

**МЕТОДИКА ПОБУДОВИ КОМПЛЕКСНИХ ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ОПИСУ
ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ У СИСТЕМІ "МЕТАПЛ-ШЛАК" ПРИ ДОВЕДЕННІ
СТАЛІ НА УКП З ВИКОРИСТАННЯМ ФУНКЦІЇ БАЖАНОСТІ ХАРРІНГТОНА**

Тогобицька Д.М.¹, Белькова А.І.²

Інститут чорної металургії ім.. З.І. Некрасова Національної академії наук

України, д.т.н., професор, Україна

Інститут чорної металургії ім.. З.І. Некрасова Національної академії наук

України, д.т.н. Україна

Анотація. Розроблено методику побудови комплексних показників для опису фізико-хімічної взаємодії компонентів у системі «метал-шлак» при позапичній обробці сталі на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку та аналітичного апарату функції бажаності Харрінгтона. Методика передбачає обґрунтування та генерацію структури комплексних показників систем «метал-шлак» (F_{ms}) та «метал-добавки» (F_{md}) з урахуванням їх хімічного складу і фізико-хімічних властивостей, а також параметрів технологічного режиму (F_t). Розроблено аналітичні залежності для розрахунку коефіцієнтів розподілу сірки, кремнію, марганцю та алюмінію у вигляді: $L_{ел} = A \cdot F_{ms}^{\alpha_1} \cdot F_{md}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$, де коефіцієнти A , α_1 , α_2 , α_3 визначаються для конкретної марки сталі. Запропонований підхід є основою прогнозування хімічного складу кінцевих розплавів обробки сталі на УКП для вибору оптимального складу шлакових сумішей, легуючих і мікролеуючих добавок, які підвищують ефективність та вдосконалення технології доведення сталі на установці ківш-піч.

Ключові слова: система «метал-шлак», параметри міжатомної взаємодії в розплавах, коефіцієнти розподілу сірки, кремнію, марганцю та алюмінію, комплексні показники, функція бажаності Харрінгтона.

Вступ. Сучасні технології металургійного виробництва висувають високі вимоги до якості сталі, що зумовлює необхідність оптимізації процесів її доведення. Одним з найважливіших аспектів у цьому напрямі є системне вивчення та опис процесів фізико-хімічної взаємодії компонентів у системі «метал-шлак», що визначають кінцеві властивості розплаву. У традиційних підходах до аналізу цих процесів основна увага приділяється експериментальному вивченню термодинамічних та кінетичних характеристик, проте важливим кроком є впровадження сучасних методів

математичного моделювання, які забезпечують комплексний аналіз та прогнозування параметрів технологічного процесу. У зв'язку з цим розробка методів побудови комплексних показників, що забезпечують всебічний облік фізичних та хімічних властивостей взаємодіючих середовищ при доведенні сталі на установці ківш-піч, є актуальним завданням, вирішення якого дозволить раціонально використовувати добавки та підвищити точність регулювання хімічного складу сталі.

Основний матеріал. Коефіцієнти розподілу елементів між металом і шлаком є найважливішими термодинамічними параметрами, які дозволяють визначити ступінь завершеності процесів легування та рафінування сталі, а також їх ефективність. Як показали наші дослідження [1], прогнозування коефіцієнтів розподілу елементів як змінних величин залежно від конкретних сировинних і технологічних умов дозволяє не тільки розрахувати кінцеві показники процесу, а й здійснювати рішення оберненої задачі пошуку оптимального рішення для отримання металу необхідної якості.

В якості інформаційної основи досліджень застосовано актуальні промислові дані хімічного складу сталі SAE1006 та відповідного шлаку до та після доведення сталі добавками на установці ківш-піч за даними марок сталі SAE1006. Виконано оцінку взаємозв'язків показників систем «метал-шлак» та «метал-добавки» з використанням інтегральних параметрів електронної структури розплавів, а саме розраховані хімічний еквівалент складу металу Z^v (e) та шлаку Δe (e), середньостатистична відстань між атомами d (10^{-1} nm) та показник стехіометрії шлаку ρ , що визначається відношенням числа катіонів до числа аніонів [2]. Також за допомогою цих параметрів розраховані температури плавлення сталі та основних добавок (феросплавів FeSi65 та FeMn).

