

3. *Снігура І.Р.* Фізико-хімічні передумови для розробки комплексних співвідношень властивостей металургійних розплавів з метою прогнозування закономірностей розподілу елементів при доведенні на УКП / *І.Р.Снігура, Д.М. Тогобицька, В.П. Піптюк, С.В. Греков, О.П. Петров* // Сб.н.пр. ІЧМ «Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії». – Дніпро. – 2020. – Вип.34. – С.150 – 158.

УДК 669.18.046

**Д. М. Тогобицька, А. І. Белькова, С.В. Греков, Н.Є. Ходотова**

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

### **ФІЗИКО-ХІМІЧНІ КРИТЕРІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕФОСФОРАЦІЇ СТАЛІ ЗА СУЧАСНИХ УМОВ УКРАЇНИ**

У сучасній металургії ефективність дефосфорації сталі є одним з найважливіших факторів, що визначають якість і придатність одержуваних сталевих виробів. В процесі виробництва сталі, особливо при використанні сировини з підвищеним вмістом фосфору, концентрація цього елемента може перевищувати допустимі межі, що потребує додаткових зусиль щодо його видалення. Для зниження вмісту фосфору до прийняттого рівня застосовуються різні технології дефосфорації з використанням флюсів, присадок та термічних методів. Завдяки цьому одержувана сталь має оптимальні властивості для широкого спектру застосувань у різних галузях промисловості. У зв'язку з цим оцінка ступеня завершеності процесу дефосфорації з метою прийняття ефективних технологічних рішень є актуальним та необхідним засобом при управлінні.

У цій роботі запропоновано метод оцінки ефективності процесу дефосфорації сталі в сучасних умовах України. Для аналізу використано методику розрахунку параметрів теорії спрямованого хімічного зв'язку, що описують склад та структуру металевого та шлакового розплавів на рівні міжатомної взаємодії [1].

Виконані раніше дослідження показали, що розподіл фосфору при проведенні рафінування рідкого металу визначається двома групами факторів: інтегральними характеристиками взаємодіючих фаз і зарядовим станом дифузного елемента. Для характеристики зарядового стану фосфору використовуються його середній заряд та інтегральні характеристики - параметр  $Z^Y$  для металу і параметри  $De$  і  $r$  для шлакової фази. Кількісні співвідношення, що пов'язують ці параметри з характеристиками між-

фазного розподілу фосфору, абстраговані від концентрацій окремих компонентів у реагуючих фазах, та описують процеси дефосфорації як складову частину кооперативних іонообмінних процесів у такій системі. Таким чином, всі компоненти розплавів впливають на кінцевий результат таких процесів, причому цей вплив є змінним, що залежить від співвідношення концентрацій окремих компонентів.

В роботі проаналізовано дані хімічного складу типових марок сталі перед її доводкою в ковші на двох комбінатах, для яких розраховані хімічний еквівалент складу сталі  $Z^Y$  та відповідного шлаку  $De$ , показник стехіометрії шлаку  $r$ , а також ефективний заряд фосфору в металі. У термінах інтегральних параметрів  $Z^Y$ ,  $De$  та  $r$  металургійні розплави описуються як хімічно єдині системи, а не суміш окремих компонентів або їх сполук.

Одним із показників оцінки ефективності процесу дефосфорації є коефіцієнт розподілу фосфору між металевою та шлаковою фазами  $L_p = (P_2O_5)/[P]$ . За величиною значення цього показника можна судити про ступінь завершеності процесу видалення фосфору зі сталі та вичерпання термодинамічного потенціалу можливості подальшої взаємодії компонентів у єдиній системі «метал-шлак».

В результаті обробки даних хімічного складу аналізованих марок сталі та відповідного шлаку виявлено закономірності впливу інтегральних характеристик розплавів на коефіцієнт розподілу фосфору між сталлю та шлаком у вигляді рівнянь. Так, наприклад, для марки сталі 480W рівняння має вигляд ( $R$  – коефіцієнт кореляції):

$$\lg L_p = 53 - 45,9 \cdot Z^Y - 0,88 \cdot De + 2,59 \cdot r \quad R=0,7 \quad (1)$$

З використанням параметрів міжатомної взаємодії у роботі [2] виконано дослідження впливу хімічного еквівалента складу шлаку на коефіцієнт розподілу фосфору за даними результатів робіт, що характеризують близький до рівноважного розподіл фосфору в системі «метал-шлак». Подана на рис. 1 залежність рівноважного коефіцієнта розподілу фосфору від хімічного еквівалента складу шлаку  $De$  має екстремальний характер.

Ефективність технології виробництва металу, що забезпечує реалізацію максимальної здатності рафінуючого шлаку, оцінюється за ступенем відхилення фактичного значення коефіцієнта розподілу фосфору від рівноважного. На рис.1 такий порівняльний аналіз зроблено для промислових конвертерних плавов марок сталі за сучасних умов України. З аналізу представлених даних випливає, що в реальних умовах плавки

розподіл фосфору для всіх марок сталі нижче рівноважного. Найкращий ступінь наближення до рівноваги фосфору спостерігається для марки сталі ШХ15, найгірша для 480W.

