
**РЕСУРСО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ПІДПРИЄМСТВАХ
МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ І У ЛИВАРНИХ ЦЕХАХ**
RESOURCE AND ENERGY SAVING IN METALLURGY AND FOUNDRY

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 34, 2026, № 2 (345), 89-106

<https://doi.org/10.15407/steelcast2026.02.089>

УДК 669.162.2:669.046:66.094.3

А.П. Мішалкін, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри теоретичних основ металургійних процесів,
e-mail: meshalkin@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-7206-1809>

Л.В. Камкіна, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри теоретичних основ металургійних процесів,
e-mail: lydmila.kamkina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>

В.О. Петренко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри інтелектуальної власності та управління проєктами,
e-mail: petrenko_v@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

В.Г. Чистяков, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри металургії чавуну і сталі,
e-mail: chist.chvg60@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4233-3797>

М.М. Бойко, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри металургії чавуну і сталі,
e-mail: m.m.boiko@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3557-9027>

А.А. Надточій, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри теоретичних основ металургійних процесів,
e-mail: Nadtochiy08@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5077-0562>

А.А. Ванюков, канд. техн. наук, доц., доц. кафедри теоретичних основ металургійних процесів,
e-mail: antonvanukov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-5616-391X>

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

Розвиток теоретичних основ використання рудовугільних композитів та їх узгодження з сучасними напрямами удосконалення доменного процесу

У роботі узагальнено сучасні теоретичні уявлення та результати практичного використання рудовуглецевих композитних матеріалів (РВКМ) як часткових заміників агломерату, окатишів, коксу і пиловугільного палива у доменному виробництві.

Метою дослідження є встановлення фізико-хімічних закономірностей впливу РВК на перебіг процесів відновлення оксидів заліза, газифікації вуглецю, формування TRZ та питомі витрати відновника, а також визначення перспективних складів і способів підготовки композитів з урахуванням можливості використання піро-біовуглецю.

Методологічну основу роботи становлять термодинамічний аналіз рівноваги системи (Fe–O–C–CO–CO₂), узагальнення результатів кінетичних і модельних досліджень. Проаналізовано особливості перебігу реакцій відновлення заліза та газифікації вуглецю в умовах безпосереднього контакту оксидів заліза і вуглецю в об'ємі композиту (при зміні виду матеріалу, що містить вуглець та його походження).

Підтверджено, що просторове зближення рудної та паливно-відновлювальної складових забезпечує: формування локально-високого відновлювального потенціалу, інтенсифікацію непрямого відновлення; зниження температури та звуження TRZ з підвищенням ступеня раціонального використання CO. Зниження TRZ на 50–150 °C, за результатами сучасних досліджень, в свою чергу, сприяє: забезпеченню більш ранньому розвитку непрямого відновлення оксидів заліза; зменшенню потреби в CO та інтенсифікації реакції газифікації вуглецю, що зумовлює зниження питомих витрат коксу і PCI та тонну чавуну, підвищення ефективності використання відновлювального

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

потенціалу CO та скорочення вуглецевого сліду доменного процесу загалом.

Розглянуто перспективні типи РВКМ: гарячебрикетовані, холоднотв'язані брикети, самовідновлювальні брикети та композитні брикети/окатиші. Показано, що найбільш перспективними для стійкого розвитку сучасної металургії можуть бути композити на основі залізородного концентрату, доменних пилів і шламів, петкоксу, дрібного вугілля та піро-біовуглецю. Проаналізовано вплив способів підготовки композитів, а саме: гарячого брикетування, холодного пресування, карбонізації та окатування вихідної шихти на їх механічні властивості, реакційну здатність і вірогідну поведінку в доменній печі.

Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні доцільності використання піро-біовуглецю як часткового заміника викопного вуглецю у складі РВКМ. Встановлено, що піро-біовуглець, завдяки високій пористості, розвиненій поверхні і підвищеній реакційній здатності, забезпечує подальше зниження TRZ і питомих витрат відновника, одночасно створюючи передумови для зменшення вуглецевого сліду доменного виробництва.

Теоретичне значення роботи полягає в розвитку уявлень про механізм суміщеного перебігу відновлення оксидів заліза і газифікації вуглецю у складі РВКМ та їх вплив на параметри доменного процесу. Практичне значення полягає у визначенні перспективних напрямів часткової заміни агломерату, окатишів, коксу і PCI рудовуглецевими композитами з метою підвищення енергоефективності доменного виробництва, зниження витрат викопного вуглецю та скорочення викидів парникових газів.

Ключові слова: рудовуглецеві композити, відновлення заліза, газифікація вуглецю, формування TRZ, скорочення викидів CO₂.

Вступ. Рудовугільні композити (залізородно-вуглецеві композитні агломерати, брикети, окатиші) — це клас сучасних матеріалів, у яких дрібна залізородна складова мікроструктурно «зближена» з вуглецевим відновником (вугілля, коксик, напівкокс, петкокс, піро-біовуглець) і реалізована у вигляді брикетів/окатишів/агломератів. Їх роль в доменному процесі — заміна частини традиційних залізородних компонентів шихти з метою прискорення відновлення Fe_xO_y за рахунок підвищення реакційної здатності вуглецю в зоні контакту «Fe_xO_y-C» через інтенсифікацію реакції газифікації. Досягається шляхом: обґрунтування раціональних фракційного, хімічного складу компонентів РВК та визначення доцільної частки їх в доменній шихті як заміників відповідних часток залізородних та паливно-відновлювальних компонентів.

За логікою еволюції напряму використання РВКМ як заміника відповідних частин шихти, першим видом композитів доцільно вважати самовідновлювальні агломерати (self-reducing agglomerates) [1]. В них дрібнодисперсні оксиди заліза поєднані із вуглецевим відновником у межах одного брикету або окатиша. Саме вони стали вихідною основою подальшого розвитку виробництва вуглецевих композитних брикетів, вуглецево-залізних композитів та ферококсу.

Ідея їх застосування, згідно з [1] — вирішення дифузійних обмежень газового відновлення у домні шляхом наближення до «мікрорівня» відстані між залізородними компонентами (оксиди заліза) та вуглецем коксу (відновник). При цьому, вірогідно, реакції прямого відновлення + газифікація вуглецю «стартують» при більш низьких температурах, їх розвиток прискорюється, що дозволить досягти більш значних рівнів їх завершеності та більш повного раціонального використання корисних властивостей фізико-хімічного потенціалу композитного матеріалу — заміника.

У Японії напрям, що розглядається, мав аналогічну ціль: створити умови для зниження темпе-

ратури відновлення оксидів заліза (Thermal Reserve Zone (TRZ) і вийти на режим доменної плавки з мінімальною витратою коксу RAR та PCI на 1 т чавуну) [2].

RAR, за даними [3] є сумарною витратою коксу, пиловугільного палива (ПВП-PCI) та інших альтернативних матеріалів-відновників. А «low-RAR operation is a blast furnace» — це режим роботи доменної печі, що характеризується зниженою витратою відновників (коксу та ПВП, що вводиться в піч з дуттям за технологією PCI) на тону чавуну при збереженні необхідного теплового та відновного балансу процесу. Фізичний зміст — зниження витрати матеріалів, що містять вуглець (кокс, вугілля, ПВП, піро-біовуглець), що зменшить витрати не тільки витрати вуглецю, але й вихід CO₂ та здешевить виробництво чавуну. Тому RAR доцільно визначати одним з головних показників ефективності роботи домни.

Аналіз результатів досліджень використання РВК у доменній шихті та обмежень їх застосування.

З метою узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень використання рудовуглецевих композитів (РВКМ) для часткової або повної заміни залізородних і паливно-відновлювальних складових доменної шихти, розглянуто вплив РВКМ на перебіг процесів відновлення, газифікації, формування температурно-газодинамічного режиму та показники роботи доменної печі. Особливу увагу приділено визначенню меж ефективного застосування композитів, факторам, що обмежують їх використання, зокрема міцності, реакційної здатності, схильності до руйнування, впливу на проникність шихти та стабільність ходу печі.

Типові значення RAR: звичайний — 500-550 кг/т чавуну; вдосконалений — 450-500 кг/т; сучасний передовий — 350-400 кг/т. Це критично важливо, тому, що відновники в собівартості чавуну становлять ~ 60 %; вуглець коксу або інші матеріали-відновники є головним джерелом CO₂. Тому RAR визначають як один з головних показників ефективності роботи домни. Реалізація результатів досліджень напряму «РВКМ»

дозволяють: знизити температуру TRZ; прискорити розвиток і реалізацію процесів відновлення оксидів заліза; зменшити показник RAR [3]. Найважливішим, для обґрунтованої реалізації «ідеї», фактором є те, що температура TRZ є ключовим параметром, що визначає витрату відновників і ефективність доменного процесу. Фактично, зона доменної печі з температурою ~ 950 °C, де температура газу і шихти вирівнюється, визначає питому витрату коксу.

TRZ як теплова резервна зона/область в доменній печі, де температури газу та твердої шихти майже зрівнюються та залишаються постійними в інтервалі 900—1000 °C, формує зону теплової рівноваги в доменній печі [3]. За фізичною суттю TRZ характеризує: завершеність теплообміну; стабілізацію температури; створення умов для розвитку головної реакції відновлення оксидів заліза CO. При цьому реалізується принцип: чим нижча температура TRZ, тим ефективніша робота домни. Авторами дослідження [4] визначено раціональний вміст вуглецю, який в залізовуглецевій композиції становить 20 %. За візуальною оцінкою, протяжність TRZ в доменній печі, для якої характерною є температура ~ 950 °C, складає ~ 35 —40 % від загальної, що визначена від колошника до рівня розташування дуттєвих фурм.

За задумом авторів [2], який ґрунтується на теоретичній основі, збільшення швидкості газифікації коксу може знизити температуру «зони теплового резерву», що призведе до зменшення споживання вуглецю та швидкості CO в доменних печах. Відповідне збільшення часу взаємодії CO з оксидами заліза в шарі шихти, очевидно, підвищить рівень використання його хімічної енергії. Досягнуто значне зниження температури відновлення оксидів заліза, що створило «резерв теплової та хімічної енергії» та збільшило рівень використання відновлювального потенціалу CO, продукту газифікації вуглецю коксу в шарі композитного матеріалу — агломерату. Як наслідок, був розроблений RCA — «реактивний коксовий агломерат», що має достатньо високий вміст вуглецю.

Випробуваннями RCA, що проведено в умовах доменної печі, встановлено, що використання RCA дозволяє знизити температуру TRZ та споживання вуглецю в доменній печі [4]. Показано, що застосування агломерату — композиту прискорює газифікацію вуглецю, покращує кінетику відновлення та зменшує споживання вуглецю приблизно на 0,36 кг/т чавуну при застосуванні 1 кг/т вхідного вуглецю з RCA.

Найзручніше класифікувати РВК за способом їх формування та носієм вуглецю — його типом та походженням. В подальшому, дослідження були спрямовані на вдосконалення складу та способів підготовки та застосування вуглецево-композитних матеріалів (РВКМ), за результатами яких розроблено наступні технологічні рішення.

