

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-265-281>

УДК 669.02/09:669.18.046.518.083.133

Д. М. Тогобицька<sup>1</sup>, д.т.н., проф., пров.н.с., ORCID 0000-0001-6413-4823

А. І. Белькова<sup>1</sup>, к.т.н., ст.н.с., ORCID 0000-0001-8519-9351

Д. О. Степаненко<sup>1</sup>, к.т.н., зав. відділом, ORCID 0000-0001-5913-2284

І. Р. Поворотня<sup>1</sup>, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-5872-7403

С. В. Греков<sup>1</sup>, н.с., ORCID 0000-0003-2849-0999

<sup>1</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

## ВИБІР КРИТЕРІЇВ ТА РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕМЕНТІВ В СИСТЕМІ «МЕТАЛ-ШЛАК» ПРИ ОБРОБЦІ СТАЛІ НА УКП

**Анотація.** Представлені основні засади розробленої методики прогнозування коефіцієнтів розподілу сірки, кремнію, марганцю та алюмінію між кінцевими продуктами після ковшової доводки сталі на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку та аналітичного апарату аналізу багатомірних даних. Виконано оцінку взаємозв'язків показників системи «метал-шлак» до та після доведення сталі відповідними добавками на установці ківш-піч за даними марок сталі SAE1006. Обґрунтована інформативність та застосування параметрів міжатомної взаємодії, які характеризують хімічний склад сталі, шлаку та добавок, та показників технологічного режиму у якості модельних параметрів прогнозних моделей для розрахунку коефіцієнтів розподілу елементів домішкової (S, P) та матричної (Mn, Si) підсистем металеві системи при позапічній обробці сталі. Здійснено генерацію структури комплексних показників систем «метал-шлак» та «метал-добавки» з урахуванням їх хімічного складу та фізико-хімічних властивостей з використанням математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона, що дозволяє різномірні показники «згорнути» у єдиний узагальнений показник. Розроблено прогнозні моделі для розрахунку коефіцієнтів розподілу елементів з використанням комплексних показників у вигляді  $L_{ел} = A \cdot F_{ms}^{\alpha_1} \cdot F_{md}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$ , де  $F_{ms}$ ,  $F_{md}$ ,  $F_t$  – комплексні показники відповідно систем «метал-шлак», «метал-добавки» та технологічного режиму плавки;  $A$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  - коефіцієнти рівнянь, які визначаються для конкретної марки сталі. Запропонований підхід відрізняється від традиційних методів розглядання коефіцієнтів розподілу елементів шихти як постійних величин та закладає передумови для розробки алгоритму прогнозування та направлення формування хімічного складу кінцевих розплавів з урахуванням початкового складу металу та шлаку, які подаються в ківш, та вибору оптимального складу

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode/uk>

шлакових сумішей, легуючих і мікролегуючих добавок.

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

**Посилання для цитування:** Вибір критеріїв та розробка моделей для прогнозування коефіцієнтів розподілу елементів в системі «метал-шлак» при обробці сталі на УКП / Д. М. Тогобицька, А. І. Белькова, Д. О. Степаненко, І. Р. Поворотня, С. В. Греков // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 265-281. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-265-281>

**Вступ.** В даний час найбільш поширеною технологією при виробництві конкурентних марок сталі відповідального призначення в умовах сучасного металургійного заводу є технологія десульфурзації та модифікації сталі з використанням установок ківш-піч (УКП). Вона дозволяє отримувати низькосірчисті сталі з вузькими межами за хімічним складом, які мають високий ступінь рафінування та очищення від неметалевих включень, що вкрай складно або неможливо в альтернативних сталеплавильних переділах.

Прогнозування та моделювання інформативних показників процесу доводки сталі за рахунок достовірної інформації щодо властивостей усіх учасників міжфазних взаємодій (метал, шлак, добавки, шлакоутворюючі суміші) у значній мірі наближає виробників до раціоналізації використання добавок та підвищення ступеню засвоєння провідних елементів з добавок, а також є перспективним способом підвищення фізико-хімічних, теплофізичних і експлуатаційних властивостей спеціальних сталей.

У зв'язку з цим для підвищення ефективності процесів рафінування та доводки сталі на УКП важливою є задача розробки методів прогнозування показників хімічного складу кінцевих продуктів плавки, які значною мірою визначаються результатами процесів фізико-хімічної взаємодії в системі «метал-шлак». Взаємодію розплавленого металу і шлаку можна характеризувати як іонообмінний процес елементів єдиної фізико-хімічної системи, результати якого традиційно визначають за допомогою коефіцієнтів міжфазного розподілу дифундуючих елементів.

**Метою роботи** є вибір критеріїв та розробка моделей прогнозування коефіцієнтів розподілу основних елементів в системі метал-шлак при обробці сталі на УКП з використанням параметрів міжатомної взаємодії в розплавах та показників технологічного режиму.

**Стан питання.** В Інституті чорної металургії НАНУ накопичений

досвід моделювання фізико-хімічних властивостей сталей та феросплавів на рівні міжатомної взаємодії, а також процесів розподілу елементів в системі «метал-шлак» для відновлювальних умов плавки [1-4] з використанням комплексних показників завантажувальних в плавильний агрегат матеріалів та технології виплавки металу.

