

УДК 669.184

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.109075

А.Г. Чернятевич, Л.С. Молчанов, П.О. Юшкевич\*

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

## УТОЧНЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ РАФІНУВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЇ ВАННИ ПІД ЧАС ПРОДУВКИ ЧЕРЕЗ ТРИЯРУСНУ КИСНЕВУ ФУРМУ

**Background.** In modern conditions, the BOP-process is the main method of mass use steel product production. At the same time, due to the shortage of high-quality charge materials, resource and energy-saving technologies are particularly relevant. To optimize the BOP-process under modern conditions, it is promising to use improved oxygen lances for top blowing in comparison with known designs.

**Objective.** An important stage in the development of advanced steel production technologies is obtaining information on the thermodynamic model of blowing a converter bath through a three-tier lance with the elaboration of the regularities of oxidation processes within the reaction zone of a 160-ton industrial converter.

**Methods.** The analysis that was carried out has a theoretical nature and is based on the definition of the influence of temperature and pressure on the regularities of oxidation processes within the reaction zones formed when oxygen jets are introduced into the volume of a metal bath, foamed slag-metallic emulsion and waste gases in the working space of the converter. As a thermodynamic parameter, the Gibbs energy was used to estimate the probability of chemical reactions. The pressure effect on the oxidation processes in the converter bath was evaluated in accordance with the Van't Hoff formula.

**Results.** The thermodynamic features of oxidation processes in the 160-ton BOF bath using a three-tier lance are presented. Primary reaction zone is characterized by the occurrence of oxidation of manganese, silicon, carbon, and iron by gaseous oxygen. In the secondary reaction zone there are chemical reactions of the oxidation of silicon and carbon dissolved in the metal by oxygen, as well as the reduction of iron oxide by carbon. The presence or absence of a slag phase on the melt surface practically does not affect the occurrence probability of chemical transformations within the boundary of primary and secondary reaction zones. The additional secondary oxygen jets are characterized by oxidation of the oxide components of the slag and gas phases.

**Conclusions.** During the research it was clarified the thermodynamical model of the oxidation processes in primary and secondary reaction zones, that were formed due to the interaction of 160-ton BOF bath with the supersonic and sonic oxygen jets flowing out of the separate groups of nozzles (of Laval and cylindrical shapes) of top three-level oxygen lance.

**Keywords:** thermodynamical analysis; BOF; three-level oxygen lance; reaction zone; bath refinement; Gibbs energy; pressure; temperature.

### Вступ

У сучасних умовах киснево-конвертерний процес є основним способом виробництва металопродукції масового призначення. При цьому у зв'язку з дефіцитом якісних шихтових матеріалів особливо актуальними є ресурсо- й енергоощадні технології. Для оптимізації конвертерного виробництва сталі в сучасних умовах перспективним є використання вдосконалених порівняно з відомими [1] конструкцій двоярусних кисневих фурм. Як відомо, крім поліпшення теплового балансу конвертерної плавки, їх застосування супроводжується низкою технологічних проблем (значним збільшенням швидкості руйнування футерівки агрегату, підвищенням витрати розкисників і зниженням виходу рідкої сталі через переокиснення кінцевого залізвуглецевого напівпродукту і шлаку). З метою усунення зазначених

недоліків авторами запропоновано дуттєвий пристрій удосконаленої конструкції – триярусну кисневу фурму [1] для верхньої продувки конвертерної ванни з модернізованою системою підведення до неї двох незалежно регульованих потоків технологічних газів (кисню, азоту).

Враховуючи, що запропонована технічна розробка є новітньою, необхідно визначити особливості перебігу хімічних перетворень, які відбуваються в кисневому конвертері при застосуванні триярусної кисневої фурми. На сьогодні встановлено термодинамічні особливості перебігу хімічних перетворень у кисневому конвертері при застосуванні фурм класичної, двоярусної та двоконтурної конструкції [2, 3], проте отримані при цьому результати не в повному обсязі відображають реальну фізико-хімічну картину. Зазначений вище аспект пов'язаний із неврахуванням впливу тиску на перебіг хімічних перетворень.

\* corresponding author: Isi.dps.jr@gmail.com

### Постановка задачі

У сучасній металургійній науці завдання з визначення особливостей перебігу хімічних перетворень у кисневому конвертері при використанні фурм різної конструкції вирішується за рахунок проведення термодинамічного аналізу. Мета роботи – уточнення термодинамічної моделі окисних процесів у первинній та вторинній реакційних зонах, що виникають у ванні кисневого конвертера при введенні звукових і надзвукових струменів кисню.

