

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.016

РОЗРОБКА КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ ПРОЦЕСІВ РАФІНУВАННЯ СТАЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРІВ МІЖАТОМНОЇ ВЗАЄМОДІЇ В РОЗПЛАВАХ

Тогобицька Д.М., Белькова А.І., Степаненко Д.О., Ходотова Н.Є.

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

Анотація. Для оцінки ефективності процесів рафінування сталі проаналізовано результати фізико-хімічної взаємодії елементів у системі «метал-шлак» десяти марок сталі, що виплавляється в у сучасних умовах України.

В результаті аналізу закономірностей зміни коефіцієнтів розподілу сірки та фосфору залежно від хімічного складу сталі та шлаку розроблено фізико-хімічні критерії для оцінки ступеня завершеності іонообмінних процесів при дефосфорації та десульфурації сталі з використанням інтегральних параметрів міжатомної взаємодії в розплавах. Поряд з використанням інтегральних фізико-хімічних параметрів хімічного та зарядового стану системи Z^Y , Δe та Z_e показано ключову роль впливу параметра «перезарядки» елемента ΔZ_e на процес розподілу сірки та фосфору між металом і шлаком та обґрунтовано його використання в якості критерію оцінки ступеня відхилення системи від рівноваги.

Ключові слова: рафінування сталі, дефосфорація, десульфурація, система «метал-шлак», параметри міжатомної взаємодії в розплавах, коефіцієнт розподілу сірки та фосфору, критерій оцінки нерівноважності системи

Проблема виробництва «чистої» сталі шляхом її рафінування та доведення на установці ківш-піч (УКП) залишається актуальною і зараз. При цьому, розробка сучасних способів оцінки процесів дефосфорації та десульфурації сталі з метою вдосконалення технології, економії енергетичних ресурсів та забезпечення необхідної якості металу в сучасних умовах є важливим завданням.

Ефективність перебігу процесу рафінування сталі залежить від багатьох факторів, серед яких особливо глибокий вплив надають результати процесів фізико-хімічної взаємодії в системі «метал-шлак». По суті, взаємодія розплавленого металу і шлаку є кооперативним іонообмінним процесом компонент єдиної фізико-хімічної системи, результуючі властивості якої залежать від характеристик кожного елемента.

Процеси дефосфорації та десульфурації є протилежними за умовами їх протікання та застосування технологічних впливів. Процес дефосфорації

найбільшою мірою здійснюється в окислювальних умовах конверторної плавки. Активна десульфуріація сталі відбувається завдяки формуванню високоосновних і малозалізистих шлаків за вищої температури плавки на установці ківш-піч (УКП).

Оскільки методологічний апарат класичної термодинаміки важко реалізується для вивчення складних реальних металургійних процесів і систем, в роботі використано методику розрахунку параметрів теорії спрямованого хімічного зв'язку, що описують склад та структуру металевого та шлакового розплавів на рівні міжатомної взаємодії [1]. Виконані дослідження реальних металургійних систем показали, що розподіл компонентів між металом і шлаком визначається двома групами факторів: властивостями середовища, вираженими через інтегральні параметри (хімічний еквівалент складу металу Z^Y та шлаку Δe), і локальним оточенням кожного з компонентів, яке визначається середньозваженим значенням його ефективного заряду (Z_e). Значення Z_e є вельми чутливим індикатором для оцінки кількісних змін у характеристиках міжатомної взаємодії в розплавах [2]. Зміна стану кожного з компонентів під час переходу з однієї фази в іншу може бути визначена як «перезарядка» іонів дифундуючого елемента ΔZ_e , що дорівнює різниці зарядів елемента в металі $[Z_{e_m}]$ і шлаку ($Z_{e_{sh}}$): $\Delta Z_e = [Z_{e_m}] - (Z_{e_{sh}})$. Причому, чим більша величина «перезарядки» при переході міжфазного кордону, тим вищою має бути різниця потенціалів подвійного шару і нижчим коефіцієнт розподілу відповідного елемента

Ефективність технології виробництва металу, що забезпечує реалізацію максимальної здатності рафінуючого шлаку, оцінюється за ступенем відхилення фактичного значення коефіцієнта розподілу елемента від рівноважного. На рис.1 показано ступень відхилення фактичного коефіцієнта розподілу фосфору (а) та сірки (б) від рівноважного, що дозволяє здійснити оцінку ефективності процесу рафінування сталі у сучасних умовах виплавки сталі в Україні. З аналізу представлених даних випливає, що в реальних умовах плавки розподіл фосфору та сірки для всіх марок сталі нижче рівноважного.