Ефективним напрямом на шляху еволюційного розвитку РВКМ необхідно визнати СІС (Carbon Iron Composite) [5]. Сутність визначається тим, що суміш дрібної руди та вугілля ущільнюють гарячим брикетуванням. При цьому використовують властивість

термопластичності вугілля, часто без зв'язуючого, з проведенням наступної карбонізації в шахтній печі. Реалізацію такої технології забезпечує за висновками дослідників достатню міцність композиту з високою реакційною здатністю вуглецю. Опис підходу, технологічний маршрут та основні результати дослідження наведені у звіті JFE [5].

Для здешевлення при переході до масового виробництва РВКМ з'являються також способи холодного брикетування/обкатування суміші вихідних компонентів композитів (cement-bonded), розробляються технологічні рішення щодо використання для їх виробництва наявного обладнання. Наприклад, концепція суміщення виробництва композитних окатишів із агломератом на діючих агломашинах [6].

До альтернативних по відношенню до коксу, що є традиційним компонентом-відновником доменної шихти, необхідно віднести петкокск [7] (продукт коксування важких нафтових залишків при 450—550 °C без доступу повітря; C = 85 – 98 %) та деревне вугілля/піро-біовуглець (ПБВ) [8] — продукти термічної деструкції матеріалів рослинного походження при 300—1100 °C з $\alpha_{O_2} = 0,7 - 0,9$, що містять 70—95 % піролізного вуглецю. Ці альтернативні матеріали використовують при виготовленні самовідновлювальних брикетів/окатишів. Причому, петкокск є високовуглецевим побічним продуктом нафтової переробки, характеризується підвищеною реакційною здатністю, високою теплотворною здатністю (теплота згоряння дорівнює 32—35 МДж/кг) та відносно низькою вартістю, що обумовлює можливість його ефективного використання як відновника та паливної складової рудовуглецевих композитів.

Як джерело вуглецю застосовують доменний шлам/пил (SRP із BF sludge) [9]. Оригінальною за ідеєю, та перспективною при вирішенні ряду проблем щодо досягнення стабільності властивостей та вмісту вуглецю є виробництво композитів на агломераційному обладнанні з отриманням матеріалу з вуглецевим ядром в захисній оболонці [10]. Високий вміст сірки (0,5—7 %), низька механічна міцність, яка не дозволяє використовувати петкокск в умовах доменної печі як «опорний» кокс, обмежують, згідно з висновками авторів [10], його використання як заміника коксу. Тому, поряд з використанням ПВП та ПБВ, вірогідними напрямками застосування петкоксу необхідно визнати їх інжекцію з дуттям (до 20—30 % як заміника ПВП при реалізації РСІ технології), або в композитах (до 20—50 % як заміника коксу). Можливість використання петкоксу ґрунтується на підвищеній реакційній, високій теплотворній здатності та його низькій вартості, які обумовлені вторинним походженням високовуглецевого продукту нафтової переробки. Разом, складові фізико-хімічного потенціалу петкоксу спроможні забезпечити ефективне використання відновлювальної та паливної здатності в складі рудовуглецевих композитів в умовах їх використання в доменній печі.

Перспективність рішень щодо формування фізико-хімічного потенціалу вуглецево-залізородних композитів та ефективності використання його

го складових властивостей в доменному процесі, визначається, на нашу думку, можливістю керування зниженням TRZ, підвищенням реакційної здатності вуглецю, частковим заміщенням рудної частини та коксу доменної шихти рециклінгу виробничих відходів: пилу, шламів та інших матеріалів.

Введення до складу вихідної шихти ПБВ перед формуванням брикетів для отримання CO₂-ефекту у доменному виробництві свідчить за даними [11] про помітне скорочення CO₂-викидів, особливо, при збільшенні частки композитів, що визначає окремий напрям оптимізації металургійних процесів.

На основі аналізу теоретичних положень та практичних результатів розробки раціональних складів, способів виробництва та використання РВК визначені основні задачі, вирішення яких сприятиме поширенню їх застосування в доменному виробництві:

— оптимізація гранулометрії брикетів/окатишів, щоб забезпечити стабільну газопроникність доменної шихти;

— обґрунтування обмежень щодо дріб'язку як наслідку використання РВКМ з забезпеченням контролю параметрів їх міцності;

— вирішення питань завантаження композитів в піч (технологічні особливості: шарове/диференційоване завантаження в певні зони колошника;

— паралельний контроль шкідливих домішок у композитах: S, Zn, R₂O₃;

— вибір раціонального маршруту виробництва на основі співставлення витрат на виробництво та наслідків/ефектів застосування (гарячебрикетований, холоднотв'язаний).

Необхідно також визначити, що часткова або повна заміна в складі композитів традиційних відновників, що мають викопне походження (коксик, дріб'язок/пил вугілля, петкокс) на піро-біовуглець (вуглець рослинного походження) доцільно розглядати як один із найбільш перспективних напрямів декарбонізації. Цьому сприяє його підвищена реакційна здатність, нижча температура початку газифікації та менший вміст сірки і золи, порівняно з коксом. Це забезпечує інтенсифікацію непрямого відновлення оксидів заліза, зниження TRZ і потенційне скорочення питомих витрат відновника. Разом з тим, надмірний вміст піровуглецю у композиті може, вірогідно, погіршити гарячу міцність і газопроникність шихти.

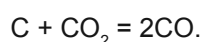
На основі узагальнення результатів використання в основних металургійних процесах [5—7, 11, 12] композитів (брикетів, агломерату, сумішей цільового призначення) визначені вірогідні ефекти та обмеження використання РВКМ за способом виробництва та їх складом, що наведено в табл. 1.

Таблиця 1

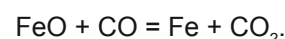
Характеристика піро-біовуглецевих рудовуглецевих композитів

Тип композиту	Склад	Спосіб отримання	Доменний ефект	Обмеження
Рудовугільний брикет з піро-біовуглецем	Залізорудний концентрат + (10—30 % піролігніну) + 2—6 % зв'язуючого	Холодне брикетування, сушіння як спосіб зволоження та зміцнення	Прискорення відновлення FeO, зниження TRZ, часткова заміна коксу і PCI	Нижчі рівні холодної та гарячої міцності
Самовідновлювальний брикет з піро-біовуглецем	Концентрат або доменний пил + піролігнін із деревини, соломи, лушпиння	Холодне брикетування або окатування	Висока швидкість газифікації, підвищення η _{CO} , зменшення RAR	Руйнування при швидкому нагріванні, підвищене утворення дріб'язку
Композитний окатиш з внутрішнім ядром з піровуглецю	Ядро: піровуглець + Fe-концентрат; оболонка з матеріалу – захисника вуглецю ядра від окислювання та Fe концентрат або Fe-відходи	Окатування і теплова обробка вихідної суміші компонентів	Часткова заміна окатишів, локальна, агломерату, генерація CO поблизу FeO	Складність одержання і контролю структури композитів
Композит на основі пилу — продукту виробництва чавуну, сталі та піровуглецю	Доменний пил, шлам, окалина, піровуглець, цемент, бентоніт, інші	Холодне брикетування	Рециклінг Fe і C, зменшення витрат коксу та Fe-відходів	Небезпека накопичення Zn, K, Na, S

Висновки дослідження [12] практично повністю узгоджуються з проблемами використання техногенних відходів у складі РВКМ і шлакоутворюючих сумішах. Піролігнін у складі композитів виконує одночасно дві функції: є локальним джерелом CO і каталізує перебіг реакції:



Завдяки високій пористості та аморфній структурі піровуглець газифікується за нижчих температур, ніж кокс, що сприяє ранньому початку непрямого відновлення:



У результаті зменшується температура TRZ, що сприяє зниженню питомої витрати коксового відновника. Для піролігніну з відходів деревини та переробки продуктів аграрної промисловості встановлено, що їх реакційна здатність щодо CO₂ істотно перевищує аналогічний показник коксу.

Разом з тим, надмірна реакційна здатність піро-біовуглецю має і негативну сторону: прискорена газифікація може призводити до часткової втрати структурної міцності композиту ще до завершення

відновлення оксидів заліза. Це особливо характерно для матеріалів із високою пористістю і низькою щільністю, отриманих з деревини або відходів переробки продуктів рослинного походження (біомаси)

Тому, узгодженою з більшістю результатів розглянутих в роботі досліджень, межею його вмісту в композиті для доменного процесу доцільно вважати 20—30 % від маси загальної вуглецевої складової. Специфічні умови виробництва та використання шлакоутворюючих на основі піровуглецю рослинного походження та залізомістячих компонентів вторинного походження дозволяють отримувати кількість піровуглецю відповідно до функціонального призначення шлакоутворюючого [12].

Інтеграція РВКМ в сучасний доменний процес,

для якого характерною технологічною ознакою є різноманіття видів залізорудних матеріалів — складових вихідної шихти, можлива при переході до їх масового виробництва при використанні в якості відновника піровуглецю [13]. Передумовою до їх застосування, в свою чергу, є вирішення задач з визначення найбільш ефективного способу виготовлення композитів, який забезпечить високу металургійну цінність РВК — стабільність хімічного складу та фізичних властивостей.

В табл. 2 наведено характеристику основних типів рудовуглецевих композитів за складом, способом, умовами виробництва, ефектами та типовими обмеженнями їх використання в доменному процесі.

Результати власних досліджень підтверджують

Таблиця 2

Характеристика піро-біовуглецевих рудовуглецевих композитів

Тип композиту	Склад	Спосіб отримання	Доменний ефект	Обмеження
Гарячебрикетований композит (Carbon Iron Composite, CIC)	Концентрат (60—70 % Fe), кам'яне вугілля або петкок (15—30 %)	Гаряче брикетування без зв'язуючого з подальшою карбонізацією	Зниження TRZ на 100—150 °С, зменшення RAR на 30—50 кг/т	Висока вартість виробництва
Холоднобрикетований композит	Концентрат, коксик або петкок, цемент або бентоніт	Пресування і твердіння	Часткова заміна агломерату (до 20 %), зниження витрат коксу	Нижча гаряча міцність
Самовідновлювальні брикети (Self-Reducing Briquettes)	Оксиди Fe (концентрат, пил), вуглець (вугілля, біовуглець)	Холодне брикетування або обкатування	Прискорення відновлення, підвищення η_{CO}	Ризик руйнування в шахті
Композитні окатиші	Концентрат, внутрішнє або зовнішнє джерело С	Обкатування з випалом	Часткова заміна окатишів, підвищення швидкості відновлення	Складність реалізації технології в умовах печі
Брикети з використанням металургійних відходів	Доменний пил, шлам, окалина, вуглецеві відходи	Холодне брикетування	Рециклінг Fe і С, зниження витрат відновника	Домішки Zn, Pb, S

технологічну доцільність введення в склад вихідної шихти РВКМ піро-біовуглецю. Дані, отримані експериментальним шляхом, свідчать про раціональність введення в шихту перед її брикетуванням/обкатуванням двох видів матеріалів, що містять вуглець:

— ПБВ, що є продуктом теплової деструкції матеріалів рослинного походження в умовах похилої печі барабанного типу з $\alpha_{O_2} \sim 0,85$. Реалізуватися теплова обробка може, на що звернено увагу вище, двома способами: низькотемпературним піролізом при 300—400 °С або високотемпературним при 900—1100 °С в умовах похилої обертової печі;

— біомаса з вологістю $w \leq 5$ %, яка досягається шляхом сушіння вихідної біомаси, що містить, залежно від умов застосування, $\sim 30\text{--}60$ % летючих газів (CO, H₂, CH₄).

