вмісту кисню від вмісту марганцю, сірки та фосфору перед

випуском (рис. 3,6,7) також мають зворотний характер, що узгоджується з теоретичними даними. Залежність решти параметрів подібна до лінійної.

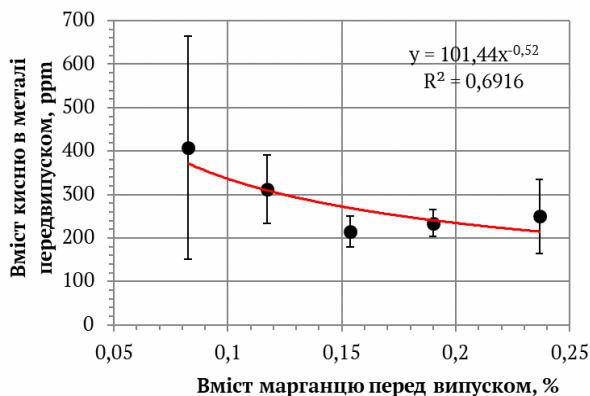


Рисунок 3 – Залежність вмісту кисню в металі від вмісту марганцю перед випуском

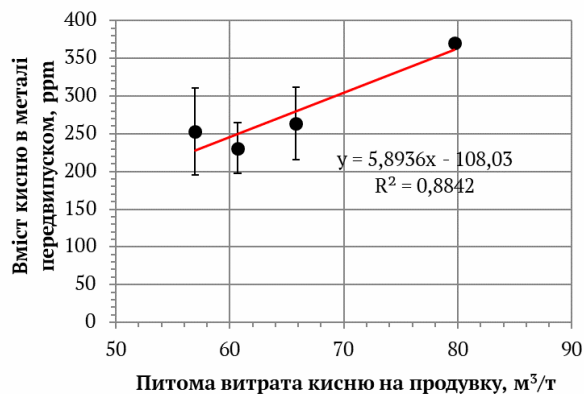


Рисунок 4 – Залежність вмісту кисню в металі від питомої витрати кисню на продувку

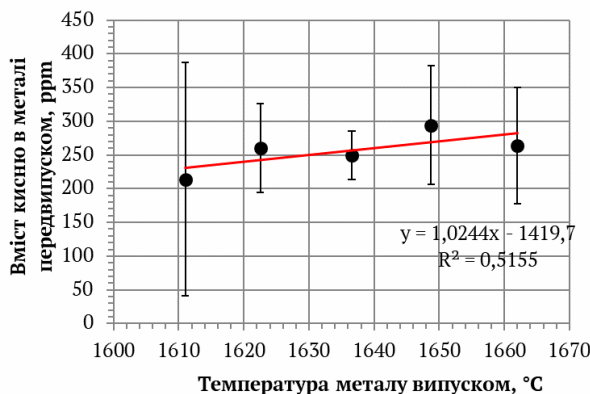


Рисунок 5 – Залежність вмісту кисню в металі від температури сталі перед випуском

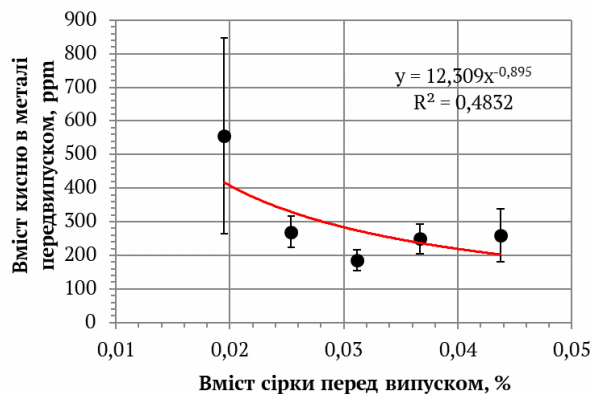


Рисунок 6 – Залежність вмісту кисню в металі від вмісту сірки в металі перед випуском

