Міністерство освіти і науки україни
Криворізький національний університет
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії чорних металів
і ливарного виробництва

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної атестаційної роботи бакалавра

зі спеціальності 136 – Металургія

на тему: Вибір та обґрунтування оптимальних технологічних рішень для ефективної переробки прокатної окалини в металургійному виробництві.

Виконав:
студент групи МТ-22-1 Олена ДЗЮБА

Керівник випускної роботи Володимир ПЛОТНІКОВ

Нормоконтролер Володимир ПЛОТНІКОВ

Завідувач кафедри Сергій САВЕЛЬЄВ

Кривий Ріг
2026 р.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана за темою «Вибір та обґрунтування оптимальних технологічних рішень для ефективної переробки прокатної окалини в металургійному виробництві.» та представлена до захисту в Криворізькому національному університеті (м. Кривий Ріг, 2026 р.). Робота містить ___ сторінок, ___ рисунків, ___ таблиць, ___ найменувань використаних джерел____.

Ключові слова: агломераційна шихта, процеси спікання, паливна складова, прокатна окалина, змішування, огрудкування, товарний агломерат, основність агломерату, показники якості агломерату.

Інтенсивність генерації та акумулювання замасленої прокатної окалини на металургійних підприємствах України суттєво перевищує фактичні масштаби її вторинного залучення до виробничого обігу. Твердофазна складова шламів вторинних відстійників прокатного виробництва, представлена переважно окалиною, характеризується високим вмістом заліза, який у окремих випадках сягає 70 %. Водночас значна частка водомастильних домішок (до 30 %) істотно ускладнює логістичні операції, довготривале зберігання та технологічну переробку зазначених відходів.У шламонакопичувачах металургійних комбінатів України зосереджені значні масиви замасленої прокатної окалини, загальні обсяги яких обчислюються сотнями тисяч тонн, що формує підвищене техногенне навантаження на навколишнє природне середовище. За цих умов науково обґрунтоване розроблення та впровадження ефективних технологій утилізації замасленої прокатної окалини набуває особливої актуальності, оскільки дозволяє одночасно вирішувати завдання ресурсозбереження, зниження екологічних ризиків та підвищення економічної ефективності металургійного виробництва в умовах України.

ЗМІСТ

Вступ

1. Системно-аналітичне узагальнення науково-технічних підходів до проблеми утилізаційної переробки замасленої прокатної окалини

2. Дослідження закономірностей формування замасленої прокатної окалини та комплексна оцінка технологічної доцільності й ефективності її залучення до процесів коксохімічного виробництва із застосуванням термокаталітичного крекінгу

3. Розроблення та наукове обґрунтування технологічних рішень з підготовки замасленої прокатної окалини для інтеграції до складу агломераційної шихти

4. Результати дослідно-промислової апробації технології утилізації замасленої прокатної окалини в умовах аглодоменного виробничого циклу

5. Техніко-економічний аналіз та обґрунтування ефективності впровадження запропонованих технологічних рішень

6. Аналіз виробничих ризиків і заходи забезпечення безпечних умов праці при реалізації технологічних процесів

7. Узагальнені наукові висновки та практичні рекомендації

Список використаних джерел

ВСТУП

Сучасна державна екологічна політика, визначена положеннями «Національного плану дій з гігієни довкілля на 2019–2030 роки», орієнтована на реалізацію концепції сталого розвитку, відповідно до якої економічне зростання має відбуватися у нерозривному зв'язку з системним поліпшенням екологічного стану навколишнього середовища. У цьому контексті особливої актуальності набуває впровадження маловідходних та ресурсоефективних технологій у промислових регіонах, де техногенне навантаження досягло критичних значень.

Металургійний комплекс України традиційно належить до найбільших генераторів промислових відходів, що підтверджується положеннями галузевих програм з використання відходів виробництва і споживання. За цих умов розроблення та впровадження технологій замкненого матеріального циклу, спрямованих на залучення вторинних ресурсів у виробничий обіг, є одним із ключових напрямів підвищення екологічної та економічної ефективності металургійного виробництва.

Результати ресурсо-екологічного аналізу, виконаного на основі концепції екологічного балансу, переконливо свідчать про необхідність інтеграції технологій рециклінгу промислових відходів у сучасні металургійні процеси. Однією з найбільш складних і водночас недостатньо вирішених проблем у чорній металургії залишається повна та безпечна утилізація замасленої прокатної окалини. У процесах прокатного виробництва втрати металу у вигляді окалини досягають близько 5 %, що для великих металургійних комбінатів еквівалентно десяткам тисяч тонн залізовмісних відходів щорічно.

Прокатна окалина є цінною вторинною сировиною, яка характеризується високим вмістом заліза (до 69–72 % у перерахунку на нелеткий залишок) та відносно низькою концентрацією шкідливих домішок, зокрема сірки, фосфору й лужних компонентів. Залежно від хімічного складу прокатуваної сталі окалина може також містити легувальні елементи, що додатково підвищує її металургійну цінність.

У технологічному відношенні розрізняють первинну та вторинну прокатну окалину, які вилучаються відповідно у первинних і вторинних відстійниках прокатного виробництва. Найбільші труднощі пов'язані саме з утилізацією вторинної дисперсної окалини, що характеризується складним фазовим складом і містить до 70 % твердої залізовмісної фази, до 20 % мастильної компоненти та близько 10 % води.

Використання замасленої окалини вторинних відстійників у складі агломераційної шихти супроводжується низкою негативних технологічних ефектів. Зокрема, гази, що відходять зі спікаючого шару, збагачуються парами мастил і продуктами їх термічного розкладу, які в умовах запиленого газового потоку утворюють липкі агломерати, схильні до інтенсивного налипання на елементи газовідвідних систем. У разі введення до шихти непідготовленої замасленої окалини вміст мастил у відкладеннях на елементах мультициклонів та лопатках ексгаустерів може сягати 25 %, а ступінь залипання батарейних циклонів у міжремонтний період — до 50 % площі живого перерізу, що істотно знижує ефективність очищення газів і посилює абразивне зношування обладнання.

Додаткові ускладнення створюють проблеми транспортування та дозування замасленої окалини, зокрема її змерзання у зимовий період, налипання на стінки транспортних ємностей та нерівномірність подачі в шихту. Сукупність зазначених факторів призводить до того, що на багатьох

металургійних підприємствах замаслена окалина практично не залучається до переробки та спрямовується на складування, нерідко разом зі

шламами газоочищення аглодоменного та сталеплавильного виробництв. Таке зберігання супроводжується вилученням значних земельних площ і створює серйозну екологічну загрозу, пов’язану з інфільтрацією мастильних компонентів у ґрунти та природні водойми.

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень і запропонованих технічних рішень у галузі утилізації прокатної окалини — зокрема введення до агломераційної або коксохімічної шихти, брикетування, огрудкування тощо — більшість із них не набула широкого промислового застосування через негативний вплив на перебіг технологічних процесів або необхідність використання складного й капіталомісткого обладнання.

У зв’язку з цим дана робота спрямована на комплексне вирішення актуальних науково-технічних завдань, пов’язаних із вибором раціональних способів утилізації замасленої прокатної окалини, оптимізацією її властивостей шляхом спеціальної підготовки, встановленням ефективних параметрів агломераційного процесу та мінімізацією негативного впливу мастильних компонентів на газовий тракт агломераційних машин.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Інтенсивність утворення та накопичення замасленої прокатної окалини на металургійних підприємствах України істотно перевищує наявні можливості її вторинного використання. Твердофазна складова шламів вторинних відстійників прокатного виробництва характеризується високим вмістом заліза (до 70 %), однак значна частка водомастильної фази (до 30 %) істотно ускладнює процеси транспортування, зберігання та технологічної переробки. У шламосховищах металургійних комбінатів накопичені сотні тисяч тонн таких відходів, що обумовлює підвищене екологічне навантаження. За цих умов розроблення ефективних технологій утилізації замасленої прокатної окалини має вагоме екологічне та економічне значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами.

Дисертаційна робота виконана у межах науково-дослідних програм Національної металургійної академії України та безпосередньо пов'язана з виконанням НДР, спрямованих на розроблення і впровадження технологій дожигання парів мастил в агломераційному виробництві, а також використання замасленої окалини як сировинного компонента агломераційної переробки.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є наукове обґрунтування та промислова реалізація технологічних рішень, спрямованих на забезпечення економічно доцільної та екологічно безпечної утилізації замасленої прокатної окалини. Для досягнення поставленої мети передбачалося оцінити ефективність існуючих способів утилізації, обґрунтувати доцільність застосування нового виду добавки при підготовці окалини, а також удосконалити режим агломераційного процесу й визначити його техніко-економічну ефективність.

Методи дослідження.

У роботі використано методи планування експерименту з реалізацією матриці Бокса—Бенкена, термогравіметричний аналіз, стандартні методики

лабораторного спікання та оцінювання властивостей агломерату відповідно до чинних ДСТУ. Статистичну обробку результатів здійснено із застосуванням програмного пакета Statgraphics Plus.

Наукова новизна.

У роботі отримано подальший розвиток уявлення про керування властивостями дисперсних матеріалів із підвищеним вмістом водомастильних компонентів; уперше встановлено закономірності впливу витримки замасленої окалини з органомінеральною добавкою на термічне виділення мастил; виявлено нові закономірності формування властивостей агломерату, які забезпечують збереження його відновлюваності за підвищеного вмісту FeO.

Практичне значення.

Розроблена технологія підготовки замасленої прокатної окалини до використання в агломераційному виробництві впроваджена в промислових умовах, забезпечує ресурсозбереження, зменшення екологічного навантаження та значний економічний ефект без необхідності капітальних витрат.

РОЗДІЛ 1

Системно-аналітичне узагальнення сучасних науково-технічних підходів до утилізаційної переробки замасленої прокатної окалини

Як було обґрунтовано у вступній частині, проблема утилізації прокатної окалини характеризується наявністю значної кількості технічних і технологічних рішень, що різняться як за принципами реалізації, так і за рівнем промислової апробації. У даному розділі здійснено систематизований аналіз основних напрямів утилізаційної переробки замасленої прокатної окалини, реалізованих у різних металургійних процесах і апаратурних схемах.

Найбільш поширеним і технологічно доступним напрямом утилізації прокатної окалини є її використання як складової агломераційної шихти. Особливості перебігу процесу спікання за умов введення окалини детально проаналізовано в низці досліджень, де показано, що наявність у шихті значної кількості FeO створює сприятливі умови для інтенсифікації твердофазних взаємодій та утворення легкоплавких сполук у системі $CaO–FeO–SiO_2$. Це, у свою чергу, забезпечує формування основної маси агломерату через рідкопластичний стан за відносно зниженого теплового рівня процесу. Встановлено, що додавання окалини позитивно впливає на міцнісні характеристики агломерату, підвищуючи його стійкість до ударного навантаження та стирання, а також сприяє зростанню продуктивності аглоустановок і зниженню питомих витрат твердого палива.

Еквівалентність добавки окалини до твердого палива підтверджується результатами досліджень, у яких показано, що введення значних кількостей окалини забезпечує ефект, співставний із підвищенням паливної складової шихти. Водночас встановлено й покращення якості готового агломерату, що свідчить про комплексний позитивний вплив окалини на процес спікання.

Разом із тим, ключовим обмежувальним фактором залишається наявність мастильних компонентів у складі вторинної окалини, що обумовлює утворення возгонів у газовій фазі та негативно впливає на роботу газовідвідних систем

агломераційних машин. У зв’язку з цим значна кількість досліджень присвячена розробленню технологій попередньої підготовки замасленої окалини, спрямованих на мінімізацію негативного впливу мастил на перебіг агломераційного процесу.

Запропоновані методи підготовки характеризуються значною різноманітністю — від механічного змішування з матеріалами, здатними адсорбувати вологу та частково мастильні компоненти, до застосування термічних методів обробки. У ряді робіт доведено, що низька ефективність використання вторинної окалини у складі аглошихти зумовлена саме недостатньо глибокою її підготовкою. Як один із практичних підходів запропоновано змішування замасленої окалини з вапняним пилом у штабелях із регламентованою пошаровою структурою, що дозволяє покращити її сипучість і транспортабельність.

Промислова апробація подібних технологічних схем показала, що витримка сумішей замасленої окалини з лужними або флюсовими матеріалами протягом певного часу забезпечує перехід матеріалу у сипучий стан і дозволяє використовувати його в агломераційному виробництві без істотних ускладнень. Водночас установлено, що введення в аглошихту непідготовленої окалини у кількостях, що перевищують 4 %, призводить до порушень транспортування, дозування та прискореного зношування ексгаустерів унаслідок підвищеного вмісту мастил у газовій фазі.

Особливий інтерес становлять результати досліджень, у яких показано, що взаємодія замасленої окалини з негашеним вапном супроводжується утворенням портландиту, що позитивно впливає на процес грудкування агломераційної шихти та підвищує механічну міцність гранул. Додавання підготовлених сумішей у невеликих кількостях забезпечує стабілізацію процесу грануляції шихти з високим вмістом тонких фракцій, підвищення продуктивності агломашин і зниження виходу дріб’язку в готовому агломераті.

Важливим результатом є встановлені закономірності перерозподілу мастильних компонентів між твердою та газовою фазами в процесі спікання. Застосування радіоізотопних методів показало, що при використанні непідготовленої окалини значна частка масел видаляється у вигляді возгонів, тоді як попередня підготовка сумішей дозволяє суттєво збільшити ступінь їх вигоряння безпосередньо в шарі агломерації. Це призводить до зниження навантаження на газоочисне обладнання та підвищення надійності роботи ексгаустерів.

У низці робіт досліджено вплив вапнованої окалини на кінетику спікання та якість агломерату. Встановлено, що такі добавки сприяють зростанню вертикальної швидкості спікання, підвищенню питомої продуктивності процесу та покращенню механічних характеристик агломерату без негативного впливу на роботу газовідвідних систем.

Разом із тим, наявні дослідження містять суперечливі оцінки щодо можливості повного згоряння мастил у шарі агломерації, зважаючи на різницю між температурними інтервалами випаровування та займання мастильних компонентів. При цьому слід зазначити, що у більшості робіт термічна поведінка масел окалини досліджувалася недостатньо глибоко, що не дозволяє зробити однозначні висновки.

Аналіз наявних даних дозволяє припустити, що ключовим чинником, який визначає характер участі мастил у процесі спікання, є стан вологи в окалині. У випадку непідготовленої сировини водомастильна емульсія починає інтенсивно випаровуватися вже за температур, близьких до температури кипіння води, що унеможливлює займання масел в умовах агломераційного шару, обмеженого за доступом кисню. Натомість переведення вологи у зв’язаний стан потенційно

дозволяє змістити температурний інтервал виділення масел у зону їх ефективного займання та вигоряння.

Незважаючи на перспективність такого підходу, питання механізмів перенесення та зв’язування вологи в процесі підготовки замасленої окалини досліджені недостатньо. Відомі роботи з сорбції масел із водних середовищ свідчать, що низка техногенних матеріалів володіє порівнянною сорбційною здатністю щодо масел, однак ці результати не були системно екстрапольовані на умови агломераційного процесу.

Окремим напрямом досліджень є застосування замасленої прокатної окалини у коксохімічному виробництві. Доведено принципову можливість введення окалини до складу вугільних шихт, де вона позитивно впливає на структуроутворення коксу, підвищує рухливість вугільних частинок та каталізує процеси коксування. При цьому мастильні компоненти піддаються піролізу з утворенням корисних хімічних продуктів, а тверда залізовмісна складова переходить у кокс у вигляді відновленого заліза.

Результати комплексних досліджень показують, що використання окалини у складі вугільної шихти є одним із найбільш ефективних способів її утилізації, оскільки наявність масел не лише не погіршує перебіг технологічного процесу, а й забезпечує повну переробку летких компонентів без додаткового екологічного навантаження.

Поряд із цим, розроблено низку технологій згрудкування замасленої окалини — брикетування та огрудкування, що особливо актуально для підприємств, які не мають агломераційного виробництва. Запропоновано різноманітні склади брикетів і окатишів з використанням флюсів, шламів, органічних і неорганічних зв’язуючих, однак присутність масел істотно ускладнює процеси формування міцних і вологостійких виробів, що нерідко потребує додаткових стадій знемаслення.

Термічні методи знемаслення, включаючи випал, низькотемпературне нагрівання та окислювальну обробку, забезпечують високий ступінь очищення окалини, проте характеризуються значними енергетичними витратами,

складністю газоочистки та потребою у спеціалізованому обладнанні, що ставить під сумнів їх економічну доцільність у більшості практичних випадків.

Узагальнюючі висновки до розділу 1

1. Безпосереднє залучення обмеженої кількості вторинної замасленої окалини до агломераційного процесу є принципово можливим за умови її ефективної попередньої підготовки із застосуванням матеріалів, здатних зв’язувати вологу та частково мастильні компоненти.

2. Закономірності термічної поведінки мастил окалини та їх участь у процесах спікання залишаються недостатньо вивченими, зокрема в аспекті можливості їх займання у газовідвідному тракті.

3. Вплив агломерату, отриманого з використанням окалини, на показники доменної плавки досліджений фрагментарно й потребує системного аналізу.

4. Відсутність у більшості публікацій детальних техніко-економічних розрахунків ускладнює об’єктивне порівняння альтернативних технологій утилізації окалини.

5. Перспективним напрямом подальших досліджень є підвищення ефективності підготовки замасленої окалини для використання у коксохімічному виробництві.

РОЗДІЛ 2

Розроблення та науково-теоретичне обґрунтування технологічних рішень підготовки замасленої прокатної окалини для її інтеграції до складу агломераційної шихти

2.1. Концептуально-технологічна схема виділення прокатної окалини зі шламових утворень прокатних цехів

Специфічні особливості компонентного та фазового складу шламів прокатного виробництва, що містять прокатну окалину вторинних відстійників і характеризуються підвищеною часткою водомасляної фази (до 30%), є прямим наслідком прийнятих технологічних регламентів ведення прокатних процесів та супутніх операцій гідравлічного очищення поверхні металу. Таким чином, фізико-хімічні параметри зазначеного виду техногенних утворень детермінуються не випадковими чинниками, а є закономірним результатом структурно організованої виробничої схеми.

Формування замасленої прокатної окалини відбувається внаслідок інтенсивного гідродинамічного впливу на поверхню прокатуваного металу, коли видалення окалини здійснюється методом гідрозбиву високоенергетичними струменями води під тиском 10–20 МПа. Додатково значна кількість окалини, що осипається в зоні розміщення прокатних станів та рольгангів, видаляється шляхом гідрозмиву. У межах цих операцій у водний потік одночасно залучаються мастильні матеріали, що застосовуються для змащування вузлів прокатного обладнання.

Слід підкреслити, що в прокатному виробництві використовуються переважно важкі індустріальні оливи (ПС-28, АІ-15, МС-20, БЛ-1, БЛ-2, ТП-22

та ін.), які характеризуються наявністю довголанцюгових вуглеводневих структур та високими температурами кипіння, що сягають 400 °С. Саме ці властивості масел зумовлюють їхню низьку леткість за помірних температур та високу схильність до адсорбції на твердій поверхні окалини.

Утворені внаслідок гідроочищення змиви являють собою багатокомпонентну дисперсну систему, в якій частинки окалини перебувають у завислому стані в водомасляному середовищі. Для відокремлення твердої фази такі суспензії спрямовуються до системи відстійників. При цьому прокатна окалина проявляє виражені сорбційні властивості щодо органічної фази, внаслідок чого її пориста структура інтенсивно акумулює мастильні матеріали, формуючи стійкі водомасляні асоціати.

Існуюча на металургійному комбінаті «Криворіжсталь» схема згущення та зневоднення шламів прокатного виробництва є багаторівневою та включає поєднання первинних, радіальних і горизонтальних відстійників. Для окремих виробничих агрегатів (блюмінги та сортопрокатні цехи) реалізовано як спільні, так і автономні системи очищення, що відрізняються кількістю секцій горизонтальних відстійників та конфігурацією потоків стічних вод.

У первинних відстійниках відбувається осадження переважно грубодисперсної та середньодисперсної фракцій окалини (з розміром частинок понад 2 мм), тоді як радіальні відстійники виконують функцію резервних або компенсаційних ланок при зростанні гідравлічного навантаження. Згущений продукт з них надходить до горизонтальних відстійників, де відбувається акумуляція тонкодисперсної замасленої окалини.

Осіла на дні горизонтальних відстійників окалина за допомогою грейферних кранів переміщується до дренажних відсіків, розташованих вище

рівня суспензії. У цих відсіках реалізується гравітаційне зневоднення матеріалу, а дренажний

стік самопливом повертається до системи відстоювання. Після завершення дренування окалину вивантажують і транспортують автомобільним або залізничним транспортом до місць складування.

У період максимального завантаження виробничих потужностей підприємства річний обсяг утворення замасленої прокатної окалини досягав близько 40 тис. т, що відповідало проектній продуктивності горизонтальних відстійників. За сучасних умов експлуатації обсяги вторинної окалини, що вловлюється, зменшилися приблизно вдвічі, проте залишаються технологічно та екологічно значущими.

Окалина, вилучена з первинних відстійників, характеризується високим вмістом заліза (понад 70%) і, як правило, може бути без істотних обмежень використана як підшихтовий компонент агломераційної шихти. Натомість вторинна прокатна окалина, незважаючи на ще вищу металургійну цінність, містить понад 10% мастильних матеріалів, що істотно ускладнює її залучення до агломераційного процесу без попередньої підготовки.

Порівняльний аналіз хімічного складу замасленої окалини та залізорудного концентрату свідчить про принципову доцільність її утилізації: вміст загального заліза в окалині перевищує відповідний показник концентрату на 7–8%, тоді як концентрація діоксиду кремнію є у декілька разів нижчою. Таким чином, з точки зору металургійного потенціалу окалина є високоякісною залізовмісною сировиною.

Фізичні характеристики прокатної окалини, зокрема величина питомої поверхні та насипна густина, свідчать про її близькість до залізорудного концентрату за реакційною здатністю, хоча вона є менш дисперсною і має

більшу насипну масу, що необхідно враховувати при формуванні гранулометричного складу аглошихти.

Спроби залучення прокатної окалини до агломераційного виробництва на комбінаті здійснювалися протягом кількох десятиліть. Зокрема, період експлуатації агломераційного цеху в 1961–1972 роках характеризувався поступовим збільшенням витрати окалини з 2 до 15 кг на 1 т агломерату. Однак одночасне введення замасленої окалини та інших техногенних відходів супроводжувалося різким зростанням частки дрібної фракції (0–5 мм) у готовому агломераті, що негативно позначалося на його споживчих властивостях. Унаслідок цього у 1972 році використання замасленої прокатної окалини в агломераційній шихті було припинено.

Таблиця 2.1

Хімічний склад окалини і залізорудного концентрату

Матеріал	Хімічний склад, %					Склад компонентів, %		
	$Fe_{общ}$	FeO	CaO	SiO_2	MnO	п.п.п.	Масла	W
Концентрат	64,0-65,0	25,4-26,9	0,35	8,0-9,0	0,03	1,0	0,05	9,0-10,0
Окалина	68-72,0	45,0-53,0	0,5	3,0	0,03	2,0-4,0	6,8-20,0	4,0-26,0

Фізико-механічні параметри прокатної окалини, узагальнені в табл. 2.2, дають змогу здійснити її зіставлення з традиційною залізорудною сировиною з позицій структурно-дисперсного стану та поверхнево-активних властивостей. Аналіз наведених даних свідчить, що за величиною питомої поверхні прокатна окалина наближається до залізорудного концентрату, що потенційно зумовлює подібний рівень її реакційної здатності в процесах термічної обробки. Водночас окалина характеризується нижчим ступенем дисперсності та підвищеною насипною густиною, що обумовлює специфіку її поведінки на стадіях формування агломераційної шихти, гранулоутворення та газодинамічного режиму шару при спіканні.

Протягом останніх п’яти десятиліть на металургійному комбінаті неодноразово здійснювалися спроби промислового залучення прокатної окалини до агломераційного виробництва з метою її утилізаційного використання.

Початок систематичного застосування замасленої окалини в агломераційному цеху датується 1961 роком. Упродовж періоду 1961–1972 рр. спостерігалася чітка тенденція до поетапного нарощування її витрати у складі аглошихти — від 2 до 15 кг на 1 т готового агломерату.