Здатність сухої біомаси переходити при певному зовнішньому тиску до в'язко-пластичного стану зумовлює ефективність її застосування, практично мінімізуючи/виключаючи використання в'язучих, що згідно з [13] знижують металургійну цінність РВКМ.

Аналіз теоретичних результатів щодо вірогідного впливу використання композитів на показники доменного процесу. Вірогідні механізми

зниження TRZ з прогнозуванням їх очікуваного впливу на баланс процесів в доменній печі досліджено в роботі [4]. Якщо створено умови, при яких вуглець у РВКМ легше газифікується поруч із Fe_xO_y, відновлення починається раніше, а зона оптимальних для цього температур (TRZ) звужується, що, на нашу думку, є одним із раціональних шляхів зниження питомих витрат відновника. Для практичного використання результатів, що аналізуються в даній роботі, необхідно розглянути суть та визначитись з результатами впливу фізико-хімічних ефектів в доменному процесі при зниженні температури TRZ та звуженні її інтервалу з встановленням їх вірогідних наслідків. Ключовим принципом TRZ, на що було звернено увагу при розгляді та уточненні фізико-хімічних закономірностей впливу РВКМ на перебіг процесів відновлення оксидів заліза, газифікації вуглецю, формування TRZ та питомої витрати відновника [14], є досягнення в системі (FeO–Fe–CO–CO₂) рівноваги реакції FeO + CO ↔ Fe + CO₂, яка визначає мінімально необхідний потенціал відновника, тобто витрату коксу. В дослідженні встановлено, що зниження температури зони теплового резерву (TRZ) є фактором контролю умов рівноваги реакції відновлення FeO → Fe.

На основі приведених результатів дослідження впливу використання РВКМ на перебіг процесів і показники доменного процесу, доцільно визначити наступні, основні, що є найбільш вірогідними для даних умов, механізми формування та особливості TRZ.

За першим, згідно з [15], при зниженні температури TRZ рівноважний газ містить менше CO, тобто для відновлення відповідної кількості FeO буде витрачено менше відновника. За другим — зниження TRZ змінює рівновагу в системі та зменшує потребу в CO, що підтверджено результатами експериментальних досліджень: «зниження температури зони TRZ зміщує рівновагу реакції відновлення вюститу до заліза, що, в свою чергу, сприяє зниженню рівня витрати відновника».

На відміну від умов традиційної домни, в якій кокс витрачається на реалізацію реакції $C + CO_2 = 2CO$ (реакція Будуара), що і складає головну статтю витрат коксу, при використанні РВКМ газифікація вуглецю та відновлення FeO в об'ємі брикетів починається раніше, що і визначає зменшення потреби в генеруванні CO та, відповідно, в газифікації додаткової кількості коксу. Результати дослідження [16] свідчать, що завдяки високій реакційній здатності відновника, початкова температура реакції Будуара знижується. В результаті, зменшується і витрата палива.

До важливих ефектів застосування РВКМ, необхідно віднести наступні:

— підвищення ступеня використання CO (η_{CO}) досягається за рахунок генерації CO безпосередньо поруч і навколо часток FeO, що скорочує дифузійні втрати, в результаті чого збільшується рівень використання хімічної енергії CO, зменшуються втрати відновлювального потенціалу CO. Підтверджено результатами дослідження [17], які свідчать, що зниження температури TRZ покращує ефективність реакції відновлення, що дозволяє працювати з низькою швидкістю відновника;

— зниження температури зони теплового резерву (TRZ) прискорює відновлення FeO до Fe при нижчих температурах, що підтверджено результатами дослідження [18];

— економія коксу при використанні композитів: TRZ ↓ на 150 °C; RAR ↓ на: 35 кг/т чавуну, що визначено експериментально в дослідженні [16]. Таким чином, фізичний зміст TRZ доцільно трактувати на основі визначених ефектів, що позитивно впливають на показники доменного процесу і мають синергетичний зв'язок.

Роль рудовуглецевих композитів (брикетів) як додаткового/або основного залізородного компонента шихти, вихідний фізико-хімічний потенціал якого підсилено відновлювальною складовою, доцільно визначити наступним. РВКМ в умовах доменної печі стають локальним джерелом CO через реакції: $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$ та $C + CO_2 \rightarrow 2CO$, які взаємно підсилюються [19]. Встановлено, що висока реакційна здатність вуглецю та взаємодія між відновленням оксиду заліза та газифікацією вуглецю знижують TRZ

та зменшують RAR. Звуження TRZ також сприяє зменшенню мертвого об'єму, підвищує інтенсивність масо- та теплообміну, забезпечуючи ефективність перебігу процесів відновлення в доменній печі загалом.

Підсумковий причинно-наслідковий ланцюг факторів впливу на доменний процес при використанні РВКМ доцільно визначати як: рудовуглецеві композити → підвищення реакційної здатності C → газифікація при нижчій температурі → зниження температури TRZ → зміщення рівноваги (FeO → Fe) в напрямку відновлення заліза → підвищення η_{CO} → менша потреба в CO та коксі → зниження питомих витрат відновника (RAR).

Таким чином, зниження температури (TRZ), що є наслідком використання рудовуглецевих композитів, призводить до зміщення рівноваги реакції $FeO \rightarrow Fe$ у бік її прямого розвитку при нижчих концентраціях CO, що забезпечує підвищення ступеня використання CO та зменшення, відповідно, і необхідної витрати відновника. Досягнення позитивного ефекту пов'язано з підвищенням реакційної здатності вуглецю композиту, який газифікується при нижчих температурах, інтенсифікує процеси непрямого відновлення та знижує витрати коксу на реакцію газифікації вуглецю діоксидом вуглецю, що супроводжується поглинанням теплової енергії [19] тощо: нижчий TRZ → менше потрібно CO → менша витрата коксу.

Кінетика основних реакцій в умовах застосування РВКМ та результати моделювання їх використання в умовах доменної печі.

Під час випробувань, результати яких приведено в дослідженні [4], зразки ССВ (Carbon Composite Briquette — рудовугільний композитний брикет для самовідновлення оксидів заліза) після реалізації реакцій відновлення оксидів заліза та газифікації вуглецю, в якому відновлення заліза відбувалося всередині брикету, використано для визначення кінетики реакцій на моделі, що наближена до умов доменної печі. Визначена раціональна частка заміщення частини руди композиту дослідного складу з визначенням рівня відновлення оксидів заліза та конверсії вуглецю. В дослідженні використано дослідні партії ССВ, які були виготовлені методом холодного брикетування та термічної обробки. За результатами узагальнення промислових і модельних даних визначено, що використання в якості компонента доменної шихти РВКМ сприятиме:

— прискоренню кінетики відновлення, завдяки скороченню дифузійної відстані між оксидом заліза і вуглецем;

— підвищенню реакційної здатності вуглецевої фази та початку газифікації вуглецю при більш нижчих температурах. Використання РВКМ споможне забезпечити зниження (TRZ) на 50—150 °C і, як наслідок, зменшити питомі витрати коксу та пилувугільного палива на 20—50 кг/т чавуну (RAR); підвищення ступеня використання CO; покращення теплового і газодинамічного режиму доменної печі, а також, скорочення питомих викидів CO₂ на 5—15 %, залежно від частки вуглецю коксу, що замінена ву-

глицем РВКМ.

Отримання позитивних для розвитку і реалізації доменного процесу ефектів, доцільно обґрунтувати наступним. При нижчій температурі TRZ, що забезпечується використанням РВКМ (брикетів), рівновага реакції: $\text{FeO} + \text{CO} \rightleftharpoons \text{Fe} + \text{CO}_2$ зміщується в бік відновлення FeO при нижчому вмісті CO в газовій фазі. Це означає, що для відновлення тієї ж кількості оксидів заліза потрібно менше CO, а отже — менше коксу і PCI. У результаті, згідно з [20], знижується інтенсивність реакції газифікації вуглецю відновника ($\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$, $\Delta H_{1100} = 166$ кДж/моль). Тому, одержаний при цьому ефект сприятиме зменшенню питомих витрат відновника, що практично підтверджено результатами [4, 20]: зменшуються питомі витрати коксу та PCI на 20—50 кг/т чавуну; підвищується ступінь використання CO; знижуються на 5—15 % питомі викиди CO₂; покращується стабільність відновлення і газорозподілу в брикетах, що є складовою часткою шихти; досягається звуження TRZ, що, відповідно, зменшує «мертвий» об'єм шахти, в якому процеси відновлення протікають більш повільно. Разом, визначені фактори, сприяють підвищенню продуктивності доменної печі, за рахунок:

— безпосереднього контакту оксидів заліза і вуглецю в об'ємі композиту, що скорочує дифузійну відстань між реагентами, що утворюють активну зону взаємодії;

— підвищеної реакційної здатності вуглецевої складової композиту, особливо, при використанні дрібного вугілля, петкоксу та піро-біовуглецю;

— початку реакції газифікації вуглецю при нижчих температурах, що забезпечує раннє утворення CO без додаткової витрати коксу;

— формування локального високого відновлювального потенціалу в середині композиту, коли CO утворюється безпосередньо біля FeO;

— підвищення пористості та реакційної поверхні композиту, що інтенсифікує тепломасообмін — дифузійно CO і CO₂ та кінетику відновлення оксидів заліза.

Особливо, значно більший позитивний ефект можна очікувати при використанні ПБВ рослинного походження, оскільки він має вищу пористість і реакційну здатність порівняно з коксом, тому реакція газифікації отримує розвиток на 50—150 °C раніше ніж при використанні вуглецю коксу, згідно з [20]. Таким чином, зниження TRZ забезпечить більш раннє та інтенсивне непряме відновлення оксидів заліза, зменшення потреби в CO та в інтенсифікації реакції газифікації вуглецю. Знизяться питомі витрати коксу і PCI, підвищиться ефективність використання

відновлювального потенціалу газу та скоротиться вуглецевий слід доменного процесу.

За результатами дослідження [2] встановлено, що шар доменної шихти з домішкою ССВ виконує дві функції: перша — висока внутрішня відновлюваність, а інша використовується для посилювання відновлення навколишнього агломерату. В результаті реалізації цих двох функцій вуглецю, що містять РВКМ, при їх застосуванні в доменному процесі, досягнуто значне зниження температури TRZ та збільшення рівня використання хімічної енергії CO за рахунок домішок до загальної маси доменної шихти відповідної частки дослідних брикетів.

