

**А. Г. Чернятевич**, д.т.н., проф.; ORCID 0000-0002-4552-4997

**Л. С. Молчанов**, к.т.н.; ORCID 0000-0001-6139-5956

**Т. С. Голуб**, к.т.н.; ORCID 0000-0001-9269-2953

**С. І. Семикін**, к.т.н., с.н.с.; ORCID 0000-0002-7365-2259

*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## **ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПЕРИКЛАЗО-ВУГЛЕЦЕВИХ ВОГНЕТРИВІВ В КОНВЕРТЕРАХ МАЛОЇ ЄМНОСТІ**

**Анотація.** Метою дослідження є встановлення функціональних взаємозв'язків між різними групами виробничих факторів та стійкістю футерівки конвертерів малого об'єму. Нині киснево-конвертерний процес є найбільш масовим способом виробництва конструкційної сталі. Головною його відмінністю є висока продуктивність, що визначається тривалістю безремонтних періодів роботи плавильних агрегатів. В існуючих умовах підвищити продуктивність і скоротити собівартість виробництва сталі в конвертерах можна за рахунок підвищення стійкості вогнетривкої футерівки. Тому оцінка факторів, що впливають на стійкість футерування, є актуальним та необхідним. Проведено статистичний аналіз роботи за п'ятирічний період двох 60-т конвертерів з верхньою продувкою, які були зафутеровані периклазовуглецевими термообробленими вогнетривами. Встановлено, що стійкість футерівки має екстремальний характер і залежить від витратних показників шихтових матеріалів: витрата чавуну на рівні 920-930 кг/т сталі відповідає найнижчим показникам стійкості футерівки; витрата брухту на рівні 200 – 220 кг/т сталі та витрата вапна на рівні 70-75 кг/т сталі відповідають найкращим умовам роботи футерівки. Найкращим умовам роботи футерівки відповідають чавуни з вмістом кремнію у на рівні 0,80-0,85 % мас та марганцю на рівні – 0,50-0,60 % мас. В ході виконання досліджень з'ясовано, що для більш вірного тлумачення впливу певних факторів на стійкість футерівки кисневих конвертерів необхідно групувати фактори за організаційно-виробничою ознакою та проводити детальний аналіз саме у кожній з груп. За результатами кореляційного та регресійного аналізу отримано рівняння, що дозволяє прогнозувати стійкість футерівки конвертерів ємністю 60-т. Отримане рівняння може бути використане у промислових умовах для прогнозування стійкості футерівки.

**Ключові слова:** кисневе конвертування, периклазовуглецева футерівка, кореляційний аналіз.

**Посилання для цитування:** Чернятевич А. Г., Молчанов Л. С., Голуб Т. С., Семикін С. І. Технологічний аналіз ефективності експлуатації периклазовуглецевих вогнетривів в конвертерах малої ємності. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 275-295. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-275-295

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35  
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2021. – Vypusk 35  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

**Актуальність та завдання дослідження.** В сучасних умовах організації виробництва промислової продукції приблизно три чверті всіх споживаних промисловістю вогнетривких матеріалів і виробів припадає на чорну металургію. При цьому стале та безаварійне функціонування її ефективність цілих технологічних систем в чорній металургії зумовлено високими якістю і експлуатаційними властивостями вогнетривких матеріалів та виробів з них. Найбільше значимість вогнетривких матеріалів проявляється на етапах виробництва чавуну і сталі у складі футерівки технологічних агрегатів, ємкостей для накопичення та транспортування рідких металевих розплавів, нагрівального устаткування для підігріву заготовок тощо [1-4].

Враховуючи, наведені вище особливості, необхідно відзначити, що правильний вибір матеріалів для виконання та ремонту складових елементів технологічних агрегатів, що експлуатуються в середовищах з агресивним фізико-хімічним впливом та підвищеною температурою, є найважливішою умовою досягнення їх максимальної продуктивності. Вказаний аспект є особливо актуальним, для кисневих конвертерів, що використовуються в якості основного агрегату для виплавки сталі звичайного призначення на провідних металургійних підприємствах світу. Стійкість його вогнетривкої футерівки визначає тривалість компанії, а найзначніші витрати часу у сучасних сталеплавильних цехах пов'язані, насамперед, з технологічними операціями з заміни футерівки.

Виходячи зі світового досвіду експлуатації кисневих конвертерів в сучасних умовах для виконання вогнетривкої футерівки у якості тих, що найефективніше себе зарекомендували, використовуються периклазовуглецеві вогнетривкі матеріали [5]. Завдяки високим показникам службових властивостей (вогнетривкість, термічна міцність, механічна міцність та інші) вони захищають металеві конструкції основного технологічного устаткування від високотемпературного впливу газових фаз, металевих і шлакових розплавів. При цьому на футерівку діють різноманітні екстремальні навантаження та фактори, різні за своєю природою, які можна класифікувати відповідно до особливостей виробничого процесу та визначаються ємністю агрегату [6-14]. Зі збільшенням ємності умови експлуатації футерівки поліпшуються (рис. 1).

**Метою даного дослідження** є встановлення функціональних взаємозв'язків між різними групами виробничих факторів та стійкістю футерівки конвертерів малого об'єму. При цьому особливу увагу необхідно приділити розробці моделей для прогнозування тривалості експлуатації футерівки кисневого конвертера ємністю 60-т.

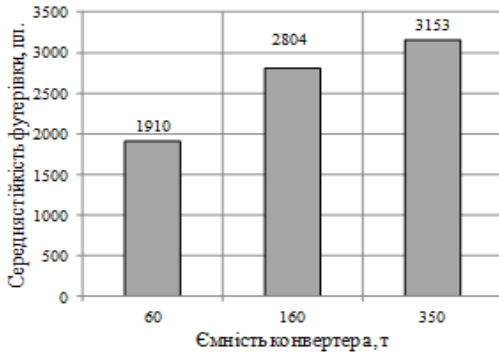


Рисунок 1 – Залежність середньої стійкості футерівки від ємності конвертера.

**Методика проведення досліджень.** В основі роботи покладено комплексне статистичне дослідження технологічних показників експлуатації кисневих конвертерів малої ємності (60-т). Дане дослідження проводилось в декілька етапів: визначення функціональної залежності різних факторів, що впливають на стійкість вогнетривкої футерівки; встановлення функціонального взаємозв'язку між комплексом найбільш важливих факторів та стійкістю футерівки.