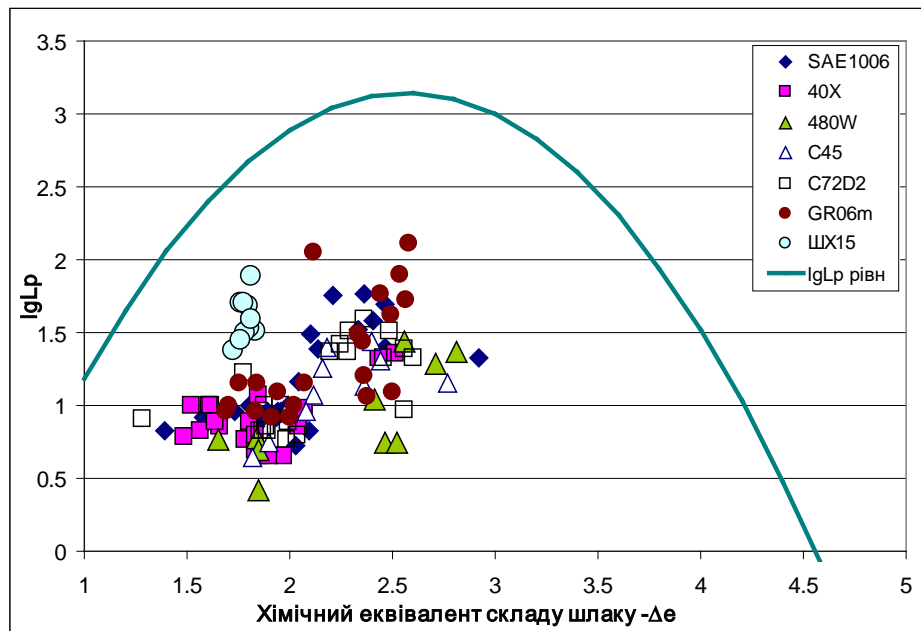


Рис. 1 – Оцінка ефективності процесу дефосфорації сталі за ступенем відхилення фактичного коефіцієнта розподілу фосфору від рівноважного у сучасних умовах виплавки сталі в Україні

Процес переходу іонів фосфору через границю «метал-шлак» значною мірою визначається активністю відповідних елементів у розплавах, що залежить від їх зарядового стану та загального складу взаємодіючих фаз. Як критерій оцінки ефективності процесу дефосфорації сталі пропонується використовувати параметр «перезарядки» іонів дифузного елемента  $DZ_e$ , рівний різниці зарядів елемента в металі  $[Z_{eM}]$  та шлаку  $(Z_{eШ})$ :  $DZ_e = [Z_{eM}] - (Z_{eШ})$ . При цьому його вплив тим більший, чим більше відхилено систему від рівноваги.

Ця теза отримала підтвердження під час аналізу аналізованих марок сталі. Зокрема, найбільший ступінь впливу параметра «перезарядки» фосфору  $DZ_p$  виявлено для марки сталі 480W, що оцінюється за коефіцієнтом кореляції тісноти парного зв'язку  $R$ . Значення  $R^2$  зв'язку  $lgL_p=f(DZ_p)$  для сталі 480W найбільше  $R^2=0,71$ , що свідчить про незавершеність процесу дефосфорації цієї сталі при її виплавці в конвертері (рис.2). Введення в модель (1) параметра  $DZ_p$  як додатковий фактор покращує точність прогнозу:

$$lg L_p = 64 - 32,2 \cdot Z^Y + 6,1 \cdot \Delta\epsilon - 26,5 \cdot \rho + 13,7 \cdot \Delta Z_p \quad R=0,87 \quad (2)$$

Найкраща ефективність видалення фосфору зі сталі марки ШХ15 на додаток до даних рис. 1 підтверджується низьким ступенем зв'язку коефіцієнта розподілу фосфору з параметром його «перезарядки», для якої значення коефіцієнта кореляції  $R^2=0,18$ .