Однак сумісне введення замасленої окалини та інших техногенних компонентів у шихту супроводжувалося істотним порушенням гранулометричної рівноваги готового продукту, що проявлялося у різкому зростанні вмісту дрібної фракції розміром 0–5 мм. Негативний вплив цього чинника на експлуатаційні властивості агломерату та стабільність доменного процесу зумовив прийняття рішення про припинення використання замасленої прокатної окалини в агломераційній шихті, починаючи з 1972 року.

Таблиця 2.2

Фізичні характеристики окалини і залізорудного концентрату

Материіл	Гранулометричний склад, %					Насипна маса, кг/м^3	Удільная поверхність, м^2/кг
	>1,0	1,0-0,3	0,3-0,1	0,1-0,05	<0,05		
Концентрат	0,9	0,4	2,5	10,1	86,1	3200	180-210
Окалина	8,5	26,4	18,2	18,7	28,2	4500-5500	120-150

У зв’язку зі стійкою тенденцією до накопичення значних обсягів замасленої прокатної окалини у відвалах і шламонакопичувачах металургійних підприємств, у 1984 році було ініційовано чергову спробу повторного залучення цього техногенного залізовмісного ресурсу до складу агломераційної шихти. Найвищі значення середньорічної питомої витрати окалини — до 18 кг на 1 т агломерату — зафіксовано у 1992 році, що збіглося в часі з періодом гострого дефіциту залізорудного концентрату в сировинному балансі підприємства.

Зазначений етап функціонування агломераційного цеху характеризувався помітним зниженням питомої продуктивності агломашин, що було зумовлено

сукупністю технологічних чинників. Одним із визначальних факторів виявилася незадовільна якість усереднення замасленої окалини в штабелях, унаслідок чого вона надходила на агломераційні машини у вигляді щільно зцементованих агломератів і грудок діаметром до 100 мм. Металографічний і макроскопічний аналіз зламів спека виявляв наявність локалізованих зон, практично не залучених до процесів спікання, які за складом майже повністю відповідали вихідній окалині.

Додатковим суттєвим негативним чинником стала інтенсифікація процесів займання залишкових масел окалини під час завантаження готового агломерату в хопери. Це супроводжувалося утворенням значної кількості густого, високодисперсного димового аерозолю з інтенсивними сажеутворювальними властивостями, що істотно погіршувало санітарно-гігієнічні умови праці персоналу агломераційного цеху. Сукупність зазначених технологічних, експлуатаційних і екологічних ускладнень зумовила повну відмову від введення замасленої окалини до складу аглошихти в період з 1993 по 2001 роки.

Відновлення експериментально-промислових спроб використання прокатної окалини відбулося у 2002 році, однак на істотно нижчому рівні питомих витрат — у середньому 2,9 кг на 1 т агломерату протягом 2002–2003 років. Подальший етап активізації утилізаційного залучення окалини безпосередньо пов’язаний з розробленням, науковим обґрунтуванням та промисловим упровадженням технологічних рішень, викладених у цій дисертаційній роботі.

Епізодичний, несистемний характер використання замасленої прокатної окалини в агломераційному виробництві призвів до формування значних обсягів її невикористаних запасів. Так, на металургійному комбінаті «Криворіжсталь» лише в акумулювальних ємностях накопичено до 700 тис. т замасленої окалини. Крім того, певна її частина систематично спрямовувалася на складування в

четверту карту першого ставка відстійників аглодоменного виробництва, де вона депонувалася спільно з шламами газоочисток. Станом на теперішній час у цій зоні зосереджено близько 220 тис. т такої суміші із середнім вмістом заліза на рівні ≈51%, тоді як безпосередньо у вигляді донних відкладень у ставку акумульовано до 670 тис. т власне прокатної окалини.

2.2. Дослідження ефективності утилізації прокатної окалини в процесі доменного коксування

Як зазначалося в розділі 1, одним із технологічно перспективних напрямків утилізації замасленої прокатної окалини є її залучення до процесів коксохімічної переробки. Водночас специфічні фізико-механічні властивості вихідної окалини — зокрема її в'язкість, схильність до злипання та низька здатність до дезінтеграції — зумовлюють істотні труднощі при безпосередньому змішуванні з вугільною шихтою.

За відносно невеликих витрат добавки (1–2 т/год, що відповідає 5–10 кг окалини на 1 т шихти) досягнення рівномірного розподілу матеріалу в об'ємі шихти із застосуванням серійних промислових дозаторів, розрахованих на продуктивність не менше 20 т/год, є практично неможливим. Запропоновані раніше підходи, що передбачають використання вугільної шихти як сорбенту для поглинання масел у процесі підготовки окалини, виявилися недостатньо ефективними, оскільки кам'яне вугілля характеризується обмеженою адсорбційною здатністю, особливо щодо водної складової емульсії.

З метою усунення зазначених обмежень за безпосередньої участі автора була розроблена спеціалізована технологія підготовки замасленої окалини із застосуванням активованого торфу. Активація торфу, здійснена відповідно до способу [49], забезпечує формування жорсткого пористого каркасу з високорозвиненою питомою поверхнею та підвищеною сорбційною ємністю. У процесі контакту з окалиною активований торф ефективно зв'язує як вологу, так

і масляну фракцію, що дозволяє сформувати окалино-торф'яну композицію з прийнятними реологічними характеристиками та достатньою сипучістю. Закономірності формування таких сумішей детально розглянуті в розділі 3.

Для кількісної оцінки впливу добавок окалино-торф'яної суміші до вугільної шихти на показники якості коксу в умовах коксохімічного виробництва ВАТ «Криворіжсталь» були виконані ящикові коксування. Як базову застосовували вугільну шихту марочного складу, %, : Г — 17; Ж — 31; ГР — 7; К — 27; ОС — 18, з помелом до крупності 79,1% класу 0–3 мм. Тривалість процесу коксування становила 17 год 35 хв.

Підготовку окалино-торф'яної суміші здійснювали механічним способом у металевому листі у кілька стадій з інтервалом між операціями близько 12 годин. Практичні спостереження показали, що протягом не більше ніж двох діб формується матеріал із стабільною сипучістю, придатною для подальшого дозування у вугільну шихту. Остаточне формування дослідних шихт виконували шляхом пошарового змішування компонентів із застосуванням методу конусування.Склади дослідних шихт, їхні фізико-хімічні характеристики та основні показники якості отриманого коксу наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Склади шихт і показники якості коксу

Шихти	Склад суміші окалини і торфа в угольній шихті, %	Відношення окалина:торф по масе	Технічний аналіз шихти, %				Вихід кокса, %	Характеристики кокса, %			
			W^r	A^d	S_t^d	V^{daf}		M_{25}	M_{10}	A^d	S_t^d
Базова	0	-	10,1	8,3	1,34	29,1	74,6	87,5	8,0	12,5	1,12
1	3,0	4:1	8,4	9,9	1,40	29,5	73,1	85,0	12,0	14,0	1,18
2	3,0	7:3	9,0	10,2	1,45	29,8	73,4	87,0	10,0	14,1	1,25
3	1,0	2:1	8,6	9,3	1,68	30,9	74,4	87,2	8,2	12,6	1,10
4	0,75	2:1	8,2	10,2	1,68	31,7	74,5	87,4	8,0	12,7	1,15
5	0,5	2:1	8,0	10,2	1,68	31,5	74,6	87,4	8,3	12,6	1,12

Отриманий у ході комплексних лабораторних і дослідно-промислових

досліджень експериментальний матеріал дозволяє сформулювати низку узагальнених науково обґрунтованих висновків, які відображають закономірності впливу введення композиційних добавок на основі замасленої прокатної окалини та торфу на формування фізико-механічних і структурних характеристик коксу.

По-перше, встановлено, що інтеграція до складу вугільної шихти суміші окалини й торфу в кількості до 3 мас.% від загальної маси шихти зумовлює помірну деградацію міцнісних показників коксу, яка кількісно проявляється у зменшенні показника М25 у межах 0,5–2,5% та показника М10 — у діапазоні 2,0–4,0%. Разом із тим експериментально підтверджено, що зростання питомої частки торф'яної складової у композиційній добавці сприяє частковій компенсації негативного ефекту, що може бути пояснено формуванням більш розвиненої пористо-каркасної структури коксу за рахунок термохімічної трансформації органічної речовини торфу.

По-друге, показано, що найбільш сприятливе поєднання показників міцності коксу, які практично відповідають рівню базового (контрольного) варіанту, досягається за умови введення суміші окалини та торфу в кількості близько 0,75 мас.% від маси вугільної шихти. Зазначене значення може бути розглянуте як раціональний технологічний компроміс між масштабами утилізації техногенного залізовмісного відходу та збереженням стабільних експлуатаційних характеристик коксу.

По-третє, доведено, що введення прокатної окалини у вугільну шихту супроводжується формальним зростанням показника зольності коксу, яке, однак, має принципово іншу фізико-хімічну природу порівняно з традиційним підвищенням мінеральної складової палива. Фактично має місце збільшення частки неорганічної фази, представленої металевим залізом, вплив якого на

доменний процес істотно відрізняється від впливу зольних компонентів. Водночас застосовуваний стандартний метод визначення зольності шляхом озолення навішування не дозволяє диференціювати оксид заліза, що утворюється в результаті окиснення металевого заліза, від оксидів заліза мінеральної частини вугілля, що зумовлює певну умовність інтерпретації цього показника.

З урахуванням позитивних результатів напівпромислових ящикових коксувань було реалізовано програму дослідно-промислових випробувань технології утилізації замасленої прокатної окалини в умовах коксохімічного виробництва ВАТ «Криворіжсталь». Відповідно до спеціально розробленої технологічної інструкції формування композиційної добавки здійснювалося механізованим способом із застосуванням грейферного крана на майданчику, розташованому поблизу горизонтального відстійника, при цьому масове співвідношення компонентів підтримувалося на рівні 2:1 (окалина : торф).

Експериментально встановлено, що за умови витримки суміші протягом не менше 24 годин у поєднанні з чотири–п’ятикратним механічним

перемішуванням відбувається стабілізація її фізико-механічних характеристик: насипна густина сформованого матеріалу досягає значень 960–1086 кг/м³, що є співставним із параметрами вихідної вугільної шихти, тоді як кут природного укосу зменшується до 41–45°, що свідчить про формування задовільної сипучості та можливість надійного промислового дозування.

Підготовлену суміш транспортували залізничними вагонами, в які з метою запобігання адгезійному налипанню матеріалу до днища попередньо завантажували 15–20 т вугільної шихти, після чого вагони подавали до цеху вуглепідготовки, де поверх суміші додатково завантажували ще 10–25 т вугілля. Розвантаження здійснювали у порожні бункери вагоноперекидача з подальшим транспортуванням матеріалу до спеціально підготовленого силосу закритого складу, в якому вже знаходилося не менше 300 т вугільного концентрату. Надалі суміш концентрату з окалиною дозовано подавали на вугільну башту.

У межах дослідної кампанії з використанням модифікованих шихт було вироблено 91 253 т коксу, який використано при виплавці чавуну в доменному

цеху № 2. Аналіз експлуатаційних показників свідчить, що зольність дослідних шихт зростає в середньому на 1,67%, що в межах експериментальної похибки корелює зі збільшенням вмісту оксидів заліза. У гранулометричному складі готового коксу відзначено зменшення частки некондиційного для доменної плавки класу +80 мм приблизно на 1% та одночасне зростання на 2,3% вмісту фракції 60–40 мм, яка є найбільш сприятливою з точки зору газодинамічних і тепломасообмінних умов доменного процесу. Міцнісні характеристики коксу змінюються незначно: показник М25 зменшується на 0,73%, тоді як М10 зростає на 0,23%. Зольність готового коксу підвищується в середньому на 1,46%, що зумовлено збільшенням вмісту металевого заліза до приблизно 1,1%.

Використання отриманого коксу в доменній плавці не супроводжувалося негативними змінами теплового, газодинамічного або шлакоутворювального режимів. Реалізація запропонованої технології в умовах коксохімічного виробництва ВАТ «Криворіжсталь» забезпечує можливість утилізації до 25 тис. т замасленої прокатної окалини на рік; технічне рішення захищене патентом України [50].

Поряд із загалом позитивними результатами дослідно-промислових випробувань ідентифіковано низку проблемних аспектів, що потребують додаткового технологічного опрацювання, зокрема: адгезійне налипання суміші на стінки конічної частини силосів, негативний вплив залишкових масел на міцність залізобетонних конструкцій при тривалому зберіганні, а також потенційну хімічну взаємодію підвищених концентрацій оксидів заліза з динасовою футеровкою. Дослідження показали, що часткове нівелювання зазначених ускладнень можливе шляхом збільшення частки торфу в композиції. Водночас у сучасних сировинних умовах масштаби утилізації окалини при

коксуванні залишаються обмеженими дефіцитом жирних вугілля у шихті, що ускладнює формування оптимального марочного складу, необхідного для стабільного отримання коксу високої якості.

2.3. Утилізація замасленої прокатної окалини методом низькотемпературного крекінгу

Одним із перспективних напрямів підготовки замасленої прокатної окалини до подальшого використання в агломераційному виробництві є її термохімічна обробка, зокрема шляхом низькотемпературного крекінгу органічної складової в умовах контрольованого теплового впливу. На відміну від традиційних схем термообезжирення, що передбачають спалювання органічних компонентів із безповоротною втратою їхньої потенційної енергетичної цінності, запропонований у даній роботі підхід ґрунтується на поєднанні процесів деструкції вуглеводневих ланцюгів масел з утилізацією продуктів їх

термічного розкладання.

У межах розробленої технологічної концепції замаслена прокатна окалина піддається обробці в обертовій печі при температурах, нижчих за інтервал інтенсивного окиснення залізовмісної фази, із використанням теплоти, що виділяється внаслідок крекінгу та часткового окиснення органічної складової. Така схема забезпечує, з одного боку, ефективне видалення водомасляної суспензії з поверхні та порового простору частинок окалини, а з іншого — формування газоподібних і рідких продуктів, які можуть бути залучені до подальшого енергетичного або технологічного використання.

Експериментальні дослідження процесу низькотемпературного крекінгу замасленої прокатної окалини були виконані в умовах центральної лабораторії коксохімічного виробництва ВАТ «Криворіжсталь». У ході дослідів аналізували склад газоподібних продуктів термічного розкладання масел, а також оцінювали їхню енергетичну цінність. Результати газохроматографічного аналізу, наведені

в табл. 2.4, свідчать про формування газової суміші з істотною часткою горючих компонентів, зокрема водню, оксиду вуглецю та низькомолекулярних вуглеводнів.

Розрахунок питомої теплоти згоряння отриманого газу показав, що її значення є достатньо високим і порівнюваним із характеристиками традиційних вторинних палив коксохімічного виробництва (для зіставлення: теплота згоряння коксового газу становить близько 17 000 кДж/м³). Це дозволяє розглядати газ, утворений у процесі низькотемпературного крекінгу, не лише як побічний продукт, а як повноцінний енергоносій, придатний для використання в технологічних печах або системах підігріву.

Таким чином, застосування методу низькотемпературного крекінгу замасленої прокатної окалини створює передумови для комплексної утилізації даного техногенного відходу, що поєднує очищення залізовмісного матеріалу,

зниження екологічного навантаження на довкілля та повернення енергетичного потенціалу органічної складової у виробничий цикл. Отримані результати свідчать про доцільність подальшого розвитку та промислової адаптації цього підходу як складової інтегрованої системи переробки замаслених металургійних відходів.

Таблиця 2.4

Характеристика крекінг-газу

Хімічний склад, %					$Q_н^р$, кДж/м^3
CO_2	C_nH_m	CO	H_2	CH_4	
13,4	4,7	4,2	62,5	15,2	14724

Результати комплексного дослідження фізико-хімічних і реологічних параметрів зразка масла, одержаного внаслідок реалізації процесу низькотемпературного крекінгу органічної складової замасленої прокатної окалини, узагальнено та наведено в табл. 2.5. Аналіз в'язкісних характеристик отриманого продукту свідчить про його відповідність інтервалу значень, регламентованих для

індустріальних масел класу І-8, що підтверджує можливість його функціонального використання в технологічних системах загальнопромислового призначення.

Водночас виявлені відмінності за температурою спалаху порівняно з нормативними показниками вихідних мастильних матеріалів зумовлені глибинною перебудовою вуглеводневої матриці внаслідок перебігу крекінгових реакцій, які супроводжуються утворенням більш летких фракцій.

Зростання кислотного числа, у свою чергу, є наслідком протікання окиснювальних процесів, що відбуваються в умовах термічного впливу та контакту з кисневмісним середовищем, і відображає зміну хімічної природи полярних компонентів масла.

Таблиця 2.5

Порівняння характеристик олії, отриманого крекінгом, та індустріального

Показники	Метод випробування (ГОСТ)	Випробуване масло	І-8
Кінематична вязкість при 40°С, мм^2/с	33-82	10,72	9-11
Кислотне число, мг КОН на 1 г (не більше)	5985-79	0,38	0,02
Температура спалаху в відкритому тиглі, °С	4333-87	80	150
Температура застигання, °С	20287-74	-10	-15
Зольність, % (не більше)	1461-75	0,004	0,005
Масова доля сірки, % (не більше)	1437-75	0,64	1,0

Отриманий експериментальний масив даних переконливо засвідчує, що газова фаза, яка формується в результаті реалізації процесів низькотемпературного крекінгу замасленої прокатної окалини, характеризується достатньо високими паливно-енергетичними показниками, що дозволяє розглядати її як повноцінний вторинний енергетичний ресурс, придатний для використання безпосередньо в межах технологічної схеми. Паралельно з цим інший продукт термохімічної

трансформації — рідка вуглеводнева фракція (олія) — за сукупністю реологічних, фізико-хімічних і експлуатаційних характеристик відповідає вимогам, що висуваються до мастильних матеріалів, застосовуваних у прокатному виробництві, що обґрунтовує можливість її замкненого внутрішнього рециклінгу.

Принципова технологічна схема переробки замасленої прокатної окалини наведена на рис. 2.2. Вихідний матеріал, що акумулюється в дренажних відсіках горизонтальних відстійників прокатного виробництва, за допомогою грейферного крана (поз. 1) подається на захисний гуркіт (поз. 2), призначений для вилучення крупногабаритного металевого скрапу та сторонніх механічних домішок. Після стадії попереднього очищення окалина надходить до накопичувального відсіку (поз. 3), оснащеного системою теплообмінних змійовиків (на схемі умовно не показано), в яких здійснюється її підігрів за рахунок використання оборотного водяного конденсату та топкових газів.

Підігрітий замаслений матеріал далі транспортується грейферним краном або, залежно від обраного варіанту компонування обладнання, через стрічковий транспортер (поз. 4) безпосередньо до апарата низькотемпературного крекінгу (поз. 5). У межах цього апарата реалізується комплекс фізико-хімічних процесів, що включає випаровування вологи, термічне розщеплення та деструкцію вуглеводневих компонентів мастильних матеріалів, а також їх фазове відокремлення від твердої залізовмісної матриці. Очищена від води та масел гаряча окалина за допомогою шнекового механізму (поз. 5.1) вивантажується до

накопичувального відсіку (поз. 6), обладнаного системою охолоджувальних змійовиків, у яких тепло відводиться холодним повітрям та частково крекінг-газом. Після охолодження матеріал грейферним краном завантажується у залізничні вагони та спрямовується споживачеві як вторинна залізовмісна сировина.

Парогазова суміш, що формується в робочій зоні апарата низькотемпературного крекінгу (поз. 5), під дією розрідження, створюваного газодувкою (поз. 12), транспортується до теплообмінника (поз. 7), де в результаті інтенсивного теплообміну з оборотною водою, що циркулює за допомогою насоса (поз. 11), відбувається конденсація водяної та масляної пари. Сформована водомасляна емульсія разом із неконденсованим крекінг-газом надходить у

сепаратор (поз. 8), в якому здійснюється глибоке очищення газової фази та розділення емульсії на рафіновану олію й водяний конденсат. Очищений крекінг-газ у суміші з повітрям повторно подається до топкового відділення апарата (поз. 5), попередньо проходячи стадію підігріву в накопичувальному відсіку (поз. 6), що забезпечує підвищення загальної енергоефективності процесу.

Рафінована олія періодично відводиться до накопичувальної ємності (поз. 9), звідки повертається в прокатне виробництво як вторинний мастильний матеріал. Водяний конденсат відводиться до ємності (поз. 10) і далі спрямовується в систему оборотного водопостачання комбінату. Топкові гази, що утворюються в апараті, після проходження теплообмінної системи підігріву вихідної замасленої окалини відводяться в атмосферу з дотриманням встановлених екологічних нормативів.

Безпосередня реалізація процесу низькотемпературного крекінгу здійснюється в апараті, конструктивна схема якого наведена на рис. 2.3. Попередньо підігріту замаслену прокатну окалину завантажують у бункер-живильник (поз. 2), звідки матеріал за допомогою вертикального завантажувального шнека (поз. 1.1), змонтованого на центральному валу (поз. 1),

надходить до вузла зневоднення та знемаслення (поз. 4). У межах цього вузла окалина під дією перемішувальних і транспортуючих лопаток (поз. 1.2) поступово переміщується вниз по горизонтальних просічних полицях (поз. 4.1), одночасно зазнаючи інтенсивного теплового впливу. У процесі нагрівання відбувається послідовне випаровування вологи, термічна деструкція вуглеводнів і формування газоподібних продуктів крекінгу. Зневоднена та знемаслена окалина акумулюється в

розвантажувальному конусі (поз. 4.2), звідки через вузол вивантаження (поз. 5), оснащений горизонтальним шнеком (поз. 5.1), виводиться з робочої зони апарата.

Газоподібна суміш, що складається з пари води, пари масел і крекінг-газу, під дією розрідження через пристрій відводу парогазової суміші (поз. 9) залишає робочу камеру апарата. Нагрів робочої зони забезпечується спалюванням у топковому відділенні (поз. 3) крекінг-газу з можливим додаванням рідкого палива, при цьому повітря для горіння подається через пристрій (поз. 7). Топкові гази, що утворюються, через пристрій відводу (поз. 10) виводяться з апарата під тиском, створюваним системою нагнітання.

Реалізація запропонованого способу переробки замасленої прокатної окалини може бути проілюстрована наступним прикладом: вихідна окалина з витратою 5950 кг/год, що містить 8,4% масел і характеризується вологістю 16,0%, попередньо піддається стадії зневоднення в дренажних відсіках, після чого спрямовується на подальшу термохімічну обробку за описаною технологічною схемою.