### Методика проведення досліджень

Для ефективного впровадження розробленої конструкції триярусної фурми у виробничі умови необхідно уточнити особливості фізико-хімічної взаємодії кисневих струменів різних ярусів із конвертерною ванною. Тому важливим етапом створення прогресивних технологій виробництва сталі було отримання інформації щодо термодинамічної моделі організації запропонованого способу продувки конвертерної ванни через триярусну фурму (рис. 1, табл. 1) з уточненням закономірностей перебігу окисних процесів у межах реакційної зони робочого простору 160-тонного промислового конвертера за витрат

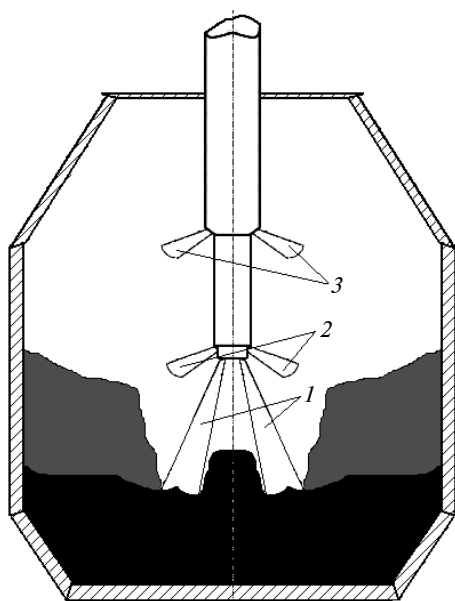


Рис. 1. Схема триярусної фурми для здійснення верхньої кисневої продувки ванни 160-тонного конвертера: 1 – 1-й ярус основних надзвукових кисневих струменів; 2 – 2-й ярус звукових кисневих струменів; 3 – 3-й ярус звукових кисневих струменів

основного ( $360 \text{ м}^3/\text{хв}$ ) і додаткового ( $30 \text{ м}^3/\text{хв}$ ) кисню, що і стало завданням цього дослідження.

Таблиця 1. Основні конструктивні параметри триярусної кисневої фурми

Розміщення сопел	Основні характеристики сопел			
	Тип сопел	Кількість	Кут нахилу до вертикальної осі, град	Діаметр проходного перерізу, мм
1-й ярус	Лаваля	4	12	41
2-й ярус	Циліндричні	8	30	9
3-й ярус	Циліндричні	8	30	13

Проведений аналіз має теоретичний характер і базується на виявленні впливу температури й тиску на закономірності перебігу окисних процесів у межах реакційних зон, що формуються при проникненні кисневих струменів у об'єм металеві ванни, спіненої шлакометалевої емульсії та газів, що відходять у робочому просторі конвертера. Як термодинамічний параметр для оцінки ймовірності перебігу хімічних реакцій була використана енергія Гіббса. При цьому вплив тиску на окисні процеси в конвертерній ванні оцінювали відповідно до формули Вант-Гоффа [4]:

$$\Delta G_T = -RT \cdot \ln K_p + RT \cdot \sum n \cdot \ln P,$$

де  $-RT \cdot \ln K_p$  – вираз, що визначає залежність значення енергії Гіббса від температури;  $n$  – число молей різних газоподібних речовин, які беруть участь у хімічній реакції;  $P$  – тиск, що діє на хімічну систему, атм.;  $R$  – універсальна газова стала:  $R = 8,314 \text{ Дж/град}$ ;  $T$  – температура, за якої відбувається реакція, К.

Константа рівноваги хімічної реакції визначалася з рівнянь температурної залежності, наведених у табл. 2. У сучасній теорії киснево-конвертерної плавки виокремлюють такі реакційні зони перебігу фізико-хімічних перетворень, що принципово відрізняються одна від одної [5–7]: первинна реакційна зона (безпосередній контакт кисневих струменів із рідким металевим розплавом); вторинна реакційна зона (перебіг процесів окиснення домішок у розплаві за рахунок взаємодії з розчиненим киснем і оксидами заліза); зона дії додаткових кисневих струменів (допалення  $\text{CO}$  до  $\text{CO}_2$ , окиснення  $\text{FeO}$  до  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Таблиця 2. Розподіл реакцій хімічних перетворень і температурні залежності константи рівноваги, що їм відповідають [6, 7]