Моделювання властивостей розплавів здійснюється на засадах концепції спрямованого хімічного зв'язку, принципова особливість якої полягає у розгляді розплаву як хімічно єдиної системи на відміну від механічної суміші хімічних елементів, та впровадженні інтегральних параметрів міжатомної взаємодії у нерозривному ланцюгові «склад – технологія – структура – властивості» [1-3]. Структурний стан та реакційна здатність розплавів виражаються за допомогою інтегральних параметрів:  $Z^Y$  – параметр зарядового стану металевої системи,  $e$ ;  $d$  – середньозважена між'ядерна відстань,  $10^{-1}$ нм;  $tg\alpha$  – константа для кожного елемента, яка характеризує градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду;  $\rho_l$  – спрямована зарядова щільність, е/нм. В наслідок виявлення вагомих параметрів впливу розроблені прогностичні моделі у вигляді Властивість =  $f(d, Z^Y, \rho_l, tg\alpha)$  для розрахунку температур плавлення сталей і важливих фізико-хімічних властивостей феросплавів, саме: температури плавлення та кристалізації ( $T_{пл}$ ,  $T_{ліквідус}$ ,  $T_{солідус}$ , °C), щільності ( $D$ , кг/м<sup>3</sup>,  $\rho$ , г/см<sup>3</sup>) і теплофізичних характеристик (теплопровідність -  $\lambda$ , Вт/м·К; теплоємність –  $C$ , Дж/кг·К; теплота плавлення –  $Q_{пл}$ , кДж/кг; питомий електроопір –  $\rho$ , мОм·м ; тимчасовий опір –  $\sigma$ , МПа).

Наприклад, для розрахунку температури плавлення сталей (модель 1) та феросплавів (феросиліцій та феромарганець – модель 2) розроблено наступні моделі:

$$T_{лік}, °C = 10^3 \times (2,994 + 0,176 Z^Y - 0,476\rho_l), R^2 = 0,94 \quad (1)$$

$$T_{пл} = 972 - 850,4Z^Y + 1689,99\rho_l - 54658,5 tg\alpha, R^2 = 0,88 \quad (2)$$

Відмінністю розробленого нами підходу до розрахунку кінцевого складу металу та шлаку доменної плавки на основі використання комплексних показників завантажувальної шихти й технології від відомих підходів є саме прогнозування коефіцієнтів розподілу елементів як змінних, а не постійних величин залежно від конкретних сировинних і технологічних умов [4]. Цей підхід дає можливість оцінювати прогностичні показники кінцевих розплавів та виконувати на цій основі аналіз технологічної ситуації і прийняти рішення щодо корегування вхідних показників плавки. В наступному програмна реалізація прогностичних моделей в автоматизованих системах

управління технологічним процесом (АСУТП) дозволить одержати адекватні числові значення ступеню засвоєння добавок (що реально відображають процес розподілу та взаємодії), на відміну від тих, що часто використовуються зараз у промисловій практиці.

**Основні результати досліджень.** На початковому етапі досліджень виконано оцінку взаємозв'язків показників системи метал-шлак до та після доведення сталі відповідними добавками на установці ківш-піч за даними марок сталі SAE1006 та 40X. Зокрема, досліджено дані хімічного складу сталі SAE1006, одержаної у двох різних часових періодах за 2021 рік (340 плавок – 1 вибірка) та 2019-2021 рік (600 плавок – 2 вибірка). Для проведення аналізу системи «метал-шлак» до та після обробки сталі на УКП розраховано основні параметри електронної структури металевих та шлакових розплавів - хімічний еквівалент складу металу  $Z^y$  (e) та шлаку  $\Delta e$  (e), середньостатистична відстань між атомами  $d$  ( $10^{-1}$  нм) та показник стехіометрії шлаку  $\rho$ , що визначається відношенням числа катіонів до числа аніонів [1] (табл. 1, 2). Також за наведеними вище моделями (1-2) розраховані температури плавлення сталі та основних добавок (феросплавів FeSi65 та FeMn) (табл. 3).

Формування кінцевих продуктів доведення сталі на УКП здійснюється в результаті взаємодії металевої та шлакової систем, що надійшли після первинного доведення сталі до УКП, а також їх модифікації в результаті розкислення та легування металу в ковші додатковими різними добавками (феросплави, шлакоутворювальні суміші та ін.) для отримання легованої та кондиційної за ТУ марки сталі. При цьому відбувається активна десульфуратія сталі завдяки формуванню високоосновних і малозалізістих шлаків, для чого на практиці вводять добавки, що підвищують вміст CaO (флюси) і знижують його в'язкість ( $Al_2O_3$ ,  $CaF_2$ , MnO та ін.).

Взагалі, на установці ківш-піч окрім десульфуратії проходять багато іонообмінних процесів між компонентами фізико-хімічної системи метал-шлак, результати яких відображають коефіцієнти міжфазного розподілу елементів, які є основними термодинамічними параметрами, що визначають ефективність і ступінь завершеності процесів легування та рафінування сталі.