При визначенні впливу використання ССВ [21] встановлено, що заміна дослідними брикетами частки руди, на рівні ~10 % від рудної складової, може покращити тепло-відновлювальний режим, але потребує контролю міцності та їх впливу на газопроникність шару при їх введенні в піч. Використані ССВ містили 29,70 мас.% Fe₃O₄, 39,70 мас.% FeO, 1,57 мас.% заліза, 8,73 мас.% пустої породи та 20,30 мас.% вуглецю. Кінетика їх реакції в печі досліджена за допомогою неізотермічних випробувань і змодельована. Чисельне моделювання доменної печі з заміною 10 % руди на ССВ показало, що заміна 10 % руди на ССВ ефективно покращила роботу доменної печі, забезпечивши економію коксу.

Для уточнення фізико-хімічної структури процесів в РВКМ щодо вкладу у відновлення заліза С та CO, розглянемо результати наступних досліджень. Для композитів (рудовугільних брикетів, окатишів, композитних матеріалів, що самоущільнюються) основна частина відновлення, за даними з [22] реалізується не безпосередньо твердим вуглицем, а через проміжне утворення CO за реакцією Будаара: $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO}$. Далі, саме CO відновлює оксиди заліза: $\text{Fe}_x\text{O}_y + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$.

Тому, в брикеті РВКМ, «пряме» відновлення твердим вуглицем, згідно з [22], матиме обмежений розвиток, тоді як непряме відновлення через CO — домінуючим. Типові оцінки співвідношення для рудовуглецевих композитів наведено в табл. 3.

Аналіз даних, наведених в табл. 3, свідчить, що найбільша частка прямого відновлення припадає лише на завершальну стадію FeO → Fe, коли оксид і вуглець вже контактують через тонкий прошарок металу або коли вуглець розчиняється у відновленому залізі. В цих умовах, на ранніх стадіях перевагу має CO — практично весь кисень видаляється через використання відновлювального потенціалу CO. Для типових рудовуглецевих композитів з високореакційним вуглицем (ПБВ, напівкокс, дрібний вуглець) сумарна

Таблиця 3

Характеристика піро-біовуглецевих рудовуглецевих композитів

№	Стадія відновлення	Частка непрямого відновлення CO	Частка прямого відновлення C
1	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$	90—100 %	0—10 %
2	$\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$	80—95 %	5—20 %
3	$\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$	50—80 %	20—50 %
4	Загалом по всьому процесу	70—90 %	10—30 %

частка непрямого відновлення зазвичай становить близько 75—85 %, а прямого — 15—25 % [23].

Для сучасної традиційної доменної печі з агломератом, окатишами та коксом практично-доцільним вважають наступну схему: непряме відновлення ~60—75 %, а пряме ~25—40 % від сумарного відновлення оксидів заліза; при цьому зниження ступеня прямого відновлення навіть на кілька відсоткових пунктів дає, згідно з результатами [24] помітну економію коксу. Зокрема, для промислової печі в роботі показано, що зменшення ступеня прямого відновлення з 27 % до 21 % знижує витрату коксу приблизно на 24 кг/т чавуну. Як цільовий орієнтир — наведено співвідношення: 60 % відновлення за рахунок CO; 20 % — H₂ та 20 % — прямого відновлення C, що добре показує сам напрям розвитку: чим більше газового відновлення у шахті, тим нижчий «коксний тягар» у горні печі. Раціональний режим доменної плавки, за висновками авторів, досягається через максимізацію непрямого відновлення газом CO (і частково H₂), з часткою прямого відновлення, як процесу, що термодинамічно й теплотехнічно обов'язково реалізується в нижній зоні печі при використанні коксу.

Для рудовуглецевого композиту характерними є інші наслідки його використання. У середині композиту контакт «оксид–вуглець» дуже тісний, але навіть в таких умовах основний механізм буде реалізовано не стільки прямою твердофазною реакцією FeO + C, скільки через ланцюг $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ і далі $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$. Тобто найефективнішим для РВКМ, автори [21] визначають режим, коли непряме, внутрішнє локалізоване, відновлення через CO домінує, а пряме, через твердий C, виконуватиме роль підсилювача, насамперед, завершальної стадії FeO → Fe. Практично для композитів доцільно орієнтуватися на CO-опосередкований внесок близько 70—90 % та прямий через C — близько 10—30 %. Зростання прямого внеску понад цей рівень позначатиме наступні за впливом негативні наслідки: локальний дефіцит газової фази; вищу ендотермічність і гіршу теплову ефективність.

У помірному діапазоні збільшення частки РВКМ у доменній шихті ефект, як правило, позитивний: композит починає відновлюватися раніше, зміщує частину роботи з нижньої зони у верхню, знижує температуру TRZ і підвищує рівень використання CO. Для прикладу, за результатами [21, 23], при заміні 10 % рудної частини на ССВ на моделі BF отримано: повне відновлення оксидів у брикеті вище зони когезії, ступінь конверсії вуглецю ~ 85 %, зниження температури колошникового газу на 8 К, зростання рівня використання відновлювального потенціалу CO на 1,3 %, зменшення витрати коксу на 52,2 кг/т чавуну та зменшення витрати рудної частини на 101 кг/т чавуну, хоча продуктивність трохи знизилась — на 17 т/добу для розрахункової печі 6250 т/добу. Наведені дані свідчать, що застосування РВКМ може суттєво економити кокс, створювати реальний екологічний ефект, але їх надмірна частка в шихті негативно впливає на тепловий і газодинамічний баланс печі.

Тому зі зростанням частки РВКМ у шихті слід очікувати подвійний ефект. З одного боку, менша витрата коксу, нижчі питомі викиди CO₂, краща утилізація дрібних відходів, можливість частково замінити агломерат/окатиші та введення біо-піровуглецю. З іншого боку, при їх надмірному введенні: погіршення газопроникності, зсув розподілу газового потоку, підвищення утворення дріб'язку, ризик нестійкого ходу, більша чутливість до міцності брикетів і до температур їх розм'ягчення, плавлення в умовах печі. Саме через це більшість робіт розглядає РВКМ не як повний замітник традиційного грудкового рудного матеріалу і коксу, а як добавку в помірній частці, яка повинна працювати разом із міцним коксовим «скелетом» шихтового стовпа.

При розгляді умов досягнення загального екологічного ефекту від використання композитів, необхідно визначити три його основні складові: зниження потреби в коксі та, частково, в агломераті; можливість утилізувати дрібні рудні та вуглецевмісні техногенні відходи металургійного походження; по-третє, використання ПБВ або торрефікованої біомаси з вологістю ≤ 2% зменшує частку викопної складової вуглецю коксу. Але екологічний вигравш буде нижчим за очікуваний, якщо при зниженні механічної міцності брикетів зросте винос пилу, а порушення технологічного регламенту плавки потребує виправляти тепловий стан печі шляхом додаткової витрати палива. Це означає, що екологічний ефект стає реальним лише тоді, коли брикети не руйнують проникність стовпа шихти і не збільшують утворення дріб'язку.

Підсумковий технологічний висновок щодо визначення раціонального режиму доменної плавки: для традиційної ДП найбільш раціонально тримати пряме відновлення на помірно-низькому рівні, умовно ~20—30 % як бажаний орієнтир, не допускаючи його зростання до 35—40 % без крайньої на то потреби; для рудовуглецевого композиту раціонально забезпечувати домінування внутрішнього CO-відновлення при достатній реакційності вуглецю, щоб внесок прямого відновлення лишався допоміжним. За цих умов, використання РВКМ реально призведе до економії коксу і зменшить CO₂, але лише тоді, коли його частка в шихті буде узгоджена з міцністю брикету, гранулометриєю, газопроникністю та тепловим режимом печі. Для менш реакційного щодо газифікації вуглецю (антрацит, коксик) частка прямого відновлення може дещо зростати, як стверджують автори, через уповільнення газифікації та локальний контакт FeO–C. Автори [25] для випадку використання самовідновлювальних брикетів на основі руди й вугілля наводять, що до 80—90 % кисню видаляється через газову фазу CO, а безпосередня твердофазна реакція: $FeO + C \rightarrow Fe + CO$ є повільною й забезпечує лише 10—20 % загального ефекту. Причина полягає в тому, визначають автори, що твердофазний контакт між частинками руди й вуглецю є обмеженим, тоді як CO швидко дифундує через пористу структуру композиту.

Обмеження, компроміси та технологічні ризи-

ки використання рудовуглецевих композитів у доменному процесі. Пов'язані з протиріччями між реакційною здатністю та стабільністю механічних властивостей РВКМ. Щодо обмежень технологічного характеру, які впливають на ефективність використання РВКМ, необхідно навести наступні факти. Незважаючи на наведені переваги використання рудовуглецевих композитів як часткових заміників агломерату та окатишів, їх застосування у доменній печі супроводжується рядом обмежень та технологічних ризиків використання в доменному процесі [21, 26]. Обумовлені вони особливостями їх фізико-механічних властивостей, поведінкою при нагріванні та впливом на газодинаміку шахти печі. Практичний досвід і результати дослідження [26] показують, що при впровадженні таких композитних матеріалів необхідно забезпечити компроміс між реакційною здатністю композиту і його механічною та термічною стабільністю в умовах доменної печі.

Ще одним обмежуючим використання РВКМ фактором є недостатня холодна і гаряча міцність композитів, порівняно з традиційними залізородними матеріалами, що є проблемою, ефективно вирішення якої дозволить збільшити їх частку в шихті доменного процесу, наблизивши її до оптимальної. Пов'язують її виникнення автори [27] з більш пористою структурою, наявністю вуглецевої фази і використанням неефективних зв'язуючих компонентів, що може призвести до втрати міцності при нагріванні РВКМ. Автори звертають увагу також на те, що глобальні вимоги істотного скорочення викидів CO_2 змушують доменні печі споживати менші обсяги коксу. З огляду на це, вони визначають необхідність пошуку інших способів компонентного розподілу шихти для забезпечення найбільш оптимальної проникності шару шихти в печі як фактора, що має вирішальне значення для її стабільної роботи. А в забезпеченні таких умов, очевидно, ключове значення має контрольований розподіл класифікованої за хімічним та гранулометричним складом компонентів вихідної доменної шихти. Встановлено, що при температурах 200—600 °C в верхній частині печі композити піддаються інтенсивному термічному впливу, внаслідок чого, при їх опусканні в шарі шихти, можуть виникати термічні напруження, пришвидшена дегідратація зв'язуючих, розтріскування брикетів з утворенням дрібної фракції.

Особливо, це характерно для холоднов'язаних брикетів із цементними або бентонітовими зв'язуючими, які при швидкому нагріванні, згідно з [27], втрачають механічну цілісність. В свою чергу, неконтрольоване руйнування композитів у шахті печі призводить до утворення дріб'язку (<5 мм), що негативно впливає на газодинамічний режим через погіршення фільтраційних властивостей шару. На основі практичних результатів дослідження показано, що фільтраційні властивості шару доменної шихти, які характеризують проникність шихти, є одним із ключових параметрів, що визначають стабільність роботи печі, ефективність відновних процесів і продуктивність доменного агрегата [28].