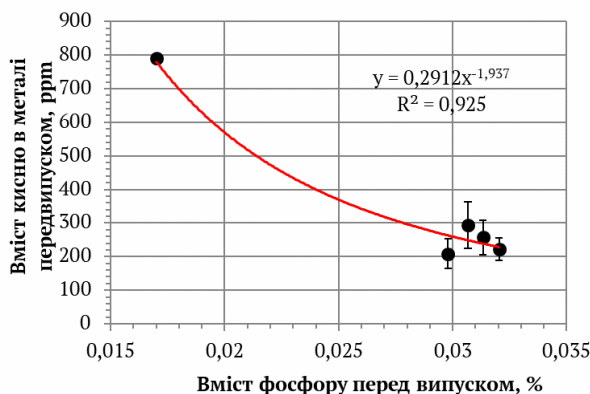


Рисунок 7 – Залежність вмісту кисню в металі від вмісту фосфору в металі перед випуском

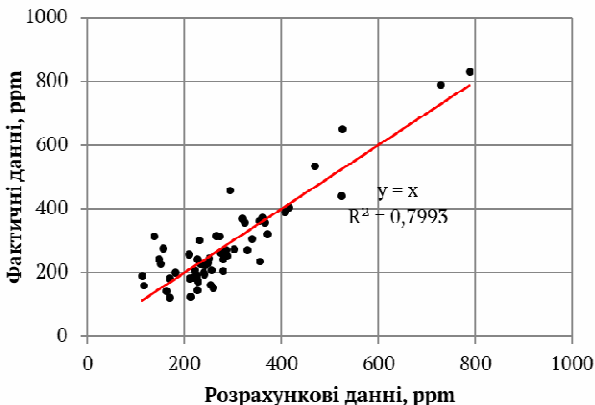


Рисунок 8 – Порівняння фактичних даних із розрахованими за моделлю (1)

Таким чином, при проведенні регресійного аналізу паспортів плавок необхідно замість вмісту вуглецю [%C], марганцю [%Mn], сірки [%S] і фосфору [%P] в металі перед випуском враховувати параметри [%C]<sup>-1</sup>, [%Mn]<sup>-0,5</sup>, [%S]<sup>-1</sup> і [%P]<sup>-2</sup>.

За результатами регресійного аналізу отримано математичну модель

$$[\%O] = 939 \lg \left( 3246 + \frac{13,9}{[\%C]} + \frac{159}{\sqrt{[\%Mn]}} + \frac{1}{115[\%P]^2} - 2,169t_{\text{ст}} + 1,9V_{O_2} - \frac{1}{11,5[\%S]} \right) - 1996, \text{ ppm.} \quad (1)$$

Порівняння розрахункових даних вмісту кисню в сталі перед випуском із фактичними наведено на рисунку 8. Як видно на рисунку отримана математична модель має хорошу досить добре збігається з результатами фактичних замірів вмісту кисню в сталі перед випуском.

### Висновки

За результатами кореляційного аналізу визначено, що серед контрольованих параметрів конвертерної плавки найбільший вплив на вміст у сталі кисню перед випуском мають хімічний склад сталі перед випуском, зокрема вміст в ній вуглецю, марганцю, сірки і фосфору, а також температура та питома витрата кисню. Із використанням методу множинного регресійного аналізу було отримано математичну модель, яка описує вміст кисню в металі перед випуском в залежності від найбільш значущих параметрів виплавки сталі. Отримана математична модель може бути корисна для визначення необхідної кількості феросплавів для розкислення і легування сталі, що дозволить за рахунок точнішого визначення їх витрати зменшити витрати на її виробництво.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Теорія металургійних процесів [Підручник] / В.Б. Охотський, О.Д. Костьолов, В.К. Сімонов [та ін.]. – К.: ІЗМН, 1997. – 512 с.
2. Воскобойников В.Г. Общая металлургия / В.Г. Воскобойников, В.А. Кудрин, А.М. Якушев. – М.: Металлургия, 1987. – 486 с.
3. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотський, П.С. Харлашин. – Дніпропетровськ: РВА „Дніпро-ВАЛ”, 2004. – 454 с.
4. Технології підвищення якості сталі [Підручник] / О.Г. Величко, О.М. Стоянов, Б.М. Бойченко, К.Г. Нізяєв. – Дніпропетровськ: Середняк Т.К., 2016. – 196 с.
5. Pagden, S; Carlier, K. Oxygen activity measurement using the Celox probe / Steel Times. – 1991. – Vol. 219. – Iss. 7. – P. 366-368.