Досліджено коефіцієнти розподілу сірки, кремнію, марганцю, фосфору та алюмінію між металом та шлаком за даними їх кінцевого хімічного складу після доведення сталі на УКП. Ефективність перебігу процесів міжфазного розподілу цих елементів залежить від багатьох факторів, серед яких особливо глибокий вплив надають результати фізико-хімічної взаємодії в системі «метал-шлак», які можна оцінити за

допомогою інтегральних параметрів:  $Z^Y$  для металу,  $\Delta\epsilon$  і  $\rho$  для шлаку.

Додатковий вплив на кінцевий вміст вказаних елементів в готовій сталі процесів розкислення, легування та рафінування було оцінено з використанням показників фізико-хімічних властивостей добавок феросплавів та шлакоутворюючої суміші, а також технологічних параметрів доведення сталі на УКП.

Зокрема, був розрахований температурний показник стану розплавів у ковші по відношенню до температури плавлення феросплаву (феросиліція або феромарганцю) до температури ліквідус сталі до її обробки на УКП. Чим ближче значення зазначених температур і як наслідок менше їх відношення, тим ефективніше відбуватимуться процеси взаємодії компонентів у системі метал-добавка. Для обліку впливу флюсуєчих добавок на процес десульфурації в ковші розрахована основність шлакоутворюючої суміші, що включає вапняк та плавиковий шпат. Ефективність технологічного режиму зазвичай оцінюють інтегральним показником інтенсивності продування, рівним відношенню сумарної витрати аргону на тривалість продувки (табл. 3).

Аналіз впливу зазначених показників на коефіцієнт розподілу сірки між металом та шлаком після доведення сталі на УКП за даними марки сталі першої вибірки виявив суттєвий вплив наступних показників: інтегральних показників хімічного складу металу та шлаку до УКП (рис. 1), температурного показника стану системи «метал-добавка», основності шлакоутворюючої суміші та інтенсивності продування. Також кінцевий вміст сірки сталі після її обробки на УКП істотною мірою визначається початковим вмістом сірки сталі до УКП, що необхідно враховувати при моделюванні міжфазного коефіцієнта розподілу сірки. Тим більше, що на практиці для забезпечення ефективності процесу десульфурації на УКП вводять флюси, що підвищують CaO та основність у кінцевому шлаку, орієнтуючись на початковий вміст сірки в сталі (рис. 2 (а)). Між традиційним показником ступеню десульфурації сталі по видаленій сірці і кінцевим коефіцієнтом міжфазного розподілу сірки виявлено значний зв'язок, що цілком логічно підтверджує значний внесок іонообмінних процесів взаємодії компонентів в системі метал-шлак в процес видалення сірки зі сталі (рис. 2 (б)).

Таким чином, аналіз промислових даних сталі SAE1006 показав, що на коефіцієнт розподілу сірки між кінцевими продуктами плавки після доведення сталі на УКП впливають три групи основних факторів: система «метал-шлак», система «метал-добавки» та технологічний режим.

Таблиця 1 - Показники хімічного складу сталі SAE1006 до і після її обробки на УКП та інтегральні показники складу

№ Плавки	Хімічний склад сталі, %													Хімічний еквівалент складу Z <sub>т</sub> , e	Між'ядрна відстань, d, 10 <sup>-1</sup> нм	Температура ліквіду, Т <sub>л</sub> , °С			
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Zr	V	Mo				Nb	As	Ca
1	до УКП	0,049	0,38	0,078	0,064	0,017	0,021	0,017	0,028	0,003	0,005	0,005	0,0100	0,0100	0,0050	0,00001	1,1580	2,8165	1531,6
	після	0,058	0,41	0,130	0,008	0,017	0,021	0,023	0,029	0,003	0,001	0,005	0,0017	0,0100	0,0020	0,0017	1,1592	2,8136	
2	до УКП	0,051	0,26	0,015	0,022	0,010	0,046	0,031	0,053	0,006	0,005	0,005	0,0050	0,0100	0,0050	0,00001	1,1523	2,8183	1531,6
	після	0,067	0,30	0,036	0,003	0,009	0,049	0,032	0,055	0,004	0,001	0,005	0,0011	0,0099	0,0010	0,0027	1,1541	2,8149	
3	до УКП	0,060	0,27	0,081	0,053	0,014	0,022	0,026	0,037	0,009	0,005	0,0050	0,0100	0,0100	0,0050	0,00001	1,1562	2,8143	1530,4
	після	0,077	0,38	0,111	0,008	0,015	0,030	0,027	0,040	0,003	0,001	0,005	0,0011	0,0100	0,0010	0,0016	1,1598	2,8109	

Таблиця 2 - Показники хімічного складу шлаку та інтегральні показники

№ Плавки	Хімічний склад шлаку, %										Коефіцієнти розподілу							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	S	Оснóвність CaO/SiO <sub>2</sub>	Хіміч. еквівалент Δe, e	Стехіометрія P	Лs	Лsi	Лmn	Лp	Лal	
1	до УКП	46,2	15,7	9,0	8,0	12,3	0,53	3,40	1,71	0,90	2,94	-2,327	0,808	14,02	201,28	4,43	31,1	4100
	після	57,8	25,0	9,8	0,9	2,9	0,10	0,05	0,32	1,05	2,31	-1,979	0,801	131,25	192,31	0,77	5,8	966
2	до УКП	43,5	16,3	6,0	10,0	14,4	0,42	4,28	2,55	0,15	2,67	-2,429	0,793	6,94	1086,6	9,48	44,2	2400
	після	56,2	22,4	7,9	1,0	7,0	0,10	0,11	1,72	1,09	2,51	-1,942	0,801	363,33	622,22	5,70	11,1	1760
3	до УКП	43,9	11,7	9,3	5,6	24,3	0,26	2,23	1,82	0,43	3,75	-2,033	0,801	8,05	144,44	6,55	18,0	2700
	після	61,9	22,5	9,0	1,0	2,3	0,10	0,09	0,28	0,98	2,75	-1,820	0,818	122,50	202,70	0,72	6,6	770