Найкращий ступінь наближення до рівноваги по фосфору спостерігається для марки сталі ШХ15, найгірша для 480W.

Для оцінки розрахунку рівноважного міжфазного коефіцієнта розподілу сірки використовується залежність від параметрів металевої (Z^Y) і шлакової системи (Δe і ρ), яка отримана за даними Куликова І.С. і Баптизманського В.І. [3]

$$\lg L_s^0 = 9,03 \times Z^Y + 18,53 \times \rho - 0,096 \times \Delta e - 24,27 \quad (1)$$

Ця залежність дає змогу оцінити ступінь наближення системи «метал-шлак» до рівноваги за сіркою в реальних умовах плавки через відношення фактичного коефіцієнта L_s розподілу сірки до рівноважного:

L_s^0 : $\varepsilon_s = L_s / L_s^0 \times 100, \%$. Найбільша різниця значень фактичного коефіцієнта розподілу сірки L_s та рівноважного L_s^0 до обробки сталі на УКП спостерігається для марок: ШХ15 ($\varepsilon_s = 1/n \times \Sigma L_s / L_s^0 \times 100 = 45\%$), 480W ($\varepsilon_s = 46\%$), SAE1006 ($\varepsilon_s = 51\%$), GR06m ($\varepsilon_s = 52\%$) (група 1), що свідчить про незавершеність іонообмінних процесів розподілу сірки в системі «метал-шлак» на цьому етапі доведення сталі.

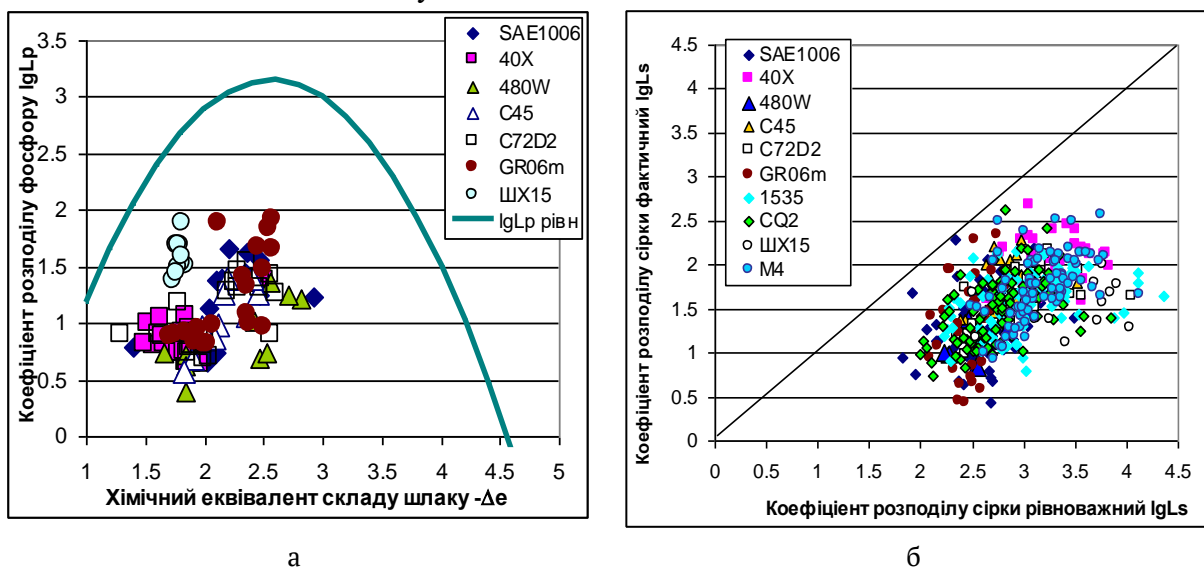


Рисунок 1 - Оцінка ефективності процесу рафінування сталі за ступенем відхилення фактичного міжфазного коефіцієнта розподілу фосфору (а) та сірки (б) від рівноважного у сучасних умовах виплавки сталі в Україні

Виконаний розрахунковий аналіз зв'язку параметра «перезарядки» фосфору ΔZ_p та сірки ΔZ_s з відповідними коефіцієнтами їх розподілу між металом та шлаком показав наступне. Найбільший ступінь зв'язку $\lg L_p = f(\Delta Z_p)$ встановлено для сталі 480W з коефіцієнтом кореляції тисноти парного зв'язку $R = 0,82$, що свідчить про незавершеність процесу дефосфорації цієї марки сталі при її виплавці в конвертері. Найкращу ефективність видалення фосфору зі

сталі встановлено для марки ШХ15, про що свідчить низький рівень зв'язку показника L_p з параметром ΔZ_p зі значенням $R^2=0,18$.