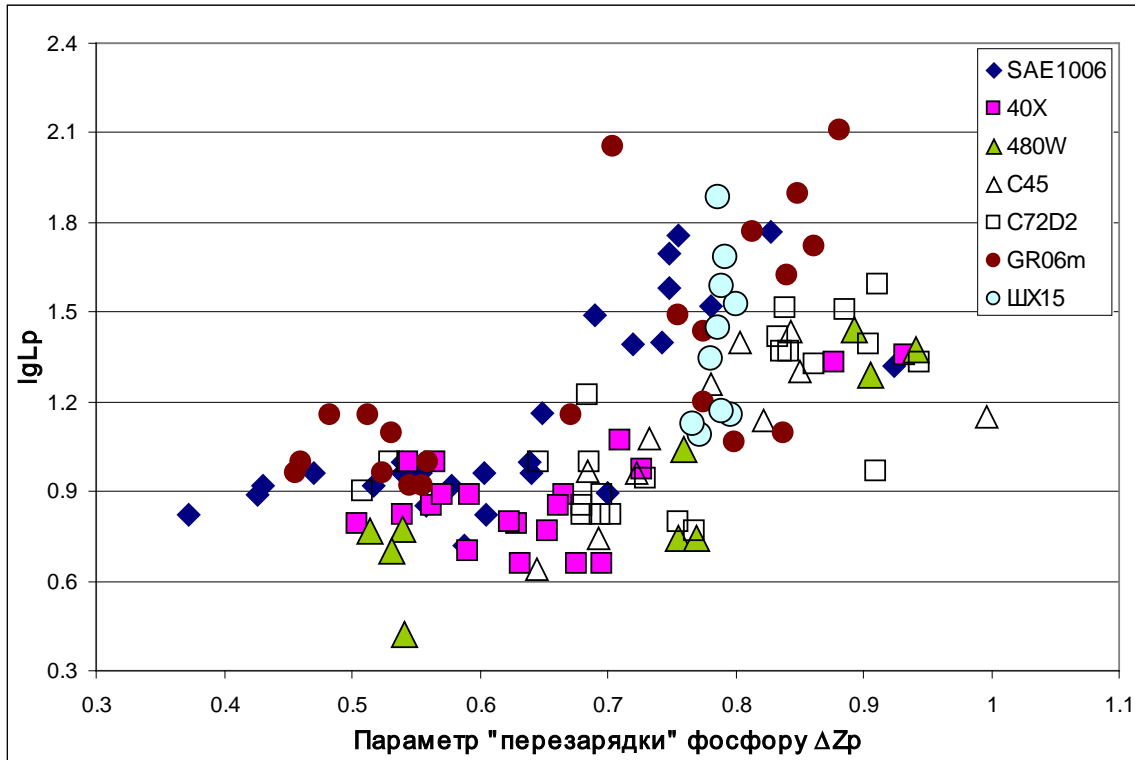


Рис. 2. Зв'язок коефіцієнта розподілу фосфору з параметром його «перезарядки»

Таким чином, використання параметрів міжатомної взаємодії при трактуванні хімічного зв'язку як спрямованого дозволяє з єдиних фізико-хімічних позицій інтерпретувати результати іонообмінних процесів між фазами, що реагують. Такий підхід дозволяє оцінити ступінь завершеності процесу дефосфорації з метою прийняття ефективних технологічних рішень, а також на новому рівні підійти до вирішення конкретних прикладних завдань, зокрема до оптимізації існуючих та розробки нових технологій та реагентів для отримання чистих по сірці та фосфору сталей.

### Список літератури

1. Приходько Э. В., Тогобицкая Д. Н., Хамхотько А. Ф., Степаненко Д. А. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем. – Днепропетровск: Пороги, 2013. – 339 с.

2. Приходько Э.В., Шеенко М.И. Равновесное распределение фосфора между металлом и шлаком и методика оценки степени его достижения // Известия ВУЗов. Черная металлургия.-1985.-№1.-С.6-9.

УДК 669.1.061.6

**Л. Г. Тубольцев<sup>1</sup>, О. Е. Меркулов<sup>1</sup>, В. О.Петренко<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Український державний університет науки і технологій, Дніпро

### **ЕКОЛОГІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ УКРАЇНИ**

**Вступ.** Слід одразу звернути увагу, що металургія є базовою галуззю економіки більшості промислово розвинених країн, однак у загальному обсязі світових викидів парникових газів частка металургії становить 6%, транспорту – 23%, електроенергетики – 39%. В Україні у 2019 році частка чорної металургії у викидах CO<sub>2</sub> від загальних склала 23% [1]. Проте, обмеження щодо рівня використання вуглецю у виробництві, прийняті на найвищому законодавчому рівні в ЄС, найближчим часом вірогідно призведуть до закриття багатьох підприємств. ЄС планує запровадити спеціальний механізм (Carbon Border Adjustment Mechanism), відповідно до якого імпорт продукції, виробленої з вищими, ніж у ЄС, викидами CO<sub>2</sub>, буде оподатковуватись додатковою платою [2]. У світі розглядаються можливості застосування технологій декарбонізації під час виробництва сталевих продукції для зменшення викидів вуглекислого газу, відповідального за парниковий ефект та глобальне потепління Землі, та поліпшення екологічної ситуації. Нагальним є використання альтернативних вуглецю відновників оксидів заліза, перспективних технологій та їх застосування у металургійному виробництві.

**Термодинаміка відновлення оксидів заліза.** Процеси відновлення оксидів металів газоподібними та твердими відновниками лежать в основі всіх металургійних технологій. Зазвичай, основним відновником у металургійних процесах використовується вуглець. Вуглець є єдиним елементом металевої ванни, що дає у звичайних умовах плавки газоподібні продукти окислення - {CO}, або суміші {CO} і {CO<sub>2</sub>}. Іншим відновником може служити водень, але у звичайних умовах його продуктом є вода H<sub>2</sub>O, яка при високих температурах переходить у газоподібний пар {H<sub>2</sub>O}. Таким чином, во-