Таблиця 3- Показники добавок, використаних при обробці сталі на УКП

№ Плавки	Витрата, тн				$T_{плFeSi}/T_{плСталі}$	$T_{плFeMn}/T_{плСталі}$	Основність ШУС CaO/SiO <sub>2</sub>	Тривалість прод-и, хв -	Витрата та аргону, л	Інтенсивність продувки, л/хв
	FeSi65	FeMn	Плав. шпат	Вапно						
1	0,453	0,128	0,633	2,712	1,99	0,55	13,22	43	44340	1031
2	0,039		0,249	1,036	0,16	0,00	12,96	50	50179	1004
3	0,197	0,276	0,357	1,354	0,93	1,28	12,14	37	36247	980

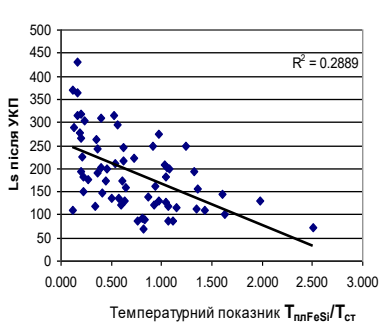
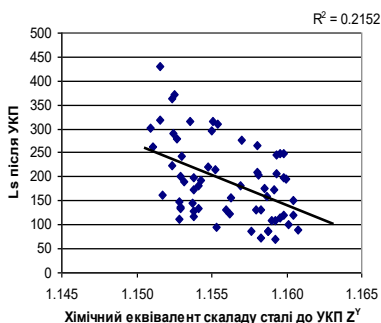


Рисунок 1 - Вплив показників металу та шлаку до обробки сталі на УКП та температурного показника системи «метал-добавка» на кінцевий коефіцієнт розподілу сірки між металом та шлаком для марки сталі SAE1006

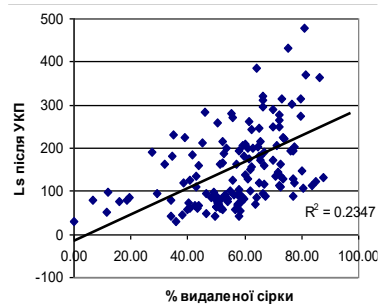
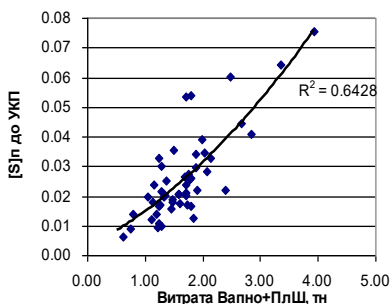


Рисунок 2 – Зв'язок витрати шлакоутворюючої суміші з початковим вмістом сірки в сталі (а) та взаємозв'язок між ступенем десульфурації сталі та кінцевим коефіцієнтом міжфазного розподілу сірки (б)

Виконані раніше дослідження [4] показали доцільність використання для прогнозування коефіцієнтів розподілу елементів у відновлюваних умовах інтегральних показників, зокрема, показника якості доменної шихти Кш і температурно-дутьового режиму Кт. Такий підхід дозволяє не тільки прогнозувати кінцеві показники плавки, але й здійснювати рішення оберненої задачі пошуку оптимального рішення для отримання металу необхідних властивостей та підвищення ефективності технологічного процесу.

Щодо опису процесу десульфурації на УКП отриманий вище висновок в аналітичному вигляді 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 плавки.

Для генерації структури комплексних показників доцільно використання математичного апарату узагальненої функції бажаності Харрінгтона [5], що дозволяє різнорозмірні показники перетворити на безрозмірну шкалу бажаності та «згорнути» їх у єдиний узагальнений показник, щоб підвищити його інформаційну потужність. 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. 3). Вісь координат у 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.

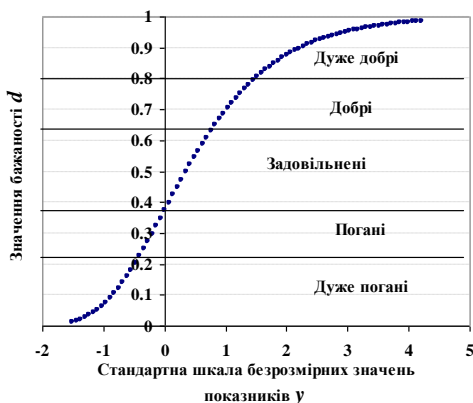


Рисунок 3 - Графік функції бажаності  
 $d = \exp(-(\exp(-y)))$



Після того, як усі часткові показники  $u_i$  переведені у свої бажаності ( $d_i$ ), здійснюється розрахунок узагальненого показника  $D$  як середнє геометричне із часткових функцій бажаності з поправкою на значущість кожної властивості (характеристики):  $D = \frac{\prod_{i=1}^n d_i^\beta}{P}$ , де  $P$  – добуток приватних функцій бажаності,  $d_i$  - індивідуальні показники,  $n$  - кількість показників,  $\beta$  - 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, що досліджується. Функція має властивості ефективної та статистичної чутливості, її можна використовувати як критерій оптимізації.