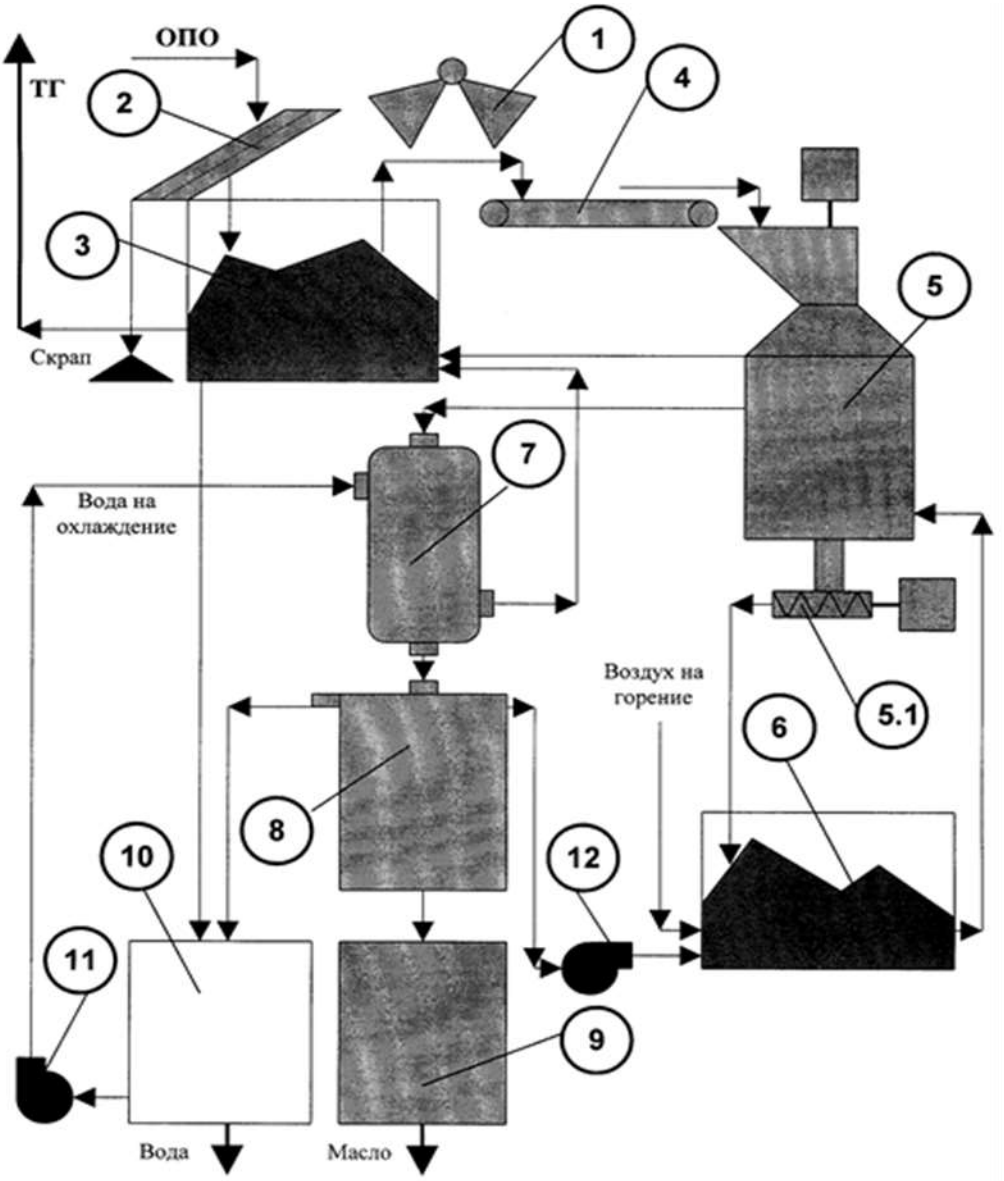


Рис.2.1. Схема ланцюга апаратів для переробки замасленої прокатної окалини: 1 - грейферний кран; 2 - захисний гуркіт, 3 - накопичувальний відсік для вихідної замасленої прокатної окалини; 4 - транспортер; 5 - апарат низькотемпературного крекінгу, 5.1 - вузол шнекової вивантаження нагрітої очищеної прокатної окалини, 6 - накопичувальний відсік для очищеної окалини; 7 - холодильник; 8 - сепаратор; 9 - накопичувальна ємкість для олії; 10 - накопичувальна ємкість для водяного конденсату; 11 - рециркуляционний насос; 12 - газодувки; ЗПО-замаслених прокатна окалина; ТГ - топкові гази.

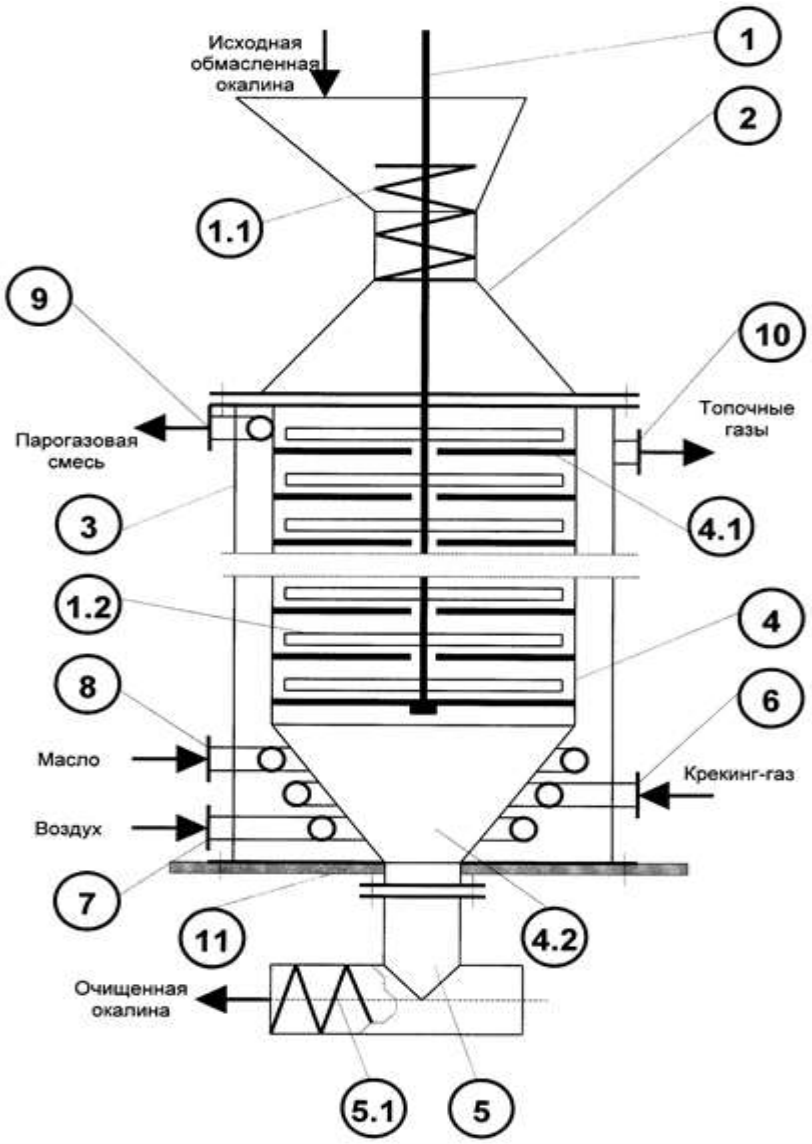


Рис.2.2. Схема апарату низькотемпературного крекінгу замасленої прокатної окалини: 1 - центральний вал з вертикальним завантажувальним шнеком 1.1 і переміщають лопатками 1.2; 2 - бункер-живильник, 3 - топковий відділення; 4 - вузол зневоднення і знеоливнення, забезпечений горизонтальними просічно полками 4.1 і розвантажувальним конусом 4.2; 5 - вузол вивантаження матеріалу з горизонтальним розвантажувальним шнеком 5.1; 6 - пристрій подачі крекінг-газу; 7 - пристрій подачі повітря; 8 - пристрій подачі масла; 9 - пристрій відведення парогазової суміші; 10 - пристрій відводу топкових газів.

1) частково зневоднена замаслена прокатна окалина у кількості 5000 кг / годину з вмістом масел 9,0% і вологістю 12,0%;

2) замаслених сильнообводненна суспензія в кількості 950 кг / годину з вмістом масел 5,3% і вологістю 36,8%.

Сильно замаслена та високодисперсна водонасичена суспензія, що формується в результаті попередніх операцій механічної та гідравлічної обробки прокатної окалини, за рахунок гравітаційних сил у режимі самопливу інтегрується в замкнений технологічний контур, тоді як тверда фаза, яка зазнала часткового зневоднення та характеризується зниженою масовою часткою рідкої фази, спрямовується на наступний етап комплексної термохімічної підготовки. Процес завантаження матеріалу в бункер-живильник, що реалізується із застосуванням грейферного підйомно-транспортного обладнання, являє собою багатостадійну операцію, структурно організовану таким чином, щоб забезпечити селективне видалення небажаних металевих включень, стабілізацію гранулометричного складу та формування рівномірного потоку підготовленої замасленої прокатної окалини.

Захисне грохочення, яке передує стадії акумулювання матеріалу, виконує функцію бар'єрного розділення та запобігає надходженню скрапу й крупних металевих фрагментів у подальші ланки технологічного ланцюга. Вилучений скрап періодично евакуюється з робочої поверхні грохоту, тоді як очищена від сторонніх домішок замаслена прокатна окалина транспортується в накопичувальний відсік, де реалізується стадія її попередньої термічної кондиціоналізації. У межах цього відсіку здійснюється тепловий вплив на матеріал за рахунок використання вторинних енергетичних ресурсів, зокрема зворотної циркуляційної води та низькопотенційних топкових газів, що дозволяє зменшити сумарні енерговитрати процесу та підвищити його термодинамічну ефективність. Після досягнення заданого температурного стану матеріал за допомогою грейферного крана подається на стрічковий транспортер, який забезпечує його безперервне надходження до вузла низькотемпературного крекінгу.

Низькотемпературний крекінг замасленої прокатної окалини виступає визначальним елементом запропонованої технології та являє собою складний фізико-хімічний процес, у межах якого відбувається термічний розклад

високомолекулярних вуглеводневих сполук у поєднанні з інтенсивним масо- та теплообміном між твердою, рідкою та газовою фазами. Даний процес структурно включає три взаємопов'язані стадії: безпосередньо крекінг нафтопродуктів із одночасним зневодненням і знемасленням твердої фази; контрольоване механізоване вивантаження очищеної окалини; а також конденсацію парів вуглеводнів і водяної пари, що утворюються в реакційному об'ємі апарата.

У результаті реалізації процесу низькотемпературного крекінгу формуються два основні матеріальні потоки, які істотно відрізняються за фазовим складом і енергетичними характеристиками. Перший потік представлений очищеною твердою фазою — прокатною окалиною, практично вільною від органічних забруднень і вологи, з масовою витратою близько 3950 кг/год, яка виводиться з апарата при температурі порядку 360 °C. Другий потік являє собою складну двофазну систему, що включає водомасляну емульсію та крекінг-газ, сумарною витратою близько 1050 кг/год при температурі, близькій до температури навколишнього середовища.

Вивантаження очищеної окалини здійснюється за допомогою шнекового транспортного пристрою, після чого матеріал акумулюється в спеціалізованому відсіку, де відбувається його контрольоване охолодження потоком атмосферного повітря. Повітря нагнітається газодувкою в кількості 9157 м³/год при початковій температурі 27 °C та, проходячи через шар нагрітої окалини, інтенсифікує процес тепловідведення. Охолоджений продукт надалі використовується як цінна залізовмісна складова в агломераційному виробництві.

Газова фаза, насичена парами масел, водяною парою та низькомолекулярними продуктами крекінгу, виводиться з апарата шляхом вакуумування і спрямовується на стадію конденсації. У процесі фазового переходу відбувається утворення двох самостійних потоків: суміші очищеної олії та водяного конденсату загальною масовою витратою 1040 кг/год і крекінг-газу з об'ємною витратою 224 м³/год. Подальше розділення водомасляної

емульсії здійснюється методом вакуумного відстоювання, у результаті чого формується рафінована олія (440 кг/год), водяний конденсат (600 кг/год) та стабілізований потік крекінг-газу.

Водяний конденсат періодично відводиться в накопичувальні ємності та залучається до внутрішньозаводського водообігу, тоді як крекінг-газ використовується як паливний компонент і нагнітається в топкове відділення апарата. Рафінована олія акумулюється в стандартній ємності, з якої її частина спрямовується на підтримання теплового режиму процесу низькотемпературного крекінгу, а основний обсяг повертається у прокатне виробництво для повторного технологічного використання.

Теплова підготовка вихідної замасленої прокатної окалини забезпечується комбінованим використанням топкових газів із витратою 13 430 м³/год при температурі близько 127 °C та гарячої води з операції конденсації водомасляної емульсії у кількості 63 м³/год при температурі 87 °C. Така схема дозволяє реалізувати принципи енергетичної інтеграції та мінімізувати зовнішні теплові витрати.

Запропонований технологічний підхід захищений патентом України [65], а розроблене технологічне завдання на проектування дослідно-промислової установки стало основою для створення експериментального зразка агрегату низькотемпературного крекінгу. Водночас впровадження цієї технології пов’язане з необхідністю значних капітальних інвестицій, що в сучасних економічних умовах обмежує масштаби її промислового застосування.

Узагальнений висновок.

Таким чином, накопичення замасленої прокатної окалини в металургійному виробництві формує комплексну екологічно-економічну проблему, вирішення якої можливе шляхом інтеграції термохімічних методів підготовки вторинної сировини.

Низькотемпературний крекінг розглядається як технологічно обґрунтований інструмент глибокої трансформації властивостей окалини з одночасним вилученням енергетично цінних продуктів, однак його промислова реалізація потребує оптимізації з позицій капітало- та ресурсоефективності.

РОЗДІЛ 3

3. Розроблення та наукове обґрунтування технологічних рішень з підготовки замасленої прокатної окалини для інтеграції до складу агломераційної шихти.

З урахуванням системного характеру проблеми утилізації прокатної окалини, яка в умовах сучасних металургійних підприємств характеризується як високими темпами накопичення, так і значними абсолютними обсягами утворення, а також зважаючи на об’єктивно обмежені інвестиційні можливості більшості виробників, особливої науково-практичної актуальності набувають технологічні концепції підготовки окалини, реалізація яких не передбачає створення спеціалізованих апаратурно-технологічних комплексів, глибокої реконструкції існуючих виробничих схем або залучення значних капіталовкладень. У цьому контексті першочерговий інтерес становлять підходи, засновані на використанні функціональних добавок, здатних цілеспрямовано модифікувати фізико-механічні, реологічні та гранулометричні характеристики окалини, водночас оптимізуючи її технологічну роль як складової агломераційної шихти.

У Розділі 1 було систематизовано та проаналізовано низку відомих способів підготовки прокатної окалини, спрямованих на поліпшення таких критично важливих технологічних параметрів, як сипкість, транспортабельність, стабільність поведінки при дозуванні та здатність до рівномірного розподілу в об’ємі агломераційної суміші. У ряді випадків зазначені технологічні рішення також сприяють інтенсифікації процесів грудкування аглосуміші, а також підвищенню ступеня повноти згоряння органічних домішок, насамперед нафтопродуктів, що входять до складу замасленої окалини.

Водночас, як було встановлено на підставі узагальнення літературних та експериментальних даних, спектр застосовуваних добавок у більшості реалізованих схем обмежується сухими мінеральними компонентами, такими як вапняний або доломітовий пил, залізорудні концентрати та подібні матеріали. Функціональна дія таких добавок зводиться, головним чином, до зв'язування вільної вологи з утворенням гідратованих фаз, що призводить до трансформації консистенційних характеристик водомасляної суспензії, якою фактично представлена рідка фаза окалини, та, відповідно, до зміни її поведінки на стадіях транспортування, змішування і грануляції.

Разом із тим результати попередніх промислових випробувань, виконаних за нашої безпосередньої участі на ВАТ «Криворіжсталь» [52], переконливо засвідчили, що використання сухих мінеральних добавок, зокрема вапняного пилу, супроводжується інтенсивним пиловиділенням, яке в умовах діючих схем підготовки агломераційної шихти на рудному дворі практично не піддається ефективній локалізації та нейтралізації. Додатково встановлено, що гідрат оксиду кальцію, який утворюється в результаті взаємодії вапна з вологою окалини, характеризується підвищеною схильністю до агрегації та формування укрупнених конгломератів, що зумовлює його нерівномірний розподіл у спікальній масі. Така неоднорідність створює передумови для виникнення локальних зон хімічної та фазової нерівноважності, що негативно позначається на мікроструктурній однорідності та експлуатаційних характеристиках готового агломерату.

У зв'язку з викладеним особливої актуальності набуває пошук альтернативних типів добавок, здатних забезпечити керовану модифікацію властивостей замасленої та високообводненої прокатної окалини без супутніх негативних ефектів, притаманних традиційним сухим мінеральним матеріалам. У попередніх дослідженнях, виконаних за нашої участі [51–53], з метою регулювання реологічних і технологічних характеристик високообводнених залізовмісних аглодоменних шламів, що утилізуються в складі агломераційної

шихти, було успішно застосовано торф, активований сульфатно-спиртовою бардою відповідно до способу [49]. Отримані позитивні результати промислової апробації цієї технології стали науково обґрунтованою підставою для подальшого дослідження можливості використання активованого торфу як функціональної добавки, здатної забезпечити комплексне поліпшення технологічних характеристик прокатної окалини та, як наслідок, підвищити ефективність її утилізації в агломераційному виробництві без істотного зростання капітальних витрат.

Торф, який за своїм генезисом і ступенем вуглефікації належить до твердих палив початкової стадії метаморфічних перетворень органічної речовини, принципово відрізняється від більш глибоко метаморфізованого кам'яного вугілля як за морфоструктурними характеристиками, так і за фазово-компонентним складом органічної матриці. На відміну від вугілля, у складі торфу домінують гідрофільні органічні сполуки, представлені переважно гуміновими кислотами, гумінами та геміцелюлозними фрагментами, тоді як гідрофобна фракція, до якої належать бітуми, смолисті речовини та жирні кислоти, характерна для вуглецевих палив більш високого ступеня метаморфізму, у торфі присутня у незначних кількісних співвідношеннях. Додатково до продуктів трансформації рослинної біомаси у торф'яній масі зберігається значна частка морфологічно ідентифікованих рослинних решток, які формують просторово розвинений пористий каркас матеріалу, що визначає його структурно-функціональні властивості [54].

Зазначені особливості будови та хімічної організації торфу зумовлюють його надзвичайно високу вологоємність і здатність до тривалого утримання води у капілярно-пористій системі. Згідно з даними [55], граничне водопоглинання низинних торфів, що є найбільш типовими для родовищ Західної України, може досягати 837%, тоді як у переважній більшості випадків цей показник перебуває в інтервалі 210–280%.

Поєднання високої вологоємності з розвиненою пористою структурою зумовлює ефективність використання торфу як функціональної добавки при підготовці вологих залізовмісних металургійних шламів газоочисних систем. Водночас, як свідчить аналіз літературних джерел, технологічна доцільність застосування торфу не обмежується лише його здатністю до акумулювання вологи. Зокрема, встановлено [56], що торф завдяки значній питомій поверхні, а також наявності у його структурі консорціумів вуглеводнеокиснювальних мікроорганізмів, здатний виконувати функцію ефективного сорбенту нафтових компонентів із одночасною їх біохімічною деструкцією, що обґрунтовує можливість його використання у технологіях рекультивації нафтово забруднених ґрунтів.

Беручи до уваги той факт, що металургійна окалина містить залишки мінеральних масел нафтового походження, які зазнали часткового окиснення внаслідок контакту з гарячим прокатом, вищезазначені властивості торфу дозволяють розглядати його як перспективний матеріал для обробки замасленої окалини. Встановлено, що сорбційна ємність торфу щодо нафти істотно залежить від ступеня його розкладання і для верхових торфів становить 8–10 м нафти на 1 г сухої речовини, тоді як для низинних торфів цей показник знижується до 3–6 м/г. Окиснювальна активність торфу перевищує аналогічні характеристики ґрунтів у 4–5 разів, при цьому фізико-хімічна активація торф’яної маси сприяє зростанню чисельності вуглеводнеокиснювальних мікроорганізмів у 20–100 разів, досягаючи в середньому 5–10 клітин на 1 г сухої речовини. За умови контакту протягом 90 діб ступінь деструкції нафтових вуглеводнів може досягати 55% [56].

У подальшому наведено результати експериментальних досліджень, спрямованих на комплексну оцінку впливу торф’яної добавки на фізико-хімічні властивості замасленої окалини, що визначають її поведінку в умовах термічного впливу, а також на аналіз впливу окалини, обробленої торфом, на формування агломераційної шихти, кінетику процесу спікання та експлуатаційні

характеристики отриманого агломерату.

3.1. Експериментальна оцінка впливу торф’яної обробки замасленої окалини на особливості її термічної поведінки

У межах експериментальних досліджень як об’єкт аналізу було використано металургійну окалину, відібрану з вторинних відстійників прокатного виробництва ВАТ «Криворіжсталь», яка характеризується підвищеним вмістом органічних домішок нафтового походження. Як модифікуючу добавку застосовували торф, попередньо підданий фізико-хімічній активації відповідно до методики, описаної у [49], що забезпечує підвищення його реакційної та сорбційної здатності.

Фізико-хімічні та гранулометричні характеристики вихідної окалини наведено у табл. 3.1, тоді як параметри використаного активованого торфу узагальнено у табл. 3.2 і 3.3. Кількісний аналіз складу досліджуваної окалини показав, що масова частка мінеральних олій у її складі становила 11,4%, а вміст вологи досягав 5,56%, що суттєво впливає на характер тепломасообмінних процесів та перебіг фізико-хімічних перетворень при нагріванні матеріалу.

Таблиця 3.1

Хімічний склад окалини, %

$Fe_{общ}$	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	$S_{общ}$	P	Zn	Pb	Cu	Na_2O	K_2O	п.п.п.
68,36	52,53	39,29	1,78	0,58	0,25	0,27	0,8	0,01	0,02	-	-	0,01	0,21	0,08	4,19

Таблиця 3.2

Фізико-хімічна характеристика торфа

Технічний аналіз, %				Q^r, МДж/кг	Сухий безсольний склад						
					Елементний склад (daf), %					$Q_б^{daf}$, МДж/кг	$Q_і^{daf}$, МДж/кг
W^r	A^d	S_t^d	V^{daf}		S	C	H	N	O		
14,7	16,0	0,3	69,0	8,92	0,4	58,8	6,1	1,3	33,4	24,16	22,69

Таблиця 3.3

Хімічний склад золи торфа, %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O+Na_2O
5,3	5,5	22,3	58,2	7,2	1,5

На початковому етапі експериментальних досліджень здійснювали визначення ключових термохімічних характеристик, а саме температури спалаху ($t_{(всп)}$) та температури займання ($t_{(воспл)}$) мінеральних масел, що містяться у складі металургійної окалини, оскільки саме ці параметри в сукупності визначають специфіку перебігу процесів термічного розкладання та згоряння органічної складової в умовах агломераційного процесу.

Для реалізації поставленого завдання готували модельні суміші окалини з активованим торфом у масовому співвідношенні 80:20, які одержували шляхом інтенсивного механічного перемішування компонентів із подальшою витримкою сумішей протягом 60 діб. Упродовж зазначеного періоду з інтервалом у 10 діб здійснювали контрольні вимірювання значень $t_{(всп)}$ і $t_{(воспл)}$, що дозволяло простежити динаміку змін пожежонебезпечних характеристик у часі.

Визначення температур спалаху та займання проводили відповідно до методу Бренка у відкритому тиглі згідно з вимогами ГОСТ 4337–87 «Нафтопродукти. Методи визначення температур спалаху і займання у відкритому тиглі». Досліджуваний матеріал — вихідну окалину або окалино-торф’яну композицію — завантажували у фарфоровий тигель до рівня, розташованого на 12 мм нижче

його верхнього краю. Ртутний термометр розміщували безпосередньо у товщі матеріалу на глибині 6 мм від дна тигля в точці, що відповідала половині його радіуса, забезпечуючи таким чином репрезентативність температурного контролю.

Режим нагрівання на початковій стадії експерименту задавали зі швидкістю 15 °C/хв; при досягненні температури, що на 56 °C була нижчою за попередньо встановлене орієнтовне значення температури спалаху, інтенсивність теплопідведення поступово знижували таким чином, щоб за 28 °C до очікуваного моменту спалаху швидкість нагрівання становила не більше 5 °C/хв. Випробування на спалах ініціювали при температурі, нижчій на 28 °C від орієнтовної $t_{(всп)}$, повторюючи їх через кожні 2 °C. Перед кожним випробуванням досліджуваний матеріал ретельно перемішували скляною паличкою для вирівнювання температурного поля. Контрольне полум’я газового пальника проводили над поверхнею матеріалу від однієї стінки тигля до іншої. За температуру спалаху приймали значення, зафіксоване термометром у момент появи короткочасного полум’я над частиною або всією поверхнею зразка.

Перед початком кожної серії експериментів здійснювали попереднє визначення орієнтовної температури спалаху шляхом рівномірного нагрівання зразка зі швидкістю 6 °C/хв, що дозволяло коректно задати подальший температурний режим досліджень. Відповідно до положень ГОСТ 4337–87, визначення температури займання виконували безпосередньо після фіксації температури спалаху на тому самому зразку.

Після реєстрації спалаху нагрівання матеріалу продовжували зі швидкістю 5 °С/хв, здійснюючи випробування з інтервалом у 2 °С. За температуру займання приймали значення, при якому пари, що утворювалися над поверхнею досліджуваного матеріалу, запалювалися від полум'я газового пальника та підтримували стале горіння протягом не менше 5 с після його усунення.Усі експериментальні визначення виконували у трикратній повторюваності; за результатами паралельних вимірювань розраховували середні арифметичні значення досліджуваних параметрів.