№	Місце перебігу хімічної реакції	Хімічне рівняння реакції	Вираз для розрахунку константи рівноваги реакції
1	Первинна реакційна зона (1 р.з.)	$1/2\{O_2\} = [O]$	$\lg K = 6119/T + 0,15$
2		$[Fe] + 1/2\{O_2\} = (FeO)$	$\lg K = 12439/T - 2,584$
3		$[Mn] + 1/2\{O_2\} = (MnO)$	$\lg K = 18880/T + 4,56$
4		$[Si] + \{O_2\} = (SiO_2)$	$\lg K = 43060/T - 11,46$
5		$[C] + 1/2\{O_2\} = \{CO\}$	$\lg K = 7280/T + 2,15$
6		$[C] + \{O_2\} = \{CO_2\}$	$\lg K = 21880/T - 2,29$
7		$\{CO\} + 1/2\{O_2\} = \{CO_2\}$	$\lg K = 14600/T - 4,44$
8		$2(FeO) + 1/2\{O_2\} = (Fe_2O_3)$	$\lg K = 15952/T - 3,33$
9		$[Fe] = \{Fe\}$	$\lg K = -18280/T + 5,86$
10		$(FeO) = \{FeO\}^*$	$\lg K = (-21000/T + 7,54)/\lg a_{FeO}$
11		$[Mn] = \{Mn\}$	$\lg K = -12052/T + 4,98$
12		$(MnO) = \{MnO\}$	$\lg K = -20320/T + 5,86$
13		$[Si] = \{Si\}$	$\lg K = -21200/T + 5,74$
14		$(SiO_2) = \{SiO_2\}$	$\lg K = -25580/T + 8,40$
15		$[Si] + 1/2\{O_2\} = \{SiO\}$	$\lg K = 1039/T - 1,31$
16		$[S] + \{O_2\} = \{SO_2\}$	$\lg K = 12664/T - 3,01$
17		$2[P] + 5/2\{O_2\} = (P_2O_5)$	$\lg K = 67447/T - 28,32$
18	Вторинна реакційна зона (2 р.з.)	$[Fe] + [O] = (FeO)$	$\lg K = 6320/T - 2,73$
19		$[C] + [O] = \{CO\}$	$\lg K = 1168/T + 2,07$
20		$[C] + 2[O] = \{CO_2\}$	$\lg K = 9616/T - 2,51$
21		$[Mn] + [O] = (MnO)$	$\lg K = 12760/T - 5,68$
22		$[Si] + 2[O] = (SiO_2)$	$\lg K = 30720/T - 11,77$
23		$[Si] + [O] = \{SiO\}$	$\lg K = -5080/T - 1,46$
24		$2[P] + 5[O] = (P_2O_5)$	$\lg K = 36852/T - 29,07$
25		$[S] + 2[O] = \{SO_2\}$	$\lg K = 426/T - 3,31$
26		$[Si] + 2(FeO) = (SiO_2) + 2[Fe]$	$\lg K = 20200/T - 10,60$
27		$[Mn] + (FeO) = (MnO) + [Fe]$	$\lg K = 6440/T - 2,95$
28		$2[Mn] + (SiO_2) = 2(MnO) + [Si]$	$\lg K = -5200/T + 0,40$
29		$\{CO\} + (FeO) = \{CO_2\} + [Fe]$	$\lg K = 2160/T - 1,86$
30		$[C] + (FeO) = \{CO\} + [Fe]$	$\lg K = -5160/T + 4,74$
31		$[C] + (MnO) = \{CO\} + [Mn]$	$\lg K = -5272/T + 5,02$
32		$[C] + \{CO_2\} = 2\{CO\}$	$\lg K = -7288/T - 6,58$
33		$[O] + \{CO\} = \{CO_2\}$	$\lg K = 8448/T - 4,58$
34		Зона взаємодії кисневих струменів 3-го ярусу	$2(FeO) + 1/2\{O_2\} = (Fe_2O_3)$
35	$3(FeO) + 1/2\{O_2\} = (Fe_3O_4)$		$\lg K = 21027/T - 8,87$
36	$4(Fe_3O_4) + \{O_2\} = 6(Fe_2O_3)$		$\lg K = 26066/T - 14,7$
37	$6(FeO) + \{O_2\} = 2(Fe_3O_4)$		$\lg K = 36623/T - 13,07$
38	$\{CO_2\} + 2(FeO) = (Fe_2O_3) + \{CO\}$		$\lg K = 1350/T + 1,10$
39	$\{CO\} + (FeO) = \{CO_2\} + [Fe]$		$\lg K = 2164/T - 1,85$
40	$\{CO\} + 1/2\{O_2\} = \{CO_2\}$		$\lg K = 14600/T - 4,44$

\* $a_{FeO}$  визначена відповідно до псевдопотрійної діаграми.

Надмірний тиск ( $P_{\text{пов}}$ ) був обчислений з урахуванням глибини проникнення надзвукових і звукових кисневих струменів, що витікали відповідно із сопел Лавалю та циліндричних кінцевика триярусної фурми, в обсяг металевої ванни 160-тонного конвертера згідно з виразом

$$P_{\text{пов}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{гідр.стат.}}, \text{ Па,}$$

де  $P_{\text{атм}}$  – атмосферний тиск, Па;  $P_{\text{гідр.стат.}}$  – гідростатичний тиск стовпа металу і шлаку, що діє на реакційну зону, Па.

Величина гідростатичного тиску визначається з урахуванням довжини первинної ( $L_{\text{Imin}}$ ) і вторинної ( $L_{\text{IImin}}$ ) реакційних зон, які утворені при взаємодії надзвукових і звукових кисневих струменів у металевому розплаві за витрат кисню 330 і 30 м<sup>3</sup>/хв відповідно на групи сопел Лавалю і циліндричних кінцевика фурми та за робочої висоти розміщення останньої над рівнем ванни 1,1 м. Значення  $L_{\text{Imin}}$  і  $L_{\text{IImin}}$  розраховували з використанням рівнянь [8, 9]:

$$L_{\text{Imin}}(H_{\text{ф}}^{\text{роб}} + L_{\text{Imin}})^2 = 75,1 \cdot \frac{i_{\text{O}_2}^{\text{в}}}{\rho_{\text{м}} \cdot g \cdot \cos \alpha};$$

$$L_{\text{IImin}}(H_{\text{ф}}^{\text{роб}} + L_{\text{IImin}})^2 = 205,3 \cdot \frac{i_{\text{O}_2}^{\text{в}}}{\rho_{\text{м}} \cdot g \cdot \cos \alpha},$$

де  $H_{\text{ф}}^{\text{роб}}$  – робоча висота розміщення фурми над рівнем спокійної ванни, м;  $i_{\text{O}_2}^{\text{в}}$  – імпульс кисневого струменя, Н;  $\rho_{\text{м}}$  – густина рідкої сталі (7000 кг/м<sup>3</sup>);  $g$  – прискорення вільного падіння (9,81 м/с<sup>2</sup>);  $\cos \alpha$  – косинус кута нахилу сопел до вертикальної осі фурми.