Аналіз процесу десульфурзації сталі показав, що на коефіцієнт розподілу сірки між кінцевими продуктами плавки після доведення сталі на УКП впливають три групи основних факторів: система «метал-шлак» до обробки сталі, система «метал-добавки» та технологічний режим. В аналітичному вигляді цей висновок можна відобразити як $L_s = f(F_{ms}, F_{md}, F_t)$, де F_{ms} , F_{md} , F_t –

комплексні показники відповідно систем «метал-шлак», «метал-добавки» та технологічного режиму.

Структуру зазначених комплексних показників було згенеровано за допомогою математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона [3], який дозволяє перетворювати різнорозмірні показники на єдину безрозмірну шкалу, забезпечуючи об'єктивну та кількісну оцінку процесів взаємодії в системі «метал-шлак». Формула «кривої бажаності» $d = \exp(-(\exp(-y)))$ визначає функцію із двома ділянками насичення ($d \rightarrow 0$ та $d \rightarrow 1$) та лінійною ділянкою (від $d = 0,2$ до $d = 0,63$) (рис. 1). Вісь координат (y) називається шкалою часткових показників, вісь (d) – шкалою бажаності. Ця функція відображає залежність оцінок або показників бажаності (d), від безрозмірних показників (y), які переводять розмірні (натуральні) конкретні показники (x) відповідно до стандартних оцінок за шкалою бажаності.

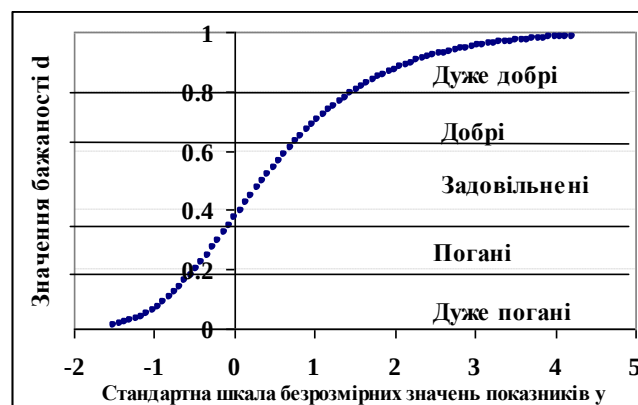


Рисунок 1 - Графік функції бажаності $d = \exp(-(\exp(-y)))$

Після переведення часткових показників y_i у шкалу бажаності (d_i), здійснюється розрахунок узагальненого показника D як середнє геометричне із часткових функцій бажаності з поправкою на значущість кожної властивості:

$$D = \prod_{i=1}^n d_i^{\beta}, \text{ де } \Pi - \text{добуток приватних функцій бажаності, } d_i - \text{індивідуальні}$$

показники, n - кількість показників, β - показник важливості якості. Причому число показників може бути різним для різних систем. Узагальнена функція бажаності є кількісним, однозначним, єдиним та універсальним показником якості об'єкта, її можна використовувати як критерій оптимізації.