Узагальнені результати експериментів наведено у табл. 3.4

Таблиця 3.4

Значення $t_{всп}$ і $t_{воспл}$ досліджуваного матеріалу

Матеріал	Час вилежиння, доба	$t_{всп}$, °С	$t_{воспл}$, °С
Окалина замасленная	0	277	299
Сумішь окалини з торфом в співвідношенні 80:20 по масі	0	266	283
	10	253	275
	20	237	266
	30	230	254
	40	223	247
	50	224	249
	60	224	245

Отриманий масив експериментальних даних дозволяє дійти обґрунтованого висновку про те, що введення торф'яної компоненти до складу замасленої металургійної окалини призводить до істотної трансформації її термопожежних характеристик, що кількісно фіксується у вигляді зниження температури спалаху ($t_{всп}$) та температури займання ($t_{воспл}$) вже на стадії первинного формування композиційного матеріалу. Зокрема, встановлено, що безпосереднє змішування окалини з активованим торфом супроводжується

зменшенням $t_{(всп)}$ на 11 °С та $t_{(воспл)}$ на 16 °С, що свідчить про зміну умов формування та займання парової фази органічних компонентів при нагріванні.

Подальше вилежування окалино-торф'яної суміші характеризується чітко вираженою тенденцією до додаткового зниження зазначених температурних параметрів, що вказує на пролонгований характер фізико-хімічних і біохімічних перетворень органічної складової. Так, після 40 діб витримки зафіксовано зменшення температури спалаху на 43 °С і температури займання на 36 °С відносно вихідної суміші, що у перерахунку на початкову, необроблену окалину

відповідає зниженню на 54 °С та 52 °С відповідно. Така динаміка змін свідчить про глибоку модифікацію властивостей мінеральних масел нафтового походження, що входять до складу окалини.

Спалах і подальше займання у даному випадку доцільно розглядати не як самостійні явища, а як інтегральні макроскопічні індикатори перебігу комплексу мікроскопічних процесів, пов'язаних з виділенням, накопиченням і запалюванням парів органічних компонентів у приповерхневому шарі матеріалу під час нагрівання. При цьому вирішальний вплив на значення $t_{(всп)}$ і $t_{(воспл)}$ чинить не лише інтенсивність масопереносу, але й хімічна природа парової фази, зокрема молекулярна маса, ступінь насиченості та реакційна здатність вуглеводневих фрагментів.

Для нафтових вуглеводнів зниження температур спалаху і займання зазвичай корелює з перебігом процесів деструкції довголанцюгових молекул, у результаті яких утворюються більш леткі та хімічно активні низькомолекулярні сполуки, схильні до займання за менш жорстких температурних умов. З огляду на відомі з літератури дані щодо здатності торфу до окиснювально-деструктивної трансформації нафтових вуглеводнів [56], є підстави вважати, що саме реалізація цього механізму визначає зафіксоване зниження значень $t_{(всп)}$ і $t_{(воспл)}$ у досліджуваних композиційних системах.

Хоча ідентифікація детального молекулярного складу органічних компонентів масел, присутніх в окалині до та після торф’яної обробки, не входила до кола завдань даного дослідження, аналіз можливих механізмів взаємодії дозволяє висунути низку обґрунтованих припущень. Поряд із біохімічною активністю вуглеводнеокиснювальних мікроорганізмів, описаною у [56], суттєву роль у процесах деструкції можуть відігравати гумінові кислоти — структурно складні поліфункціональні сполуки, що становлять одну з основних фракцій органічної речовини торфу. Відомо, що гумінові кислоти характеризуються високим вмістом кисню (до 40 %) у складі гетероатомних функціональних груп, здатних

до протонної дисоціації з утворенням гуматів [57, с. 55], що супроводжується розривом вуглеводневих ланцюгів, зменшенням середньої молекулярної маси та зростанням реакційної здатності утворених фрагментів [58, с. 89].

З метою більш глибокого з’ясування закономірностей термічної поведінки замасленої окалини та окалино-торф’яних композицій було виконано комплекс термогравіметричних досліджень із використанням дериватографа Q1500 у температурному інтервалі до 500 °C у потоках інертного (Ar) та окислювального (повітря) газових середовищ. Нагрівання здійснювали зі сталою швидкістю 5 °C/хв. Як еталонну речовину застосовували прожарений оксид алюмінію, маса наважки в усіх експериментах становила 900 мг. Узагальнені результати експериментів наведено на рис. 3.1–3.3.

Дослідження в атмосфері аргону дозволяють оцінити характер термічних перетворень матеріалів за умов відсутності прямої взаємодії з окислювальною газовою фазою, хоча при цьому не виключається перебіг внутрішніх окисно-відновних реакцій, зумовлених взаємодією оксидів заліза окалини з вуглецевою складовою торфу або з вуглеводнями масел. Кількісна інтерпретація швидкості втрати маси (DTG) та теплових ефектів (DTA) не проводилася через обмежені функціональні можливості апаратури, у зв’язку з чим відповідні розмірності на

графічних залежностях не наведено; при цьому нижні піки на кривих DTA відповідають екзотермічним процесам, а верхні — ендотермічним ефектам.

Нагрівання вихідної окалини як у інертному, так і в окислювальному середовищі при температурах, що перевищують 50 °С, супроводжується стійкою втратою маси зразка, причому максимальна швидкість цього процесу фіксується в околі температури 130 °С, що відображається характерним максимумом на кривій DTG. Одночасна поява слабко вираженого ендотермічного ефекту на кривій DTA з високим ступенем імовірності пов'язується з випаровуванням фізично зв'язаної та капілярної вологи, присутньої у структурі матеріалу.

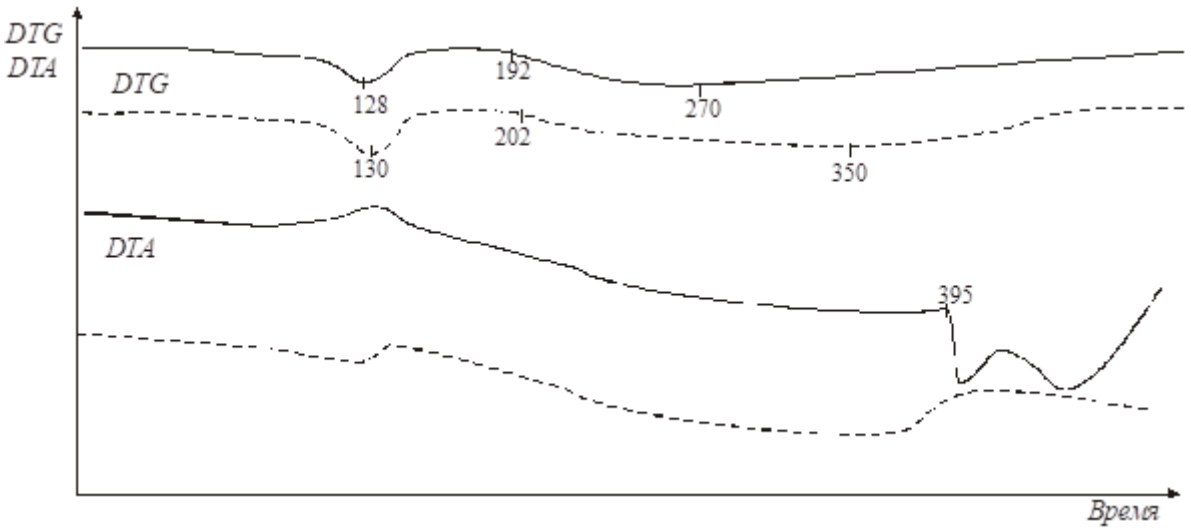


Рис.3.1. Криві термогравіметричного аналізу для окалини:
_____ - В струмі повітря; ----- - в струмі Ar (тут і далі цифри у кривих - температура)

За підвищення температури понад 192 °С у випадку окислювального газового середовища фіксується повторна інтенсифікація втрати маси зразка, зумовлена переважно випаровуванням мінеральних масел, яка досягає свого максимального прояву, що відображається у вигляді глибокого мінімуму на кривій DTG, при температурі близько 270 °С в атмосфері повітря та зміщується до області вищих температур — приблизно 350 °С — за умов інертного

середовища. Така температурна розбіжність екстремумів переконливо вказує на те, що присутність окислювальної атмосфери істотно сприяє деструктивним перетворенням вуглеводневих компонентів масел, що опосередковано підтверджується більш вираженим нахилом кривої DTA у зазначеному температурному інтервалі, а також зумовлює їх інтенсифіковане і більш раннє випаровування.

Доцільно відзначити, що другий мінімум на кривій DTG, зафіксований в окислювальному середовищі, практично збігається з раніше встановленим значенням температури спалаху $t_{всп}$, визначеним у ході окремих випробувань (табл. 3.2), що свідчить про кореляцію між термогравіметричними характеристиками матеріалу та його пожежонебезпечними параметрами.

На відміну від експериментів з визначення температур спалаху і займання, у яких наявність відкритого полум'я газового пальника ініціювала спалах і подальше стале горіння парів масел у температурному інтервалі 270–300 °C, у даному випадку, за відсутності зовнішнього джерела запалювання, самозаймання парової фази (природно, виключно в струмі повітря) було зафіксовано лише при досягненні температури близько 395 °C, що вказує на суттєву роль кінетичних факторів та умов тепломасообміну у реалізації процесів займання.

При цьому сумарна втрата маси наважки за результатами нагрівання в інертному та окислювальному середовищах виявилася практично ідентичною і становила близько 13 г у струмі аргону та 12 г у струмі повітря, що свідчить про подібний загальний внесок органічної складової у масовий баланс процесу незалежно від складу газової фази.

Нагрівання активованого торфу як в атмосфері аргону , так і в окислювальному середовищі повітря (рис. 3.2), починаючи з температур близько

40 °C, супроводжується вираженою ендотермічною втратою маси, що характеризується формуванням екстремумів на кривій DTG при температурах приблизно 150 °C у струмі повітря та 155 °C в атмосфері Ar. Зазначені ефекти обумовлені видаленням вологи, яка в торфі присутня у вигляді широкого спектра фізично та хімічно зв'язаних форм і, відповідно, десорбується в розширеному температурному інтервалі [55].

Другий мінімум на кривій DTG для торфу реєструється при температурі близько 257 °C в інертному середовищі та зміщується до області нижчих температур — приблизно 240 °C — у струмі повітря; на кривій DTA цьому відповідає характерний перегин. Для твердих палив подібна конфігурація дериватограм є типовою ознакою інтенсивного виділення летких компонентів органічної речовини, що узгоджується з літературними даними [59].

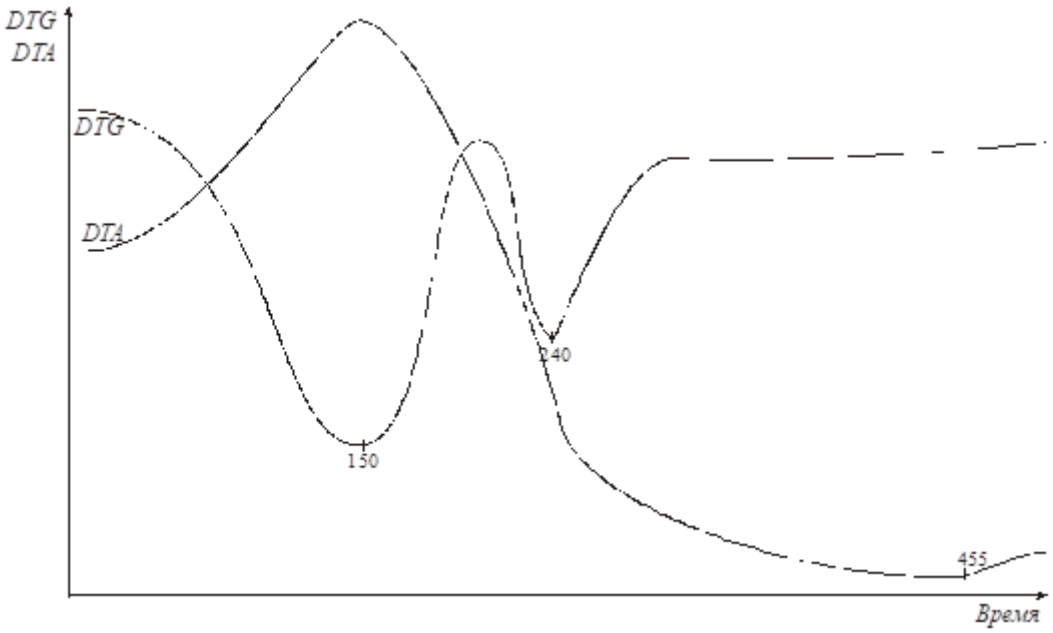


Рис.3.2. Криві термогравіметричного аналізу для торфу в струмі Ar повітря

Фіксація значно більш глибокого мінімуму на кривій DTG за умов окислювальної атмосфери у поєднанні з підвищеним кутом нахилу відповідної

ділянки кривої DTA свідчить про істотне зниження ефективної енергії активації процесу виділення летких компонентів органічної речовини порівняно з аналогічними експериментами, виконаними в інертному середовищі аргону [60]. Така зміна кінетичних параметрів процесу є індикатором інтенсифікації термохімічних перетворень у присутності окислювальної газової фази.

Подальше підвищення температури в нейтральних умовах не супроводжується виникненням критичних термічних ефектів, що свідчить про відсутність перебігу процесів глибокої термічної деструкції та напівкоксування, характерних для твердих палив більш високого ступеня метаморфізму [59]. Натомість в окислювальному середовищі при температурі близько 455 °C спадна ділянка кривої DTA поступово трансформується у висхідну, при цьому зазначена перебудова теплового сигналу не супроводжується помітною зміною швидкості втрати маси зразка. Такий характер дериватограм з високим ступенем імовірності пов’язаний із перебігом фізико-хімічних перетворень у складі органічної матриці торфу, що не супроводжуються масообмінними ефектами, але відображаються у зміні теплового балансу системи.

Сумарна втрата маси наважки за результатами нагрівання в струмі повітря становила 97 мг, тоді як у середовищі аргону відповідний показник зменшувався до 80 мг, що додатково підтверджує більш інтенсивний характер трансформацій органічної складової в присутності окислювальної атмосфери.

Для окалино-торф’яних композицій також є характерною чітко виражена багатостадійність термічних перетворень, що відображається на кривих DTG у вигляді розвитку процесів сушіння в температурному інтервалі 40–160 °C, причому найбільш інтенсивний характер цей етап має для вихідної, невилежаної суміші. Зі зростанням температури зазначений процес поступово змінюється стадією випаровування мінеральних масел, початок якої фіксується при температурі близько 203 °C для вихідної композиції та дещо зміщується до 205 °C для суміші, що зазнала вилежування протягом 60 діб (рис. 3.3), що може

свідчити про незначну модифікацію фізико-хімічного стану органічної фази внаслідок тривалої взаємодії з торф'яною матрицею.

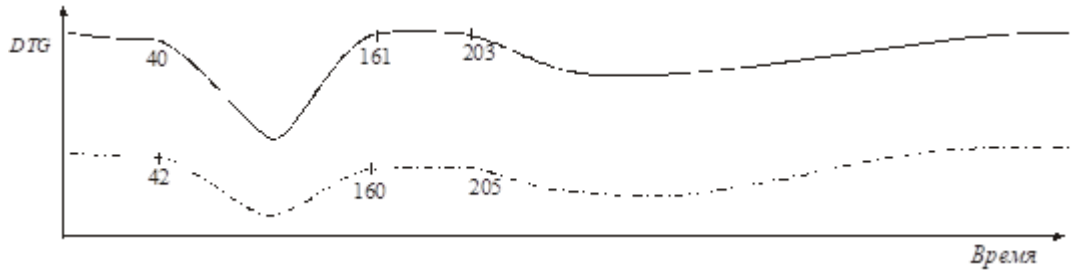


Рис.3.3. Кривіе DTG для суміші окалини з торфом:
——— -вихідна суміш;
– · – · – - суміш після витримки 60 діб

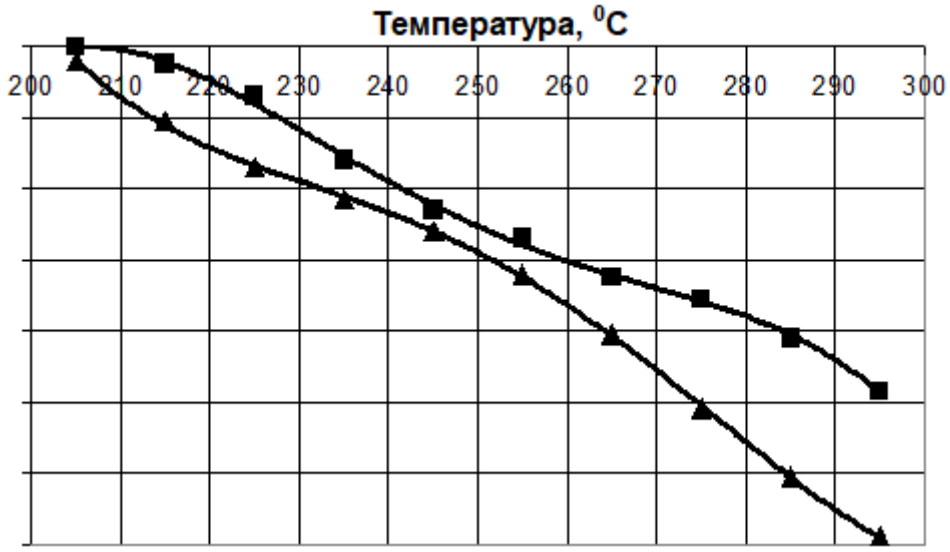


Рис.3.4. Ділянка кривих DTA для суміші окалини з торфом в струмі повітря:
■ - вихідна суміш
▲ - суміш після витримки 60 діб

Криві диференціально-термічного аналізу (DTA), отримані для окалино-торф'яних композицій, з огляду на їх інформативність щодо перебігу термохімічних перетворень органічної складової, потребують більш детального та формалізованого розгляду. Особливий інтерес у контексті даного дослідження становить температурний інтервал 200–300 °С (рис. 3.5), у межах якого

спостерігаються найбільш інтенсивні теплові ефекти, пов'язані з випаровуванням і частковою деструкцією мінеральних масел.

З метою кількісного опису характеру зміни теплового сигналу в зазначеному температурному діапазоні експериментальні залежності DTA були апроксимовані аналітичними функціями з використанням стандартного математичного апарату програмного пакета **Microsoft Excel™**. Отримані апроксимаційні рівняння дозволяють узагальнити експериментальні дані у вигляді формалізованих математичних залежностей та створюють передумови для подальшого порівняльного аналізу термокінетичних особливостей різних композицій.

Для вихідної окалино-торф'яної суміші відповідна залежність у діапазоні 200–300 °C може бути описана таким рівнянням:

$$y = -7 \cdot 10^{-6}x^4 + 0{,}007 \cdot x^3 - 2{,}6136 \cdot x^2 + 430{,}9 \cdot x - 26390 \qquad (3.1)$$

$$R^2 = 0{,}9986$$

- Суміш після витримки 60 діб

$$y = 6 \cdot 10^{-6}x^4 + 0{,}0062 \cdot x^3 + 2{,}3525 \cdot x^2 - 393{,}5 \cdot x + 24590 \qquad (3.2)$$

$$R^2 = 0{,}9997$$

Інтерпретація термогравіметричних та диференціально-термічних кривих для окалино-торф'яних композицій демонструє, що температурні точки перегину, які асоціюються з критичними фізико-хімічними трансформаціями органічної складової, корелюють із нульовими значеннями других похідних апроксимаційних функцій. Рішення квадратних рівнянь, утворених шляхом подвійного диференціювання відповідних аналітичних виразів (3.1) та (3.2),

дозволяє визначити температурні координати цих критичних точок: для вихідної суміші — 266 °С, для суміші, вилежаної протягом 60 діб — 221 °С. Зауважимо, що зазначені значення практично співпадають із експериментально визначеною температурою спалаху $t_{(всп)}$ (табл. 3.4), що вказує на системність та закономірність спостережуваних явищ.

Таким чином, отримані результати однозначно демонструють закономірне зниження температур спалаху та займання мінеральних масел окалини під дією торф'яної добавки, причому процес тривалого витримування композиції сприяє подальшому редукованню цих параметрів. Виявлені тенденції надають підстави для гіпотези щодо підвищення термічної спалюваності масел у складі окалино-торф'яних сумішей під час спікання агломераційної шихти, однак інтерпретація таких результатів має враховувати комплексну поведінку масел у контексті вологої шихти, де реалізуються мультифакторні процеси тепломасообміну та фазових перетворень.

Динаміка випаровування масел, що відбувається під час фронту інтенсивного нагріву шихти від поверхневого до нижніх шарів, які слідують за зоною сушіння, визначається сукупністю технологічних та фізико-хімічних чинників. До перших належать параметри теплового режиму, геометричні характеристики шару, гранулометричний та хімічний склад шихти, а також наявність додаткових легуючих або сорбційних компонентів. До других — властивості масел, такі як температура початку випаровування, температура спалаху, температура займання та інші кінетичні і термодинамічні характеристики.

Необхідно підкреслити, що найбільш леткі фракції органічної фази випаровуються при температурах нижче $t_{(всп)}$ та $t_{(воспл)}$ і в умовах обмеженого доступу кисню здебільшого конденсуються у зоні перезволоження шихтового шару. У канальному режимі спікання можливий механічний винос цих фракцій у газовий колектор, що має важливе технологічне та безпекове значення.

Інтервал між температурою початку випаровування та температурою спалаху органічної фази прямо корелює з ймовірністю виникнення займання у шаровому процесі спікання: чим він менший, тим вища імовірність локального самозаймання. Комплексний аналіз кривих DTG у поєднанні з даними табл. 3.4 дозволяє формалізовано оцінити ступінь реакційної активності масел у складі шихти та інтегрувати ці результати у таблицю 3.5 для подальшого порівняльного аналізу термодинамічної поведінки композицій.

Таблиця 3.5

Інтервали виділення горючих масел

Матеріал	Температура початку випаровування масел (по кривим DTG), °C	$t_{всп,}$ °C	Δt, °C
Окалина	192	277	85
Вихідна суміш окалини і торфу	203	266	63
Сумішь окалини і торфа після 60 діб витримки	205	224	19

Одержані експериментальні дані (табл. 3.5) переконливо свідчать про те, що для досліджуваних композиційних систем, особливо після регламентованої витримки, формується істотно розширений температурний інтервал між моментом ініціації випаровування мастильних компонентів і температурою їх

спалаху. Така трансформація термодеструкційних характеристик зумовлює зростання імовірності більш повного та стійкого окиснювального перетворення органічної фази в умовах шару, що спікається, у процесі агломерації. Виявлений позитивний ефект, обумовлений фізико-хімічною взаємодією торфу із замасленою прокатною окалиною, знайшов практичне відображення у відповідному патентному рішенні, що регламентує технологічний режим підготовки окалино-торф'яних сумішей [61].

З метою кількісної оцінки впливу попередньої підготовки окалини із залученням торфу на концентрацію маслянистих компонентів в агломераційних газах на виході зі спікального шару було виконано серію спеціалізованих експериментів. У ході досліджень агломерацію здійснювали з шихт, до складу яких вводили 20 кг окалини у розрахунку на 1 т готового агломерату. При цьому в першому варіанті використовували шихту, сформовану шляхом інтенсивного механічного змішування стандартної аглосуміші із замасленою окалиною, тоді як у другому випадку застосовували попередньо підготовлену окалино-торф'яну композицію з масовим співвідношенням компонентів 80:20.

Процес спікання реалізовували в умовах лабораторної агломераційної чаші циліндричної конфігурації діаметром 200 мм і висотою 360 мм. Над патрубком з'єднання вакуум-камери з колектором ексгаустера монтували перфоровану металеву шайбу, на поверхню якої укладали фільтрувальний шар шамотної крихти завтовшки 30 мм. За такої конструктивної схеми весь об'єм агломераційних газів примусово проходив через пористе шамотне середовище, у якому здійснювалося уловлювання маслянистих фракцій. Встановлено, що при спіканні шихт з непідготовленою замасленою окалиною вміст масел у шамоті становив 3550–3840 мг/кг, тоді як використання окалино-торф'яної суміші забезпечувало зниження цього показника до рівня 2080–2930 мг/кг.