Своєю чергою імпульс кисневого струменя ( $i_{\text{O}_2}^{\text{в}}$ ) визначається з урахуванням розмірів діаметра сопла ( $d$ ), густини ( $\rho_{\text{вит}}$ ), швидкості ( $w_{\text{вит}}$ ), а також тиску ( $P_{\text{вит}}$ ) газу, що витікає, і тиску навколишнього середовища ( $P_{\text{сер}}$ ) за виразом

$$i_{\text{O}_2}^{\text{в}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot [\rho_{\text{вит}} \cdot w_{\text{вит}}^2 + (P_{\text{вит}} - P_{\text{сер}})].$$

Довжина факелів ( $L_{\text{ф}}$ ), що утворюються при допаленні СО до СО<sub>2</sub> під час подачі додаткового кисню через групи циліндричних сопел 3-го ярусу, визначалася відповідно до виразу [10]

$$L_{\text{ф}} = 0,373 \cdot \sqrt{Q_{\text{гол.}}^{\text{I, дод.}}}, \text{ м,}$$

де  $Q_{\text{гол.}}^{\text{I, дод.}}$  – витрата додаткового кисню на сопла 3-го ярусу фурми, в розглядуваному випадку 30 м<sup>3</sup>/хв.

З урахуванням того, що кисневі струмені проникають в об'єм розплаву під певним кутом до нормалі, справжня висота стовпа металевого розплаву ( $L_{\text{мет}}$ ) може бути визначена за формулою

$$L_{\text{мет}} = L_{\text{I}}^{\text{min}} \cdot \cos \alpha.$$

Термодинамічний аналіз процесів окиснення домішок в умовах продувки конвертерної ванни із застосуванням триярусної кисневої фурми проводився в діапазоні температур 1300–2300 °С з урахуванням впливу кількості шлаку, що утворюється. Відповідно до результатів статистичного аналізу даних із виробництва сталі в кисневих конвертерах покладається, що кількість шлаку становить 12 % від загальної кількості рідкої сталі [11].

### Результати дослідження

Процес продувки конвертерної ванни киснем розбитий на 3 періоди, що принципово відрізняються один від одного: початок плавки (на поверхні ванни практично відсутній шлак); перша третина продувки (на поверхні розплаву міститься сформована шлакова фаза); інтенсивне окиснення вуглецю (над металеву ванною розміщується спінена шлакометалева емульсія). При проведенні досліджень визначені величини глибини реакційних зон для розглянутих випадків взаємодії кисневих струменів триярусної фурми з конвертерною ванною (рис. 2).

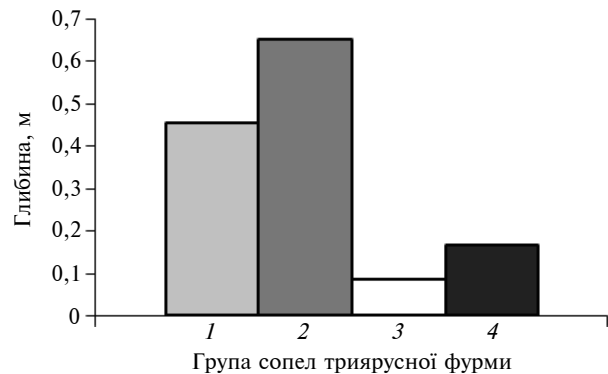


Рис. 2. Глибини первинної і вторинної реакційних зон, що утворені струменями різних груп сопел триярусної фурми при продувці конвертерної ванни: 1 – сопла Лавалю 1 р.з., 2 – сопла Лавалю 2 р.з., 3 – циліндричні сопла 2-го ярусу 1 р.з., 4 – циліндричні сопла 2-го ярусу 2 р.з.

На підставі наведених даних (див. рис. 2) можна припустити, що звукові струмені, які витікають із циліндричних сопел кінцевика, проникають у ванну поблизу верхніх границь реакційних зон, сформованих надзвуковими кисневими струменями із сопел Лаваля, що пов'язано зі значним перевищенням глибини проникнення останніх у металевий розплав. Довжина утворених факелів при допалюванні CO до CO<sub>2</sub> кисневими струменями, що витікають із циліндричних сопел 3-го ярусу, свідчить на користь виключення їх взаємодії з поверхнею металевої ванни.

З урахуванням глибини проникнення кисневих струменів у металеву ванну були визначені величини тиску (табл. 3), який впливає на перебіг реакцій у зоні впливу кисневих струменів на металевий розплав (табл. 2).

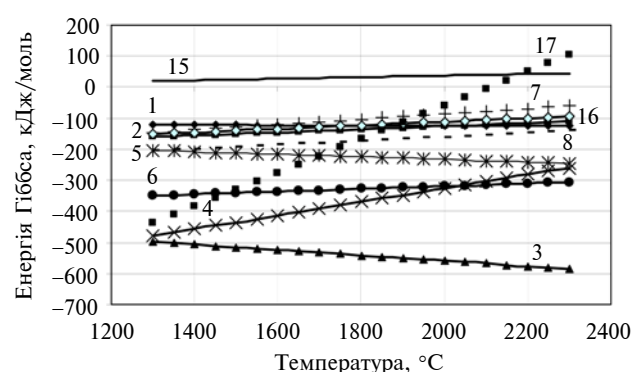
**Таблиця 3.** Тиск, що впливає на перебіг окисних процесів у реакційних зонах для різних умов і груп сопел триярусної фурми, атм.