Крім того, в інтервалі температур 800—1100 °C

отримують розвиток реакції газифікації вуглецю, які додатково знижують механічну міцність композиту, оскільки вуглець виконує роль структурного каркаса. Втрата вуглецевої фази призводить до ослаблення структури і можливого руйнування матеріалу до завершення процесу відновлення оксидів заліза. Це є важливим, тому що газопроникність шару доменної шихти є одним із визначальних факторів стабільності роботи печі, ефективності відновних процесів і питомих витрат відновника, що підтверджено фундаментальними дослідженнями [26].

За висновком, що зроблено в [27], фільтраційні властивості, що визначають газопроникність шару доменної шихти є одним із ключових параметрів, що впливають на стабільність ходу печі, визначаючи ефективність відновлювальних процесів і продуктивність доменного агрегата в цілому. В цьому плані, рудовугільні композити мають, за даними, що проаналізовано, як правило, нижчу механічну міцність і більшу схильність до утворення дріб'язку порівняно з агломератом і окатишами [29]. Накопичення дрібної фракції в шихтовому стовпі призводить до: зменшення міжкускового простору; підвищення гідравлічного опору шару; нерівномірного розподілу газового потоку та виникнення зон застою газу і нерівномірного відновлення оксидів в шарі. Це може викликати локальне переохолодження або перегрів матеріалу, погіршення відновлювальних умов і збільшення витрат коксу.

Особливо критичним фактором, необхідно визнати можливе руйнування композитів в TRZ-зоні шахти доменної печі з температурою газу і шихти, яка становить приблизно 900—1000 °C, де газодинамічні умови визначають ефективність непрямого відновлення. Надлишкове накопичення в цій зоні, яка розташована в середній частині шахти доменної печі між зонами непрямого відновлення і когезійною зоною, дрібної фракції може призвести до зміщення температурного профілю печі та викликати порушення стабільності процесу [28, 29]. Тому, при введенні в склад композитів вторинних матеріалів, таких як доменний пил, шлам, прокатна окалина необхідно звертати увагу на вибір зв'язуючого, тепловий режим обробки та вплив на механічні характеристики брикетів.

Окрім того, використання металургійних відходів техногенного походження супроводжується введенням до брикету небажаних домішок, які можуть негативно впливати на доменний процес. Особливо небезпеку становлять: сірка (S), що призводить до погіршення якості чавуну та підвищення витрат флюсів (вапна) та палива (коксу); лужні метали (Na, K) — викликають утворення циркуляційних потоків у печі, руйнування вогнетривів футерівки та погіршення структури шихти; цинк (Zn) може випаровуватися і конденсуватися у верхній частині печі; спричиняти утворення настилів і наростів; порушувати нормальний хід печі. Накопичення цих елементів у доменному циклі обмежує можливу частку використання композитів, особливо виготовлених із використанням вторинних матеріалів без їх попередньої підготовки.

Оцінюючи взаємозв'язок реакційної здатності і

стабільності механічних властивостей, необхідно підкреслити, що однією з ключових особливостей рудовуглецевих композитів є протиріччя між ними. Так, одночасне підвищення реакційної здатності вуглецю, що є бажаним для інтенсифікації відновлення і зниження температури TRZ, призводить до прискореної газифікації вуглецю; втрати структурної міцності та підвищеного ризику руйнування брикетів. Висока швидкість нагрівання у верхній частині доменної печі може спричинити інтенсивне виділення газів і руйнування структури композиту. Тому, при розробці композитів необхідно забезпечити оптимальний баланс між: реакційною здатністю, механічною міцністю та їх термічною стабільністю.

На основі аналізу протиріч між реакційною здатністю та стабільністю механічних властивостей РВКМ визначено основні, вірогідні, обмеження застосування в доменному процесі РВКМ, до яких необхідно віднести: їх недостатню холодну і гарячу міцність; утворення дрібної фракції (<5 мм) і погіршення газопроникності шихти; введення з компонентами РВКМ небажаних, шкідливих домішок; негативний вплив вологи і зв'язуючих; та втрата їх механічної стабільності при газифікації вуглецю.

Саме ці фактори, очевидно, визначають допустиму частку використання композитів у доменній шихті, яка, за даними промислових і експериментальних досліджень [10, 12], становить 5—20 % від маси залізородної складової брикетів.

Компромисне узгодження визначених протиріч доцільно досягати комплексним способом через ке-

руванням наступними параметрами: складом, структурою, гранулометриєю, способами підготовки, брикетування та режимом теплової обробки, а, в подальшому, розподілом РВКМ при їх завантаженні в піч.

Суть вирішення протиріч між реакційною здатністю та стабільністю механічних властивостей композитів та мінімізації обмежень їх використання в тому, щоб композит був достатньо реакційним для раннього відновлення FeO через зниження TRZ, але при цьому не руйнувався у верхній і середній частині шахти, не утворюючи, згідно з [25], надлишок дріб'язку і не погіршуючи газопроникність шару доменної шихти. На практиці цей компроміс може бути забезпечений при взаємодії наступних, на наш погляд раціональних, технологічних підходів, сутність та ефекти від їх реалізації наведено в табл. 4.

Для ефективного вирішення протиріч з забезпеченням компромісу між відновлювальними можливостями РВКМ та їх механічними властивостями з ціллю раціональної мінімізації обмежень щодо їх використання в шихті доменного процесу проаналізовано особливості поведінки РВКМ в умовах печі та визначено основні складові фізико-хімічного змісту такого компромісу:

1. Підвищення реакційних властивостей потрібне для того, щоб вуглець композиту почав газифікуватися за нижчих температур, швидше генерував CO і прискорював відновлення FeO_x. Саме тому ССВ і композити, отримані гарячим брикетуванням, здатні, згідно з [21—25], знижувати TRZ і RAR.

2. Але надмірна реакційна відновлювальність

Таблиця 4

Технологічні підходи до вирішення протиріч, суть та результати їх застосування

№	Підхід	Суть/зміст	Результат
1	Оптимізація вмісту вуглецю в композитах (C/Fe _x O _y)	Відповідність частки С та значення параметра Fe/C очікуваній швидкості самовідновлення	Достатня реакційна здатність без передчасної втрати міцності
2	Керування гранулометриєю компонентів вихідного складу композитів	Контроль гранулометрії дрібних FeO _x та С, мінімум надлишку ультрадисперсної фракції	Скорочення дифузійного шляху при збереженні структурної цілісності
3	Обґрунтування/вибір типу, складу вуглецьмістячого матеріалу	Коксик/вугілля/петкокк/біо-піровуглець у змішаному варіанті їх використання	Забезпечення заданого рівня відновлювальної здатності: біо-піровуглець підвищує її, а коксик/вугілля підсилює стабільність механічних властивостей
4	Обґрунтування адекватного за результатами використання зв'язуючого	Цемент, силікати, бентоніт, органічні зв'язуючі — за призначенням без зниження металургійної цінності	Отримання достатньої холодної міцності, опору удару й менший ризик розпаду РВКМ
5	Застосування гарячого брикетування/карбонізації	Термопластичність вугілля при нагріванні	Вища гаряча міцність і краща поведінка в умовах доменної печі
6	Обмеження рівня раціональної пористості композитного матеріалу	Регулювання тиску при пресуванні, вологості та режиму сушіння РВКМ	Баланс між швидкою газифікацією і опором руйнуванню брикетів
7	Контроль вологості РВКМ при їх тепловій обробці	Недопущення залишкової вологи в РВКМ перед їх завантаженням в піч	Зменшення ризику тріщиноутворення і руйнування при нагріванні брикетів
8	Обмеження в складі РВКМ вмісту шкідливих домішок	Контроль вмісту Zn, K, Na, S, Pb у вторинній сировині, що використовують	Зниження небажаних для умов доменного процесу циркуляції домішок, їх впливу на стійкість вогнетривів і деградацію шихти
9	Раціональне обмеження частки композитів як складової вихідної шихти	Обґрунтування алгоритму завантаження та розподілу РВКМ без перевантаження	Збереження раціональної газопроникності шихти та стабільності ходу печі

композитів — брикетів означає також й швидшу втрату вуглецевого «каркаса»: якщо вуглець газифікується занадто інтенсивно, композит втрачає несучу здатність, тріскається, що стає причиною збільшення дріб'язку і погіршує газопроникність шару шихти. Саме механічну міцність визначають одним з ключових обмежень для пилових/шламових брикетів — складової шихти [30].

3. Тому на практиці потрібен не максимальний, а найбільш раціональний, для умов використання, рівень реакційної здатності: композит має інтенсивно працювати після прогріву і в зоні активного відновлення, але не руйнуватися у верхній частині шахти, на що було звернено увагу вище. Такий підхід може бути реалізовано через обґрунтований вибір зв'язуючого, режиму формування РВКМ і типу вуглецю [31].

З використанням складових основи для знайдення компромісного рішення, яка характеризується фізико-хімічною спрямованістю, визначені найбільш раціональні для умов доменної печі практичні рішення:

— для досягнення максимальної стабільності доцільним може бути використання гарячебрикетованих композитів на термопластичному вугіллі з подальшою їх карбонізацією, що, очевидно, забезпечить їх високу відновлювальну здатність при кращій, за даних умов, механічній стійкості РВКМ;

— при застосуванні холоднбрикетованих композитів необхідно підвищити рівень контролю вологи, типу зв'язуючого та наслідків їх гарячої, в умовах печі, деградації властивостей, що забезпечують стабільність ходу доменної печі;

— для декарбонізації необхідно забезпечити часткове введення біо-піровуглецю без його надлишку, тому що його висока реакційна здатність може погіршувати гарячу міцність композитів та істотно знижувати якість вуглецю як носія навантаження в доменній печі.

Проведений аналіз фізико-хімічних особливостей та сучасних поглядів на виробництва, застосування та можливі його наслідки, дозволяють стверджувати наступне.

Компромис між реакційною здатністю рудовуглецевого композиту та його механічною та термічною стабільністю в умовах доменної печі доцільно забезпечувати шляхом оптимізації співвідношення FeO_x/C , визначення раціональної гранулометрії компонентів РВКМ, обґрунтування типу вуглецевого матеріалу, зв'язуючого, пористості, вологості, режимів брикетування та частки композитів у шихті доменного процесу. Метою такої оптимізації є досягнення достатньо високої швидкості газифікації, з забезпеченням самовідновлення без передчасного руйнування композиту, утворення дріб'язку та погіршення газопроникності стовпа шихтових матеріалів. Таке трактування компромісу та визначені шляхи вирішення його протиріч та обмежень використання РВКМ повністю узгоджується з результатами дослідження [32].