В аналіз включено результати плавок протягом п'яти років двох промислових 60-т конвертерів (надалі конвертера № 1 - № 2), оснащених периклазовуглецевою футерівкою (12 кампаній на конвертері № 1 та 11 кампаній на конвертері № 2 відповідно). Футерівка була викладена диференційованим способом з посиленням місць підвищеного зносу найбільш якісними вогнетривками різного хімічного складу та товщини. У складі робочої поверхні футерівки конвертера були виділені наступні зони: днища та металевої ванни; циліндричної частини; зони цапф у циліндричній частині; горловини. Робочий шар футерівки кисневого конвертера був виконаний з вогнетривів, які включали до свого складу периклаз, графіт, антиоксиданти (металеві порошки сплавів на основі алюмінію, кремнію, магнію) та синтетичної зв'язки. У процесі виготовлення вогнетриви піддавалися високотемпературній обробці. Хімічний склад та службові властивості периклазовуглецевих вогнетривів для виконання різних зон футерівки кисневого конвертера представлені в таблиці 1.

План комплексного дослідження передбачав визначення в масиві факторів, що впливають на стійкість футерівки та об'єднання їх у групи за технологічним походженням. У якості технологічних параметрів, що досліджувалися на взаємозв'язок із стійкістю футерівки, розглядалися наступні фактори: хімічний склад чавуну (вміст кремнію, марганцю та

сірки) і шлаку (вміст оксидів заліза і основність); маса твердих металовмісних та шлакоутворюючих матеріалів; кінцева температура розплаву і кількість обробок футерівки шлаком та торкрет масою.

Таблиця 1 – Основні службові характеристики вогнетривів робочої поверхні футерівки.

Показники	Місце розташування вогнетривів у складі футерівки			
	Ділянка донної частини та металевої ванни	Ділянка циліндричної частини	Колоцапфена ділянка	Ділянка горловини
Вміст MgO, % за ваг.	94,5	91,0	90,5	92,0
Вміст C, % за ваг.	10,0	14,0	14,0	10,0
Відкрита шпаринність, % за об.	5,0	2,8	2,5	4,0
Уявна щільність, г/см <sup>3</sup>	2,94	2,98	2,97	3,02
Межа міцності при стисненні, МПа	35,0	30,0	35,0	35,0

Виявлення значимості показників проводилося шляхом кореляційного аналізу, виконаного за рахунок надбудови «Аналіз даних» програми Microsoft Excel. У встановлених групах факторів були побудовані графічні залежності, за якими оцінювався вплив факторів. При цьому з метою підвищення статистичної достовірності функціональної залежності розглянуті данні були розбиті на діапазони з визначенням середнього значення у кожному інтервалі. Кількість діапазонів визначалася за виразом:

$$K = \ln(N) + 1 \quad (1)$$

де N – кількість даних (для проаналізованих конвертерів K дорівнювало 4).

Таким чином для конвертера № 1 та № 2 до першого діапазону потрапило 3 та 3 компанії; до другого діапазону - 3 та 3; до третього діапазону - 3 та 3 і 3 та 2 - до четвертого діапазону відповідно.

Враховуючи, що отримані графічні залежності носять кумулятивний характер накопичення впливу різних технологічних факторів, то для встановлення одиничного впливу найбільш значимих технологічних факторів на стійкість футерівки були отримані коефіцієнти лінійної регресії. З їх використанням була побудована модель для визначення прогнозної стійкості футерівки кисневих конвертерів ємністю 60-т від технологічних факторів. Визначення коефіцієнтів лінійної регресії проводилося за рахунок використання статистичних функцій програмного продукту Microsoft Excel.

**Основні матеріали дослідження.** На першому етапі досліджень було проаналізовано технологічні показники виробництва сталі у 60-т

конвертерах. Узагальнена та усереднена технологічна інформація наведена у таблиці 2. Відповідно до даних, представлених у таблиці 2, можна зробити висновок, що показники технологічних факторів значно відрізняються і тому потребують окремого розгляду. На першому етапі комплексного аналізу даних було проведено встановлення кореляційного взаємозв'язку між технологічними параметрами процесу виплавки сталі та стійкістю футеровки кисневих конвертерів. Відповідно до нього було встановлено, що комплексний розгляд не дає встановити чіткої залежності між стійкістю футеровки та технологічними параметрами виплавки сталі (коефіцієнти кореляційного взаємозв'язку не перевищують 0,37). Таким чином для подальшого дослідження було прийнято рішення виділити групи факторів за організаційно-виробничою ознакою: організаційний (кількість плавок з додувками за температурою та вмістом вуглецю у металі; кількість операцій торкретування; кількість операцій роздуву шлаку; кількість простоїв конвертера), шихтовий режим (витрата рідкого чавуну; витрата твердої металевої складової у завалку; витрата неметалевої складової у завалку; хімічний склад чавуну; температура чавуну) та шлаковий режим (основність шлаку; вміст загального заліза у шлаку; вміст оксиду магнію, оксиду алюмінію та оксиду марганцю у шлаку). В подальшому проведення аналізу базувалось на розгляді кожної групи факторів окремо та встановлення кореляційного зв'язку в кожній з виділених підгруп.

Таблиця 2 – Діапазон технологічних показників роботи 60-т конвертера. У чисельнику наведено данні для конвертера №1, у знаменнику – для конвертера №2.

Параметри	Величина показників		
	середня	Міні	Максі
Стійкість футеровки, пл	<u>1813</u> 2006	<u>1058</u> 1433	<u>2431</u> 2733
Кількість плавок на робочому шарі, пл	<u>1379</u> 1452	<u>892</u> 978	<u>1761</u> 1844
Знос футеровки, мм за плавку	<u>0,59</u> 0,52	<u>0,41</u> 0,37	<u>0,95</u> 0,69
Кількість торкретувань, %	<u>38,7</u> 43,85	<u>20,4</u> 33,66	<u>65,8</u> 67,08
Кількість плавок з роздувом шлаку, %	<u>79,8</u> 83,35	<u>70,8</u> 66,20	<u>89,9</u> 99,88
Витрата чавуну, кг/т	<u>921,2</u> 917,10	<u>890,8</u> 895,75	<u>983,0</u> 966,79
Витрата брукхту, кг/т	<u>145,1</u> 145,52	<u>119,1</u> 116,08	<u>167,2</u> 170,20

Продовження табл. 2.