Параметр	На поверхні металу шлак відсутній	На поверхні металу шлак	На поверхні металу спінена шлакометалева емульсія
1 р.з. від сопел Лаваля	1,310	1,396	1,396
2 р.з. від сопел Лаваля	1,442	1,528	1,528
1 р.з. від циліндричних сопел 2-го ярусу	1,058	1,145	1,145
2 р.з. від циліндричних сопел 2-го ярусу	1,113	1,199	1,199
Циліндричні сопла 3-го ярусу	1,000	1,000	1,086

Як виявилось, наявність шлакової фази на поверхні металевого розплаву незначною мірою впливає на умови перебігу хімічних реакцій у первинній і вторинній реакційних зонах (наявність шлаку призводить до збільшення тиску в межах реакційної зони, сформованої за рахунок впливу на ванну кисневих струменів із сопел Лаваля, всього на 6,2 %).

Термодинамічний аналіз окисних процесів у межах 1 р.з. показав (рис. 3), що там переважно відбуваються процеси окиснення марганцю, кремнію, вуглецю, заліза (підтверджується від'єм-

ним значенням енергії Гіббса в усьому інтервалі температур, що досліджувалися). Крім того, з огляду на меншу глибину проникнення звукових кисневих струменів 2-го ярусу порівняно з надзвуковими кисневими струменями, можна припустити, що вони будуть виступати в ролі додаткового джерела кисню, який братиме участь в окисненні CO до CO<sub>2</sub> і FeO до Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> з надходженням CO<sub>2</sub> і Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у межі 2 р.з.



**Рис. 3.** G–T-діаграма окисних процесів, що перебігають у 1 р.з. під час продувки ванни 160-тонного конвертера киснем із застосуванням триярусної фурми: цифри біля кривих – номери реакцій у табл. 2

Для процесу окиснення фосфору встановлено, що його видалення в 1 р.з. можливе в діапазоні температур 1300–300 °С. Що стосується окиснення вуглецю, то переважає утворення діоксиду вуглецю, хоча процеси утворення монооксиду вуглецю і його подальшого окиснення теж можливі. Окиснення кремнію відбувається до діоксиду кремнію; утворення монооксиду кремнію в 1 р.з. є малоімовірним.

Що стосується процесів пилоутворення за рахунок випаровування оксидних і неоксидних компонентів шлакометалевої емульсії, то термодинамічний аналіз для умов 1 р.з. підтвердив (рис. 4) неможливість їх перебігу (позитивне значення енергії Гіббса в усьому досліджуваному діапазоні температур) для заліза, кремнію, їх оксидів і оксиду марганцю. Виняток становить марганець, випаровування якого можливе в діапазоні температур 2100–2300 °С.

Для 2 р.з. (рис. 5) встановлено, що процеси окиснення фосфору, сірки, кремнію до монооксиду, газифікації вуглецю, відновлення діоксиду кремнію марганцем і оксиду заліза монооксидом вуглецю практично не відбуваються (в усьому досліджуваному діапазоні температур спостерігалося позитивне значення енергії Гіббса). Для процесів відновлення оксиду заліза марганцем і кремнієм, окиснення марганцю, утворення оксиду за-

ліза, а також доокиснення монооксиду вуглецю характерна можливість самовільного їх перебігу за температур не вище 2000 °С, що робить можливим перебіг цих реакцій на межі метал–шлакова фаза (оскільки місце перебігу хімічної реакції досить віддалене від високотемпературної 1 р.з.).

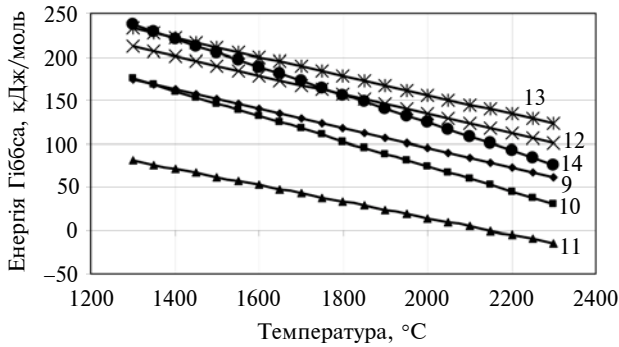


Рис. 4.  $G$ – $T$ -діаграма процесів пилоутворення, що перебігають у 1 р.з. під час продувки ванни 160-тонного конвертера киснем із застосуванням триярусної фурми: цифри біля кривих – номери реакцій у табл. 2