Що до десульфурації сталі виявлено зворотний характер зв'язку фактичного коефіцієнта розподілу сірки L_s з параметром «перезарядки» ΔZ_s для всіх досліджуваних марок сталі до її обробки на УКП, що свідчить про загальну закономірність - чим більшою є величина "перезарядки" під час переходу міжфазного кордону, тим нижчим є фактичний коефіцієнт розподілу сірки. При цьому найбільший ступінь парного зв'язку $lgL_s=f(\Delta Z_s)$ виявлено для тих самих марок сталі, для яких найменший ступінь наближення до рівноваги по сірці: GR06m ($R^2=0,63$), SAE1006 ($R^2=0,37$), 480W ($R^2=0,36$), ШХ15 ($R^2=0,35$).

Отже, для зазначених марок сталі процес розподілу сірки в системі «метал-шлак» на етапі її доведення до УКП не вичерпав свій потенціал іонообмінної взаємодії, про що свідчить низькі значення ступеня досягнення до рівноваги показника ε_s , а також істотно значущий вплив параметра «перезарядки» ΔZ_s на коефіцієнт розподілу сірки. Слід відзначити, що саме для цих марок сталі процес її десульфурації на УКП пройшов найбільш ефективно, що підтверджують високі значення показника ε_s , розрахованого по даним кінцевого хімічного складу сталі після її обробки на УКП. Наприклад, для марки сталі GR06m $\varepsilon_s=81\%$ (рис. 2). До того ж найбільші значення різниці показника ε_s до обробки сталі на УКП і після її доведення на УКП ($\Delta\varepsilon_s= \varepsilon_{\text{спосле УКП}} - \varepsilon_{\text{до УКП}}$) виявлено для тієї ж 1-ї групи марок сталі: для GR06m $\Delta\varepsilon_s=29\%$, ШХ15 $\Delta\varepsilon_s=25\%$, SAE1006 $\Delta\varepsilon_s=24\%$, 480W $\Delta\varepsilon_s=21\%$ (рис. 2).

Тобто для марок сталі групи 1 процес десульфурації на установці ківш-піч пройшов найефективніше з позиції перебігу іонообмінного процесу міжфазного розподілу сірки, що підтверджується високими значеннями показника $E_s = (L_s^k - L_s^h) / L_s^h$, де L_s^h, L_s^k - фактичні коефіцієнти розподілу сірки між металом і шлаком до і після доведення сталі на УКП. Чим вищі значення цього показника, тим інтенсивніше відбувалися фізико-хімічні процеси взаємодії компонент у системі «метал-шлак». Зокрема, високі значення показника E_s зафіксовано для марок сталі також 1-ї групи: GR06m $E_s= 9$ од., 480W $E_s= 7$ од., SAE1006 $E_s= 8$ од. Слід зазначити, що десульфуруючий потенціал системи

«метал-шлак» для марки сталі ШХ15 порівняно із зазначеними марками сталі був не до кінця вичерпаний, що підтверджує невисоке значення показника $E_S=4$ од.

