

3. Singh R., Pandey B., Chatterjee A. *Metallics for Steelmaking: Production and Use* – Allied Publishers Pvt., 2001. – 756.
4. Шатоха В.І. *Сталий розвиток чорної металургії*. – Дніпропетровськ: «Дріант», 2015. - 184 с.
5. 2023 World Direct Reduction Statistics. веб-сайт. URL: <https://www.midrex.com/insight/world-dri-production-reaches-135-7-mt-in-2023/> (дата звернення: 10.04.2025).
6. Hydrogen-based steelmaking to begin in Hamburg URL: <https://corporate.arcelormittal.com/media/cases-studies/hydrogen-based-steelmaking-to-begin-in-hamburg> (дата звернення: 11.04.2025).
7. H₂ Green Steel is Now Stegra <https://www.midrex.com/tech-article/h2-green-steel-is-now-stegra/> (дата звернення: 11.04.2025).
8. Нестеров О.С., Хамхотько А.Ф., Белькова А.І., Скачко О.С. Актуалізація бази даних та моделей для прогнозування властивостей залізородних матеріалі // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 20012 № 26. С. 120 — 129.

УДК 669.26:094. 22:669.053

Д. О. Степаненко¹, С. В. Семірягін², О. М. Гришин¹, А. І. Белькова¹

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро

²ДП «НПІ «ДНІПРОЕНЕРГОСТАЛЬ», Запоріжжя

ОЦІНКА ПЕРЕДУМОВ ВИДАЛЕННЯ ФОСФОРУ ПРИ ТВЕРДОФАЗНОМУ ВІДНОВЛЕННІ ЗАЛІЗА ТА ХРОМУ З КОМПЛЕКСНОЇ ШИХТИ

З моменту індустріалізації і по теперішній час, промисловість постійно генерує і накопичує значну кількість техногенних відходів. Промислові відходи викликають найбільше занепокоєння через два основні фактори: їх масштаби (відходи накопичуються у великих кількостях та обсягах) та, як правило, їх токсичність, що обумовлено вмістом шкідливих речовин. Проте, деякі види відходів представляють інтерес як джерело мінеральної сировини для заміщення мінеральних ресурсів природного походження, які потребують значних затрат на їх видобуток. Розробка методів комплексної безвідходної переробки техногенних утворень з отриманням цінних продуктів для потреб, зокрема металургійної галузі є актуальною проблемою. До проблемних техногенних утворень, які мають інтерес для чорної металургії, можна віднести червоний шлам, мідно-

нікелеві шлаки, шлаки виробництва феромарганцю, хромвмісні відходи (відходи збагачення хромітових руд, шлаки виробництва ферохрому, відходи шкіряного виробництва), а також некондиційні хромітові руди та ін. Переробка подібних матеріалів дозволяє розширити сировинну базу для чорної металургії та знизити екологічне навантаження на довкілля. Використання різних техногенних матеріалів у традиційних металургійних агрегатах (доменна піч, ДСП та ін.) утруднене, в першу чергу у зв'язку з вмістом у їх складі значної кількості шкідливих елементів, зокрема сірки, фосфору, цинку, лугів та ін., які негативно впливають на якість металу та стійкість футерівки металургійних агрегатів. Однак для технології твердофазного відновлення (ТВ) такі матеріали представляють інтерес, оскільки перебіг процесу проходить в області температур нижче за точку розм'якшення шихти, що сприяє не потраплянню шкідливих елементів у метал. Використання технології прямого відновлення є також важливим кроком до зниження викидів CO₂. Сучасні дослідження показують, що водень є високоефективним відновником для технології твердофазного відновлення [1, 2]. Сучасні установки прямого отримання заліза можуть працювати на 100% водню як відновлювальний газ. У цьому випадку процес виготовлення заліза прямого відновлення (процес DRI) стає вуглецево-нейтральним, до чого прагне світова металургія.

Враховуючи переваги процесу ТВ, нами проводяться ґрунтовні дослідження особливостей термодинаміки даного процесу при відновленні заліза, хрому та видалення фосфору зі складу комплексної шихти, яка містить, зокрема, некондиційні хромітові руди вітчизняних родовищ (Побузьке родовище) та хромвмісну золу термічної обробки відходів шкіряного виробництва. Хімічний склад хромвмісних некондиційних руд не дозволяє застосовувати їх для виробництва стандартних марок ферохрому традиційними методами через низьке співвідношення Cr : Fe, рівного ~ 1:1, але дана сировина має потенціал, оскільки містить хром в середньому близько 25%. Наявне в складі вітчизняних хромітових руд залізо, в умовах твердофазного відновлення, є одним з основних джерел заліза у складі металізованого продукту. Основною цінністю відходів шкіряного виробництва є високий, порівняно навіть з кондиційними хромітовими рудами, вміст у їх складі Cr₂O₃ (більше 60 мас. %). Основною проблемою переробки відходів шкіряного виробництва традиційними методами є високий вміст в їх складі P₂O₅, що утворюється при високотемпературному випалюванні органічної частки шкіри. З метою оцінки можливості видалення фосфору з комплексної шихти проведено попередній термодинамічний аналіз рівноважного фазового складу у системі