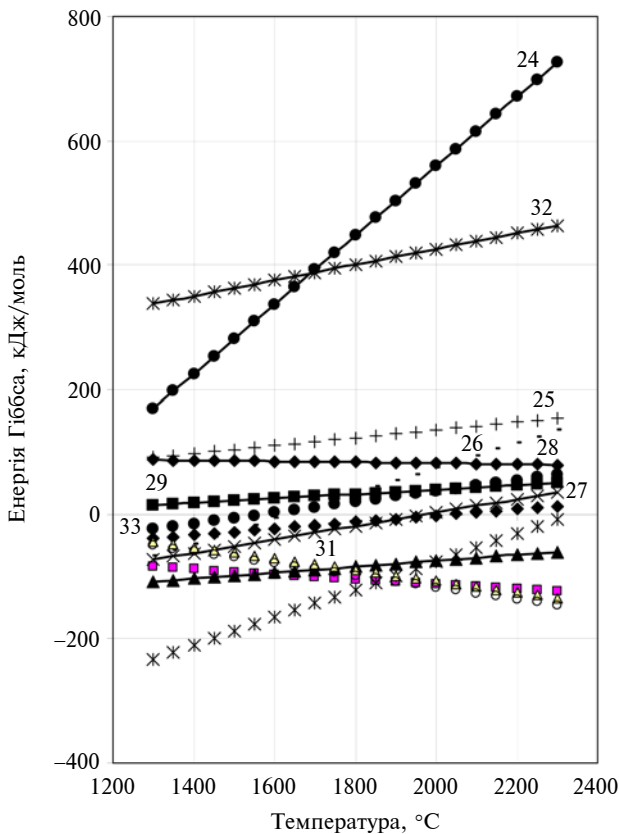


Рис. 5.  $G$ – $T$ -діаграма хімічних процесів, що перебігають у 2 р.з. під час продувки ванни 160-тонного конвертера киснем через триярусну фурму: цифри біля кривих – номери реакцій у табл. 2

Процеси окиснення кремнію та вуглецю розчиненим у металі киснем, а також відновлення

оксиду заліза вуглецем можуть успішно відбуватися у всьому досліджуваному діапазоні температур, що дає змогу припускати можливість перебігу їх у всьому об'ємі металу в межах 2 р.з. Крім того, необхідно відзначити, що для процесу окиснення вуглецю в 2 р.з. характерне утворення діоксиду вуглецю (що пов'язано з більш низьким значенням енергії Гіббса порівняно з процесами окиснення до монооксиду вуглецю).

Особливе місце при продувці в кисневому конвертері з використанням триярусної фурми має уточнення термодинамічної моделі окисних процесів у зоні дії додаткових кисневих струменів від 3-го ярусу (рис. 6)

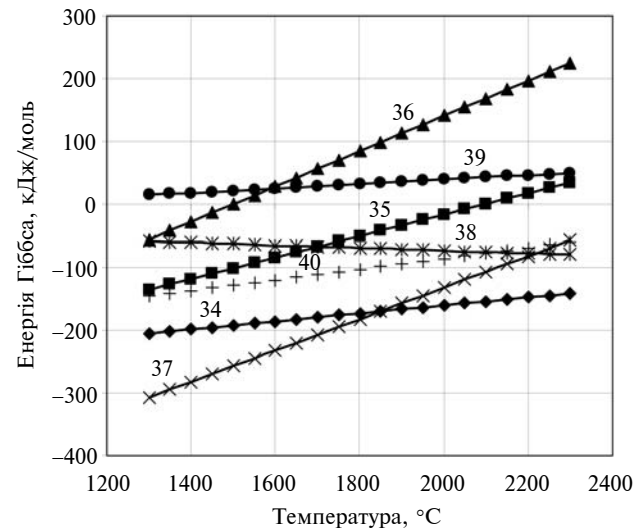


Рис. 6.  $G$ – $T$ -діаграма хімічних процесів, що перебігають у зоні дії вторинних додаткових реакційних струменів 3-го ярусу: цифри біля кривих – номери реакцій у табл. 2

За результатами проведених досліджень (див. рис. 6) встановлено, що у вказаній вище області відбуватиметься утворення вищих оксидів заліза (при контакті кисневих струменів зі шлаковою фазою) і діоксиду вуглецю в зоні зіткнення спливаючих макробульб монооксиду вуглецю із вторинними кисневими струменями. Крім того, взаємодія оксидів заліза з бульбами діоксиду вуглецю в об'ємі шлакової фази призводить до перекиснення шлаку за рахунок насичення його вищими оксидами заліза.

Таким чином, необхідно відзначити, що для 1 р.з. характерний перебіг реакцій 1–8 та 15–17. У 2 р.з. перебігають хімічні реакції 18–22, 26, 27, 30, 31 і 33 (див. табл. 1). Наявність або відсутність на поверхні розплаву шлакової фази практично не впливає на ймовірність хімічних перетворень у межах як 1 р.з., так і 2 р.з. Для вто-

ринних додаткових кисневих струменів характерне окиснення ними оксидних складових шлакової (FeO) і газової {CO} фаз із отриманням сполук (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) і {CO<sub>2</sub>}. Крім того, визначено, що діоксид вуглецю, який утворюється в 1 і 2 р.з., при проходженні через шлакову фазу відновлюється до монооксиду вуглецю, а частина оксидів заліза в складі шлакової фази окиснюється до Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### Висновки

У ході проведених досліджень уточнена термодинамічна модель окисних процесів у первинній та вторинній реакційних зонах, які утворені при взаємодії з ванною 160-тонного конвертера надзвукових і звукових кисневих струменів, що витікають із роздільних груп сопел (Лавалія та циліндричних) кінцевика верхньої триярусної фурми за витрат кисню між цими групами сопел

330 і 30 м<sup>3</sup>/хв і при розміщенні фурми на робочій висоті 1,1 м над рівнем металевого розплаву в спокійному стані.