Параметри	Величина показників		
	середня	Міні	Максі
Витрата скрапу, кг/т	<u>21,80</u>	<u>14,84</u>	<u>32,2</u>
	18,87	9,74	25,36
Витрата вапна, кг/т	<u>70,5</u>	<u>63,1</u>	<u>75,9</u>
	70,69	66,32	75,93
Витрата залізовмісних брикетів, кг/т	<u>4,09</u>	<u>0,02</u>	<u>8,77</u>
	3,54	0,37	7,81
Витрата MgO вмісних брикетів, кг/т	<u>4,07</u>	<u>0,30</u>	<u>5,78</u>
	4,57	0,37	6,27
Витрата плавикового шпату, кг/т	<u>0,75</u>	<u>0,01</u>	<u>1,95</u>
	1,71	0,04	2,71
Середній вміст у чавуні Si, %мас	<u>0,83</u>	<u>0,72</u>	<u>0,91</u>
	0,82	0,69	0,91
Середній вміст у чавуні Mn, %мас	<u>0,58</u>	<u>0,28</u>	<u>0,73</u>
	0,59	0,17	0,75
Середній вміст у чавуні S, %мас	<u>0,039</u>	<u>0,031</u>	<u>0,046</u>
	0,037	0,027	0,044
Доля плавок з вмістом Si у чавуні більше 0,9%мас, %	<u>31,76</u>	<u>7,46</u>	<u>52,4</u>
	28,99	10,76	47,73
Доля плавок з вмістом Mn у чавуні менше 0,3%мас, %	<u>13,68</u>	<u>0,31</u>	<u>67,29</u>
	15,77	0,70	93,28
Доля плавок з вмістом S у чавуні більше 0,05%мас, %	<u>12,46</u>	<u>1,86</u>	<u>33,05</u>
	11,67	0,54	21,00
Доля плавок з вмістом C у металі менше 0,1%мас, %	<u>19,78</u>	<u>14,10</u>	<u>25,69</u>
	20,57	8,70	27,49
Доля плавок з температурою металу > 1640 °C, %	<u>36,13</u>	<u>22,98</u>	<u>53,91</u>
	40,13	23,80	68,70
Доля плавок з температурою металу < 1600 °C, %	<u>0,51</u>	<u>0,14</u>	<u>1,32</u>
	1,12	0,13	4,71
Середній вміст у шлаку Fe загального, %мас	<u>17,67</u>	<u>16,74</u>	<u>19,10</u>
	17,92	16,84	19,06
Середній вміст у шлаку MgO, %мас	<u>5,09</u>	<u>4,24</u>	<u>6,46</u>
	4,88	4,11	5,70
Середня основність шлаку, од	<u>3,18</u>	<u>3,06</u>	<u>3,33</u>
	3,13	2,98	3,25
Кількість плавок з рівнем основності шлаку менше 2,8 од, %	<u>5,02</u>	<u>1,49</u>	<u>12,2</u>
	8,95	1,7	20,23

Вплив параметрів шихтовки плавки на стійкість футерівки кисневих конвертерів представлений на рис. 2 - 9. Слід відзначити, що витратні показники шихтових матеріалів для обох конвертерів були на близькому рівні як за витратами рідкого чавуну і твердої металеві складової, так й за

витратою вапна. Це зумовлено однаковим тепловим режимом плавки та близьким сортаментом сталей, що виплавляються і технологічними параметрами рідкого чавуну, що використовується. Встановлено, що залежність стійкості футерівки від параметрів шихтовки плавки здебільшого носить екстремальний характер. Так, для витрати чавуну характерний зворотній характер залежності (див. рис. 2), що визначається використанням залізовмісних брикетів різного хімічного складу (див. рис. 3 різний характер залежностей для конвертерів № 1 та № 2). В період, що розглядається, використовувалися залізовмісні брикети двох різних типів: перший, що додатково містили карбід кремнію; другий - без нього. Вказаний аспект робить неможливим використання параметрів витрати рідкого чавуну та залізовмісних брикетів для аналізу впливу на стійкість.

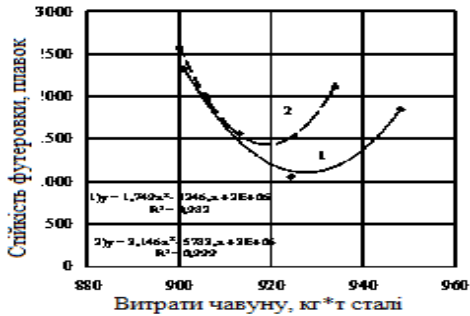


Рисунок 2 – Вплив питомої витрати чавуну на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 – 2.

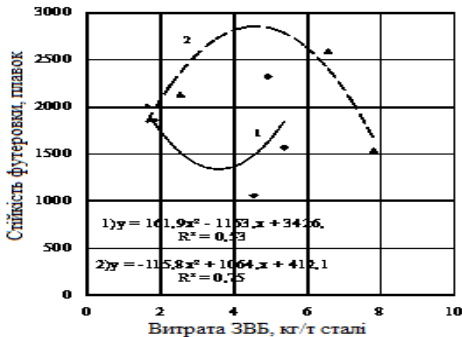


Рисунок 3 – Вплив питомої витрати залізовмісних брикетів (ЗВБ) на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 – 2.

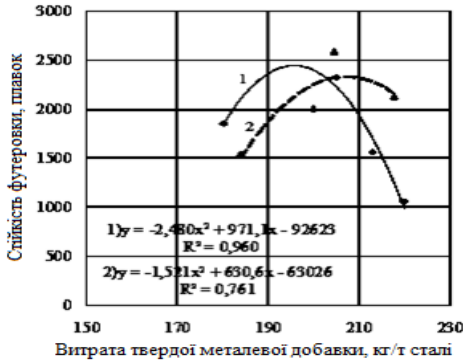


Рисунок 4 – Вплив питомої витрати твердої металевої добавки на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 – 2.

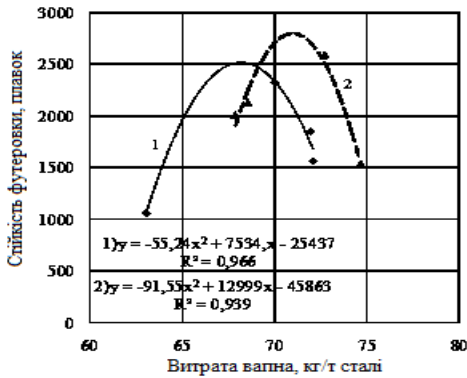


Рисунок 5 – Вплив питомої витрати вапна на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 – 2.

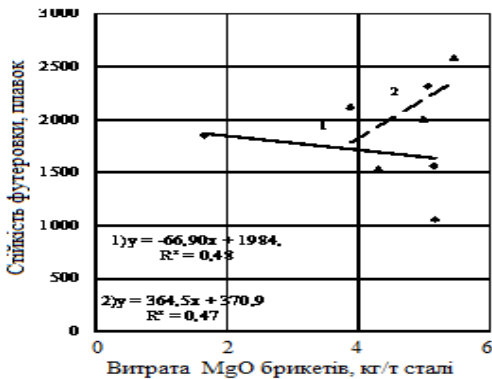


Рисунок 6 – Вплив питомої витрати магнійвмісних брикетів на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 – 2.



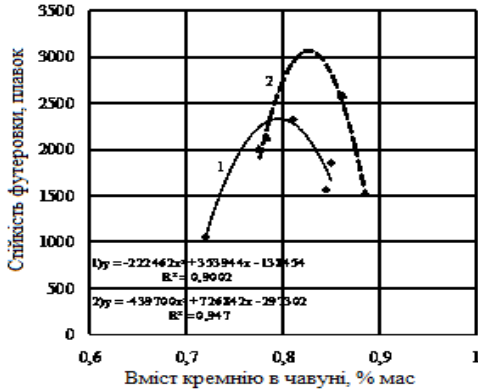


Рисунок 7 – Вплив вмісту кремнію в чавуні на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 – 2.