Функцію бажаності було застосовано для генерації структури комплексних показників систем «метал-шлак»  $F_{ms}$  та «метал-добавки»  $F_{md}$  з урахуванням виявлених факторів впливу на коефіцієнт розподілу сірки між продуктами плавки після доведення сталі на УКП.

С цією метою визначені найбільш бажані значення окремих показників, для яких розраховані стандартні значення по осі ординат  $u_i$  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»  $F_{ms}$  (табл. 4):

$$F_{ms} = [S]_п^{0,5} \cdot Z_{п}^{0,25} \cdot \Delta e_{п}^{0,25} \quad (3)$$

$$F_{md} = (T_{плFeSi}/T_{плCталі})^{0,6} \cdot (CaO/SiO_2)_{пшУС}^{0,4} \quad (4)$$

де  $[S]_п$  - початковий вміст сірки в сталі до УКП,  $Z_{п}^{0,25}$  та  $\Delta e_{п}^{0,25}$  – інтегральні показники початкового складу металу та шлаку,  $T_{плFeSi}/T_{плCталі}$  – відношення температур плавлення добавки FeSi65 та сталі,  $CaO/SiO_2$ <sub>пшУС</sub> – основність шлакоутворюючої суміші з вапна та плавикового шпату.

В якості комплексного показника технологічного режиму плавки  $F_t$  використано значення інтенсивності продувки  $I_{пр}$ , яке розраховується як відношення витрати аргону  $R_{ар}$  до тривалості плавки  $Tr$ :  $I_{пр} = R_{ар}/Tr$ ,  $F_t = I_{пр}$ . 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 розроблено наступну аналітичну залежність для прогновної 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):

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

Таблиця 4 - Розраховані значення безрозмірних часткових показників, функцій бажаності та інтегральної функції бажаності для комплексних показників системи «метал-шлак»  $F_{ms}$  та «метал-добавка»  $F_{md}$

№ Плавки	Безрозмірні часткові показники						Комплексний показник	
	Часткові функції бажаності						$F_{ms}$	$F_{md}$
	$[S]_n$	$Z^Y$	$\Delta e$	$CaO/SiO_2$	$T_{плFeSi}/T_{плСталі}$	$I_{пр}$		
1	<u>-1,030</u>	<u>1,283</u>	<u>0,028</u>	<u>1,040</u>	<u>-0,448</u>	<u>0,519</u>	0,167	0,449
	0,061	0,758	0,378	0,702	0,333	0,552		
2	<u>-0,094</u>	<u>2,425</u>	<u>0,918</u>	<u>0,980</u>	<u>2,807</u>	<u>1,354</u>	0,646	0,830
	0,545	0,915	0,671	0,687	0,941	0,772		
3	<u>-1,470</u>	<u>1,478</u>	<u>0,686</u>	<u>0,771</u>	<u>1,038</u>	<u>0,364</u>	0,081	0,672
	0,013	0,796	0,604	0,630	0,702	0,499		

На рис. 4 представлені графіки залежності коефіцієнта розподілу сірки  $L_s$  від комплексних показників систем «метал-шлак», «метал-добавки» та технологічного режиму плавки.

В результаті аналізу впливу показників системи метал-шлак, добавок та технологічного режиму плавки на коефіцієнти розподілу кремнію, марганцю та алюмінію між металом та шлаком після доведення сталі на УКП встановлено визначальну значимість показників системи метал-шлак до обробки сталі на УКП так саме як для коефіцієнта розподілу сірки, а також суттєвий вплив температурного стану системи метал-добавка, а саме - відношення температур плавлення добавок феросиліцію та феромарганцю до температури ліквідус сталі до УКП, що обумовлює ефективність процесів розчинення та засвоєння добавок.

Наприклад, для сталі SAE1006 взаємозв'язок коефіцієнта розподілу кремнію з інтегральним параметром міжатомної взаємодії  $Z^Y$  має нелінійний характер (рис. 5 (а)). Такий же зворотній зв'язок спостерігається при впливі параметру  $Z^Y_n$  на кінцевий розподіл марганцю в системі «сталь-шлак». Також виявлена залежність  $L_{mn}$  від властивостей добавки феромарганцю (ФМн78), зокрема, від співвідношення температури його плавлення до температури сталі ( $T_{плFeMn}/T_{сталі}$ ) (рис. 5 (б)) та інтенсивності продувки на УКП, яка активізує перемішування металу та шлаку і взаємообмін елементів у системі «метал-шлак».