Отримані результати термодинамічного моделювання дають змогу усвідомлено підійти до обґрунтування додаткових керуючих впливів на хід рафінування конвертерної ванни з точки зору інтенсифікації окиснення фосфору за високого вмісту вуглецю в металевому розплаві та підвищення ефективності допалювання CO до CO<sub>2</sub> у робочому просторі конвертера.

Подальші дослідження особливостей перебігу хімічних перетворень при використанні триярусної фурми для продувки конвертерної ванни дадуть змогу суттєво розширити відомості з теорії виробництва сталі у кисневих конвертерах, а також можуть бути використані для удосконалення існуючих технологій виробництва сталі у кисневих конвертерах.

### Список літератури

1. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Инновационная технология комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом с применением многоярусных фурм // 36. праць наук.-техн. конф. "Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти", 4–5 квітня 2017 р., Дніпро. – Дніпро: НМетАУ, 2017. – С. 193–198.
2. Чернятевич А.Г. Разработка дутьевого и шлакового режимов конвертерной плавки при верхней кислородной продувке. Сообщение 1 // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 4. – С. 24–31.
3. Явойский А.В., Хисамутдинов Н.В., Белов В.В. Кислородно-конвертерный процесс с комбинированным пульсирующим дутьем // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2014. – № 7. – С. 20–25.
4. Кубашевский О., Оллок К.Б. Металлургическая термехимия. – М.: Металлургия, 1982. – 392 с.
5. Охотский В.Б. Физико-химическая механика сталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1993. – 152 с.
6. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія. – Дніпропетровськ: РВА "Дніпро-ВАЛ", 2006. – 456 с.
7. Охотский В.Б. Модели металлургических систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 287 с.
8. О повышении эффективности дожигаания отходящих газов в полости конвертера / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, Е.О. Мастеровенко, С.В. Юдин // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1999. – № 3. – С. 30–35.
9. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Разработка наконечников двухъярусных фурм для кислородных конвертеров // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1995. – № 12. – С. 13–16.
10. Дожи́гание монооксида углерода в конвертере – газовая динамика / В.Б. Охотский, Ю.Н. Борисов, А.Д. Зражевский, А.В. Шибко // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1992. – № 6. – С. 4–5.
11. Теорія металургійних процесів / В.Б. Охотський, О.Л. Костьолов, В.К. Сімонов та ін. – К.: ІЗМН, 1997. – 512 с.

### References

- [1] A.G. Cherniatevych *et al.*, "Innovative technology of combined blowing of converter bath by oxygen and neutral gas with using of multilevel lance", in *Proc. Sci. Tech. Conf. "Actual problems of development of metallurgical science and education"*, Dnipro, Ukraine, Apr. 4–5, 2017, pp. 193–198 (in Russian).
- [2] A.G. Cherniatevych, "Development of blowing and slag regimes of converter melts for top oxygen blowing. 1st Report", *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, no. 4, pp. 24–31, 2015 (in Russian).
- [3] A.V. Yavoiskii *et al.*, "Basic oxygen process with combined pulse blowing", *Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya*, no. 7, pp. 20–25, 2014 (in Russian).



- [4] O. Kubashevskii and K.B. Olkoko, *Metallurgy Thermochemistry*. Moscow, SU: Metallurgy, 1982 (in Russian).
- [5] V.B. Okhotskiy, *Physical and Chemical Mechanic of Steelmaking Process*. Moscow, Russia: Metallurgy, 1993 (in Russian).
- [6] B.M. Boichenko et al., *Converter Production of Steel: Theory, Technology, Quality of Steel, Design of Aggregates, Material Recycling and Ecology*. Dnipropetrovsk, Ukraine: RPA“Dnipro-VAL”, 2006 (in Ukrainian).
- [7] V.B. Okhotskiy, *Models of Metallurgical Systems*. Dnipropetrovsk, Ukraine: System Technologies, 2006 (in Russian).
- [8] E.V. Protopopov et al., “About increase of efficiency of fume gases postcombustion in the converter workspace”, *Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya*, no. 3, pp. 30–35, 1999 (in Russian).
- [9] A.G. Cherniatevych and E.V. Protopopov, “Development of lance heads for the two-level lances for oxygen converters”, *Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya*, no. 12, pp. 13–16, 1995 (in Russian).
- [10] V.B. Okhotskiy et al., “Postcombustion of carbon monoxide in converter – gas dynamics”, *Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya*, no. 6, pp. 4–5, 1992 (in Russian).
- [11] V.B. Okhotskiy et al., *Theory of Metallurgical Processes*. Kyiv, Ukraine: IZMN, 1997 (in Ukrainian).