Сучасний стан ресурсів, а саме залізородних

концентратів (Кривбас, Полтавський ГЗК, Північний ГЗК); наявність вторинних металургійних відходів (доменні шлами, пил газоочистки, прокатна окалина); вуглецевих матеріалів (петкокс, газове вугілля, антрацит, піро-біовуглець), створюють основу для розвитку і впровадження в металургійну практику інноваційних рішень щодо подальшого вдосконалення доменного виробництва. Одним з них є використання в процесі виробництва чавуну РВКМ. Особливо важливим та перспективним для підприємств чорної металургії України це питання стає у зв'язку з дефіцитом коксу, високою вартістю енергоносіїв та необхідністю рециклінгу відходів поточного виробництва.

В цьому плані, РВКМ є перспективним класом залізозмісних матеріалів, що поєднують у собі функції носія оксидів заліза та локального джерела відновника. Їх використання у доменній печі дозволить частково замінити агломерат і окатиші, а також знизити витрати коксу в шихті та пиловугільного палива, що вводиться в піч з дуттям. Науково-дослідну та дослідно-конструкторську діяльність в даному напрямі, згідно з [33], необхідно спрямувати на одержання нових знань, а на їх основі, створювати інноваційні заміники традиційних матеріалів та вдосконалювати технології виробництва металургійної продукції.

Обґрунтування доцільності використання корисних властивостей вихідного фізико-хімічного потенціалу біогенних відходів як компонента РВКМ. На основі теоретично-експериментального обґрунтування та практичного підтвердження в промислових умовах ефективності використання відходів рослинного походження, як вторинного джерела ресурсів сировини та енергії, що мають біогенне походження, розроблено рекомендації щодо їх застосування як компонента РВКМ.

Розглянемо один з матеріалів-відходів рослинного походження, що містить вуглець, — рисове лушпиння. У брикеті рисове лушпиння (РЛ) або його карбонізований продукт можуть виконувати одразу кілька функцій: відновник — біопіролізний вуглець реагує з FeO/Fe_2O_3 ; джерело CO — через реакції $C + CO_2 \rightarrow 2CO$ та $C + FeO \rightarrow Fe + CO$; кремнеземистий компонент — SiO_2 бере участь у формуванні первинної шлакової фази; структуроутворювач пор в РВКМ — як наслідок піролізу, підвищує газопроникність брикету; частково паливо — за рахунок окиснення піровуглецю. Якщо використовувати карбонізований продукт з лушпиння — це відповідає дійсності. В разі використання сухого рисового лушпиння (з вологістю приблизно 1—5 %) з'являється ще одна його складова фізико-хімічного потенціалу — паливно-відновлювальна спроможність летких газів, які виділяються при нагріванні і можуть, при створенні певних умов, бути використані як додаткове паливо та, вірогідно, й відновника.

При використанні сухого рисового лушпиння (СРЛ) можна очікувати, що до функціоналу « $C + SiO_2$ » додається потужне джерело корисних властивостей СРЛ — леткі, які можуть працюва-

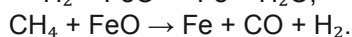
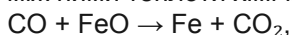
ти як внутрішнє паливо і частково як відновник в брикеті. Нижче наведено фахову оцінку ймовірності та доцільності використання цього потенціалу для різних сценаріїв металургійного напрямку. Визначимо ефективність використання вторинного енергетичного потенціалу летких газів в умовах застосування сухого рисового лушпиння в брикетах, мономатеріалі для введення з дуттям в піч та ін. В умовах оберткової печі леткі, що містять біогенні відходи, виконують роль джерела вторинної теплової енергії (палива), яка використовується для проведення термічної їх деструкції матеріалів на основі відходів рослинного походження.

Тому вторинний енергетичний потенціал летких РЛ доцільно максимально використовувати саме в брикетах (РВКМ) як внутрішнє паливо й частково як відновник; у фурмених умовах — переважно як паливо; у мономатеріалах — як фактор активації газофазних реакцій і зниження ефективної температури.

До практичних орієнтирів/рекомендацій і як умови забезпечення ефективності впровадження даного технічного рішення в промислових умовах доменного процесу, необхідно віднести наступне: раціональний вміст біо-піровуглецю в РВКМ становить 10—30 % (залежно від зв'язки і міцності брикетів — холодної та гарячої); швидкість нагріву в інтервалі 300—600 °С, в разі попередньої карбонізації брикету, необхідно контролювати для уникнення руйнування брикетів з утворенням дріб'язку; комбінування раціонального співвідношення в брикеті (СРЛ: карбонізований продукт) для досягнення ефективного балансу в брикеті між вмістом летких та стабільного піровуглецю; додавання компонентів, що містять СаО та Al₂O₃ з забезпеченням їх співвідношення, як стабілізації структури, властивостей брикетів, а в подальшому і шлакового режиму доменного процесу.

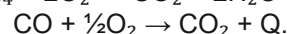
Під час нагрівання сухого рисового лушпиння, або інших біогенних компонентів, у брикеті відбувається піроліз з утворенням піровуглецю та суміші летких газів: СО, Н₂, СН₄, С₂ – С₄ та смол. Ці компоненти мають високу теплоту згорання: СН₄ ≈ 35 – 50 МДж/м³; СО ≈ 12 – 13 МДж/м³; Н₂ ≈ 10 – 12 МДж/м³. Тобто цей матеріал є повноцінним паливом, яке формується при нагріванні композитного матеріалу в умовах доменної печі. Необхідно також відзначити, що енергія летких через дифузійне обмеження в брикеті (ефект мікро-реактора) переважно реалізується саме в об'ємі брикету, для якого характерними ознаками є: пористість середовища; обмежена проникність та значна внутрішня поверхня. В цих умовах леткі не одразу виходять назовні, а затримуються в порах; контактують із твердою оксидною фазою та частково реагують локально.

Наявність в брикеті окислювача (Fe₂O₃/FeO, СО₂ з газової фази, Н₂O як продукту дегідратації) дозволяє реалізувати реакції відновлення з виділенням/перерозподілом між ними теплоти хімічних реакцій:



Таким чином, частина вторинної теплової енергії

використовується для відновлення оксидів заліза, інша — на нагрів брикету. Окислювання летких при виході частки летких за межі брикету, якщо є навіть невелика кількість О₂, реалізується через наступні реакції:



В результаті — створюються локальні мікросередовища з підвищеною температурою, характерні для автотермічного (наближеного до автотермічного) режиму.

Щодо крекінгу смол, що входять до складу матеріалів біогенного походження. При 600—900 °С вони стають джерелом додаткової енергії, розкладаючись на гази та твердий вуглець: частково виділяють фізичну теплоту та формують додатковий активний вуглець без втрати енергії назовні. Таким чином, в брикеті формується замкнений мікроцикл: піроліз → утворення газів → часткове окиснення/відновлення → виділення теплоти → нагрів твердих фаз → прискорення хімічних реакцій, що, загалом, доцільно визнати як важливу складову внутрішньої енергетичної самопідтримки — леткі працюють як мікро-нагрівач — відновник.

Як фізико-хімічний підсумок, визначаємо, що можливість використання летких як внутрішнього енергетичного ресурсу базується на: утворенні горючих газів при піролізі; їх затримці в пористій структурі брикету; взаємодії з FeO, СО₂, Н₂O та (частково) О₂; локальному виділенню теплоти без значних втрат; самоприскорювальному характері процесу, забезпечується термохімічним зворотним зв'язком складових процесу.

Можливість реалізації внутрішнього енергетичного ресурсу летких у рудовуглецевих брикетах не є «гіпотезою», а прямо визначається поєднанням ефектів кінетики піролізу, тепломасообміну в пористому тілі та локального окислювально-відновлювального балансу газової фази, що дозволяє енергії летких та частини піровуглецю генеруватися і споживається в об'ємі брикету, практично без втрат в навколишнє середовище доменної печі, де її використання є менш ефективним за результатами впливу на процес.

Висновки

Кінетично рудовуглецеві композити в умовах доменного процесу працюють як інтенсивно зв'язана система «газифікація вуглецю ↔ відновлення оксиду». Для брикетів із піро-біовуглецем швидкість процесу в інтервалі 1000—1200 °С вища, ніж для коксових композитів, за рахунок: швидшої газифікації піролізного вуглецю; більшої відкритої пористості; коротших дифузійних шляхів та швидшого формування відновлювального потенціалу СО.

Незважаючи на доведені переваги рудовуглецевих композитів як часткових заміників агломерату та окатишів, їх використання у доменній печі супроводжується рядом обмежень, обумовле-

них особливостями їх фізико-механічних властивостей, поведінкою при нагріванні та впливом на газодинаміку шахти печі. Практичний досвід і результати досліджень показують, що при впровадженні таких матеріалів необхідно забезпечити компроміс між реакційною здатністю композиту та його механічною та термічною стабільністю.

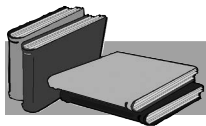
Суть вирішення протиріч між реакційною здатністю та стабільністю механічних властивостей композитів та мінімізації обмежень їх використання в тому, щоб композит був достатньо реакційним для раннього відновлення FeO через зниження TRZ, але при цьому не руйнувався у верхній і середній частині шахти, не утворюючи надлишок дріб'язку і не погіршуючи газопроникність шару доменної шихти.

Компроміс між реакційною здатністю рудовуглецевого композиту та його механічною і термічною стабільністю в умовах доменної печі забезпечують шляхом оптимізації співвідношення Fe_xO_y/C , гранулометрії, типу вуглецевого матеріалу, зв'язуючого, пористості, вологості, режимів бри-

кетування та частки композитів у шихті. Метою такої оптимізації є досягнення достатньо високої швидкості газифікації і самовідновлення без передчасного руйнування композиту, утворення дріб'язку та погіршення газопроникності шихтового стовпа.

Рудовуглецеві композити є ефективним інструментом підвищення енергоефективності доменного процесу і можуть частково замінювати агломерат і окатиші. Їх використання забезпечує зниження температури TRZ, підвищення ступеня використання відновлювального газу і зменшення питомих витрат відновника. Україна має значний ресурсний і технологічний потенціал для широкого впровадження таких матеріалів у доменному виробництві.

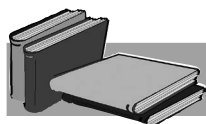
Наступним завданням дослідження визначено створення структурованої фізико-хімічної моделі контактної взаємодії компонентів рудовуглецевого брикету на основі залізородного концентрату + піробіовуглецю в інтервалі 1000—1200 °C для умов шахти доменної печі.