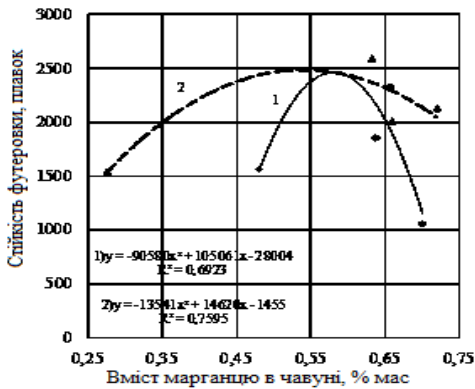


Рисунок 8 – Вплив вмісту марганцю в чавуні на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 – 2.

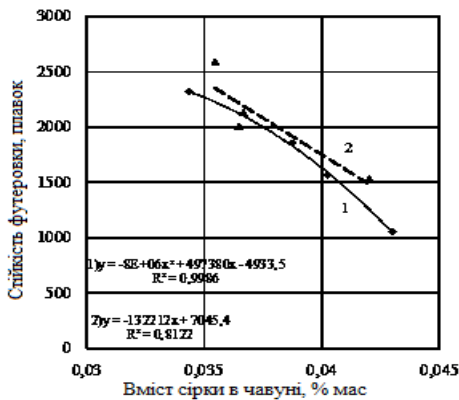


Рисунок 9 – Вплив вмісту сірки в чавуні на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 – 2.

Що стосується залежності стійкості футерівки від витрати твердої металевої добавки (див. рис 4) (сумарна витрата всіх видів твердої металевої шихти), характер її залежності мав екстремальний характер з максимізацією цільової функції при досягненні витрати 200 – 220 кг/т сталі. Це зумовлено особливостями теплової роботи кисневих конвертерів ємністю 60-тонн.

Залежність стійкості футерівки від витрати вапна (див. рис. 5) також має екстремальний характер з максимумом стійкості при витраті вапна близько 70 кг/т сталі, що зумовлено необхідністю досягнення заданої основності кінцевого шлаку і необхідного ступеня рафінування залізовуглецевого розплаву.

Відповідно до даних, наведених на рис. 6 залежність стійкості футерівки від витрати MgO вмісних брикетів має лінійний характер, що зумовлено технологічними особливостями: MgO вмісні матеріали додаються у шихту кисневих конвертерів з метою збільшення строку служби їх футерівки за рахунок досягнення концентрації насичення MgO в шлаковому розплаві та зменшення інтенсивності його надходження з вогнетривких матеріалів. Таким чином введення MgO брикетів у склад шихти кисневого конвертера дозволяє збільшити стійкість його футерівки (так для конвертера № 1 введення MgO брикетів підтримувало стійкість футерівки на певному рівні в умовах підвищеної концентрації SiO<sub>2</sub> у шлаці за рахунок введення ЗВБ з підвищеним вмістом кремнію; а для конвертера № 2 введення MgO брикетів дозволяло підвищити стійкість футерівки й відповідно строк її служби).

Вплив вмісту кремнію та марганцю в чавуні на стійкість футерівки конвертерів, що наведено на рис. 7-8, мають досить високі кореляційні показники на рівні 0,7-0,9 одиниць та проявляють екстремальний характер з максимумом стійкості футерівки при вмісті кремнію у чавуні на рівні 0,8-0,85 % мас. та марганцю приблизно 0,5 % мас. Це зумовлено особливостями теплової роботи та процесів шлакоутворення в кисневих конвертерах малої ємності. Вплив вмісту сірки на стійкість кисневого конвертера має лінійний характер (див. рис. 9) зі зворотною залежністю, що зумовлено необхідністю рафінування залізовуглецевого розплаву до заданого рівня сірки відповідно до сортаменту марок сталей, що виплавляється.

При цьому кращий рівень показнику стійкості футерівки від наведених параметрів відповідав роботі конвертера № 2. Представлені залежності кореспондуються з результатами робіт інших авторів [15-16].

Вплив шлакового режиму ведення плавки на стійкість футерівки кисневих конвертерів представлений на рис. 10 - 12.



Рисунок 10 - Вплив рівня основності шлаку на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 - 2.

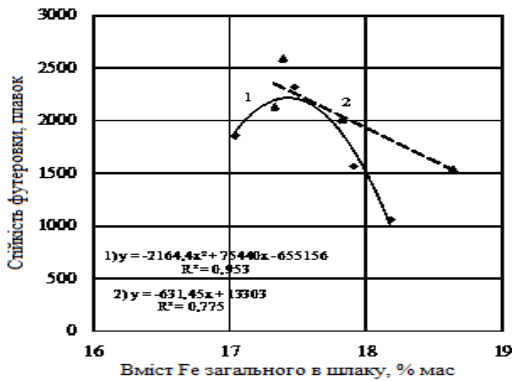


Рисунок 11 - Вплив рівня Fe загального у шлаку на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 - 2.

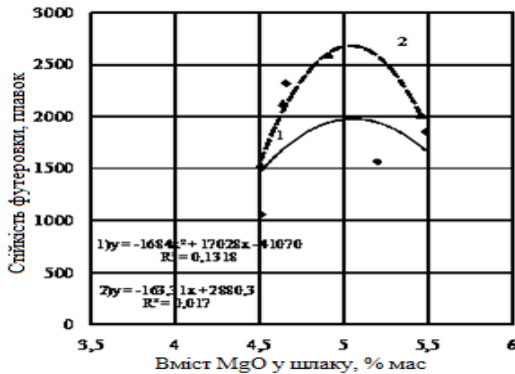


Рисунок 12 - Вплив рівня MgO у шлаку на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 - 2.

У якості параметрів шлакового режиму були розглянуті: основність, вміст загального заліза та оксиду магнію в шлаці. Раціональне збільшення

основності шлаку до величин на рівні 3,15-3,20 од. позитивно впливає на службові показники футерівки (див. рис. 10). Основність шлаку відповідає співвідношенню основних та кислотних оксидів, а саме відношенню оксидів кальцію та кремнію, тобто за її величиною можна прогнозувати можливість утворення тих чи інших сполук. Взаємодія оксидів кальцію й кремнію при конкретному співвідношенні може відповідати можливості утворення наступних хімічних сполук, що мають свої характерні температури плавлення:  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  зі співвідношенням 0,93 -  $t_{\text{плавлення}} = 1544^\circ\text{C}$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  зі співвідношенням 1,87, що є стійкою сполукою при високих температурах, має  $t_{\text{плавлення}} = 2130^\circ\text{C}$ , та зі зниженням температури до  $1440^\circ\text{C}$  переходить в  $\beta$   $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  й далі в  $\gamma$   $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  при  $840^\circ\text{C}$  з можливістю розтріскування фази при надлишку силікату,  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  зі співвідношенням 2,8 має  $t_{\text{плавлення}} = 2070^\circ\text{C}$  [17]. Тобто найвища стійкість футерівки з рівнем основності близько трьох відповідає умовам формування стійкої сполуки три кальцієвого силікату з досить високою температурою плавлення, у тому числі з можливістю ошлакування футеровки.