Разом із тим слід підкреслити, що інтенсивний розвиток пристінного ефекту в лабораторних установках істотно обмежує можливість прямої екстраполяції отриманих результатів на реальні умови промислового спікання аглошихт, що містять замаслену окалину, на агломераційних стрічках. У зв'язку з цим для уточнення та верифікації виявлених закономірностей було передбачено проведення розширеного комплексу досліджень безпосередньо у виробничих умовах.

Узагальнюючи результати лабораторного етапу, можна констатувати, що сумісне змішування замасленої прокатної окалини з торфом та наступна витримка отриманої суміші призводять до принципової зміни характеру термічної поведінки мастильних компонентів. Зокрема, спостерігається зближення температур початку інтенсивного випаровування та займання масел, що дозволяє обґрунтовано припустити зростання ймовірності їх ефективного згоряння в процесі утилізації окалини під час виробництва агломерату.

3.2. Вплив введення в агломераційну шихту окалини, підготовленої з використанням торфу, на перебіг процесу спікання та властивості агломерату

Дослідження кінетичних особливостей процесу спікання та фізико-механічних характеристик агломерату, отриманого з шихт, що містять замаслену окалину, підготовлену із застосуванням торфу, виконували в умовах лабораторного комплексу Проблемної лабораторії підготовки металургійної сировини Національної металургійної академії України. У рамках експериментальної програми було сформульовано та послідовно реалізовано низку науково-прикладних завдань, а саме: обґрунтування раціонального режиму підготовки аглошихти, включаючи оптимізацію способу та стадії введення окалино-торф'яної суміші; вибір оптимальних технологічних параметрів процесу спікання; комплексне дослідження властивостей сформованого агломерату.

Поведінку маслянистих домішок окалини в лабораторних умовах цілеспрямовано не аналізували, оскільки суттєве посилення пристінних явищ у малогабаритних установках, порівняно з промисловими агрегатами, зумовлює помітну трансформацію механізмів видалення масел. З огляду на це було прийнято рішення перенести дослідження зазначеного аспекту до серії промислових експериментів.

На початковому етапі лабораторних досліджень основну увагу зосередили на визначенні раціонального режиму підготовки аглошихти з використанням окалино-торф'яної суміші. Відповідна серія експериментів була спрямована на встановлення оптимальної частки окалини в складі ОТС шляхом варіювання вмісту торфу в межах 15, 20, 25 та 30 мас. %. Гранулометричний склад сухого залишку окалини після видалення масел і вологи наведено в табл. 3.6, тоді як дисперсний склад свіжоприготованих окалино-торф'яних сумішей представлено в табл. 3.7. При цьому слід зазначити, що визначення гранулометричного складу вихідної замасленої окалини є методично неможливим унаслідок її пастоподібного агрегатного стану.

Таблиця 3.6

Гранулометричний склад окалини

Розмір фракції, мм	+1	1-0,3	0,3-0,1	0,1-0,05	-0,05
Масова часткая фракції, %	8,5	26,4	18,2	18,7	28,2

Таблиця 3.7

Гранулометричний склад окалино-торфяних сумішей

Масове співвідношення окалина:торф в суміші, %	Масова доля фракцій, %			
	+20	20-10	10-5	-5
85:15	3,89	39,75	29,44	26,92
80:20	4,19	34,03	30,89	30,89
75:25	2,10	31,90	30,53	35,47
70:30	1,6	31,50	29,70	37,20

На рисунку 3.6 наведено узагальнену залежність трансформації фракційного складу досліджуваної суміші від масової частки торфу в її складі. Аналіз представлених даних свідчить, що поступове збільшення вмісту торф’яної складової супроводжується систематичним зсувом гранулометричного розподілу в бік підвищення дисперсності матеріалу. При цьому встановлено наявність чітко вираженого екстремуму: максимальна концентрація фракції з розміром частинок 5–10 мм реалізується за умови введення близько 20 мас. % торфу, що вказує на формування найбільш сприятливої структури суміші з позицій її грануляційної однорідності.

Слід підкреслити, що до ключових фізико-технологічних характеристик компонентів агломераційної шихти, які детермінують закономірності її формування, перерозподілу та ущільнення, належать насипна густина та кут природного укосу. Саме сукупність цих параметрів визначає здатність матеріалу до самовпорядкування у шарі, умови контакту між частинками, а також

стабільність структури шихти в процесі її завантаження та подальшого спікання, що зумовлює кінцеві властивості агломерату.

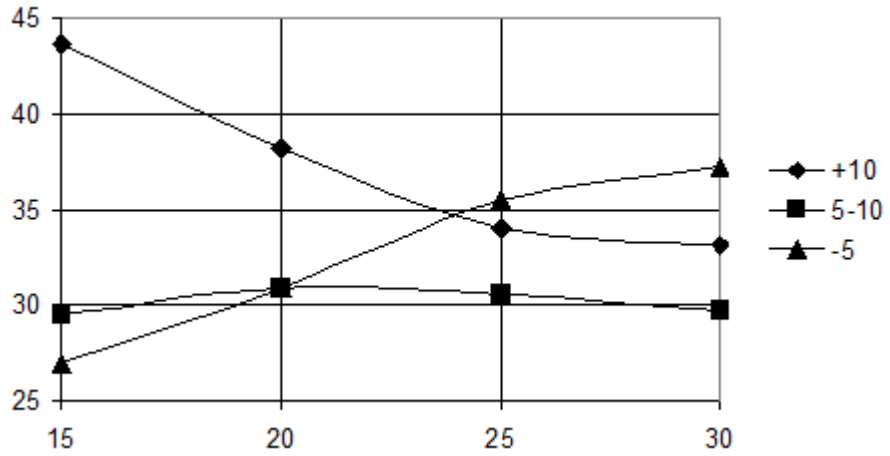


Рис.3.5. Зміна гранулометричного складу окалино-торф'яної суміші в залежності від частки торфу

Насипну масу сумішей визначали шляхом зважування проби матеріалу, вільно (без ущільнення) примусову циліндричну мірну ємність. Отримані результати дослідження представлені в табл.3.8. Слід зауважити, що реальна насипна маса окалини вище встановленого значення, оскільки через її тістоподібний стан не вдалося досягти повного заповнення ємності.

Таблиця 3.8

Насипна маса і кут природного укосу сумішей

Масове співвідношення окалина:торф в суміші, %	100:0	85:15	80:20	75:25	70:30
Насипная маса, т/м^3	2,12	1,39	1,24	1,13	1,002
Кут природного зкосу, град	-	40	39	38	35

У таблиці 3.8 поряд із показниками насипної маси наведено також експериментально встановлені значення кута природного укосу досліджуваних композиційних сумішей, який розглядається як інтегральна реологічна характеристика, що відображає сукупний вплив гранулометричного складу, міжчастинкових сил зчеплення та морфології поверхні частинок на сипучість матеріалу.

Визначення зазначеного параметра здійснювали з використанням класичної лабораторної методики, згідно з якою суміш завантажували у гладкостінний металевий циліндр без дна діаметром 105 мм і висотою 150 мм, жорстко встановлений на вирівняній горизонтальній площині. Після контрольованого вертикального підняття циліндра відбувалося самодовільне обсипання матеріалу з формуванням стійкої конічної насипі, геометричні параметри якої дозволяли шляхом вимірювання кута між твірною поверхні конуса та його основою визначити величину кута природного укосу. Для вихідної замасленої окалини цей показник не встановлювали, оскільки її пастоподібний агрегатний стан і відсутність сипучості принципово унеможливлюють реалізацію даного методу та формування стабільної конічної структури.

Графічну залежність насипної маси сумішей від вмісту окалини (або, відповідно, торфу) в їх складі наведено на рисунку 3.7. Аналітична обробка експериментальних даних шляхом поліноміальної апроксимації дозволила встановити наявність вираженого мінімуму насипної густини, який відповідає масовій частці торфу на рівні 37,8%. Водночас слід підкреслити, що досягнення мінімальних значень насипної маси не може розглядатися як самодостатній критерій оптимізації складу аглошихти, оскільки надмірне її зниження неминуче супроводжується погіршенням структурної стабільності суміші, посиленням явищ фракційної та щільнісної сегрегації, а також зниженням відтворюваності умов формування шару при завантаженні на агломераційну машину. З урахуванням викладеного, підвищення частки торфу в окалино-торф’яній суміші понад 15–20 мас. % слід вважати технологічно та структурно необґрунтованим, оскільки воно не забезпечує додаткових переваг з позицій керованості процесу спікання та однорідності агломераційної шихти.

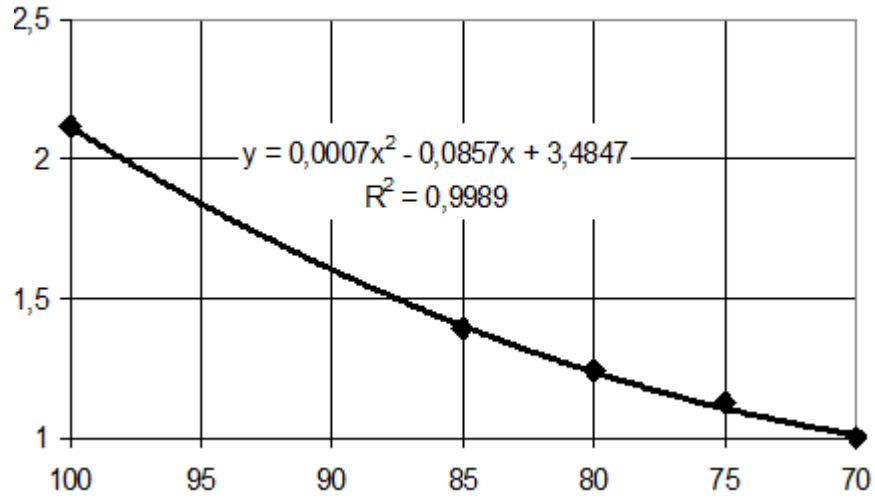


Рис.3.6. Зміна насипної маси в залежності від складу суміші

Як випливає з аналізу експериментальних даних, узагальнених у таблиці 3.8, систематичне зростання масової частки торфу в складі окалино-торф'яної суміші супроводжується монотонним зменшенням величини кута природного укосу, що однозначно свідчить про поступове підвищення сипучості матеріалу та зниження внутрішнього тертя між його структурними елементами. Зазначена тенденція відображає трансформацію реологічних властивостей суміші внаслідок введення торф'яної компоненти, яка, за рахунок своєї волокнисто-пористої морфології та низької насипної густини, модифікує характер контактної взаємодії частинок окалини.

У цілому результати даного етапу досліджень дозволяють зробити узагальнюючий висновок про те, що механічне поєднання торфу із замасленою окалиною забезпечує формування сипкого, достатньо дисперсного композиційного матеріалу, технологічні характеристики якого відповідають вимогам, що висуваються до компонентів агломераційної шихти. З урахуванням сукупності гранулометричних, реологічних та структурних показників у якості раціональної масової частки торфу в складі суміші доцільно рекомендувати рівень близько 20%. При цьому слід спеціально зазначити, що вагове дозування компонентів у зазначеній пропорції практично еквівалентне їх приблизно рівному об'ємному вмісту в суміші, що створює передумови для більш

інтенсивного та рівномірного взаємного розподілу фаз і, відповідно, для підвищення якості змішування.

Подальший етап експериментальних досліджень було спрямовано на обґрунтування раціонального способу введення окалино-торф’яної суміші до складу аглошихти на стадії формування штабеля. Зокрема, поставлено завдання оцінити можливість інтенсифікації процесів огрудкування шляхом спільного штабелювання окалино-торф’яної суміші з компонентами агломераційної шихти, що характеризуються зниженою здатністю до грудкування. У ході експериментів окалино-торф’яну суміш із вмістом 20 мас. % торфу укладали пошарово у штабель у безпосередньому контакті з різними видами таких матеріалів. Після цього сформований штабель піддавали вертикальному перерізанню з наступним зсипанням матеріалів у конічну насип, що забезпечувало первинне просторове перемішування. Отриману в такий спосіб суміш додатково змішували та огрудковували спільно з іншими компонентами агломераційної шихти. Кількісні результати проведених експериментів узагальнено та наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Вплив умов закладки окалино-торф'яної суміші на фракційний склад грудкуючої агломераційної шихти (мас.%)

Варіант закладки окалино-торфяної суміші	Розмір фракції, мм			
	0-3	3-5	5-10	+10
Без ввода ОТС	47,2	24,7	15,5	12,6
ОТС задається з залізорудним концентратом	43,6	26,5	15,5	14,4
ОТС задається з аглорудою	44,7	26,0	14,1	15,2
ОТС задається з відсівом агломерата	41,4	29,1	14,9	14,6
ОТС задається з колошниковим пилом	37,9	35,0	15,1	12,0

Отриманий масив експериментальних даних переконливо засвідчив наявність вираженого позитивного впливу введення окалино-торф’яної суміші (ОТС) до складу агломераційної шихти на інтенсивність і результативність процесів її огрудкування. Зокрема, зафіксовано істотне скорочення вмісту дрібнодисперсної фракції з розміром частинок менше 3 мм, що супроводжується закономірним зростанням сумарної частки гранул у найбільш технологічно сприятливому інтервалі 3–10 мм. Така трансформація гранулометричного складу свідчить про підвищення ефективності агрегування частинок у процесі підготовки шихти.

Найбільш виражений позитивний ефект спостерігався у варіантах, за яких окалино-торф’яну суміш вводили до складу штабеля в безпосередньому контакті з компонентами аглошихти, що характеризуються зниженою здатністю до грудкування, зокрема з подрібненим черепашником та колошниковим пилом. Очевидно, що маслянista складова окалини, адсорбуючись на поверхні зазначених високодисперсних матеріалів, сприяє підвищенню міжчастинкових адгезійних взаємодій, що, у свою чергу, інтенсифікує процеси їх коагуляції та спільної агрегації з іншими компонентами агломераційної шихти. Специфічні особливості формування сипучої композиційної суміші залежно від режиму укладання штабеля та просторового розподілу ОТС відображені у відповідному патентному рішенні [62].

Подальша серія експериментальних досліджень [63] була спрямована на комплексне вивчення впливу добавок окалино-торф’яної суміші на закономірності грудкування агломераційної шихти, кінетику процесу спікання та показники якості отриманого агломерату за різних значень питомої витрати твердого палива і висоти шару, що спікається. Дослідження виконували відповідно до матриці трьохфакторного експерименту, побудованої за планом Бокса–Бенкена [64], що дозволило з мінімальною кількістю дослідів отримати статистично обґрунтовані регресійні залежності.

У якості варійованих технологічних факторів розглядали:

- X_1 — масову частку окалино-торф’яної суміші в агломераційній шихті;
- X_2 — висоту шару, що спікається;
- X_3 — витрату твердого палива в шихту.

Окрім 13 експериментальних точок, передбачених класичним планом, було виконано три додаткові досліди (№ 14–16), які відповідали крайнім значенням усіх факторів, а також варіанту без введення окалини в шихту, що слугував базовим. При розрахунку складу аглошихт обов’язково враховували внесок вуглецю торфу, що входив до складу окалино-торф’яної суміші.

На постійному рівні підтримували такі технологічні параметри процесу:

- основність шихти CaO/SiO2=1,15\mathrm{CaO/SiO_2} = 1{,}15CaO/SiO2=1,15;
- частку зворотного продукту в шихті — 20%;
- масове співвідношення окалина : торф в ОТС — 80 : 20;
- вологість шихти — 8,5%;
- тривалість запалювання — 1,5 хв;
- режим зволоження та огрудкування шихти.

Окалино-торф’яну суміш після дозування піддавали ретельному перемішуванню та протиранню через сито з розміром комірки 5 мм. Усі віддозовані компоненти агломераційної суміші попередньо змішували на деці, після чого завантажували в горизонтальний барабан-грудкувач діаметром 500 мм і довжиною 750 мм, який працював із частотою обертання 19,34 об/хв. У барабані шихту перемішували протягом 30 с, далі впродовж наступних 30 с подавали розрахункову кількість води, після чого здійснювали процес огрудкування тривалістю 2 хв.

Гранулометричний склад вихідної шихти характеризувався таким розподілом за фракціями (мас. %):

- менше 3 мм — 55,4;
- 3–5 мм — 20,30;
- 5–10 мм — 21,65;
- понад 10 мм — 2,65.

Статистичну обробку результатів, виконану з урахуванням вихідного гранулометричного складу шихти з використанням стандартних функцій програмного пакета **Statgraphics Plus 3.0**, показала, що вплив витрати твердого палива на фракційний склад грудкуючої шихти є статистично незначущим і може бути знехтуваний. У зв'язку з цим отримані експериментальні дані доцільно інтерпретувати як результати однофакторного експерименту, що дозволяє адекватно оцінити вплив витрати окалино-торф'яної суміші на гранулометричний склад агломераційної шихти.

У результаті математичної обробки експериментальних даних було отримано рівняння регресії, які описують залежність масової частки окремих фракцій YiY_iYi від вмісту окалино-торф'яної суміші в шихті X1X_1X1 зі статистично значущими коефіцієнтами, що підтверджує системоутворюючу роль ОТС у процесах формування грануляційної структури агломераційної шихти.

Отриманий масив експериментальних даних переконливо засвідчив наявність вираженого позитивного впливу введення окалино-торф'яної суміші (ОТС) до складу агломераційної шихти на інтенсивність і результативність процесів її огрудкування. Зокрема, зафіксовано істотне скорочення вмісту дрібнодисперсної фракції з розміром частинок менше 3 мм, що супроводжується закономірним зростанням сумарної частки гранул у найбільш технологічно сприятливому інтервалі 3–10 мм.

Така трансформація гранулометричного складу свідчить про підвищення ефективності агрегування частинок у процесі підготовки шихти.

Найбільш виражений позитивний ефект спостерігався у варіантах, за яких окалино-торф’яну суміш вводили до складу штабеля в безпосередньому контакті з компонентами аглошихти, що характеризуються зниженою здатністю до грудкування, зокрема з подрібненим черепашником та колошниковим пилом. Очевидно, що маслянista складова окалини, адсорбуючись на поверхні зазначених високодисперсних матеріалів, сприяє підвищенню міжчастинкових

адгезійних взаємодій, що, у свою чергу, інтенсифікує процеси їх коагуляції та спільної агрегації з іншими компонентами агломераційної шихти. Специфічні особливості формування сипучої композиційної суміші залежно від режиму укладання штабеля та просторового розподілу ОТС відображені у відповідному патентному рішенні [62].

Подальша серія експериментальних досліджень [63] була спрямована на комплексне вивчення впливу добавок окалино-торф’яної суміші на закономірності грудкування агломераційної шихти, кінетику процесу спікання та показники якості отриманого агломерату за різних значень питомої витрати твердого палива і висоти шару, що спікається. Дослідження виконували відповідно до матриці трьохфакторного експерименту, побудованої за планом Бокса–Бенкена [64], що дозволило з мінімальною кількістю дослідів отримати статистично обґрунтовані регресійні залежності.

У якості варійованих технологічних факторів розглядали:

- **X_1** — масову частку окалино-торф’яної суміші в агломераційній шихті;
- **X_2** — висоту шару, що спікається;
- **X_3** — витрату твердого палива в шихту.
-

Окрім 13 експериментальних точок, передбачених класичним планом, було виконано три додаткові досліди (№ 14–16), які відповідали крайнім значенням усіх факторів, а також варіанту без введення окалини в шихту, що слугував базовим. При розрахунку складу аглошихт обов’язково враховували внесок вуглецю торфу, що входив до складу окалино-торф’яної суміші.

На постійному рівні підтримували такі технологічні параметри процесу:

- основність шихти CaO/SiO2=1,15;
- частку зворотного продукту в шихті — 20%;
- масове співвідношення окалина : торф в ОТС — 80 : 20;

- вологість шихти — 8,5%;
- тривалість запалювання — 1,5 хв;
- режим зволоження та огрудкування шихти.

Окалино-торф’яну суміш після дозування піддавали ретельному перемішуванню та протиранню через сито з розміром комірки 5 мм. Усі віддозовані компоненти агломераційної суміші попередньо змішували на деці, після чого завантажували в горизонтальний барабан-грудкувач діаметром 500 мм і довжиною 750 мм, який працював із частотою обертання 19,34 об/хв. У барабані шихту перемішували протягом 30 с, далі впродовж наступних 30 с подавали розрахункову кількість води, після чого здійснювали процес огрудкування тривалістю 2 хв.

Гранулометричний склад вихідної шихти характеризувався таким розподілом за фракціями (мас. %):

- менше 3 мм — 55,4;
- 3–5 мм — 20,30;
- 5–10 мм — 21,65;

- понад 10 мм — 2,65.

Статистичну обробку результатів, виконану з урахуванням вихідного гранулометричного складу шихти з використанням стандартних функцій програмного пакета **Statgraphics Plus 3.0**, показала, що вплив витрати твердого палива на фракційний склад грудкуючої шихти є статистично незначущим і може бути знехтуваний. У зв'язку з цим отримані експериментальні дані доцільно інтерпретувати як результати однофакторного експерименту, що дозволяє адекватно оцінити вплив витрати окалино-торф'яної суміші на гранулометричний склад агломераційної шихти.

У результаті математичної обробки експериментальних даних було отримано рівняння регресії, які описують залежність масової частки окремих фракцій.

$$Y_{+10} = 2{,}95019-0{,}0903774\cdot X_1+0{,}0917925\cdot X_1^2 \quad (3.3)$$

$$Y_{3-10} = 42{,}2097+4{,}69693\cdot X_1-1{,}12894\cdot X_1^2 \quad (3.4)$$

$$Y_{-3} = 54{,}8401-4{,}78731\cdot X_1+1{,}03715\cdot X_1^2 \quad (3.5)$$

Графічна інтерпретація цих залежностей показано на рис.3.7.

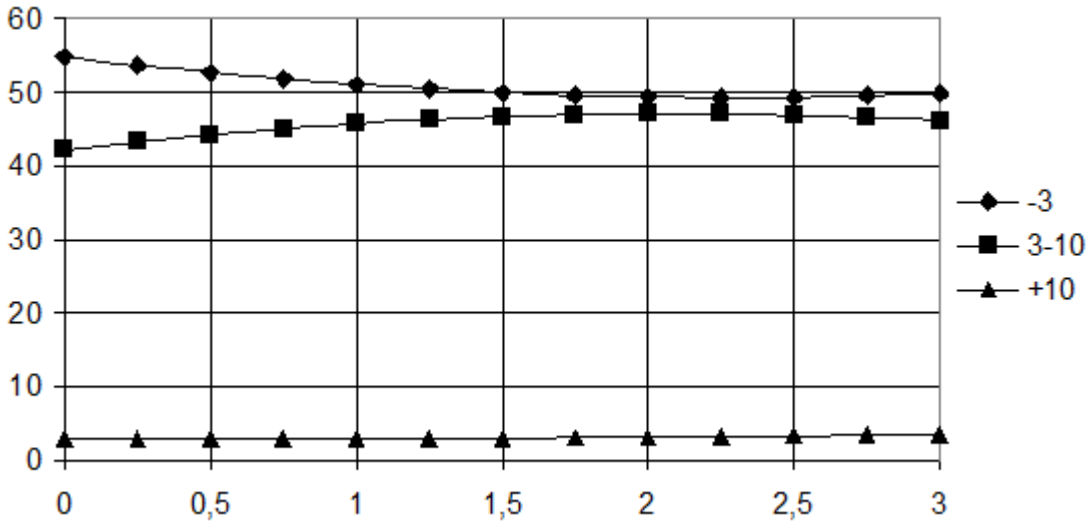


Рис.3.7. Зміна гранулометричного складу агломераційної шихти (мм) залежно від змісту окалино-торф'яної суміші

Інкорпорація окалино-торф’яної суміші до складу агломераційної шихти супроводжується комплексною перебудовою грануляційної структури матеріалу, що підлягає огрудкуванню, яка проявляється у статистично значущому скороченні частки надмірно дрібнодисперсної фракції з еквівалентним діаметром частинок менше 3 мм та одночасному зростанні масової концентрації гранул у діапазоні 3–10 мм, що вважається оптимальним з точки зору забезпечення стабільної газодинаміки та рівномірного тепломасообміну в спікальному шарі. Разом із тим встановлено, що подальше підвищення вмісту окалино-торф’яної суміші в агломераційній шихті понад критичний інтервал 2,0–2,5 мас. % призводить до нелінійної зміни характеру огрудкування, за якої інтенсифікація міжчастинкових адгезійно-капілярних взаємодій зумовлює зростання комкувальної здатності аглосуміші, формування укрупнених агломератів і, як наслідок, збільшення виходу фракції з розміром частинок понад 10 мм при відповідному зменшенні частки фракції 3–10 мм.