А.Г. Чернятевич, Л.С. Молчанов, П.О. Юшкевич

#### УТОЧНЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ РАФІНУВАННЯ КОНВЕРТЕРНОЇ ВАННИ ПІД ЧАС ПРОДУВКИ ЧЕРЕЗ ТРИЯРУСНУ КИСНЕВУ ФУРМУ

**Проблематика.** У сучасних умовах киснево-конвертерний процес є основним способом виробництва металопродукції масового призначення. При цьому у зв'язку з дефіцитом якісних шихтових матеріалів особливо актуальними є ресурсо- і енергоощадні технології. Для оптимізації конвертерного виробництва сталі в сучасних умовах перспективним є використання вдосконалених порівняно з відомими конструкцій кисневих фурм для верхньої продувки.

**Мета дослідження.** Отримання інформації щодо термодинамічної моделі продувки конвертерної ванни через триярусну фурму з уточненням закономірностей перебігу окисних процесів у межах реакційної зони 160-тонного промислового конвертера.

**Методика реалізації.** Проведений аналіз має теоретичний характер і базується на виявленні впливу температури й тиску на закономірності перебігу окисних процесів у межах реакційних зон, що формуються при проникненні кисневих струменів в об'єм металевої ванни, спіненої шлакометалевої емульсії та газів, що відходять у робочому просторі конвертера. Як термодинамічний параметр для оцінки ймовірності перебігу хімічних реакцій було використано енергію Гіббса. При цьому вплив тиску на окисні процеси в конвертерній ванні оцінювали відповідно до формули Вант-Гоффа.

**Результати дослідження.** Представлено термодинамічні особливості перебігу окисних процесів у ванні 160-тонного кисневого конвертера при використанні триярусної фурми. Для первинної реакційної зони характерний перебіг реакцій окиснення марганцю, кремнію, вуглецю, заліза газоподібним киснем. У вторинній реакційній зоні відбуваються хімічні реакції окиснення кремнію та вуглецю розчиненим у металі киснем, а також відновлення оксиду заліза вуглецем. Наявність або відсутність на поверхні розплаву шлакової фази практично не впливає на ймовірність хімічних перетворень у межах як первинної, так і вторинної реакційних зон. Для вторинних додаткових кисневих струменів характерне окиснення оксидних складових шлакової і газової фаз.

**Висновки.** Уточнено термодинамічну модель окисних процесів у первинній і вторинній реакційних зонах, які утворені при взаємодії з ванною 160-тонного конвертера надзвукових і звукових кисневих струменів, що витікають із роздільних груп сопел (Лавалю та циліндричних) кінцевика верхньої триярусної фурми.

**Ключові слова:** термодинамічний аналіз; кисневий конвертер; триярусна фурма; реакційна зона; рафінування ванни; енергія Гіббса; тиск; температура.

А.Г. Чернятевич, Л.С. Молчанов, П.О. Юшкевич

#### УТОЧНЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАФИНИРОВАНИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ ПРИ ПРОДУВКЕ ЧЕРЕЗ ТРЕХЪЯРУСНУЮ КИСЛОРОДНУЮ ФУРМУ

**Проблематика.** В современных условиях кислородно-конвертерный процесс является основным способом производства металлопродукции массового назначения. При этом в связи с дефицитом качественных шихтовых материалов особенно актуальны ресурсо- и энергосберегающие технологии. Для оптимизации конвертерного производства стали в современных условиях перспективным является использование усовершенствованных по сравнению с известными конструкций кислородных фурм для верхней продувки.

**Цель исследования.** Получение информации о термодинамической модели продувки конвертерной ванны через трехъярусную фурму с уточнением закономерностей протекания окислительных процессов в пределах реакционной зоны 160-тонного промышленного конвертера.

**Методика реализации.** Проведенный анализ носит теоретический характер и базируется на определении влияния температуры и давления на закономерности протекания окислительных процессов в пределах реакционных зон, сформированных при внедрении кислородных струй в объем металлической ванны, вселенной шлакометаллической эмульсии и отходящих газов в рабочем пространстве конвертера. В качестве термодинамического параметра для оценки вероятности протекания химических реакций была использована энергия Гиббса. При этом влияние давления на окислительные процессы в конвертерной ванне оценивали в соответствии с формулой Вант-Гоффа.



**Результаты исследования.** Представлены термодинамические особенности протекания окислительных процессов в ванне 160-тонного кислородного конвертера при использовании трехъярусной фурмы. Для первичной реакционной зоны характерно протекание реакций окисления марганца, кремния, углерода, железа газообразным кислородом. Во вторичной реакционной зоне протекают химические реакции окисления кремния и углерода растворенным в металле кислородом, а также восстановления оксида железа углеродом. Наличие или отсутствие на поверхности расплава шлаковой фазы практически не влияет на вероятность протекания химических превращений в пределах как первичной, так и вторичной реакционных зон. Для вторичных дополнительных кислородных струй характерно окисление оксидных составляющих шлаковой и газовой фаз.

**Выводы.** Уточнена термодинамическая модель окислительных процессов в первичной и вторичной реакционных зонах, образованных при взаимодействии с ванной 160-тонного конвертера сверхзвуковых и звуковых кислородных струй, вытекающих из отдельных групп сопел (Лавала и цилиндрических) наконечника верхней трехъярусной фурмы.

**Ключевые слова:** термодинамический анализ; кислородный конвертер; трехъярусная фурма; реакционная зона; рафинирование ванны; энергия Гиббса; давление; температура.

Рекомендована Радою  
інженерно-фізичного факультету  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
23 серпня 2017 року