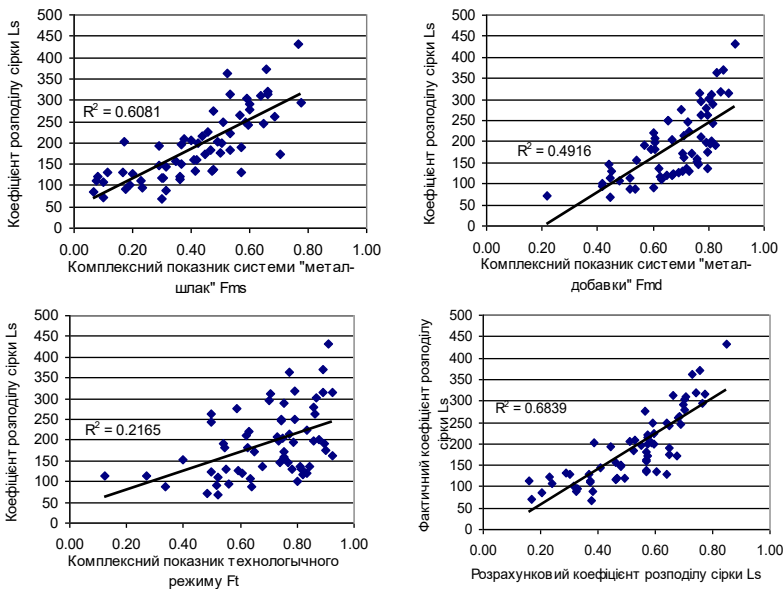


Рисунок 4 – Зв'язок коефіцієнту розподілу сірки  $L_s$  між продуктами плавки після обробки сталі на УКП з комплексними показниками систем метал-шлак до УКП, метал-добавки та технологічного режиму по даним марки сталі SAE1006

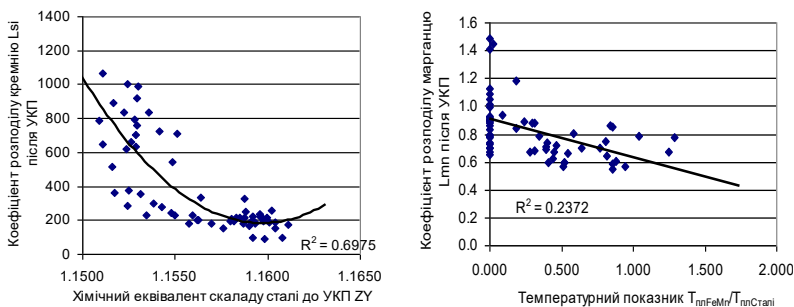


Рисунок 5 – Вплив інтегральних показників металевої системи сталі початкового хімічного складу до УКП на кінцевий міжфазний розподіл кремнію після доводки сталі на УКП

Суттєвий зв'язок коефіцієнту розподілу алюмінію  $L_{Al}$  до та після доводки сталі на УКП (рис. 6(a)) відображає врахування двоетапну

операцію введення алюмінію для розкислення металу та шлаку у вигляді спочатку чушок на установці комплексної доводки сталі (УКДС) та гранул на УКП. Алюміній реагує з оксидами заліза та марганцю у шлаці, зменшуючи їх сумарний вміст до 3% і сприяючи дифузійному розкисленню металу, тобто ще більшому зменшенню в ньому кисню завдяки попередньому методу введення.

З приводу розподілу фосфору між металом і шлаком на установці ківш-піч виявлено, що початковий та кінцевий коефіцієнти розподілу мають тісний зв'язок як і кінцевий та початковий вміст фосфору в сталі, що свідчить про відсутність активного процесу дефосфорації на УКП (рис. 6 (б)).

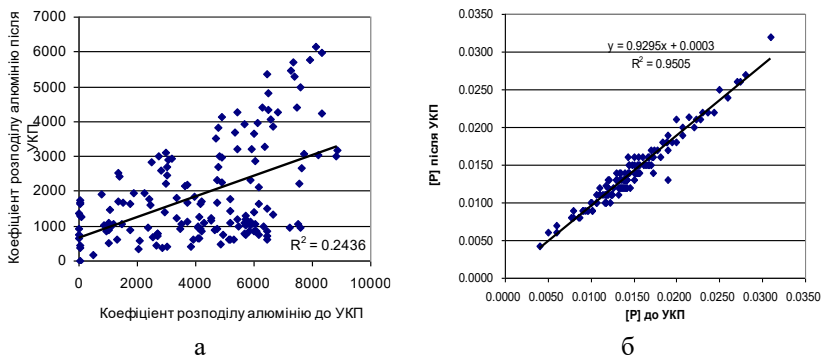


Рисунок 6 – Взаємозв'язок кінцевих та початкових показників коефіцієнта розподілу алюмінію Lal (а) і вмісту фосфору (б) до та після доводки сталі SAE1006 на УКП

Таким чином, з використанням визначених показників впливу на розподіл елементів між кінцевими продуктами плавки згенерована структура комплексного показника  $F_{ms}$ , яка для кожного коефіцієнта розподілу кремнію, марганцю та алюмінію включає інтегральні показники початкового складу металу та шлаку та має деякі відмінності. Наступні аналітичні залежності для розрахунку показників  $F_{ms}$  та  $F_{md}$  та прогнозування коефіцієнту розподілу елементів отримано з застосуванням математичного апарату функції бажаності:

- для кремнію:

$$F_{ms} = Z Y_{\Pi}^{0,7} \cdot \Delta e_{\Pi}^{0,3} \quad (6)$$

$$F_{md} = T_{\Pi\Pi FeSi} / T_{\Pi\Pi Сталі}, F_i = I_{\Pi\Pi} \quad (7)$$

$$L_{Si} = A_2 \cdot F_{ms}^{0,57} \cdot F_{md}^{0,2} \cdot F_t^{0,23} \quad R=0,87 \quad (8)$$

- марганцю:

$$F_{ms} = Z Y_{\Pi}^{0,55} \cdot \Delta \epsilon_{\Pi}^{0,45} \quad (9)$$

$$F_{md} = T_{\Pi\Pi FeMn} / T_{\Pi\Pi Сталі} , F_t = I_{\Pi\Pi} \quad (10)$$

$$L_{Mn} = A_3 \cdot F_{ms}^{0,4} \cdot F_{md}^{0,3} \cdot F_t^{0,3} \quad R=0,76 \quad (11)$$

- алюмінію:

$$F_{ms} = L_{Al}^{0,4} \cdot Z Y_{\Pi}^{0,3} \cdot \rho_{\Pi}^{0,3} \quad (12)$$

$$F_{md} = T_{\Pi\Pi FeSi} / T_{\Pi\Pi Сталі} , F_t = I_{\Pi\Pi} \quad (13)$$

$$L_{Al} = A_4 \cdot F_{ms}^{0,45} \cdot F_{md}^{0,35} \cdot F_t^{0,2} \quad R=0,72 \quad (14)$$

Тут  $Z Y_{\Pi}$  та  $\Delta \epsilon_{\Pi}$  – інтегральні показники початкового складу металу та шлаку,  $\rho_{\Pi}$  - показник стехіометрії початкового шлаку,  $L_{Al}$  – коефіцієнт розподілу алюмінію між сталлю та шлаком до УКП,  $T_{\Pi\Pi FeSi} / T_{\Pi\Pi Сталі}$  та  $T_{\Pi\Pi FeMn} / T_{\Pi\Pi Сталі}$  – відношення температур плавлення відповідно феросиліцію та феромарганцю до температури ліквідус сталі до УКП,  $I_{\Pi\Pi}$  – інтенсивність продувки плавки на УКП,  $A_2, A_3, A_4$  - коефіцієнти рівнянь, які визначаються для конкретної марки сталі.

Головною відмінністю отриманих комплексних показників для різних елементів розподілу є відповідні значення ступенів, які характеризують частку (вагу) впливу конкретного показника на головний показник. Зокрема, вміст вказаних елементів розподілу в першу чергу визначається процесами взаємодії металевої та шлакової систем до доведення сталі на УКП з невеликою різницею значень ступеню при комплексному показнику  $F_{ms}$ . Температурний стан системи «метал-добавка» (сталь-феросплав) також суттєво впливає на кінцевий розподіл елементів між сталлю та шлаком після ковшової обробки: чим нижче відношення їх температур плавлення, тим ефективніше відбуватимуться процеси у системі метал-добавка.

На рис. 7 представлено порівняльну оцінку точності розрахованих значень коефіцієнтів розподілу кремнію та марганцю між кінцевими продуктами плавки після обробки сталі на УКП.

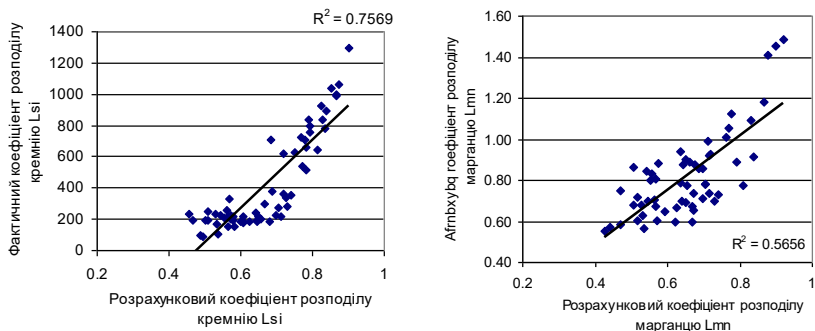


Рисунок 7 – Порівняльний аналіз фактичних та розрахункових значень коефіцієнтів розподілу кремнію та марганцю між кінцевими продуктами плавки після обробки сталі на УКП

## Висновки

Розроблено методику прогнозування коефіцієнтів розподілу сірки, кремнію, марганцю та алюмінію між кінцевими продуктами після ковшової доводки сталі на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку та аналітичного апарату аналізу багатовимірних даних, яка включає:

- вибір та обґрунтування найбільш значущих показників хімічного складу сталі та шлаку до УКП, добавок та технологічного режиму, що забезпечують отримання необхідного хімічного складу кінцевої сталі;

- генерацію структури комплексних показників систем «метал-шлак» та «метал-добавки» з урахуванням їх хімічного складу та фізико-хімічних властивостей з використанням математичного апарату узагальної функції бажаності Харрінгтона, що дозволяє різнорозмірні показники «згорнути» у єдиний узагальнений показник;

- розробку прогнозних моделей для розрахунку коефіцієнтів розподілу елементів з використанням комплексних показників у вигляді  $L_{ел} = A \cdot F_{ms}^{\alpha_1} \cdot F_{md}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$ , де  $F_{ms}$ ,  $F_{md}$ ,  $F_t$  – комплексні показники відповідно систем метал-шлак, метал-добавки та технологічного режиму плавки,  $A$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – коефіцієнти рівнянь, які визначаються за відповідною експертною оцінкою для конкретної марки сталі.