Сукупний аналіз отриманих експериментальних результатів дозволяє сформулювати узагальнений висновок про те, що з позицій формування раціонального гранулометричного складу агломераційної шихти найбільш доцільним є введення окалино-торф’яної суміші в кількості 1–2 мас. %, оскільки саме в цьому інтервалі концентрацій реалізується максимум сумарного вмісту фракції 3–10 мм у грудкуючому матеріалі. Такий грануляційний стан створює передумови для утворення структурно однорідного шару з підвищеною газопроникністю, зменшенням локальних перепадів температур і стабілізацією фронту горіння в процесі спікання.

Подальший етап лабораторних досліджень було спрямовано на детальне експериментальне вивчення закономірностей перебігу процесу спікання та формування комплексу експлуатаційних і фізико-механічних властивостей готового агломерату за умов варійованого введення окалино-торф’яної суміші до складу шихти.

Процес спікання реалізовували в циліндричній агломераційній чаші лабораторного типу діаметром 200 мм з висотою борту 360 мм, що забезпечувало відтворення основних газодинамічних і теплових умов, характерних для промислових агрегатів у масштабно-зменшеному вигляді. До ініціації запалювання палива здійснювали попередню оцінку газопроникності шару грудкуючої шихти, яку визначали за швидкістю фільтрації повітря крізь шар. Для цього на поверхні шихти встановлювали крильчатий анемометр, вмикали ексгаустер і за фіксованого розрідження 800 мм вод. ст. реєстрували швидкість повітряного потоку на вході в шар, приймаючи її як інтегральний показник газопроникності.

Після завершення вимірювань газодинамічних характеристик опускали горн, здійснювали запалювання газоповітряної суміші та підтримували процес займання палива агломераційної шихти протягом 1,5 хв. Подальше спікання проводили за умов сталого розрідження 800 мм вод. ст., забезпечуючи квазістаціонарний режим фільтрації газів. Процес вважали завершеним через 5–7 с після досягнення максимуму температури відхідних газів, після чого ексгаустер вимикали. Сформований спік без порушення його цілісності вивантажували на деко та піддавали зважуванню.

Для кількісної оцінки механічної міцності та виходу придатного продукту гарячий спік піддавали стандартному ударно-динамічному випробуванню шляхом скидання з висоти 2 м на сталеву плиту в копровому пристрої. За результатами подальшого розсіву продуктів руйнування на ситі з квадратною чарункою 5×5 мм визначали вихід придатного агломерату (фракція +5 мм, мас. %), на підставі якого розраховували інтегральні показники продуктивності установки та її питомої продуктивності, що використовувалися як узагальнені критерії ефективності процесу агломерації.

$$П = \frac{M \cdot 60}{1000 \cdot \tau_{сп}}, \quad \text{т/ч} \qquad (3.6)$$

$$П_{уд} = \frac{П}{S_{чаши}}, \quad \text{т/(м}^2\text{·ч)} \qquad (3.7)$$

де: М –-маса придатного агломерату, кг;

$\tau_{сп}$ – час спікання, хв;

$S_{чаши}$ - площа поперечного перерізу чаші, м^2.

Вихідну масу придатного агломерату використовували для відбору репрезентативних проб з метою проведення комплексного хімічного аналізу. Холодну міцність отриманого агломерату оцінювали за результатами стандартних випробувань у барабані відповідно до вимог **ДСТУ 3200-95**, що передбачають механічне навантаження матеріалу шляхом обертання барабана з визначеною частотою. На основі розсіву зруйнованої в барабані проби встановлювали показники міцності на удар (М+5+5+5, %) та на стирання (М−0,5-0,5−0,5, %), а також відбирали проби для проведення детального мінераграфічного аналізу, який дозволяє визначити фазовий склад, морфологію спікання та структуру контактів між окремими компонентами агломерату.

Статистичну обробку отриманих експериментальних даних здійснювали із застосуванням програмного пакета **Statgraphics Plus 3.0**, що забезпечувало побудову регресійних моделей та оцінку значущості факторів, що впливають на технологічні параметри процесу. У результаті аналізу виділено статистично значущі залежності, зокрема для швидкості фільтрації газів крізь спікаємий шар VфільтрV_{\text{фільтр}}Vфільтр. Після виключення факторів, статистично незначущих для даного показника, отримано аналітичну залежність, що дозволяє прогнозувати швидкість фільтрації як функцію змінного вмісту окалино-торф’яної суміші та інших ключових технологічних параметрів.

Цей підхід дозволяє інтегрувати результати експериментального моделювання з інженерними розрахунками, забезпечуючи можливість прогнозування газодинамічних характеристик агломераційного шару та оптимізації режимів спікання з урахуванням фізико-хімічних та механічних властивостей компонентів шихти.

$$V_{фильтр} = 1{,}78133 + 0{,}0010839 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0{,}0776954 \cdot X_1^2 - 0{,}0000113502 \cdot X_2^2 \qquad (3.8)$$

$$R^2 = 85{,}99$$

Статистичний аналіз експериментальних даних продемонстрував, що питома витрата твердого палива в шихті не належить до числа факторів, які статистично значущо впливають на швидкість фільтрації VфільтрV_{\text{фільтр}}Vфільтр; відповідно, фактор X3X_3X3 не включено до рівняння регресії (3.7). Це свідчить про те, що варіювання витрати палива в межах досліджених значень не призводить до суттєвої зміни газодинамічних характеристик шару грудкуючої шихти.

На рисунку 3.8 наведено графічну залежність газопроникності шару від вмісту окалино-торф’яної суміші в шихті. Зі спектра даних видно, що максимальна газопроникність спікаємого шару реалізується в інтервалі концентрацій окалино-торф’яної суміші, що забезпечує оптимальний баланс між формуванням

однорідної грануляційної структури та підтримкою достатнього об’єму міжчастинкових пор, критичних для ефективного проходження газового потоку. Ця закономірність підкреслює суттєву роль ОТС у модифікації текстурної та структурної організації шихти, сприяючи поліпшенню умов газопроникності та, відповідно, стабільності процесу спікання.

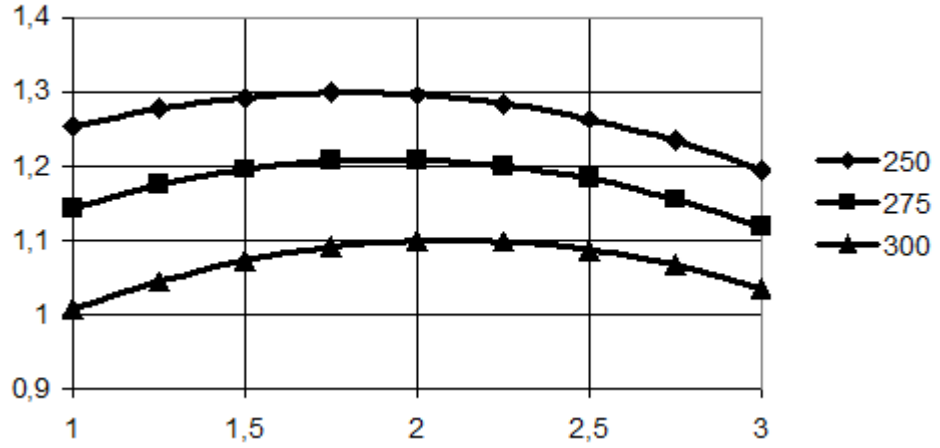


Рис.3.8. Зміна газопроникності шару в залежності від вмісту окалино-торф'яної суміші в аглошихту (цифрами позначена висота шару,що спікається мм)

Зіставлення експериментальних даних показує, що збільшення висоти шару шихти призводить до зсуву значення максимального показника газопроникності в бік вищих вмістів окалино-торф’яної суміші. Така тенденція пояснюється тим, що збільшення товщини шару підсилює ефект ущільнення при укладанні матеріалу, особливо за відповідного гранулометричного складу шихти, що зумовлює зниження об’єму міжчастинкових пор та, як наслідок, зменшення газопроникності при надмірному вмісті ОТС. Таким чином, існує оптимальний інтервал концентрацій окалино-торф’яної суміші для кожної висоти шару, при якому забезпечується максимальна пропускна здатність газового потоку, що є критично важливим для стабільного протікання процесу спікання.

Вплив обраних технологічних факторів на індекс міцності агломерату на удар описується аналітичним рівнянням регресії наступного вигляду:

$$I_y = 478{,}634 - 10{,}4137 \cdot X_1 - 0{,}3694 \cdot X_2 - 241{,}103 \cdot X_3 + 0{,}1376 \cdot X_2 \cdot X_3 + 3{,}25 \cdot X_1 \cdot X_3 + 31{,}372 \cdot X_3^2 \qquad (3.9)$$

$$R^2 = 96{,}17$$

На рисунку 3.9 продемонстровано, як варіювання витрати палива модифікує характер впливу вмісту окалино-торф’яної суміші (ОТС) на показник міцності агломерату на удар. Зокрема, при збереженні концентрації коксика на рівні 3,0–3,25 мас. % підвищення вмісту ОТС у складі шихти не призводить до статистично значущих змін . У той же час, при зростанні питомої витрати палива вище цього інтервалу спостерігається чітка тенденція до підвищення міцності на удар у міру збільшення ОТС, що свідчить про взаємозалежність між тепловим режимом спікання та структурним впливом ОТС на механічну цілісність агломерату. Така закономірність підкреслює необхідність комплексної оптимізації одночасно кількості добавки ОТС і витрати палива, оскільки їх взаємодія визначає формування текстури спікаємого шару та кінцеві механічні характеристики продукту.

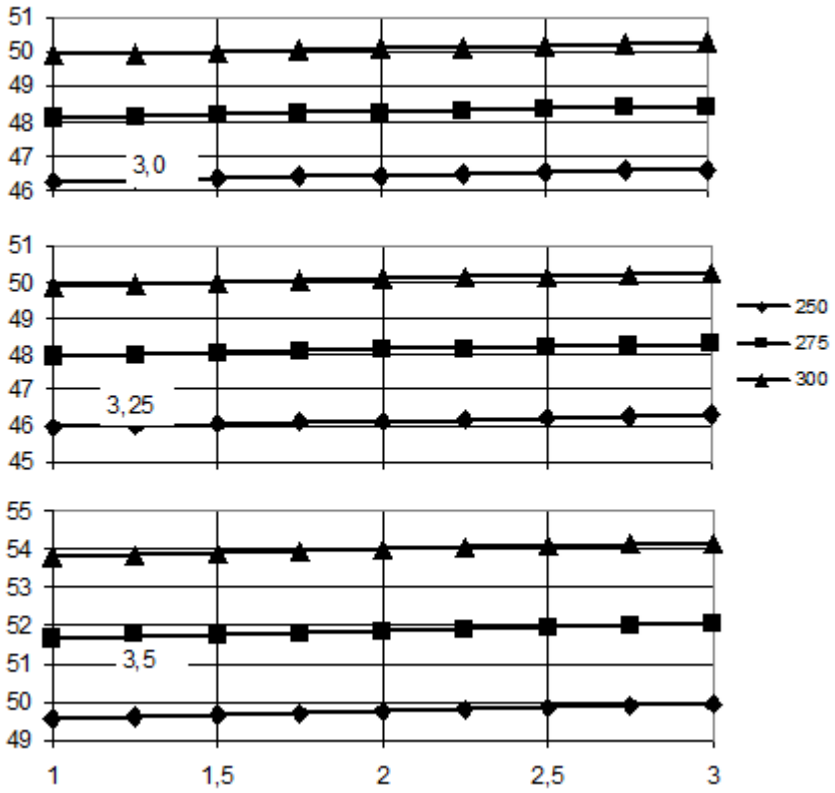


Рис.3.9 Зміна показника індексу на удар в залежності від вмісту окалино-торф'яної суміші в шихті (точками позначені результати розрахунку для різної висоти шару, мм; цифри на графіках - вміст палива в шихті,%)

кспериментальні дані свідчать, що підвищення масової частки окалино-торф’яної суміші (ОТС) у шихті призводить до відчутного зростання індексу міцності агломерату на удар , причому найвищі значення цього показника спостерігаються при спіканні шихти у шарі максимальної висоти. Така закономірність вказує на синергетичний ефект взаємодії гранулометричного та структурного впливу ОТС із товщиною шару, який забезпечує оптимальне ущільнення і формування контактних поверхонь між компонентами агломерату, що критично впливає на його механічну цілісність.

Вплив обраних технологічних параметрів на індекс міцності агломерату на стирання описується аналітичним рівнянням регресії виду:

$$I_и = -100{,}601-5{,}52982\cdot X_1-0{,}0715\cdot X_2+82{,}1521\cdot X_3+0{,}0277\cdot X_1\cdot X_2-0{,}675357\cdot X_1^2- \\ - 12{,}9657\cdot X_3^2 \qquad (3.10)$$

$$R^2 = 89{,}60$$

Графічна інтерпретація залежності, наведена на рисунку 3.10, демонструє, що при спіканні шихти у шарі висотою 250 мм збільшення масової частки окалино-торф’яної суміші (ОТС) у складі шихти призводить до помітного підвищення показника міцності агломерату на стирання M0,5M_{0,5}M0,5. Разом із тим, зі збільшенням висоти шару спостерігається загальне зниження стираності, а вплив вмісту ОТС стає менш вираженим. Така закономірність свідчить про те, що ефективність додавання ОТС у підвищенні стійкості агломерату до механічного зносу істотно залежить від геометричних параметрів шару, причому в товстому шарі ущільнення матеріалу переважає над ефектом модифікації структури суміші ОТС, що призводить до вирівнювання впливу додатка на показники стираності.

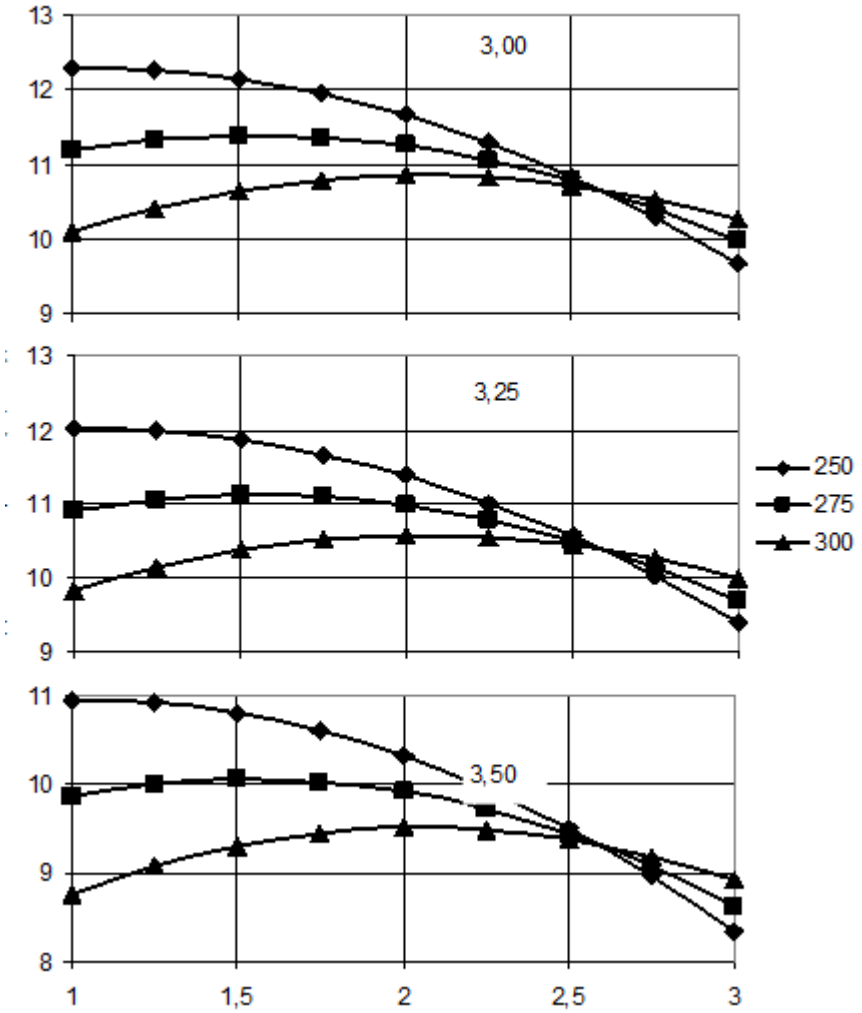


Рис.3.10 Зміна показника індексу на витирання в залежності від вмісту окалино-торф'яної суміші в шихті (точками позначені результати розрахунку для різної висоти шару, мм; цифри на графіках - вміст палива в шихті,%)

Результати проведених експериментальних досліджень свідчать, що введення окалино-торф’яної суміші (ОТС) до складу агломераційної шихти чинить позитивний вплив на вихід придатного агломерату. Після проведення стандартного розсіву матеріалу та усунення статистично незначущих факторів отримано наступну залежність, яка є статистично значущою та описує вплив варійованих параметрів на вихід придатного продукту:

$$K_{годн} = 71{,}6103+0{,}0208\cdot X_2-1{,}7795\cdot X_1^2+2{,}32444\cdot X_1\cdot X_3 \qquad (3.11)$$

$$R^2=79{,}26$$

З графіків, представлених на рис.3.11, видно, що збільшення вмісту ОТС в суміші до 2,0-2,5% супроводжується помітним збільшенням виходу придатного, особливо істотним при спіканні з більш високою витратою твердого палива. Збільшення висоти шару, що спікається також позитивно позначається на даному показнику.

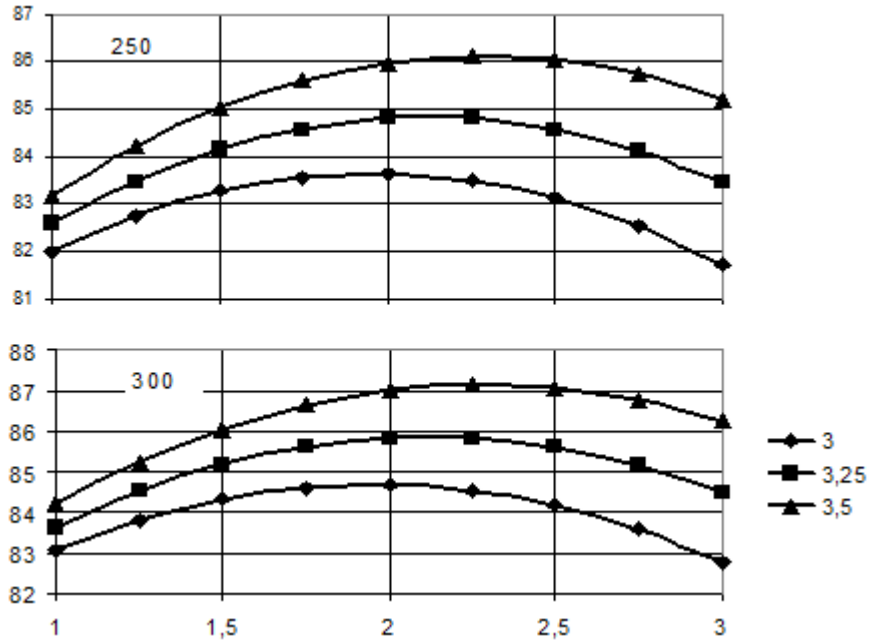


Рис.3.11 Вплив вмісту окалино-торф'яної суміші на вихід придатного агломерату (точками позначені результати розрахунку для різного змісту палива в шихті,%; цифри на графіках - висоти шару, мм)

Динаміка зміни питомої продуктивності установки у залежності від вмісту окалино-торф’яної суміші (ОТС) у шихті демонструє високу кореляцію зі змінами газопроникності спікаємого шару, що підтверджує тісний взаємозв’язок між структурою шару та інтенсивністю газообміну. Разом із тим, у цьому випадку питома витрата твердого палива виявляється фактором, який має статистично значно більший вплив , ніж вміст ОТС.

Апроксимуюча залежність питомої продуктивності від обраних технологічних параметрів може бути виражена рівнянням регресії наступного вигляду:

$$П_{уд}=1,49557+0,00121592\cdot X_1\cdot X_2-0,0795455\cdot X_1^2-$$
$$-0,00000590712\cdot X_2^2+0,013304\cdot X_3^2 \qquad (3.12)$$
$$R=83,06$$

Для шару висотою 300 мм отримана залежність представлена на рис.3.12.

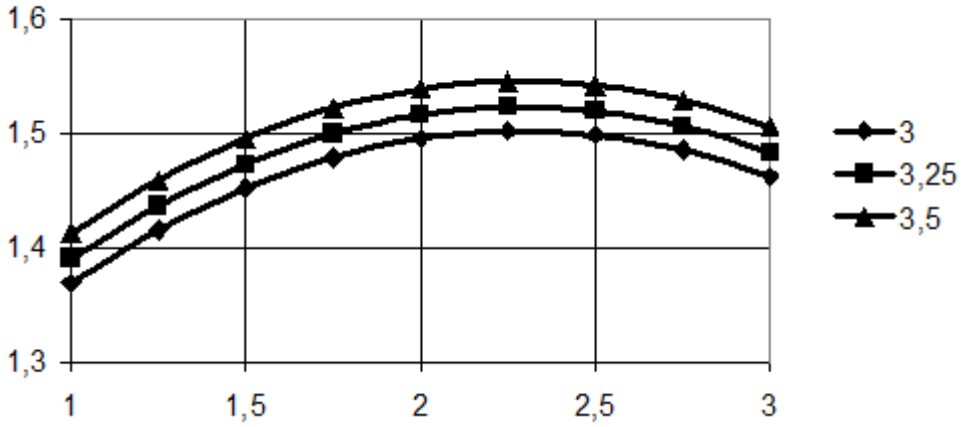


Рис.3.12 Зміна питомої продуктивності спікання в залежності від вмісту окалино-торф'яної суміші в шихті (точками позначені результати розрахунку для різного змісту палива в шихті,%)

Особливий науковий інтерес становить вивчення трансформацій хімічного складу готового агломерату при інкорпорації окалино-торф’яної суміші (ОТС) до складу агломераційної шихти. Оскільки ОТС містить як енергетично активні компоненти (паливні фракції), так і мінеральні оксиди, зокрема оксид заліза, її введення у шихту передбачає потенційне модифікування вмісту монооксиду заліза (FeOFeOFeO) в готовому продукті.

Експериментально встановлено, що зміни концентрації FeOFeOFeO у агломераті описуються наступною аналітичною залежністю:

$$FeO = 66,1753 + 0,52\cdot X_1 - 32,2261\cdot X_3 +$$
$$+0,123477\cdot X_2\cdot X_3 - 0,000769115\cdot X_2^2 \qquad (3.13)$$
$$R^2=76,25$$

Графічна залежність, представлена на рисунку 3.13, демонструє, що збільшення масової частки окалино-торф’яної суміші (ОТС) у шихті поряд із підвищенням питомої витрати палива призводить до зростання вмісту монооксиду заліза (FeOFeOFeO) в готовому агломераті. Така закономірність вказує на синергетичний вплив енергетичних та мінеральних компонентів ОТС на редукційно-окислювальні процеси у спікаємому шарі, що обумовлює підвищення концентрації відновленого FeOFeOFeO і, відповідно, впливає на фізико-хімічні властивості агломерату, критично важливі для його подальшого використання в металургійному циклі.