З урахуванням виявлених факторів впливу на коефіцієнт розподілу сірки між металом та шлаком після позапічної обробки сталі визначені найбільш бажані значення окремих показників, для яких розраховані стандартні значення по осі ординат y_i та визначені часткові показники функції бажаності у безрозмірних одиницях вимірювання по кожному компоненту d_i та розраховані комплексні показники системи «метал-шлак» F_{ms} та «метал-добавки» F_{md}

$$F_{ms} = [S]_{\Pi}^{0,5} \cdot Z_{\Pi}^{0,25} \cdot \Delta e_{\Pi}^{0,25} \quad (1)$$

$$F_{md} = (T_{\Pi\text{лFeSi}} / T_{\Pi\text{лСталі}})^{0,6} \cdot (\text{CaO} / \text{SiO}_2)_{\text{ШУС}}^{0,4}, \quad (2)$$

де $[S]_{\Pi}$ – початковий вміст сірки в сталі до УКП, Z_{Π}^Y та Δe_{Π} – інтегральні показники початкового складу металу та шлаку, $T_{\Pi\text{лFeSi}} / T_{\Pi\text{лСталі}}$ – відношення температур плавлення добавки FeSi65 та сталі, $\text{CaO} / \text{SiO}_2_{\text{ШУС}}$ – основність шлакоутворюючої суміші з вапна та плавикового шпату.

В якості комплексного показника технологічного режиму плавки F_t використано значення інтенсивності продувки $I_{\text{пр}}$, яке розраховується як відношення витрати аргону $R_{\text{ар}}$ до тривалості плавки $T_{\text{р}}$: $I_{\text{пр}} = R_{\text{ар}} / T_{\text{р}}$, $F_t = I_{\text{пр}}$. Показники ступенів характеризують вагу часткового показника та визначаються за апріорними експертними оцінками на основі факторних навантажень на генеральний фактор.

На підставі виявлених зв'язків комплексних показників F_{ms} , F_{md} , F_t з коефіцієнтом розподілу сірки (рис. 2) розроблено аналітичну залежність для прогносної оцінки кінцевого показника L_s після доведення сталі на УКП (R – коефіцієнт кореляції зв'язку, A_1 – коефіцієнт рівняння, що визначається для конкретної марки сталі):

$$L_s = A_1 \cdot F_{ms}^{0,5} \cdot F_{md}^{0,3} \cdot F_t^{0,2} \quad R=0,85 \quad (3)$$

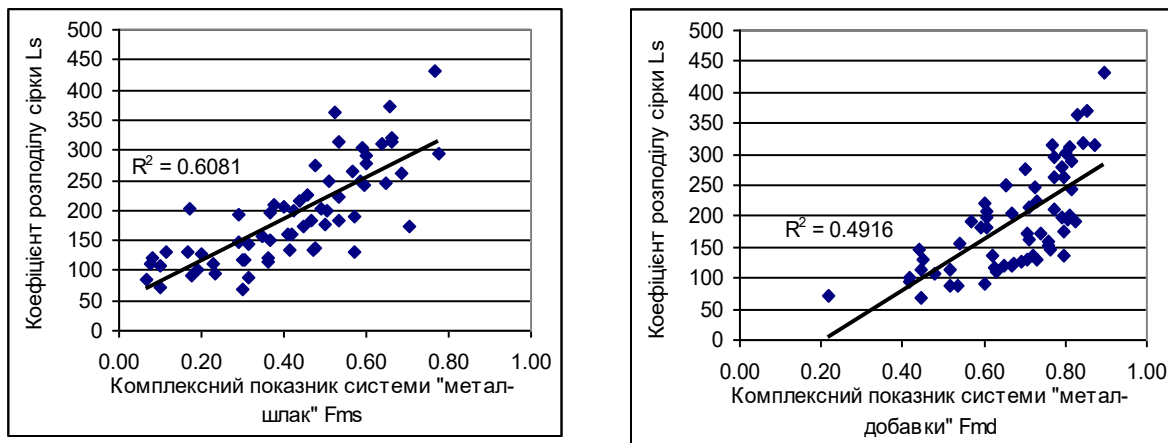


Рисунок 2 - Зв'язок коефіцієнту розподілу сірки Ls між продуктами плавки після обробки сталі на УКП з комплексними показниками систем «метал-шлак», «метал-добавки» та технологічного режиму по даним марки сталі SAE1006