### REFERENCES

1. Teoriya metalurgiynyh protsesiv [Pidruchnyk] / V.B. Ohotskii, O.D. Kostolov, V.K. Simonov [ta in.]. – K.: IZMN, 1997. – 512 p.
2. Voskoboynikov V.G. Obschaya metallurgiya / V.G. Voskoboynikov, V.A. Kudrin, A.M. Yakushev. – M.: Metallurgiya, 1987. – 486 p.

3. Boychenko B.M. Konverterne vyrobnytstvo stali / B.M. Boychenko, V.B. Ohotskii, P.S. Harlashyn. – Dnipropetrovsk: RVA „DnIpro-VAL”, 2004. – 454 p.
4. Tehnologii pidvischennya yakosti stali [Pidruchnyk] / O.G. Velychko, O.M. Stoianov, B.M. Boichenko, K.G. Niziaiev. – Dnipropetrovsk: Serednyak T.K., 2016. – 196 p
5. Pagden, S; Carlier, K. Oxygen activity measurement using the Celox probe / Steel Times. – 1991. – Vol. 219. – Iss. 7. – P. 366-368.

Received 06.01.2020.

Accepted 13.01.2020.

UDC 669.84

V.H. Herasymenko, L.S. Molchanov, Y.V. Synehin, R.P. Andriukhin

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS  
OF STEEL SMELTING IN TOP BLOWING OXYGEN CONVERTERS  
ON METAL OXIDATION**

The article considers the influence of technological steelmaking parameters in an oxygen converter on the oxygen content in steel before tapping. Today, CELOX is an effective, but at the same time expensive method for measuring the oxygen content in steel. The information obtained using this device allows you to accurately determine the ferroalloys consumption for deoxidation of steel. Since the oxygen content in steel before production directly affects the ferroalloys and aluminum consumption, necessary for steel deoxidation, the aim of this work was to create a mathematical model that allows determining the oxygen content in steel before tapping, taking into account the controlled melting parameters. The object of the study was a top blowing oxygen converter of 60 t capacity. The following analysis was carried out for 3PS steel grade. To create a mathematical model, the factors that have the greatest influence on the oxygen content in steel before tapping were previously selected by the method of correlation analysis. Such factors included the carbon, manganese, sulfur and phosphorus content in steel before tapping, its temperature and specific consumption of oxygen. Using the method of multiple regression analysis, a mathematical model was determined, which allows determining the oxygen content in steel before tapping at the end of each melt. Comparison of the actual data on the oxygen content in steel before tapping with the results of calculation using the model showed their high convergence, which confirms the adequacy of the obtained model. The application of the developed mathematical model for predicting the oxygen content in steel before tapping in a real metallurgical enterprise will allow reduce consumption of ferroalloys and alumina for deoxidation of crude steel.

**Keywords:** oxidation of steel, oxygen converter, top blowing, deoxidation, alloying.

*Герасименко Віктор Григорович* – к.т.н., доц., старший науковий співробітник відділу фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

**Молчанов Лавр Сергійович** – к.т.н., старший науковий співробітник відділу фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

**Синегін Євген Володимирович** – к.т.н., доцент кафедри металургії сталі, Національна металургійна академія України.

**Андрюхін Роман Павлович** – аспірант кафедри металургії сталі, Національна металургійна академія України.

**Герасименко Виктор Григорьевич** – к.т.н., доц., старший науковий співробітник відділу фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

**Молчанов Лавр Сергеевич** – к.т.н., старший науковий співробітник відділу фізико-технічних проблем металургії сталі, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

**Синегін Евгений Владимирович** – к.т.н., доцент кафедри металургії сталі, Національної металургічної академії України.

**Андрюхін Роман Павлович** – аспірант кафедри металургії сталі, Національна металургічна академія України.

**Herasymenko Viktor** – PhD, Associate Professor, Senior Researcher, Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.

**Molchanov Lavr** – PhD, Senior Researcher Department of Physical and Technical Problems of Steel Metallurgy, Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine.

**Synehin Yevhen** – PhD, Professor (Assistant), Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine.

**Andriukhin Roman** – PhD Student, Department of Steel Metallurgy, National Metallurgical Academy of Ukraine.