Вплив вмісту  $\text{Fe}_{\text{загального}}$  (див. рис. 11) також має екстремум при значенні 17-18 %мас. Причому підвищення кількості цього показника до 17-18 % відбивається на покращенні роботи футерівки. Проте, як відомо, значне (більше 20 % мас) збільшення вмісту Fe загального у шлаку призводить до значного зросту можливості формування легкоплавких сполук:  $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$  з  $t_{\text{плавлення}}=1475^\circ\text{C}$ ,  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$  з  $t_{\text{плавлення}}=1200^\circ\text{C}$ ,  $3\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$  з  $t_{\text{плавлення}}=1100^\circ\text{C}$ ;  $\text{CaO}\cdot\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ , для якого характерна  $t_{\text{плавлення}}=1223^\circ\text{C}$  [17, 18]. Це може чинити значний руйнуючий вплив через залучення до сполук та розчинення компонентів вогнетривів при умовах взаємодії з компонентами футерівки.

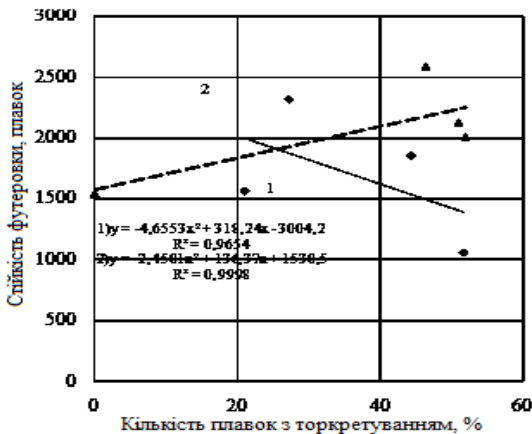
Сполука MgO надходить у шлак як з шлакоутворюючих матеріалів, так й з поверхневого робочого шару футерівки тому збільшення його у складі шлаку свідчить, перш за все, про руйнування футерівки (у випадку відсутності додаткових джерел надходження, окрім футерівки). Таким чином встановлено, що оптимальний рівень оксиду магнію повинен становити на рівні 5%, що відповідає рівноважній концентрації для умов, що розглядаються (див. рис. 12). У випадку, що розглядається підтримання оптимального рівня MgO у шлаку забезпечується за рахунок додаткового введення до складу неметалевої частини шихти матеріалів, що містять MgO, зокрема у формі брикетів. Відповідно до проведених досліджень встановлено, що залежність стійкості вогнетривкої футерівки від параметрів шлакового режиму киснево-конвертерної плавки відповідає світовій практиці виробництва сталі у кисневих конвертерах.

Вплив організаційно-технологічних показників ведення плавки у 60-т конвертерах на стійкість футерівки представлений на рис. 13 - 15.

Встановлено, що залежності стійкості футерівки від кількості операцій ремонту футерівки - торкретування мають лінійний характер з різним характером залежностей: так для конвертера № 1 спостерігається зворотна залежність, що пов'язано з більш значним впливом негативних факторів на швидкість зносу футерівки й використання операції торкретування з метою виправлення (мінімізації) зазначеного негативного впливу; для конвертера № 2 спостерігається пряма залежність стійкості футерівки від кількості операцій торкретування, що пов'язане з використанням цієї операції саме для подовження строку експлуатації футерівки без впливу інших факторів (див. рис. 13).

Залежності стійкості футерівки від операцій азотування (охолодження) мають явний позитивний тренд для всіх проаналізованих конвертерів (див. рис. 14). Це пов'язано з тим, що операція азотування додатково приводить до розбризування кінцевого конвертерного шлаку по внутрішній поверхні робочого простору та формування на його поверхні шлакового гарнісажу, що додатково захищає футерівку від зносу.

Аналіз залежності стійкості футерівки кисневих конвертерів малої ємності від кількості додувок вказує на негативний характер зазначеної операції для обох конверторів (див. рис. 15). Це зумовлено на сам перед більшою тривалістю плавки в цілому і відповідно більшим часом контакту вогнетривкої футерівки з агресивним шлаковим розплавом.



Рисунки 13 – 15 – Вплив частки плавки, проведених з торкретуванням, на стійкість футерівки 60-т конвертерів відповідно № 1 - 1, № 2 – 2.

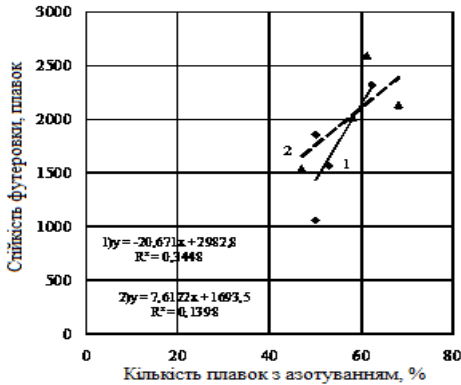


Рисунок 14 – Вплив частки плавок, проведених з азотуванням (роздувом шлаку азотом), на стійкість футерівки 60-т конвертерів № 1 - 1, № 2 – 2.

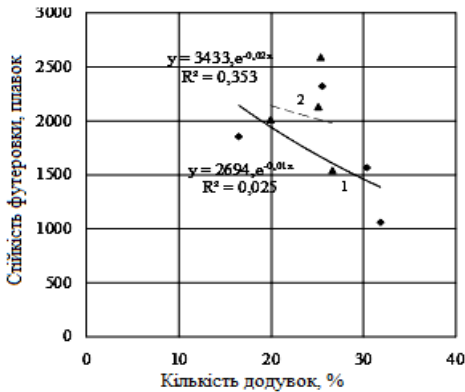


Рисунок 15 – Вплив доли плавок, проведених з додувками, на стійкість футерівки 60-т конвертерів № 1 - 1, № 2 – 2.