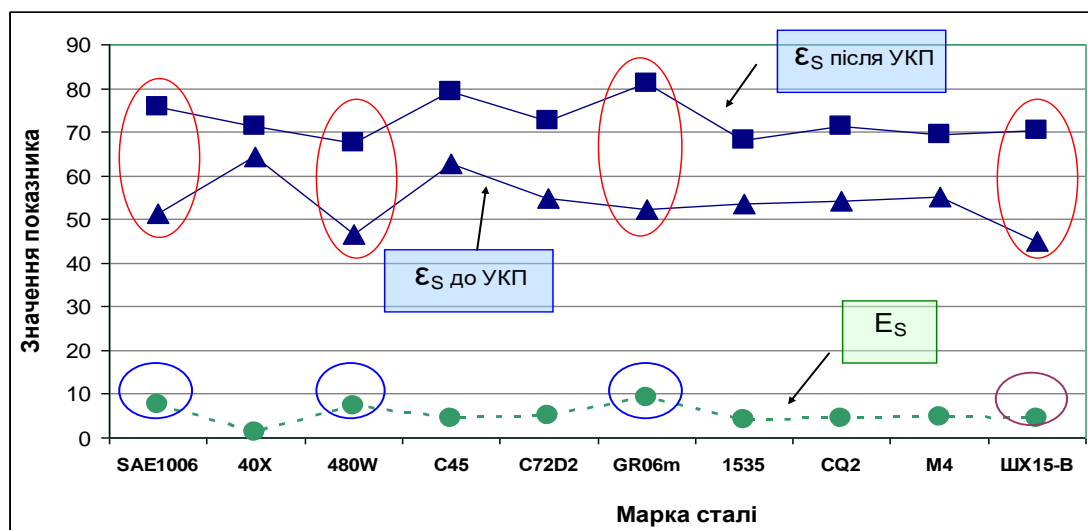


Рисунок 6 – Узгоджена зміна показників оцінки досягнення системи «метал-шлак» рівноваги по сірці $\epsilon_S = L_S / L_S^0 \cdot 100, \%$ (до та після обробки сталі на УКП) та ступеню завершення іонообмінних процесів $E_S = (L_S^K - L_S^H) / L_S^H$

Таким чином, отримані результати досліджень дають змогу використовувати параметр «перезарядки» елемента, що дифундує через кордон розділу фаз, зокрема сірки та фосфору, як критерій оцінки ступеня завершеності фізико-хімічних іонообмінних процесів взаємодії в системі «метал-шлак» на різних етапах виплавки й доведення сталі.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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, №.1, pp. 58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
2. Методика оцінки фізико-хімічної взаємодії в системі "метал-шлак" як кооперативного іонообмінного процесу під час рафінування сталі / Д. М. Тогобицька, А. І. Белькова, Д. О. Степаненко, І. Р. Поворотня, С. В. Греков // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. - 2023. - Вип. 37. - С. 271-286. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-271-286>
3. Тогобицька Д.М. Банк даних «Металургія» - інформаційна основа прогнозування властивостей фізико-хімічних систем та їх розплавів / Д.М. Тогобицька, Д.О.

4. Степаненко, А.І. Белькова, О.П. Петров, Ю.М. Ліхачов // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. -2021. -№24. - С. 140-148. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.14>

DEVELOPMENT OF CRITERIA FOR EVALUATING STEEL REFINING PROCESSES USING INTERATOMIC INTERACTION PARAMETERS IN MELTS

Togobitskaya Daria, Bielkova Alla, Stepanenko Dmytro, Khodotova Nadiya

Abstract. *To evaluate the efficiency of steel refining processes, the results of the physicochemical interaction of elements in the metal-slag system of ten steel grades smelted in modern conditions in Ukraine were analysed.*

As a result of the analysis of the patterns of changes in the distribution coefficients of sulphur and phosphorus depending on the chemical composition of steel and slag, physicochemical criteria for assessing the degree of completeness of ion exchange processes during steel dephosphorisation and desulphurisation have been developed using integral parameters of interatomic interaction in melts. Along with the use of integral physicochemical parameters of the chemical and charge state of the system Z^Y , Δe and Z_e , the key role of the influence of the "recharge" parameter of the element ΔZ_e on the process of sulfur and phosphorus distribution between metal and slag is shown and its use as a criterion for assessing the degree of deviation of the system from equilibrium is substantiated.

Keywords: *steel refining, dephosphorisation, desulphurisation, metal-slag system, parameters of interatomic interaction in melts, sulphur and phosphorus distribution coefficient, system disequilibrium assessment criterion*

REFERENCE

1. 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, №.1, pp. 58-71 (2024). <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>
2. Metodyka otsinky fizyko-khimichnoyi vzayemodiyi u systemi "metal-shlak" yak kooperatyvnoho ionoobminnoho protsesu pid chas rafinuvannya stali / D. M. Tohobyts'ka, O. I. Byel'kova, D. O. Stepanenko, I. R. Povоротnya, S. V. Hrekov // Fundamental'ni ta prykladni problemy chornoyi metalurhiyi. – 2023. – Vip. 37. – S. 271-286. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-271-286>
3. Tohobyts'ka D.M. Bank danykh «Metalurhiya» - informatsiyana osnova prohnozuvannya vlastyovostey fizyko-khimichnykh system ta yikh rozplaviv / D.M. Tohobyts'ka, D.O. Stepanenko, O.I. Byel'kova, O.P. Petrov, YU.M. Likhachov // Suchasni problemy metalurhiyi. Naukovi visti. -2021. -№24. – S. 140-148. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.14>