ЛІТЕРАТУРА

- Gandra B.F., Junior G.E. de P., Bagatini M.C., Osório E. Analysis of self-reducing composites with different iron ore-carbon ratio. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 26. P. 6433—6445. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.289>
- Yokoyama H., Higuchi K., Ito T., Oshio A. Decrease in Carbon Consumption of a Commercial Blast Furnace by Using Carbon Composite Iron Ore. *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. Iss. 11. P. 2000—2006. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.2000>
- KOBELCO Group's CO₂ Reduction Solution for Blast Furnace Ironmaking. *Kobe Steel, Ltd.* URL: https://www.kobelco.co.jp/english/releases/files/20210216_e.pdf (дата звернення: 28.04.2026).
- Tang H., Sun Y., Rong T. Experimental and Numerical Investigation of Reaction Behavior of Carbon Composite Briquette in Blast Furnace. *Metals*. 2020. Vol. 10(1). 49. <https://doi.org/10.3390/met10010049>
- Takashi A., Kiyoshi F., Hidekazu F. Development of Carbon Iron Composite Process. *JFE Technical Report*. 2009. No. 13. P. 1—6. URL: <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/013/pdf/013-02.pdf> (дата звернення: 28.04.2026).
- Yokoyama H., Ito T., Chiba M., Higuchi K., Oshio A., Sato H. Development of Carbon Composite Iron Ore Production and Improvement in Blast Furnace Reduction Efficiency. *Nippon Steel Technical Report*. 2020. No. 123. P. 90—99. URL: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/pdf/123-14.pdf> (дата звернення: 28.04.2026).
- Gandra B.F., Oliveira A.F.L., Bagatini M.C., Osório E. Iron ore-petcoke briquettes as complementary burden for blast furnaces. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 35. P. 1556—1564. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.123>
- Pascoal A. da Luz, Rossoni H.A.V., Kaffash H., Tangstad M., Henriques A.B. Study of the Physical Behaviour and the Carbothermal Reduction of Self-Reducing Briquettes Developed with Iron Ore Fines, Charcoal and Silica Fume Residues. *Sustainability*. 2022. 14(17). 10963. <https://doi.org/10.3390/su141710963>
- Vaniukov A.A., Ivashchenko V.P., Ivanova L.Kh., Kovalov M., Tsybulia Ye. Complex solid-phase reduction in a blast furnace of self-healing pellets of cold agglomeration containing by-product carbon materials of metallurgical production. *Theory and Practice of Metallurgy*. 2025. No. 2. P. 124—129. <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2025.15>
- Iwase K., Higuchi T., Yamamoto T., Murakami T. Design for Carbon Core Pellet toward Co-production with Sinter. *ISIJ International*. 2022. Vol. 62. Iss. 6. P. 1178—1188. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-590>
- Mousa E., Lundgren M., Ökvist S.L. et al. Reduced Carbon Consumption and CO₂ Emission at the Blast Furnace by Use of Briquettes Containing Torrefied Sawdust. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2019. Vol. 5. P. 391—401. <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00229-7>
- Мешалкин А.П., Камкин В.Ю., Колбин Н.А., Турищев В.В., Бабенко А.В. Проблемные вопросы использования техногенных отходов промышленного происхождения в процессах рафинирования стали. *Теория и практика металлургии*. 2017. № 3—4. С. 47—53.

13. Мішалкін А.П., Камкіна Л.В., Ковальов Д.А., Камкін В.Ю., Синицин Я.С., Колбін М.О. Розробка умов попередньої підготовки і параметрів теплової обробки сумішей техногенних відходів на основі оксидів кальцію, заліза і вуглецю. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 3—5. С. 37—42. URL: https://nmetau.edu.ua/file/ktmp_11597.pdf (дата звернення: 28.04.2026).
14. Ariyama T., Sato M., Nouchi T., Takahashi K. Evolution of Blast Furnace Process toward Reductant Flexibility and Carbon Dioxide Mitigation in Steel Works. *ISIJ International*. 2016. Vol. 56. Iss. 10. P. 1681—1696. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-210>
15. Zhao Z., Yu X., Shen Ya. Effects and mechanism of using ferro-coke in an ironmaking blast furnace – A virtual experiment. *Fuel*. 2025. Vol. 382. Part A. 133726. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133726>
16. Kasai A., Matsui Y. Lowering of Thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace by Adjoining Carbonaceous Material and Iron Ore. *ISIJ International*. 2004. Vol. 44. Iss. 12. P. 2073—2078. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.2073>
17. Higuchi K., Kunitomo K., Nomura S. Reaction Behaviors of Various Agglomerates in Reducing the Temperature of the Thermal Reserve Zone of the Blast Furnace. *ISIJ International*. 2020. Vol. 60. Iss. 11. P. 2366—2375. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-115>
18. Naito M., Okamoto A., Yamaguchi K., Yamaguchi T., Inoue Y. Improvement of Blast Furnace Reaction Efficiency by Temperature Control of Thermal Reserve Zone. *Nippon Steel Technical Report*. 2006. No. 94. P. 103—108. URL: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9417.pdf> (дата звернення: 28.04.2026).
19. Higuchi K., Matsumura M., Uebo K. Innovative Technologies to Mitigate CO₂ Emissions during Ironmaking. *Nippon Steel Technical Report*. 2022. No. 127. P. 15—20. URL: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/pdf/127-05.pdf> (дата звернення: 28.04.2026).
20. Lei Z., Yan J., Xie R., Yao Z., Xue Ch., Tian Yu., Cui P. Catalysis mechanism of solution loss reaction of metallurgical coke in blast furnace: Experimental and modeling study. *Fuel*. 2021. Vol. 290. 120025. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120025>
21. Wang Q., Liu Z., Tang H., Guo Zh. Experimental and Numerical Investigations on Charging Carbon Composite Briquettes in a Blast Furnace. *Metals*. 2021. Vol. 11(11). 1669. <https://doi.org/10.3390/met11111669>
22. Ogbazode J.E., Ajide O.O., Oluwole O.O., Ofi O. Recent Trends in the Technologies of the Direct Reduction and Smelting Process of Iron Ore/Iron Oxide in the Extraction of Iron and Steelmaking. *Iron Ores and Iron Oxides – New Perspectives* / ed. by B. Kumar. IntechOpen. 2023. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001158>
23. Ning X., Ren Z., Zhang N., Wang G. et al. Reduction Study of Carbon-Bearing Briquettes in the System of Multiple Reductants. *Materials*. 2025. № 18(18). 4408. <https://doi.org/10.3390/ma18184408>
24. Bahgat M., Halim Kh.S.A., Kelesh H.A.E., Nasr M.I. Blast Furnace Operating Conditions Manipulation for Reducing Coke Consumption and CO₂ Emission. *Steel Research International*. 2012. Vol. 83. Iss. 7. P. 686—694. <https://doi.org/10.1002/srin.201200001>
25. Bagatini M.C., Fernandes T., Silva R.T., Galvão D.F., Flores I.V. Mill scale and flue dust briquettes as alternative burden to low height blast furnaces. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 276(7). Art. 124332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124332>
26. Babich A., Senk D., Solar J., Marco I. de. Efficiency of Biomass Use for Blast Furnace Injection. *ISIJ International*. 2019. Vol. 59. Iss. 12. P. 2212—2219. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-337>
27. Chakrabarty A., Raju A.B., Pani S. et al. Effect of Selective Pellet Loading on Burden Distribution and Blast Furnace Operations. *ISIJ International*. 2023. Vol. 63. Iss. 2. P. 271—281. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-373>
28. Lu Ch.-Yu., Du Sh.-W., Kuo Sh.-K. Development of an Online Blast Furnace Burden Profile Measuring System. *China Steel Technical Report*. 2010. No. 23. P. 25—30. URL: https://www.csc.com.tw/csc_cts/ena/pdf/%5Cno23%5C05--Development%20of%20an%20Online%20Blast%20Furnace%20Burden%20Profile%20Measuring%20System.pdf (дата звернення: 28.04.2026).
29. Wei H., Zhang C., Han J., Wang Zh., Ren W., Zhang J., Chen Z., Lu P. Effect of Pellet Proportion and Charging Sequence on Burden Distribution in Blast Furnaces According to Discrete Element Method Simulation. *Processes*. 2025. Vol. 13(1). 237. <https://doi.org/10.3390/pr13010237>
30. Ye L., Zhang J., Yu J., Xu R., Dang H. Evolution behavior and kinetic analysis of vacuum-extruded iron-rich dust briquette in blast furnace. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 433. 139753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139753>
31. Asadi A.H., Hashemi S.M., Sazvar A. Effect of carbon content as reducing agent on the reduction behavior and crushing strength of iron ore composite pellets. *Materials Chemistry and Mechanics*. 2023. Vol. 1. Iss. 1. P. 24—29. <https://doi.org/10.22034/mcm.2023.1.2>
32. Pal J., Rajshekar Y., Kumar S., Venugopalan T. Development of carbon composite iron ore slime briquettes for using in ironmaking. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2021. Vol. 63. No. 1—2. P. 1—11. URL: <https://jmms.nmlindia.org/wp-content/uploads/2022/01/1st.pdf> (дата звернення: 28.04.2026).
33. OECD, Frascati Manual: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities. Paris. OECD. 2015. 398 p. <https://dx.doi.org/10.1787/9789264239012-en>