Узагальнюючи результати плавок, що не підлягають кількісній оцінці у наслідок не прогнозованого виникнення (таблиця 2) було оцінено вплив показників плавок, що відповідали «критичним» умовам роботи – тобто тим, що відрізнялися від рекомендованих світовою практикою (вміст марганцю в чавуні нижче 0,3 %мас., завищений рівень вмісту кремнію – вище 0,9 %мас. та сірки – вище 0,05 5 %мас., наднизький рівень вуглецю в металі на повалці – нижче 0,1 %мас., критичні показники температури металу - вище 1640 °С та нижче 1600 °С). При цьому кількість торкретувань та азотувань (операцій роздуву шлаку) для всіх конвертерів знаходилась також на порівняльному рівні відповідно: для 2-ого конвертера 43,85 % й 83,35 % та для 1-ого конвертера на рівні 38,72 % й 79,82% відповідно.

Аналіз впливу умов роботи конвертера за граничними показниками відносно хімічного складу чавуну на початку продувки плавки дозволив

встановити, що збільшення долі плавков, що проводяться з вмістом кремнію в чавуні більше 0,9 %мас., а сірки в чавуні більше 0,05 %мас призводить до зниження строку служби футеровки агрегату. Це пов'язано з природною зміною умов продувки при «екстремальних» відхиленнях від стандартного плану розвитку плавки, обумовленою необхідністю навмисно змінювати умови продувки та шлакоутворення для забезпечення отримання продукту, що відповідає технологічним вимогам. А саме при високому вмісті кремнію вміст його оксиду у шлаку також високий, що обумовлює агресивний вплив шлаку на футеровку, що значно проявляється при долі таких плавков більше 20% на всіх конвертерах. Підвищений вміст сірки потребує подвійного наведення шлаку з проміжним скачуванням, що значно агресивний вплив шлаку на футерівку вже при кількості таких плавков більше 2,5 % та при кількості таких плавков більше 20 % стійкість футеровки вже знижується нижче рівня 1000 – 1500 плавков.

Наступна серія показників роботи конвертера в граничних температурних умовах (вплив долі плавков з низьким вмістом вуглецю та температурою металу наприкінці продувки вище 1640 °С та нижче 1640°С) дозволяє зробити висновок, що продувка металу до наднизького вмісту вуглецю в металі (нижче 0,1 %мас) потребує значного «передуву» плавки з підвищенням вмісту оксиду заліза в шлаку та розігріву ванни. Це обумовлює також значний вплив на футерівку, тому отримані результати, скоріш за все займають інтервал до можливого максимуму, після якого подальше підвищення кількості плавков з низьким кінцевим вмістом вуглецю кореспондуватиме зі зниженням стійкості футеровки. Максимум скоріш за все матиме рівень близько 30-40%, тому що аналіз плавков, що проведені з підвищеною температурою (вище 1640°С), що характерно для плавков з низьким рівнем вуглецю, вказує на наявність мінімуму на цьому рівні відсотку плавков. Також і низькі (нижче 1640 °С) температури металу наприкінці продувки плавки погано відбиваються на стійкості футерівки, вже на рівні більше 1,0-1,5 %.

Порівняння роботи двох конвертерів показало, що найбільший негативний вплив температури проявлявся при роботі 1-ого конвертера. Це, ймовірно, було пов'язано з особливостями роботи цього агрегату, що мало неперіодичну роботу через нестачу технічного кисню для продувки у газопостачальній системі цеху й, відповідно, значно міг проявитися термоудар через можливість втрати температури поверхнею футерівки при простоях. Результати роботи 2-ого конвертера характеризувалися кращими показниками стійкості футерівки.

З метою прогнозування можливої стійкості футерівки конверторів емністю 60-т шляхом кореляційного аналізу у кожній з підгруп, виділених за організаційно-виробничою ознакою були виділені найбільш значимі, що

впливають на стійкість футерівки. До яких відносяться: вміст у чавуні марганцю та сірки (при чому вони знаходяться у функціональному взаємозв'язку); загальний вміст заліза у шлаку, питомо витрату вапна, металевого брухту та брикетів, що містять оксид магнію. Враховуючи функціональний взаємозв'язок між вмістом марганцю та сірки у подальшому було використано для побудови моделі їх відношення.

Математична модель залежності стійкості футерівки від зазначених технологічних факторів була отримана методом математичної регресії і мала наступний вид:

$$S = a_0 + a_1 \cdot \frac{Mn}{S} + a_2 \cdot Fe_{\text{загальний}} + a_3 \cdot M_{\text{вап}} + a_4 \cdot M_{\text{брухту}} + a_5 \cdot M_{\text{MgO}}, \quad (2)$$

де  $a_0 - a_5$  – регресійні коефіцієнти для конвертера №1 та №2 відповідно представлені у таблиці 3; Mn та S – вміст марганцю та сірки у чавуні, %;  $Fe_{\text{загальний}}$  – загальний вміст заліза у шлаку, %;  $M_{\text{вап}}$  – питома витрата вапна, кг/ т сталі;  $M_{\text{брухту}}$  – питома витрата металевого брухту, кг/ т сталі;  $M_{\text{MgO}}$  – питома витрата брикетів, що містять оксид магнію, кг/ т сталі.

Таблиця 3 – Регресійні коефіцієнти для конвертеру №1 та №2.

Конвертер	Регресійні коефіцієнти						R <sup>2</sup>
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	
№1	2518,34	29,08	-430,71	67,26	10,17	59,94	0,74
№2	4364,09	28,70	-374,56	39,85	7,22	19,08	0,82

Відповідно до даних представлених у таблиці 3 встановлено, що конвертер № 2 працював у більш збалансованих умовах, що підтверджується значно вищим значенням коефіцієнту кореляції.

Таким чином, для прогнозування стійкості футерівки конвертерів ємністю 60-т запропоновано саме регресійні коефіцієнти визначені для конвертера №2. З метою перевірки адекватності отриманої регресійно-статистичної моделі було проведено співставлення розрахункових показників зі статистичними (рис. 16). Відповідно до даних представлених на ньому, всі розглянуті значення стійкості є близькими до модельних значень. При цьому середнє відхилення прогнозних показників від фактичних складає 4,7%, що дозволяє використовувати розроблену модель у промислових умовах.

### Висновки

Виконано комплексний аналіз впливу технологічних показників виплавки сталі на стійкість футерівки конвертерів ємністю 60-т. В ході виконання досліджень з'ясовано, що для більш вірного тлумачення впливу певних факторів на стійкість футерівки кисневих конвертерів необхідно групувати фактори за організаційно-виробничою ознакою та проводити



детальний аналіз саме у кожній з груп. За результатами кореляційного та регресійного аналізу отримано рівняння, що дозволяє прогнозувати стійкість футеровки конверторів ємністю 60-т. Отримане рівняння може бути використане у промислових умовах для прогнозування стійкості футеровки.