Аналогічним чином розроблено прогнознi моделі для розрахунку коефіцієнтів розподілу кремнію, марганцю та алюмінію між кінцевими продуктами доведення сталі на УКП з використанням комплексних показників у вигляді $L_{\text{ел}} = A \cdot F_{\text{ms}}^{\alpha_1} \cdot F_{\text{md}}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$, де F_{ms} , F_{md} , F_t – комплексні показники відповідно систем «метал-шлак», «метал-добавки» та технологічного режиму плавки, A , α_1 , α_2 , α_3 – коефіцієнти рівнянь, які визначаються за відповідною експертною оцінкою для конкретної марки сталі.

Висновки. Розроблено методику побудови комплексних показників та прогнозування коефіцієнтів розподілу сірки, кремнію, марганцю і алюмінію між кінцевими продуктами після доводки сталі на УКП на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку та аналітичного апарату функції бажаності Харрінгтона. Запропонований підхід є основою прогнозування хімічного складу кінцевих розплавів з урахуванням початкового складу металу та шлаку для вибору оптимального складу шлакових сумішей, легуючих і мікролегуєчих добавок, які підвищують ефективність та вдосконалення технології доведення сталі на установці ківш-піч.

ЛІТЕРАТУРА.

1. Togobitska D., Bielkova A., Stepanenko D. (2023). Model decision-making system in the task of choosing the optimal composition of the blast furnace burden under specific operating conditions of BF. *Acta Metallurgica Slovaca*, 29(2), 67–74. <https://doi.org/10.36547/ams.29.2.1764>

2. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters Lithuanian Journal of Physics. Vol. 64, No. 1, pp. 58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

3. Harrington, E. C. (1965), The desirable function, Industrial Quality Control, Vol. 21, No. 10, pp. 494-498.

METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING COMPLEX INDICATORS TO DESCRIBE INTERACTION PROCESSES IN THE "METAL-SLAG" SYSTEM DURING STEEL REFINING IN A LADLE FURNACE USING HARRINGTON'S DESIRABILITY FUNCTION

Togobitska D., Belkova A.

Abstract. *A methodology has been developed for constructing complex indicators to describe the physicochemical interaction of components in the "metal-slag" system during steel refining in a ladle furnace, based on the concept of directed chemical bonding and the analytical apparatus of Harrington's desirability function. The methodology involves the justification and generation of the structure of complex indicators for the "metal-slag" (F_{ms}) and "metal-additive" (F_{md}) systems, considering their chemical composition, physicochemical properties, and technological process parameters (F_t). Analytical dependencies have been developed to calculate the distribution coefficients of sulfur, silicon, manganese, and aluminum in the form: $L_{e\Gamma} = A \cdot F_{ms}^{\alpha_1} \cdot F_{md}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$, where the coefficients A , α_1 , α_2 , and α_3 are determined for a specific steel grade. The proposed approach serves as the basis for predicting the chemical composition of final steel melts treated in a ladle furnace. It enables the selection of optimal slag mixtures, alloying, and microalloying additives that enhance efficiency and improve the steel refining technology in the ladle furnace unit.*

Keywords: *"metal-slag" system, parameters of interatomic interaction in melts, distribution coefficients of sulfur, silicon, manganese, and aluminium, complex indicators of "metal-slag" and "metal-additive" systems, Harrington's desirability function*

REFERENCES

1. Togobitska D., Bielkova A., Stepanenko D. (2023). Model decision-making system in the task of choosing the optimal composition of the blast furnace burden under specific operating conditions of BF. Acta Metallurgica Slovaca, 29(2), 67–74. <https://doi.org/10.36547/ams.29.2.1764>.
2. Togobitska D. and Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters Lithuanian Journal of Physics. Vol. 64, No. 1, pp. 58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
3. Harrington, E. C. (1965), The desirable function, Industrial Quality Control, Vol. 21, No. 10, pp. 494-498.