REFERENCES

1. Gandra, B. F., Junior, G. E. de P., Bagatini, M. C., & Osório E. (2023). Analysis of self-reducing composites with different iron ore-carbon ratio. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 6433-6445. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.289>
2. Yokoyama, H., Higuchi, K., Ito, T., & Oshio, A. (2012). Decrease in Carbon Consumption of a Commercial Blast Furnace by Using Carbon Composite Iron Ore. *ISIJ International*, 52(11), 2000-2006. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.2000>
3. KOBELCO Group's CO₂ Reduction Solution for Blast Furnace Ironmaking. *Kobe Steel, Ltd.* https://www.kobelco.co.jp/english/releases/files/20210216_e.pdf
4. Tang, H., Sun, Y., & Rong, T. (2020). Experimental and Numerical Investigation of Reaction Behavior of Carbon Composite Briquette in Blast Furnace. *Metals*, 10(1), 49. <https://doi.org/10.3390/met10010049>
5. Takashi, A., Kiyoshi, F., & Hidekazu, F. (2009). Development of Carbon Iron Composite Process. *JFE Technical Report*, (13), 1-6. <https://www.jfe-steel.co.jp/en/research/report/013/pdf/013-02.pdf>
6. Yokoyama, H., Ito, T., Chiba, M., Higuchi, K., Oshio, A., & Sato, H. (2020). Development of Carbon Composite Iron Ore Production and Improvement in Blast Furnace Reduction Efficiency. *Nippon Steel Technical Report*, (123), 90-99. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/pdf/123-14.pdf>
7. Gandra, B. F., Oliveira, A. F. L., Bagatini, M. C., & Osório, E. (2025). Iron ore-petcoke briquettes as complementary burden for blast furnaces. *Journal of Materials Research and Technology*, 35, 1556-1564. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.123>
8. Pascoal, A. da Luz, Rossoni, H. A. V., Kaffash, H., Tangstad, M., & Henriques, A. B. (2022). Study of the Physical Behaviour and the Carbothermal Reduction of Self-Reducing Briquettes Developed with Iron Ore Fines, Charcoal and Silica Fume Residues. *Sustainability*, 14(17), 10963. <https://doi.org/10.3390/su141710963>
9. Vaniukov, A. A., Ivashchenko, V. P., Ivanova, L. Kh., Kovalov, M., & Tsybulia, Ye. (2025). Complex solid-phase reduction in a blast furnace of self-healing pellets of cold agglomeration containing by-product carbon materials of metallurgical production. *Theory and Practice of Metallurgy*, (2), 124-129. <https://doi.org/10.15802/tpm.2.2025.15>
10. Iwase, K., Higuchi, T., Yamamoto, T., & Murakami, T. (2022). Design for Carbon Core Pellet toward Co-production with Sinter. *ISIJ International*, 62(6), 1178-1188. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-590>
11. Mousa, E., Lundgren, M., Ökvist, S. L. et al. (2019). Reduced Carbon Consumption and CO₂ Emission at the Blast Furnace by Use of Briquettes Containing Torrefied Sawdust. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5, 391-401. <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00229-7>
12. Meshalkin, A. P., Kamkin, V. Yu., Kolbin, N. A., Turishchev, V. V., & Babenko, A. V. (2017). Problemnyie voprosyi ispolzovaniya tehnogennyih othodov promyshlennogo proishozhdeniya v protsessah rafinirovaniya stali [Problematic issues of using industrial waste in steel refining processes]. *Theory and practice of metallurgy*, (3-4), 47-53 [in Russian].
13. Mishalkin, A. P., Kamkina, L. V., Kovalov, D. A., Kamkin, V. Yu., Sinitsin, Ya. S., & Kolbin, M. O. (2018) Rozrobka umov poperednoi pidhotovky i parametriv teplovoi obrobky sumishei tekhnogennykh vidkhodiv na osnovi oksydiv kaltsiiu, zaliza i vuhletsiiu [Development of pre-treatment conditions and thermal processing parameters for mixtures of industrial waste based on calcium, iron, and carbon oxides]. *Theory and practice of metallurgy*, (3-5), 37-42. https://nmetau.edu.ua/file/ktmp_11597.pdf [in Ukrainian].
14. Ariyama, T., Sato, M., Nouchi, T., & Takahashi, K. (2016). Evolution of Blast Furnace Process toward Reductant Flexibility and Carbon Dioxide Mitigation in Steel Works. *ISIJ International*, 56(10), 1681-1696. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-210>
15. Zhao, Z., Yu, X., & Shen, Ya. (2025). Effects and mechanism of using ferro-coke in an ironmaking blast furnace – A virtual experiment. *Fuel*, 382, part A. 133726. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133726>
16. Kasai, A., & Matsui, Y. (2004). Lowering of Thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace by Adjoining Carbonaceous Material and Iron Ore. *ISIJ International*, 44(12), 2073-2078. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.2073>
17. Higuchi, K., Kunitomo, K., & Nomura, S. (2020). Reaction Behaviors of Various Agglomerates in Reducing the Temperature of the Thermal Reserve Zone of the Blast Furnace. *ISIJ International*, 60(11), 2366-2375. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-115>
18. Naito, M., Okamoto, A., Yamaguchi, K., Yamaguchi, T., & Inoue, Y. (2006). Improvement of Blast Furnace Reaction Efficiency by Temperature Control of Thermal Reserve Zone. *Nippon Steel Technical Report*, (94), 103-108. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9417.pdf>
19. Higuchi, K., Matsumura, M., & Uebo, K. (2022). Innovative Technologies to Mitigate CO₂ Emissions during Ironmaking. *Nippon Steel Technical Report*, (127), 15-20. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/pdf/127-05.pdf>
20. Lei, Z., Yan, J., Xie, R., Yao, Z., Xue, Ch., Tian, Yu., & Cui, P. (2021). Catalysis mechanism of solution loss reaction of metallurgical coke in blast furnace: Experimental and modeling study. *Fuel*, 290, 120025. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120025>

21. Wang, Q., Liu, Z., Tang, H., & Guo, Zh. (2021). Experimental and Numerical Investigations on Charging Carbon Composite Briquettes in a Blast Furnace. *Metals*, 11(11), 1669. <https://doi.org/10.3390/met11111669>
22. Ogbezode, J. E., Ajide, O. O., Oluwole, O. O., & Ofi, O. (2023). Recent Trends in the Technologies of the Direct Reduction and Smelting Process of Iron Ore/Iron Oxide in the Extraction of Iron and Steelmaking. *Iron Ores and Iron Oxides – New Perspectives* / ed. by B. Kumar. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1001158>
23. Ning, X., Ren, Z., Zhang, N., Wang, G. et al. (2025). Reduction Study of Carbon-Bearing Briquettes in the System of Multiple Reductants. *Materials*, 18(18), 4408. <https://doi.org/10.3390/ma18184408>
24. Bahgat, M., Halim, Kh. S. A., Kelesh, H. A. E., & Nasr, M. I. (2012). Blast Furnace Operating Conditions Manipulation for Reducing Coke Consumption and CO₂ Emission. *Steel Research International*, 83(7), 686-694. <https://doi.org/10.1002/srin.201200001>
25. Bagatini, M. C., Fernandes, T., Silva, R. T., Galvão, D. F., & Flores, I. V. (2020). Mill scale and flue dust briquettes as alternative burden to low height blast furnaces. *Journal of Cleaner Production*, 276(7), art. 124332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124332>
26. Babich, A., Senk, D., Solar, J., & Marco, I. de (2019). Efficiency of Biomass Use for Blast Furnace Injection. *ISIJ International*, 59(12), 2212-2219. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-337>
27. Chakrabarty, A., Raju, A. B., Pani, S. et al. (2023). Effect of Selective Pellet Loading on Burden Distribution and Blast Furnace Operations. *ISIJ International*, 63(2), 271-281. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-373>
28. Lu, Ch.-Yu., Du, Sh.-W., & Kuo, Sh.-K. (2010). Development of an Online Blast Furnace Burden Profile Measuring System. *China Steel Technical Report*, (23), 25-30. https://www.csc.com.tw/csc_c/ts/ena/pdf%5Cno23%5C05--Development%20of%20an%20Online%20Blast%20Furnace%20Burden%20Profile%20Measuring%20System.pdf
29. Wei, H., Zhang, C., Han, J., Wang, Zh., Ren, W., Zhang, J., Chen, Z., & Lu, P. (2025). Effect of Pellet Proportion and Charging Sequence on Burden Distribution in Blast Furnaces According to Discrete Element Method Simulation. *Processes*, 13(1), 237. <https://doi.org/10.3390/pr13010237>
30. Ye, L., Zhang, J., Yu, J., Xu, R., & Dang, H. (2023). Evolution behavior and kinetic analysis of vacuum-extruded iron-rich dust briquette in blast furnace. *Journal of Cleaner Production*, 433, 139753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139753>
31. Asadi, A. H., Hashemi, S. M., & Sazvar, A. (2023). Effect of carbon content as reducing agent on the reduction behavior and crushing strength of iron ore composite pellets. *Materials Chemistry and Mechanics*, 1(1), 24-29. <https://doi.org/10.22034/mcm.2023.1.2>
32. Pal, J., Rajshekar, Y., Kumar, S., & Venugopalan, T. (2021). Development of carbon composite iron ore slime briquettes for using in ironmaking. *Journal of Metallurgy and Materials Science*, 63(1-2), 1-11. <https://jmms.nmlindia.org/wp-content/uploads/2022/01/1st.pdf>
33. OECD (2015). Frascati Manual: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities, Paris. OECD. 398 p. <https://dx.doi.org/10.1787/9789264239012-en>

Надійшла/Received 01.05.2026

Прийнята/Accepted 20.05.2026

Опублікована/Published 29.05.2026

Summary

A.P. Mishalkin, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, e-mail: meshalkin@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0002-7206-1809>
L.V. Kamkina, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, e-mail: lydmila.kamkina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>
V.O. Petrenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Intellectual Property and Project Management, e-mail: petrenko_v@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>
V.G. Chistyakov, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Iron and Steel Metallurgy, e-mail: chist.chvg60@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4233-3797>
M.M. Boiko, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Iron and Steel Metallurgy, e-mail: m.m.boiko@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3557-9027>
A.A. Nadtochiy, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, e-mail: Nadtochiy08@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5077-0562>
A.A. Vanukov, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, e-mail: antonvanukov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-5616-391X>

Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)

Development of Theoretical Foundations for the Use of Ore-Coal Composites and Their Coordination with Modern Trends in Improving the Blast Furnace Process

This paper summarizes current theoretical concepts and the results of the practical application of ore-carbon composite materials (OCCMs) as partial substitutes for sinter, pellets, coke, and pulverized coal in blast furnace production.

The aim of the study is to establish the physicochemical patterns of the influence of OCCM on the course of iron oxide reduction, carbon gasification, TRZ formation, and specific reducer consumption, as well as to determine promising compositions and methods for preparing composites, taking into account the possibility of using pyro-biocarbon.

The methodological basis of the work consists of a thermodynamic analysis of the equilibrium of the (Fe–O–C–CO–CO₂) system and a synthesis of the results of kinetic and modeling studies. The peculiarities of the course of iron reduction and carbon gasification reactions under conditions of direct contact between iron oxides and carbon within the composite volume (when changing the type of carbon-containing material and its origin) are analyzed.

It has been confirmed that the spatial proximity of the ore and fuel-reducing components ensures: the formation of a locally high reducing potential and the intensification of indirect reduction; a decrease in temperature and a narrowing of the TRZ, accompanied by an increase in the degree of efficient CO utilization. A reduction in the TRZ by 50–150 °C, according to recent studies, in turn contributes to: ensuring earlier development of the indirect reduction of iron oxides; a reduction in CO demand and intensification of the carbon gasification reaction, leading to a decrease in specific coke and PCI consumption per ton of pig iron, increased efficiency of CO reduction potential utilization, and a reduction in the carbon footprint of the blast furnace process as a whole.

Promising types of OCCMs are considered: hot-briquetted, cold-bonded briquettes, self-reducing briquettes, and composite briquettes/pellets. It is shown that the most promising for modern metallurgy are composites based on iron ore concentrate, blast furnace dust and sludge, petcoke, fine coal, and pyro-biocarbon. The influence of composite preparation methods – namely, hot briquetting, cold pressing, carbonization, and pelletizing of the feedstock – on their mechanical properties, reactivity, and expected behavior in a blast furnace has been analyzed.

The scientific novelty of this work lies in demonstrating the feasibility of using pyro-biocarbon as a partial substitute for fossil carbon in the composition of OCCM. It has been established that pyro-biocarbon, due to its high porosity, developed surface area, and increased reactivity, ensures a further reduction in TRZ and specific reducer consumption, while simultane-

ously creating the conditions for reducing the carbon footprint of blast furnace production.

The theoretical significance of the work lies in the development of understanding regarding the mechanism of the combined process of iron oxide reduction and carbon gasification within the OCCM and their influence on blast furnace process parameters. The practical significance lies in identifying promising directions for the partial replacement of sinter, pellets, coke, and PCI with ore-coal composites to improve the energy efficiency of blast furnace production, reduce fossil carbon consumption, and cut greenhouse gas emissions.

**Keywords**

Ore-carbon composites, iron reduction, carbon gasification, formation of TRZ, reduction of CO₂ emissions.