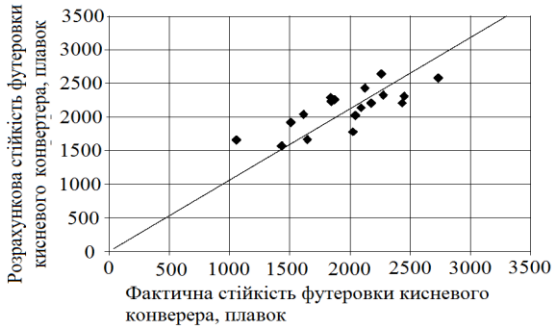


Рисунок 16 – Співставлення фактичних даних з розрахунковими для регресійно-статистичної моделі прогнозу стійкості вогнетривкої футеровки кисневих конверторів ємністю 60-т.

#### Перелік посилань

1. Смирнов А. Н. Перспективы развития рынка огнеупоров для сталеплавильного комплекса Украины. *Металл и литье Украины*. 2010. № 11. С. 3-7.
2. Суворов С. А., Козлов В. В. Эксплуатация футеровок и конструкций, выполненных из огнеупорных материалов. Санкт-Петербург : СПбГИ(ТУ), 2011. 147 с.
3. Kiyoto Kasai. Recent advances in refractories technology for steelmaking. *Nipponsteel technical report*. 1994. no. 61. P 83-88
4. Martino M., Fenu M., Anfosso A. Refractory Lining for Oxygen Converters: Recent Experiences in this Field. Proceedings of 5th European Steelmaking Conference, 26-28 June, 2006, Aachen, Germany. Dusseldorf : Steel Institute VDEh, 2006. P. 229-233.
5. Бабенко А. А. Выбор рациональных направлений повышения износоустойчивости магниальной футеровки конвертеров. *Новые огнеупоры*. 2005. № 1. С. 26-28.
6. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: підручник. Дніпропетровськ : РВА“Дніпро-ВАЛТ”, 2006. 456 с.
7. Sinelnikov V. O., Kalisz D. Influence the FeO content on slag viscosity at his spraying. Increase the life of the refractory lining. *GlassCeram.*, 2016, Vol. 73, № 3-4, P. 144-148. <https://doi.org/10.1007/s10717-016-9844-5>
8. Зражевський А. Д., Альперович Я. Л., Егоров Ю. Г., Охотський В. Б. Анализ причин износа футеровки конвертера. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1996. № 4. С. 16-18.

9. Пищида В. И., Бойченко Б. М., Низяев К. Г., Кравец С. Н., Тарнавский М., Шибко А. В. Служба периклазоуглеродистых огнеупоров в горловине конвертера. *Новые огнеупоры*. 2005. № 2. С. 23-25.
10. 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. *Теорія й практика металургії*, 2018. № 6. С. 22-33. <https://doi.org/10.34185/trp.6.2018.3>
11. Заспенко А. С., Низяев К. Г., Стоянов А. Н., Молчанов Л. С., Сигарев Е. Н. Динамика износа футеровки кислородных конвертеров в условиях ПАО «ЕВРАЗ – ДМЗ им.Петровского». *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 3. С. 20-22
12. Заспенко А. С., Низяев К. Г., Стоянов А. Н., Молчанов Л. С. Анализ влияния технологических факторов на интенсивность износа футеровки кислородных конвертеров. *Металл и литье Украины*. 2013. № 8. С. 16-17.
13. Воронина О. Б., Ушаков С. Н., Захаров И. М. и др. Опыт эксплуатации периклазоуглеродистых футеровок конвертеров. *Сталь*. 2009. № 10. С. 28-29.
14. Кашеев Д. А. Свойства и применение огнеупоров : справочное издание. Москва : Теплотехник, 2004. 352 с.
15. Пищида В. И., Бойченко Б. М., Величко А. Г., Шибко А. В., Душа В. М. Зависимость стойкости футеровки конвертеров от параметров сталеплавильного процесса. *Металл и Литье Украины*. 2003. № 5. С. 18-19.
16. Пищида В. И., Бойченко Б. М., Величко А. Г., Шибко А. В. Зависимость стойкости периклазоуглеродистой футеровки конвертеров от технологических параметров сталеплавильного процесса. IV Miedzunarodowa Sesja Naukowa, Seria Metalurgia, Czeestochowa, 2003, № 31. С. 47-51.
17. Жмойдин Г. И., Куликов И. В. Атлас шлаков. Москва : Металлургия. 1985. 207 с.
18. Ястребинский Р. Н., Павленко З. В. Структурно-фазовые превращения в системе CaO-FeO и FeO-SiO<sub>2</sub> при высокотемпературном воздействии. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 12. С. 165-169.

## References

1. Smirnov A.N. (2010). Perspektivy razvitiya rynka ogneuporov dlya staleplavil'nogo kompleksa Ukrainy [Prospects for the development of the refractory market for the steel-smelting complex of Ukraine]. *Metall i lit'ye Ukrainy [Metal and casting of Ukraine]*, 2010, 11, 3-7 [In Russian].
2. Suvorov S.A., Kozlov V.V. (2011). *Ekspluatatsiya futerovok i konstruksiy, vypolnennykh iz ogneupornykh materialov [Operation of linings and structures made from refractory materials]*. Sankt-Peterburg: SPbGTI(TU), 2011. 147. [In Russian].
3. Kiyoto Kasai. (1994). Recent advances in refractories technology for steelmaking. *Nipponsteel technical report*, 1994, 61, 83-88.
4. Martino M., Fenu M., Anfosso A. (2006). Refractory Lining for Oxygen Converters: Recent Experiences in this Field. *Proceedings of 5th European Steelmaking*