Запропонований підхід відрізняється від традиційних методів розглядання коефіцієнтів розподілу елементів шихти як постійних величин та закладає передумови для розробки алгоритму прогнозування та направленої формування хімічного складу кінцевих розплавів з урахуванням початкового складу металу та шлаку, які

подаються в ківш, та вибору оптимального складу шлакових сумішей, легуючих і мікролеуючих добавок.

### Перелік посилань

1. Тогобицька Д. М., Снігура І. Р. Моделювання металевих розплавів на рівні міжатомної взаємодії. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 404-413. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-404-413>

2. Прогнозування теплофізичних властивостей хромовмісних феросплавів / Д. М. Тогобицька, О. В. Кукса, С. В. Греков, І. Р. Поворотня, Ю. М. Ліхачев, Н. Е. Ходотова // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 287-294. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-287-294>

3. 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>

4. 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>

5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: монография. М.: Наука, 1976. 280 стр.

### References

1. Tohobytska, D. M., & Snihura, I. R. (2022). Modeliuvannia metalevykh rozplaviv na rivni mizhatomnoi vziaimodii. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 36, 404-413. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-404-413>

2. Tohobytska, D. M., Kuksa, O. V., Hrekov, S. V., Povorotnia, I. R., Likhachev, Yu. M., & Khodotova, N. E. (2023). Prohnozuvannia teplofizychnykh vlastyvostei khromovmisnykh ferosplaviv. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 287-294. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-287-294>.

3. Togobitska D. & Belkova A. (2024). New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters *Lithuanian Journal of Physics*, 64(1), 58-71. <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

4. 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>

5. Adler, Yu. P., Markova, E. V., & Hranovskiy, Yu. V. (1976). *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovii*. Nauka

**D. M. Tohobytska**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Professor, Leading Researcher, ORCID 0000-0001-6413-4823

**A. I. Belkova**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-8519-9351

**D. O. Stepanenko**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5913-2284

**I. R. Povortniia**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-5872-7403

**S. V. Grekov**<sup>1</sup>, Researcher, ORCID 0000-0003-2849-0999

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

### **SELECTION OF CRITERIA AND DEVELOPMENT OF MODELS FOR PREDICTION OF ELEMENTS DISTRIBUTION COEFFICIENTS IN THE "METAL- SLAG" SYSTEM DURING STEEL PROCESSING AT THE LADLE-FURNACE UNIT**

**Abstract.** The main principles of the developed method of forecasting the distribution coefficients of sulfur, silicon, manganese and aluminium between the final products of melting after ladle finishing of steel are presented, based on the concept of directional chemical communication and the analytical apparatus of multidimensional data analysis. An evaluation of the interrelationships of the indicators of the "metal-slag" system before and after proofing the steel with appropriate additives at the ladle-furnace unit was performed according to the SAE1006 steel grades. Reasoned informativeness and application of parameters of interatomic interaction that characterize the chemical composition of steel, slag and additives, and indicators of the technological regime as model parameters of predictive models for calculating the distribution coefficients of the elements of impurity (S, P) and matrix (Mn, Si) subsystems of the metal system at non-furnace processing of steel. The generation of the structure of complex indicators of the "metal-slag" and "metal-additive" systems was carried out, taking into account their chemical composition and physical-chemical properties, using the mathematical apparatus of the generalized Harrington desirability function, which allows various indicators to be "collapsed" into a single generalized indicator. Predictive models were developed for calculating the distribution coefficients of elements using complex indicators in the form of  $L_{el} = A \cdot F_{ms}^{\alpha_1} \cdot F_{md}^{\alpha_2} \cdot F_t^{\alpha_3}$ , where  $F_{ms}$ ,  $F_{md}$ ,  $F_t$  are complex indicators, respectively, of the "metal-slag", "metal-additive" systems and the technological mode of melting,  $A$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  - coefficients of the equations, which are determined for a specific grade of steel. The proposed approach differs from the traditional methods of considering the distribution coefficients of charge elements as constant values and lays down the prerequisites for the development of an algorithm for forecasting and directed formation of the chemical composition of the final melts, taking into account the initial composition of the metal and slag fed into the ladle, and the selection of the optimal composition of slag mixtures, alloying and microalloying additives.

**Key words:** "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, desirability function.



"Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". 2024. Випуск 38.  
"Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy". 2024. Issue 38  
ISSN 2522-9117 (print), ISSN 2786-6149 (online)

**For citation:** Tohobytska, D. M., Belkova, A. I., Stepanenko, D. O., Povorotnia, I. R., & Grekov, S. V. (2024). Selection of criteria and development of models for prediction of elements distribution coefficients in the "metal- slag" system during steel processing at the ladle-furnace unit. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 265-281. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-265-281>

Стаття надійшла до редакції збірника 28.09.2024 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)