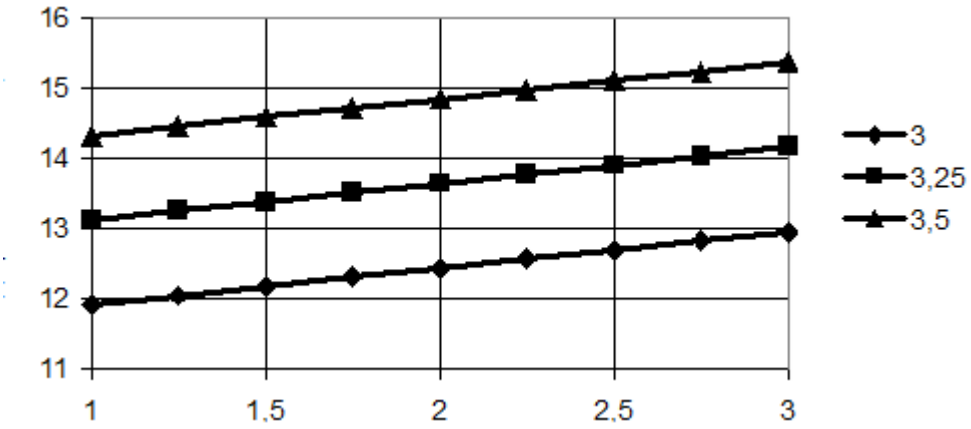


Рис.3.13. Зміст FeO в агломераті в залежності від вмісту окалино-торф'яної суміші (висота шару - 300 мм; точками позначені результати розрахунку для різного змісту палива в шихті,%)

Слід підкреслити, що в тих випадках, коли зміни вмісту монооксиду заліза (FeO) зумовлені підвищенням питомої витрати палива під час агломерації та відповідним зниженням парціального тиску кисню в реакційній зоні, підвищення концентрації FeO у агломераті зазвичай супроводжується зниженням його відновлюваності. У досліджуваному випадку зміни хімічного складу пов’язані із введенням окалино-торф’яної суміші (ОТС) як нового компоненту в шихту, що обумовило необхідність проведення серії експериментів, присвячених оцінці відновлюваності отриманих агломератів.

Дослідження відновлюваності виконували на термогравіметричній установці проточного типу. Відновлення здійснювали при температурі 800 °С у струмі водню, що подавався з балонів із регульованою витратою 600 см³/хв протягом 1 години. Наважку агломерату фракції 3–5 мм масою 10 г розміщували в кошику із сталевої сітки. Процес нагрівання до температури відновлення та подальше охолодження після експерименту здійснювали в струмі аргону для запобігання окисленню проби.

Абсолютну ступінь відновлення агломерату визначали відповідно до вимог за формулою:

$$R = \left[\frac{0{,}111FeO + 0{,}43Fe_{мет}}{0{,}43Fe_{общ}} + \frac{100(m` - m)}{m` \cdot 0{,}43Fe_{общ}} \right] - 100,\% \qquad (3.14)$$

де FeO, $Fe_{мет}$ і $Fe_{общ}$ - масові частки зазначених речовин,%;

0,111 - коефіцієнт перерахунку FeO в пробі на еквівалентну кількість кисню, необхідне для окислення FeO до Fe2O3;

0,43 - коефіцієнт перерахунку Feобщ в пробі на еквівалентну кількість кисню, необхідне для окислення Fe до Fe2O3;

т, m` – маса наважки після і до відновлення, відповідно, м.

Вміст монооксиду заліза (FeOFeOFeO) та загального заліза (FeобщFe_{\text{общ}}Feобщ) у пробах визначали шляхом стандартного хімічного аналізу. Концентрацію металевого заліза (FeметFe_{\text{мет}}Fемет) встановлювали відповідно до методу [65], що базується на кількісному визначенні об’єму водню, виділеного внаслідок реакції розчинення металевого заліза проби у розчині соляної кислоти.

Для кількісного опису впливу варійованих технологічних факторів на відновлюваність агломерату отримані експериментальні дані апроксимуються аналітичним рівнянням виду:

$$R = 96{,}1938+0{,}325303\cdot X_1^2-0{,}000048644\cdot X_2^2-0{,}626129\cdot X_3^2 \qquad (3.15)$$
$$R^2=62{,}36$$

Експериментальні спостереження показали, що процес відновлення агломерату протікав відносно швидко на початковій стадії до досягнення ступеня відновлення 55–60 %, після чого швидкість реакції значно знижувалася. Така поведінка є характерною для топохімічного механізму процесу, що обумовлює дифузійні обмеження та зміну кінетики відновлення на пізніх етапах [66].

Крім того, проведений аналіз виявив чітку тенденцію до підвищення абсолютної відновлюваності агломерату зі збільшенням масової частки окалино-торф’яної суміші (ОТС) у складі агломераційної шихти, що ілюструється на рисунку 3.14. Цей ефект пояснюється, з одного боку, наявністю в ОТС паливних компонентів, які сприяють локальному зниженню парціального тиску кисню в реакційній зоні, а з іншого — покращенням контактної взаємодії між відновлювальним газом та поверхнею часток агломерату, що підвищує ефективність відновних процесів.

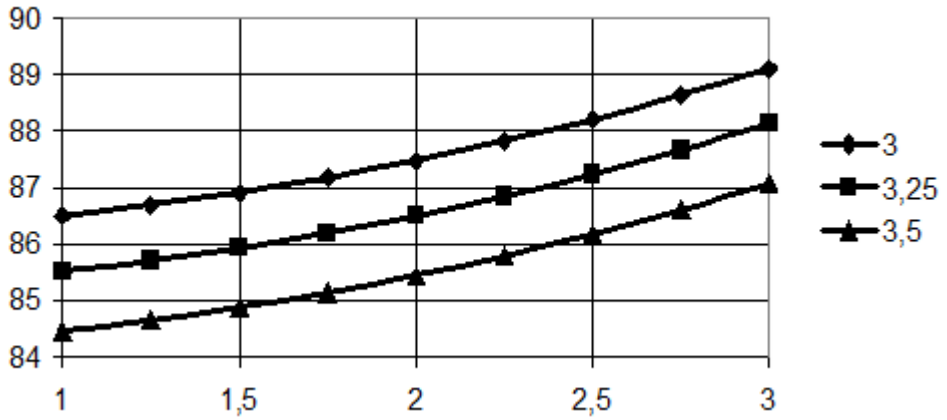


Рис.3.14. Зміна відновлюваність агломерату в залежності від вмісту окалино-торф'яної суміші (висота шару - 300 мм; точками позначені результати розрахунку для різного змісту палива в шихті,%)

Отриманий ефект знаходиться в певній суперечності з очікуваною залежністю, оскільки підвищення масової частки окалино-торф’яної суміші (ОТС) у шихті супроводжується збільшенням вмісту монооксиду заліза (FeO) в агломераті, що зазвичай призводить до зниження відновлюваності матеріалу [67]. Основні причини цього протиріччя значною мірою пояснюються результатами аналізу мікроструктури агломерату, представленими нижче в розділі 3.3, де розкрито особливості формування контактних поверхонь та пористої структури під впливом введення ОТС.

З метою врахування ефекту розм’якшення (разупрочнення) агломерату в процесі відновлення для окремих проб проводили визначення механічної міцності вихідного та відновленого матеріалу. Випробування здійснювали на механічній розривній машині. Для досліду використовували приблизно однакові за розміром шматочки агломерату округлої форми, відібрані після руйнування проби в стандартному барабані.

Отримані результати випробувань, представлені як середнє арифметичне за трьома паралельними дослідами, наведені в таблиці 3.10. Дані дозволяють кількісно оцінити вплив процесу відновлення на механічну цілісність агломерату

та виявити залежність між структурними змінами в матеріалі та його здатністю протидіяти руйнуванню під механічним навантаженням.

Таблиця 3.10

Вплив відновної обробки на міцність агломерату

№ проби	Склад ОТС в шихті, %	Прочність на сжаттчя, кг/зразок	
		вихідний агломерат	відновлювальний агломерат
16	0	90,5	48,5
7	1	98,6	70,4
12	2	102,0	68,5
5	3	114,3	77,0

Експериментальні дані свідчать, що інтеграція окалино-торф’яної суміші (ОТС)

до складу агломераційної шихти призводить до систематичного підвищення механічної міцності агломерату як у початковому стані, так і після проведення відновлювального циклу. При цьому спостерігається не лише збільшення абсолютного рівня міцності, а й суттєве зменшення ступеня розм’якшення (разупрочнення) матеріалу в процесі відновлення, що контрастує з відомими закономірностями [68], згідно з якими максимальна деградація механічних властивостей зазвичай фіксується при ступені відновлення 20–30 %, тоді як у представлених дослідженнях агломерат піддавався відновленню до 80–90 %, що обумовлює спостережувані відмінності у динаміці зміни механічних характеристик.

3.3. Мікроструктурний аналіз агломерату, синтезованого із застосуванням окалино-торф’яної суміші

Агломераційний процес, будучи термодинамічно нерівноважним, характеризується складною взаємодією фізико-хімічних, мінералогічних і металургійних параметрів, що визначають кінцеві властивості продукту.

Фазовий склад, мінералогічна організація та металургійні характеристики отриманого агломерату визначаються не лише співвідношенням та дисперсністю компонентів шихти, а й численними технологічними параметрами, що регулюють процес спікання: газопроникністю шару, режимом запалювання, ефективністю гомогенізації шихти та інтенсивністю теплообміну.

Згідно з класифікацією [69], складові шихти поділяються на три функціональні групи:

1. Основні мінералоутворюючі компоненти, представлені оксидами Fe, Ca та Si, взаємодія яких під час спікання визначає формування основного рудного скелету агломерату і контролює хімічний склад рудної фази.
2. Проміжні компоненти, до яких відносяться оксиди Al, Mg та Mn, здатні проявляти двоякий вплив на кінцеві властивості продукту. Ізоморфне включення цих оксидів у кристалічну решітку рудних фаз призводить до
3. утворення твердих розчинів з гіршою відновлюваністю порівняно з чистими оксидними фазами заліза; водночас входження їх до силікатних зв’язок або формування самостійних силікатних фаз сприяє «рафінуванню» рудних компонентів і сприяє кристалізації більш чистих залізних мінералів.
4. Другорядні компоненти, представлені оксидами V, Ti, Cr, Zn та інших елементів (сумарно ≤1–3 %), які можуть інтегруватися в рудні або силікатні фази без формування самостійних мінералів, але здатні модифікувати локальні фізико-хімічні властивості агломерату.

Металургійні характеристики кінцевого продукту, зокрема відновлюваність та механічна міцність, безпосередньо визначаються складом та морфологією оксидних фаз після завершення спікання, а також взаємодією цих фаз у межах силікатної матриці.

Ключовими технологічними параметрами, що регулюють кінцевий склад і структуру агломерату, є максимальна температура у зоні спікання, час витримки на цій температурі, композиція газової фази та рівномірність розподілу компонентів у шихті, включаючи ступінь подрібнення часток. Ефективний парціальний тиск кисню в газовій фазі контролює співвідношення Fe^{2+}/Fe^{3+} і визначає мінералогічний склад та відновлюваність продукту, а його величина залежить від вмісту палива, складу рудної частини, основності шихти та режиму теплового нагріву [69].

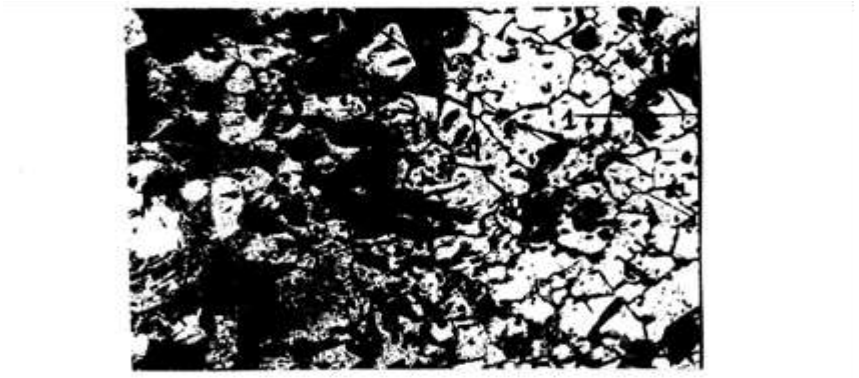
Мінераграфічний аналіз лабораторних агломератів проводився на відбитому світлі за допомогою мікроскопа **EPIGNOST-21** (×500) на аншліфах, виготовлених відповідно до загальноприйнятої методики [63]. Фіксація шліфів здійснювалася на металографічному мікроскопі **NEOPHOT-21** (×200).

Для базового агломерату (№ 16) основну структуру формують зерна оксидів заліза різної морфології та розміру: овальні, неправильної форми та ідіоморфні, представлені переважно магнетитом, рівномірно розподіленим у силікатній матриці залізо-кальцієвого складу (рис. 3.16). У складі матриці виявлено скелетні

утворення магнетиту, голчасті кристали двокальцієвого силікату та незначну кількість кальцієвого фериту. Локальне часткове або повне заміщення магнетиту гематитом обумовлено вторинним окисленням при охолодженні (рис. 3.15), причому гематит виділяється більш світлим відтінком через вищу відбивну здатність (25 % проти 19–22 % у магнетиту). Пористість агломерату невелика, а співвідношення гематит/магнетит ≈ 1:4.

Введення 1 % ОТС у шихту не спричинило суттєвих змін у мікроструктурі (агломерат № 4). Основну фазу формує магнетит із локальними псевдоморфозами гематиту, а ферит кальцію утворюється на поверхні магнетитових зерен у вигляді голчастих агрегатів (рис. 3.17).

При збільшенні частки ОТС до 3 % (агломерат № 1) якісний фазовий склад зберігся (магнетит, гематит, ферит кальцію та силікатна матриця), проте кількісне співвідношення фаз змінилося: магнетит зустрічається частіше як добре огранованні кристали різного розміру, сформовані внаслідок перетворення рудних компонентів шихти та взаємодії з паливними складовими ОТС.



а

б

Рис.3.15. Мікроструктура базового агломерату (№ 16), збільшення х200: біле - гематит; світло-сіре - магнетит; сіре - ферити кальцію, темно-сіре - скло; чорне - пори

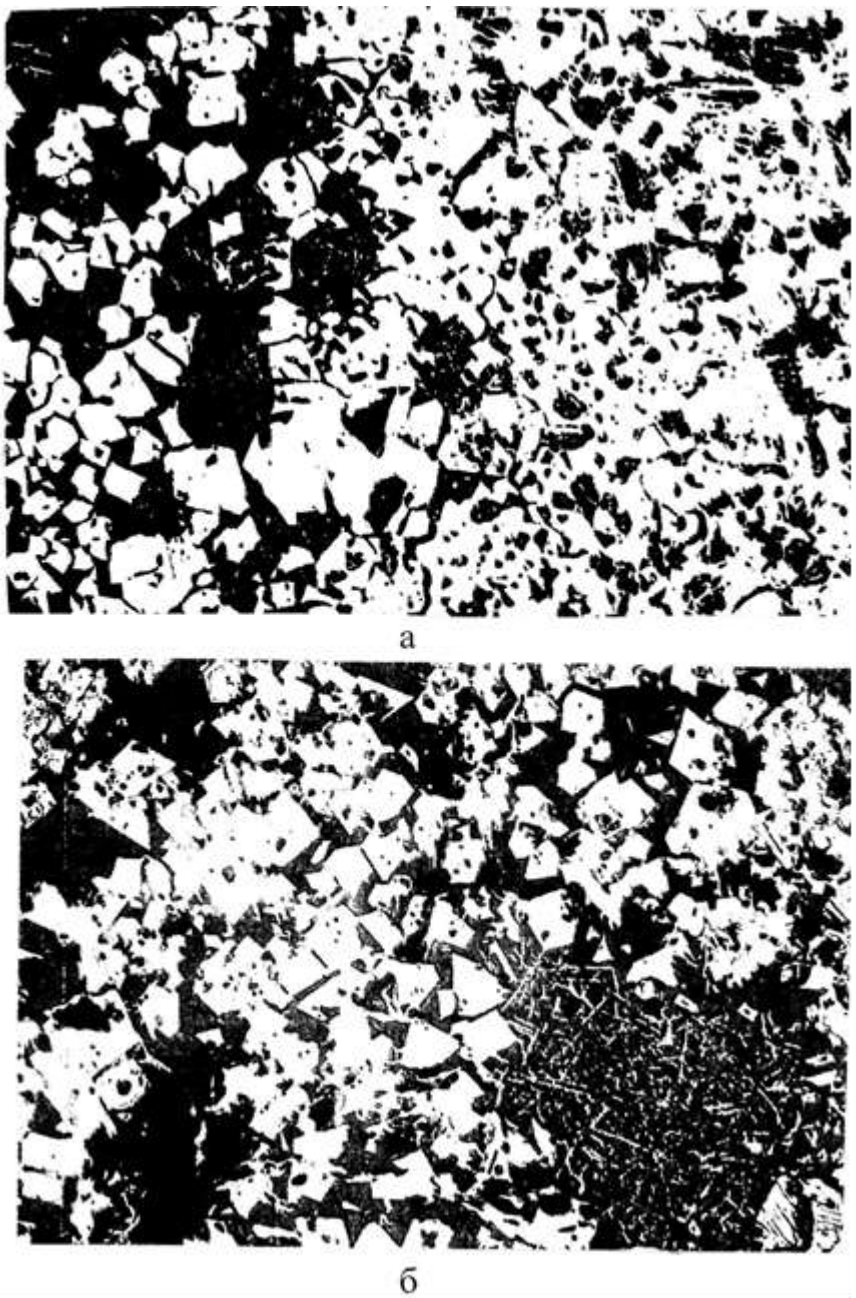
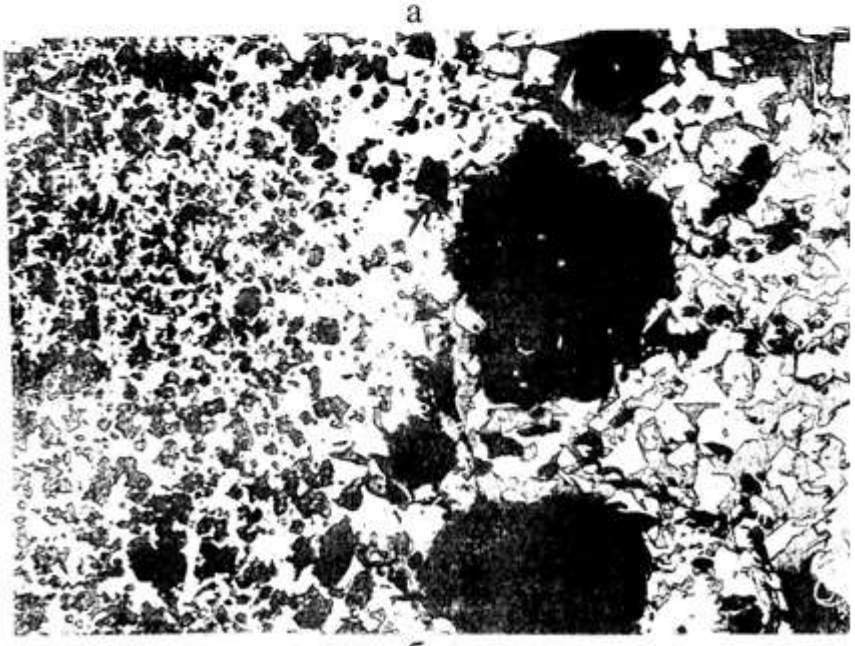


Рис.3.16. Мікроструктура агломерату № 4 (1% ОТС в шихті), збільшення х200: біле - гематит, світло-сіре - магнетит, сіре - ферити кальцію по магнетиту, темно-сіре - скло, чорне – пори

а



б

Рис.3.17. Мікроструктура агломерату № 1 (3% ОТС в шихті), збільшення х200: біле - гематит, світло-сіре - магнетит, чорне - пори, темно-сіре - розскристаллізоване скло, ліве поле б - фрагмент окалини складових шихти в пластичному стані.

Слід підкреслити, що у досліджуваній пробі агломерату кількісний вміст гематиту є істотно вищим порівняно з попередніми зразками і в окремих локальних зонах досягає 40–50 %, що свідчить про інтенсифікацію процесів окисно-фазової трансформації залізовмісних компонентів у межах реакційної зони спікання. Поряд із цим фіксується чітко виражений розвиток кальцієвих феритів за магнетитовою матрицею, що вказує на активізацію взаємодії між рудною складовою та флюсуючими компонентами шихти.

Силікатна зв’язка, в межах якої майже рівномірно дисперговані оксиди заліза, представлена переважно аморфною склоподібною фазою залізо-кальцієвого складу. Такий тип зв’язки є характерним для агломератів, сформованих за даного рівня основності, і в цілому відповідає загальноприйнятим уявленням про фазоутворення в офлюсованих аглошихтах [70, с. 99]. При цьому у значній кількості випадків спостерігаються великі ділянки силікатного скла, практично повністю пронизані скелетними утвореннями подовжених кристалів кальцієвих феритів, що свідчить про тривале існування рідкої фази та сприятливі умови для її кристалізації.

Інтенсифікація феритоутворення, ймовірно, зумовлена специфікою способу введення окалино-торф’яної суміші, зокрема її закладкою у штабель у безпосередньому контакті з погано грудкуючими компонентами шихти — подрібненим черепашником та колошниковим пилом. Така технологічна схема могла сприяти збільшенню частки CaO, що проходить через стадію формування розплаву, і, відповідно, активнішому синтезу кальцієвих феритів. Додатковим чинником є високий вміст оксиду кальцію у золі торфу, яка більш ніж на 58 % складається з CaO, що також створює термодинамічно сприятливі умови для формування феритної зв’язки. Як відомо, наявність кальцієвих феритів у зв’язці істотно підвищує відновлюваність агломерату за рахунок їх більшої реакційної здатності порівняно з силікатними фазами [71].

У мікроструктурі агломерату також виявляються поодинокі фрагменти глобул окалини (рис. 3.17, б). Невелика кількість вюститу, який має відбивну здатність, близьку до магнетиту, у процесі мінераграфічного аналізу була віднесена переважно до залишкової окалини, що не вступила в повноцінну фазову взаємодію під час спікання. Важливо підкреслити, що присутність цієї фази в даному випадку не пов’язана з утворенням важковідновного фаяліту, що має принципове значення для оцінки відновлюваності матеріалу.

Характерною особливістю досліджуваного агломерату є також підвищена пористість, представлена як дрібними, так і крупними порами, що, очевидно, є наслідком вигоряння дисперсних частинок торфу у процесі спікання. Формування такої розвиненої порової структури істотно збільшує питому поверхню контакту твердого матеріалу з відновлювальним газом, створюючи додаткові дифузійні канали для масопереносу.

Підвищений вміст гематиту в агломераті проби № 1 порівняно з базовим зразком зумовив досягнення більш високого ступеня відновлення, який становив 92,34 % (табл. 3.10). Відомо, що кількість гематиту, сформованого в агломераті, визначається тривалістю перебування матеріалу в реакційно активному температурному інтервалі 1300–500 °С, тобто часом, протягом якого зона спікання зберігає окисно-відновний характер [69]. У проведених дослідженнях цьому сприяло введення підвищених кількостей підготовленої засмальцьованої окалини, окислення якої супроводжується виділенням значної кількості тепла, що позитивно впливає на тепловий баланс та стабілізацію температурного режиму спікання.

Таким чином, комплексний аналіз результатів мікроструктурних досліджень дозволяє обґрунтовано пов’язати підвищення відновлюваності агломерату з сукупною дією таких факторів, як зростання частки гематиту, формування розвиненої пористої структури та інтенсифікація утворення кальцієвих феритів у зв’язці.

Саме поєднання цих структурно-фазових особливостей створює сприятливі умови для інтенсивного формування металевих містків у процесі відновлення та розвитку суцільного металевого каркаса, що, у свою чергу, пояснює підвищення механічної міцності відновленого агломерату.

3.4. Висновки

1. У результаті проведених експериментальних та аналітичних досліджень встановлено, що залучення торфу як функціонального компонента на стадії підготовки замасленої окалини призводить до істотної модифікації фізико-хімічних характеристик мастильних речовин, зокрема до зменшення температурного інтервалу між ініціацією їх випаровування та початком термічного займання. Зазначене явище створює сприятливі термодинамічні й кінетичні умови для більш повного та рівномірного окиснення вуглеводневих фракцій у зоні спікання, що, у свою чергу, виступає важливою передумовою стабілізації теплового режиму агломераційного процесу та підвищення ефективності використання теплової енергії палива.

2. Показано, що введення окалино-торф’яної суміші до складу агломераційної шихти супроводжується спрямованим формуванням її гранулометричної структури, що проявляється у зростанні частки структурно стійких агломератів оптимального розміру. Наслідком цього є підвищення газопроникності шару, який спікається, інтенсифікація фільтрації газового потоку та покращення умов тепло- і масообміну, що комплексно позитивно впливає на протікання фазоутворювальних і окисно-відновних реакцій у зоні високих температур.