- Conference, 26-28 June, 2006, Aachen, Germany. Dusseldorf: Steel Institute VDEH, 2006. (p.p. 229-233).
5. Babenko A.A. (2005). Vybor ratsional'nykh napravleniy povysheniya iznosoustoychivosti magnezial'noy futerovki konverterov [The choice of rational directions for increasing the wear resistance of the magnesial lining of converters]. *Novyye ognepury [New refractories]*, 2005, 1, 26-28. [In Russian].
  6. Boychenko B.M., Okhotskiy V.B., Kharlashyn P.S. (2006). *Konverterne vyrobnytstvo stali: teoriya, tekhnolohiya, yakist stali, konstruktsiyi ahrehativ, retsyrkulyatsiya materialiv i ekolohiya [Converter steel production: theory, technology, steel quality, unit design, material recycling and ecology]*. Dnipropetrovsk: RVA“Dnipro-VAL”, 2006. 456 p. [In Ukrainian].
  7. Sinelnikov V.O., Kalisz D. (2016). Influence the FeO content on slag viscosity at his spraying. Increase the life of the refractory lining. *GlassCeram.*, 2016, Vol. 73, 3-4, 144-148. <https://doi.org/10.1007/s10717-016-9844-5>
  8. Zrazhevskiy A.D., Al'perovich YA.L., Yegorov YU.G., Okhotskiy V.B. Analiz prichin iznosa futerovki konvertera [Analysis of the Causes of Converter Lining Wear]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*, 1996, 4, 16-18. [In Russian].
  9. Pishchida V.I., Boychenko B.M., Nizyayev K.G., Kravets S.N., Tarnavskiy M.S., Shibko A.V. (2005). Sluzhba periklazouglerodistykh ognepurov v gorlovine konvertera [Service of periclase-carbon refractories in the neck of a converter]. *Novyye ognepury [New refractories]*, 2005, 2, 23-25. [In Russian].
  10. Velychko O.H., Boychenko B. M., Mazov M.M., Stoyanov O.M., Synehin YE.V., Vasylyev D.P. (2018). Vymohy do peryklazovuhletsevykh vohnetryviv dlya futerovky konverteriv y osoblyvosti staleplavlynoyi tekholohiyi za yikh vykorystannya [Requirements for madnesium-carbon refractories for bof lining and features of steelmaking technology in its use]. *Teoriya y praktyka metalurhiyi [Theory and practice of metallurgy]*, 2018, 6, 22-33. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.3>
  11. Zaspenko A.S., Nizyayev K.G., Stoyanov A.N., Molchanov L.S., Sigarev Ye.N. (2015). Dinamika iznosa futerovki kislorodnykh konverterov v usloviyakh PAO «YEVRAZ – DMZ im. Petrovskogo» [Dynamics of wear of the lining of oxygen converters under the conditions of PJSC EVRAZ-DMZ im. Petrovsky"]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' [Metallurgical and mining industry]*, 2015, 3, 20-22. [In Russian].
  12. Zaspenko A.S., Nizyayev K.G., Stoyanov A.N., Molchanov L.S. (2013). Analiz vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov na intensivnost' iznosa futerovki kislorodnykh konverterov [Impact of technological factors on the intensity of wear of BOF lining]. *Metall i lit'ye Ukrainy [Metal and casting of Ukraine]*, 2013, 8, 16-17. [In Russian].
  13. Voronina O.B., Ushakov S.N., Zakharov I.M. et al. (2009). Opyt ekspluatatsii periklazouglerodistykh futerovok konverterov [Experience in operation of periclase-carbon converter linings]. *Stal' [Steel]*, 2009, 10, 28-29. [In Russian].
  14. Kashcheyev D.A. (2004). *Svoystva i primeneniye ognepurov [Properties and application of refractories]*. Moskva: Teplotekhnika, 2004. 352 p. [In Russian].

15. Pishchida V.I., Boychenko B.M., Velichko A.G., Shibko A.V., Dusha V.M. (2003). Zavisimost' stoykosti futerovki konverterov ot parametrov staleplavil'nogo protsessa [Dependence of converter lining durability on the parameters of the steelmaking process]. *Metall i Lit'ye Ukrainy [Metal and Casting of Ukraine]*, 2003, 5, 18-19. [In Russian].
16. Pishchida V.I., Boychenko B.M., Velichko A.G., Shibko A.V. (2003). Zavisimost' stoykosti periklazouglerodistoy futerovki konverterov ot tekhnologicheskikh parametrov staleplavil'nogo protsessa [Dependence of the durability of periclase-carbon lining of converters on the technological parameters of the steelmaking process]. *IV Miedzunarodowa Sesja Naukowa, Seria Metalurgia [IV International Scientific Session, Metallurgy Series]*, 2003, 31, 47-51. [In Russian].
17. Zhmoydin G.I., Kulikov I.V. (1985). *Atlas shlakov [Atlas of Slags]*. Moskva: Metallurgiya. 1985, 207 p. [In Russian].
18. Yastrebinskiy R.N., Pavlenko Z.V. (2016). Strukturno-fazovyie prevrashcheniya v sisteme CaO-FeO i FeO-SiO<sub>2</sub> pri vysokotemperaturnom vozdeystvii [Structural-phase transformations in the CaO-FeO and FeO-SiO<sub>2</sub> system under high-temperature exposure]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]*, 2016, 12, 165-169. <https://doi.org/10.12737.22714> [In Russian].

**A. G. Chernyatevich**, Dr. Sci., r. Prof.; ORCID 0000-0002-4552-4997

**L. S. Molchanov**, PhD; ORCID 0000-0001-6139-5956

**T. I. Golub**, PhD; ORCID 0000-0001-9269-2953

**S. I. Semykin**, PhD, Senior Researcher; ORCID 0000-0002-7365-2259

*Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

## TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF OPERATION OF PERICLASE-CARBON REFRACTORIES IN LOW-CAPACITY CONVERTERS

**Summary.** The aim of this study is to establish the functional relationships between different groups of factors of production and the stability of the lining of small-volume converters. At the stage of development of world metallurgy, the oxygen-converter process is the most popular way of producing structural steel. Its main difference is high productivity, which is determined by the duration of maintenance-free periods of smelting units. Under the current conditions, it is possible to increase productivity and reduce the cost of steel production in converters by increasing the stability of refractory linings. Thus it is relevant and necessary to assess the factors influencing the stability of the lining and the search for rational technological conditions for its operation. A statistical analysis over a five-year period of the work of two 50-ton converters with top blowing, which was lined with periclase carbon heat-treated refractories, was conducted. It was established that the dependences of the lining stability on the consumption indicators of charge materials are extreme: the consumption of hot metal at the level of 920-930 kg/t of steel corresponds to the lowest indicators of the lining stability; scrap consumption at the level of 200 - 220 kg/t of steel and lime consumption at the level of 70-75 kg/t of steel correspond to the

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2021. – Випуск 35  
«Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoј metallurgii». – 2021. – Vypusk 35  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2021. – Collection 35

best working conditions of the lining. Regarding the chemical composition of processed hot metal, the best working conditions of the lining correspond to the content of silicon in it at the level of 0.80-0.85% of the mass and manganese - 0.50-0.60% of the mass.

Researches shown that in order to more accurately interpret the impact of certain factors on the stability of the lining of oxygen converters, it is necessary to group factors by organizational and production characteristics and conduct a detailed analysis in each of the groups. According to the results of correlation and regression analysis, the equation was obtained, which allows to predict the stability of the lining of converters with a capacity of 50 tons. The resulting equation can be used in industrial conditions to predict the stability of the lining.

**Key words:** oxygen converter, periclase-carbon lining, correlation analysis.

**For citation:** *Chernyatevich A.G., Molchanov L.S., Golub T.S., Semykin S.I. Tekhnolohichnyy analiz efektyvnosti ekspluatatsiyi peryklazo-vuhletsevykh vohnetryviv v konverterakh maloyi yemnost [Technological analysis of the efficiency of operation of periclase-carbon refractories in low-capacity converters]. Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy], 2021, 35, 275-295. (In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2021-35-275-295*

*Стаття надійшла до редакції збірника 15.12.21 року,  
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування  
(Протокол засідання редакційної колегії  
збірника № 4 від 22 грудня 2021 року)*