3. Встановлено, що агломерати, синтезовані з використанням окалино-торф’яної суміші, характеризуються підвищеними показниками механічної міцності як у вихідному стані, так і після відновлювально-теплової обробки, а також зниженою інтенсивністю розупрочнення в процесі відновлення. Це свідчить про формування більш стабільної просторово-каркасної

мікроструктури, здатної ефективно протидіяти розвитку внутрішніх напружень і мікротріщин, індукованих фазовими перетвореннями.

4. Виявлено, що підвищення масової частки монооксиду заліза в агломераті, отриманому з використанням окалино-торф'яних сумішей, не супроводжується

пропорційним зниженням його відновлюваності, що суперечить традиційним уявленням про роль FeO у формуванні металургійних властивостей агломерату. Дане протиріччя пояснюється, по-перше, зростанням частки гематиту, який характеризується підвищеною термодинамічною схильністю до відновлення, а по-друге — тим, що наявний у структурі вюстит переважно локалізований у залишковій окалині, яка не вступила у повноцінну фазову взаємодію та не бере участі в утворенні важковідновних силікатних сполук типу фаяліту.

5. Аналіз впливу технологічних параметрів агломераційного спікання дозволив встановити, що в умовах лабораторного моделювання найбільш сприятливе поєднання фізико-механічних та металургійних характеристик агломерату досягається за спікання у максимально високому шарі при питомій витраті твердого палива на рівні 3,25 %, вмісті окалино-торф'яної суміші в агломераційній шихті близько 2 % та масовому співвідношенні окалини до торфу в складі ОТС, що дорівнює 80:20, що може бути рекомендовано як базовий орієнтир при розробці промислових технологічних режимів.

РОЗДІЛ 4

4. Результати дослідно-промислової апробації технології утилізації замасленої прокатної окалини в умовах аглодоменного виробничого циклу

4.1. Науково-методологічні засади формування агломераційної шихти із застосуванням окалино-торф’яних композицій

Технологічні операції з підготовки та подальшого спікання агломераційних шихт, модифікованих шляхом введення окалино-торф’яних композицій із варійованою питомою витратою, були реалізовані в умовах промислового агломераційного виробництва металургійного комбінату «Криворіжсталь» у суворій відповідності до регламентних рекомендацій, сформульованих на основі попередньо виконаного комплексу лабораторних, модельних та напівпромислових досліджень. Досліджуваний інтервал витрат окалино-торф’яної суміші охоплював значення від 7 кг·т$^{-1}$ готового агломерату за масового співвідношення компонентів «замаслена окалина : торф» = 95 : 5 до 11–16 кг·т$^{-1}$ агломерату при співвідношенні 80 : 20, що забезпечувало можливість багатофакторної оцінки впливу як кількісних, так і якісних параметрів добавки на перебіг агломераційного процесу.

Попередню підготовку замасленої окалини, яка розглядалася як вторинна залізовмісна сировина з підвищеним вмістом органічних домішок, здійснювали на горизонтальному відстійнику типу ГО-4 (див. рис. 2.1), що використовувався як технологічна платформа для формування окалино-торф’яної композиції з регламентованою просторовою та компонентною структурою.

У заздалегідь підготовлену секцію відстійника за допомогою грейферного крана виконували укладання активованого торфу в підошовний шар у кількості чотирьох грейферних завантажень із рівномірним розподілом по всій площі секції, що створювало передумови для формування стабільної основи штабеля. Подальше нарощування масиву здійснювали шляхом пошарового укладання із суворим чергуванням шарів активованого торфу та замасленої окалини. При цьому масове співвідношення зазначених компонентів у сформованій суміші підтримували на рівні 4 : 1, що відповідало приблизно рівному співвідношенню за об’ємом і забезпечувало оптимальні умови для розвитку міжфазних контактів.

Загальна кількість сформованих шарів у межах однієї секції змінювалася від 12 до 17 залежно від фактичної кількості залученої сировини. Сформовану окалино-торф’яну композицію витримували на відстійнику ГО-4 протягом 5–10 діб, упродовж яких відбувалися процеси фізико-хімічної взаємодії компонентів, зокрема адсорбційно-дифузійні явища та часткова дестабілізація вуглеводневих фракцій. Після завершення етапу витримування суміш через гомогенізатор-змішувач спрямовували на завантаження в залізничні вагони для подальшого транспортування.

Підготовлену окалино-торф’яну суміш відправляли на аглофабрику партіями по вісім вагонів, де її розвантажували вагоноперекидачем у приймальну траншею рудного двору з рівномірним розподілом по всій довжині фронту залізорудного штабеля. Така схема укладання забезпечувала стабілізацію співвідношення окалино-торф’яної добавки з компонентами агломераційної шихти, що характеризуються незадовільними гранулометричними властивостями та низькою здатністю до огрудкування, зокрема колошниковим пилом, відсівом агломерату, вапняком-черепашником і вапняним пилом.

Подальше формування залізорудного штабеля здійснювали відповідно до вимог чинної технологічної інструкції ТІ 228-АП-56-2003 «Виробництво офлюсованого доменного агломерату», що регламентує параметри штабелювання, послідовність укладання та режими усереднення сировини. Сумарна тривалість безпосереднього контакту замасленої окалини з активованим торфом на всіх етапах підготовки, витримування та штабелювання становила 20–40 діб, що створювало сприятливі умови для поглибленої фізико-хімічної трансформації органічних домішок.

Дослідно-промислову перевірку розробленої технологічної схеми підготовки замасленої окалини та її подальшого використання в агломераційному процесі здійснювали в період з 09.09.2004 р. по 10.11.2004 р., при цьому як базовий для порівняльного аналізу було прийнято період стабільної роботи аглофабрики з 18.06.2004 р. по 28.06.2004 р. Загальний період випробувань було структуровано на чотири послідовні етапи. На першому етапі (09.09–19.09.2004 р.) у склад агломераційної шихти вводили суміш замасленої окалини та торфу у співвідношенні 95 : 5 у кількості 7 кг·т$^{-1}$ агломерату. На другому (02.10–14.10.2004 р.), третьому (15.10–28.10.2004 р.) та четвертому (29.10–10.11.2004 р.) етапах застосовували попередньо підготовлену окалино-торф’яну композицію зі співвідношенням компонентів 80 : 20 у кількостях відповідно 13, 16 та 16 кг·т$^{-1}$ агломерату.

У процесі дослідно-промислових випробувань здійснювали комплексний багатопараметричний контроль якості підготовленої окалино-торф’яної суміші, аналізували вплив її складу та питомої витрати на структурно-гранулометричні характеристики агломераційної шихти, інтенсивність і стабільність процесів огрудкування, основні техніко-економічні показники аглопроцесу, а також на фізико-механічні та металургійні властивості отриманого агломерату. Контроль речовинного й хімічного складу агломераційної шихти у випробувальний період здійснювали відповідно до вимог технологічної інструкції І-228-АП, Д1, Д2-45-2001 «Відбір і підготовка проб для визначення хімічного складу і механічних

характеристик шихтових матеріалів і продукції в цехах аглодоменного переділу металургійного виробництва».

Для кількісної оцінки ефективності деструкції та вигоряння масел у процесі спікання визначали їх початковий вміст у вихідних компонентах агломераційної шихти, після чого розраховували сумарний прихід органічних домішок у шихту. Узагальнені результати відповідних експериментальних визначень і розрахункових оцінок наведені в таблицях 4.1–4.4.

Таблиця 4.1

Речовий склад агломераційної шихти

Матеріал	Удільна витрата, кг/т				
	Базовий період	Дослідний період			
		1	2	3	4
Аглоруда	98	203	204	196	201
Концентрат	451	420	420	460	414
Шламова суміш + торф активований	154+21	150+17	150+17	140+16	140+17
Марганцевовмісний шлак	10	11	10	6	9
Колошниковий пил	21	20	22	17	24
Окалина первинна	75	59	63	46	61
Окалино-торфяна суміш	-	7	13	16	16
Відсів агломерата і окатишів	265	187	184	173	189
Шлак збагачений	28	35	34	33	32
Вапно	27	23	23	20	20
Вапняно-вапняковий пил	12	11	7	7	10
Вапняк	19	22	28	38	27
Ракушняк	13	43	39	35	37
Коксовий дрібязок	36	38	39	39	40
Всього	1230	1246	1253	1242	1237

Таблиця 4.2

Склад масел в компонентах шихти

Матеріали	Склад масел, %
Аглоруда	0,25
Концентрат	0,05
Шламова суміш	0,65
Відсів агломерата і окатишів	Ні
Колошниковий пил	0,64
Окалина первинна	0,3
Окалина замасленна	20,0
Окалино-торфяна суміш	14,0
Марганцевовмісний шлак	0,5
Збагачений шлак	1,0
Вапняк флюсовий, фракція 0-5 мм	0,4
Торф активований	0,27
Коксовий дрібязок	0,4

Таблиця 4.3

Прихід масел с компонентами агломераційної шихти

Матеріал	Прихід масел с компонентом шихти,кг/т				
	Базовий період	Дослідний період			
		1	2	3	4
Аглоруда	0,245	0,5075	0,51	0,49	0,5025
Концентрат	0,2255	0,21	0,21	0,23	0,207
Шламова суміш	1,001	0,975	0,975	0,91	0,91
Марганцевовмісний шлак	0,05	0,055	0,05	0,03	0,045
Колошниковий пил	0,1344	0,128	0,1408	0,1088	0,1536
Окалина первинна	0,225	0,177	0,189	0,138	0,183
Окалино-торфяная суміш	0	0,98	1,82	2,1	2,24
Відсів агломерата і окатишів	0	0	0	0	0
Шлак збагачений	0,28	0,35	0,34	0,33	0,32
Вапно	0	0	0	0	0
Вапняково-вапняний пил	0	0	0	0	0
Вапняк	0,076	0,088	0,112	0,152	0,108

Ракушняк	0	0	0	0	0
Торф активований	0,0567	0,0459	0,0459	0,0432	0,0459
Коксовий дрібязок	0,144	0,152	0,156	0,156	0,16
Всього	2,438	3,668	4,549	4,688	4,875

Таблиця 4.4

Хімічний склвд агломераційної шихти

Перід		Склад, %					
		$Fe_{общ}$	SiO_2	Mn	CaO	W	C
Базовий		52,1	8,33	0,32	9,25	8,0	2,5
Дослідні	1	52,9	8,0	0,29	9,04	8,55	2,3
	2	53,89	7,92	0,30	8,75	8,75	2,2
	3	54,57	7,91	0,26	8,43	9,14	2,2
	4	54,79	7,95	0,30	8,27	8,89	2,2

Комплексний багаторівневий аналіз компонентного складу досліджуваної агломераційної шихти, доповнений системною оцінкою її фізико-хімічних і технологічних характеристик, засвідчив, що інкорпорація окалино-торф'яної суміші у кількостях, які не перевищують 16 кг·т$^{-1}$ готового агломерату, детермінує статистично відтворюване зростання масової частки загального заліза в шихтовій системі. Разом із тим зазначений позитивний ефект супроводжується супутнім збільшенням сумарного вмісту органічних домішок нафтового походження, виражених у перерахунку на масла, з 2,438 до 4,875 кг·т$^{-1}$ агломерату, тобто практично дворазовим підвищенням, що обумовлює необхідність комплексного урахування як металургійних, так і екологічно-технологічних аспектів реалізації запропонованого підходу.

Принципово важливим є те, що застосування окалино-торф'яної суміші як функціональної добавки до агломераційної шихти забезпечує можливість цілеспрямованого зниження питомих витрат традиційного залізорудного концентрату за умови одночасного підвищення залізовмісності шихти, що в контексті сучасних концепцій ресурсозбереження та раціонального використання вторинних матеріалів слід розглядати як істотну технологічну перевагу.

Водночас компонентний і хімічний склад агломераційної шихти протягом усього періоду експериментальних досліджень не характеризувався сталістю, що було зумовлено нерівномірністю постачання вихідної сировини, а також природними коливаннями хімічного, фазового та гранулометричного складу окремих шихтових компонентів. У зв'язку з цим зафіксовані у дослідні періоди зміни хімічного складу агломераційної шихти, узагальнені в таблиці 4.4, не можуть бути інтерпретовані як прямий наслідок введення окалино-торф'яної суміші, оскільки вони є результатом суперпозиції впливів кількох взаємопов'язаних факторів, що діють одночасно.

З метою елімінування впливу фонових коливань складу шихтових матеріалів і кількісного виокремлення ефекту, обумовленого саме застосуванням окалино-торф'яної суміші, спільно з аглодоменною лабораторією металургійного комбінату «Криворіжсталь» було виконано комплекс детермінованих матеріальних і компонентних балансових розрахунків. Отримані результати дали змогу ідентифікувати та кількісно описати позитивний технологічний ефект, що проявляється у зменшенні питомих витрат шихтових матеріалів і зміні вмісту заліза в агломераті як функції витрати окалино-торф'яної суміші за фіксованого масового співвідношення «окалина : торф» = 80 : 20.

Розрахункові процедури були реалізовані для агломерату з основністю CaO/SiO_2 = 1,15, що відповідає типовим параметрам промислового

агломераційного процесу та забезпечує коректність міжперіодного і міжваріантного

порівняльного аналізу. Узагальнені результати балансових оцінок, а також встановлені закономірності зміни економії шихтових матеріалів і вмісту заліза в агломераті залежно від питомої витрати окалино-торф'яної суміші, наведені в графічній формі на рис. 4.1 та рис. 4.2, що дозволяє наочно інтерпретувати виявлені тенденції та забезпечує їх зіставлення з даними аналогічних досліджень, представлених у міжнародній науково-технічній літературі.

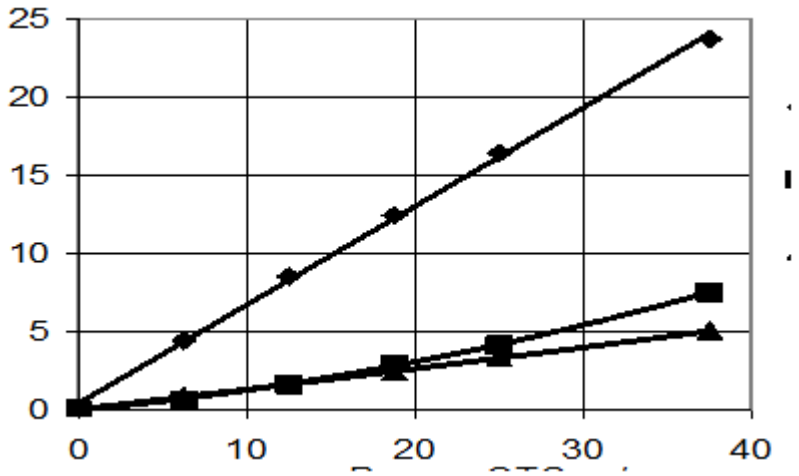


Рис.4.1. Економія шихтових матеріалів в результаті використання ОТС

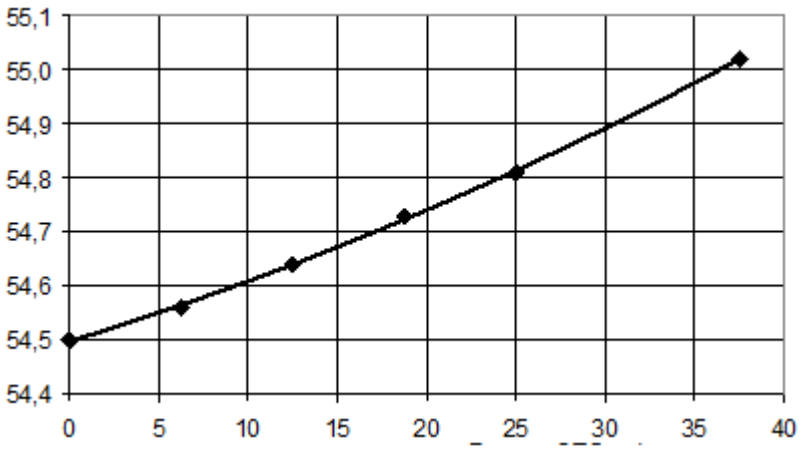


Рис.4.2. Зміна складу заліза в агломераті в результаті використання ОТС

Точковими маркерами на графіках відображено дискретні розрахункові значення досліджуваних параметрів, тоді як суцільні лінії відповідають кривим їх узагальненої графічної інтерпретації, отриманим шляхом статистично коректної

апроксимації експериментально-розрахункових даних. Зазначені апроксимувальні залежності описуються наведеними нижче рівняннями, які характеризуються статистично значущими параметрами та адекватно відтворюють виявлені закономірності зміни відповідних показників у досліджуваному інтервалі варіювання вихідних факторів.

- для залізорудного концентрату

$$E_{ж.к.} = 0{,}6309 \cdot Q_{ОТС} + 0{,}3857, \text{ кг/т агломерату} \quad (4.1)$$

- для вапняку

$$E_{изв} = 0{,}0027 \cdot Q_{ОТС}^2 + 0{,}1008 \cdot Q_{ОТС} - 0{,}049, \text{ кг/т агломерату} \quad (4.2)$$

- для коксової дрібниці

$$E_{к.м.} = 0{,}0002 \cdot Q_{ОТС}^2 + 0{,}1255 \cdot Q_{ОТС} + 0{,}0002, \text{ кг/т агломерату} \quad (4.3)$$

де $Q_{ОТС}$ - питома витрата окалино-торф'яної суміші, кг / т агломерату.

Для вмісту заліза в агломерате отримана наступна залежність:

$$\Delta_{Fe} = 0{,}0001 \cdot Q_{ОТС}^2 + 0{,}0101 \cdot Q_{ОТС} + 54{,}498,\% \quad (4.4)$$

Інтегральний розгляд аналітичних залежностей, формалізованих у вигляді рівнянь (4.1)–(4.4), у сукупності з детальним аналізом графічних матеріалів, наведених на рис. 4.1 та рис. 4.2, створює методологічне підґрунтя для кількісно обґрунтованої інтерпретації характеру та інтенсивності впливу інкорпорації окалино-торф’яної суміші на ключові витратні параметри агломераційного процесу, а також на зміну масової частки загального заліза в структурі готового агломерату. Зокрема, встановлено, що введення окалино-торф’яної суміші у кількості 16 кг·т$^{-1}$ агломерату супроводжується формуванням вираженого ресурсозберігаючого ефекту, який проявляється у скороченні питомих витрат залізорудного концентрату на 10,48 кг·т$^{-1}$, вапнякової складової — на 2,25 кг·т$^{-1}$ та паливного компонента — на 2,06 кг·т$^{-1}$.

При цьому відзначається одночасне зростання масової частки заліза в агломераті на 0,416 %, що з металургійної точки зору свідчить про підвищення якісних характеристик кінцевого продукту та його технологічної привабливості для подальшого доменного переділу.

Визначення показників якості як підготовленої окалино-торф'яної суміші, так і агломерату, отриманого за результатами дослідно-промислових випробувань, здійснювали із суворим дотриманням вимог комплексу чинних нормативно-технічних документів, що забезпечувало метрологічну коректність, відтворюваність та порівнюваність отриманих експериментальних даних із результатами, наведеними у вітчизняних і міжнародних дослідженнях аналогічної спрямованості.

Гранулометричний склад агломераційної шихти після завершення стадії огрудкування в окремі періоди проведення дослідно-промислових випробувань узагальнено у таблиці 4.5, тоді як відповідну візуалізацію отриманих закономірностей представлено на рис. 4.3. Аналіз наведених даних дозволяє констатувати, що зі зростанням частки окалино-торф'яної суміші у складі аглошихти відбувається закономірне зменшення вмісту дрібнодисперсної фракції з розміром частинок 0–3 мм, що супроводжується паралельним зростанням частки фракції 3–5 мм. Така трансформація гранулометричного спектра є індикатором інтенсифікації процесів огрудкування та формування більш сприятливої, з технологічної точки зору, структури шихти. При цьому у другому–четвертому експериментальних періодах, і особливо на третьому етапі досліджень, гранулометричний склад агломераційної шихти характеризується підвищеним рівнем оптимальності порівняно з першим періодом, що з високою ймовірністю зумовлено реалізацією раціонального масового співвідношення компонентів окалино-торф'яної суміші «окалина : торф» = 80 : 20 у зазначених інтервалах випробувань, яке забезпечує найбільш ефективне поєднання адгезійних, капілярних і структуроутворювальних механізмів огрудкування.

Таблиця 4.5

Гранулометричний склад агломераційної шихти

Період		Склад фракції, %			
		+ 10 мм	10-5 мм	5-3 мм	3-0 мм
Базовий		14,7	14,0	23,1	48,2
Дослідні	1	10,1	11,3	24,4	54,2
	2	19,1	11,9	22,8	46,2
	3	14,7	16,3	32,7	36,3
	4	12,3	13,3	33,5	40,9

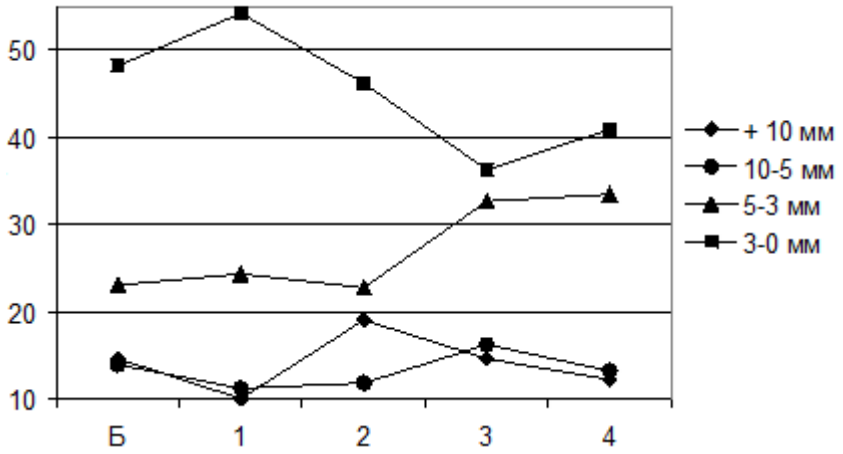


Рис.4.3. Фракційний склад аглосмесі в різні періоди випробувань

Порівняльний аналіз технологічних режимів експлуатації агломераційних машин у базовому та дослідних періодах засвідчив їхню параметричну квазістабільність, оскільки ключові керовані величини — швидкість руху аглострічки, висота шару шихти, розрідження під колосниковою решіткою, а також температурно-газодинамічні характеристики зони спікання — упродовж усього циклу дослідно-промислових випробувань залишалися в межах регламентних допусків і не зазнавали принципових коригувань. За таких умов зафіксоване зростання питомої продуктивності агломераційних машин, узагальнене у табл. 4.6, може бути обґрунтовано інтерпретоване як наслідок структурно-речовинної модифікації агломераційної шихти, зумовленої

введенням окалино-торф’яної суміші, а не як результат зміни апаратурно-технологічних параметрів.

4.2. Техніко-економічна ефективність процесу спікання та еволюція якості агломерату за умов введення окалино-торф’яної суміші до складу аглошихти

Функціональну залежність питомої продуктивності агломераційного процесу від вмісту окалино-торф’яної суміші в агломераційній шихті відображено на рис. 4.4, що дозволяє здійснити детальний аналіз впливу досліджуваного чинника на кінетику спікання та загальну інтенсивність перебігу процесу. Характер цієї залежності має чітко виражену нелінійну, близьку до екстремальної, форму, що свідчить про наявність оптимального інтервалу дозування окалино-торф’яної суміші.

Зокрема, у другому дослідному періоді, за умови підвищення питомої витрати окалино-торф’яної суміші до 13 кг·т$^{-1}$ агломерату, було зафіксовано істотне — на рівні до 5 % — зростання питомої продуктивності процесу спікання. Такий ефект, з високим ступенем імовірності, обумовлений синергічною дією кількох взаємопов’язаних механізмів, а саме: покращенням гранулометричної структури шихти, інтенсифікацією процесів огрудкування, оптимізацією умов тепло- і масоперенесення в зоні горіння та формуванням більш рівномірного температурного поля в шарі, що у сукупності сприяє підвищенню ефективності використання теплового потенціалу палива.

Водночас подальше збільшення питомої витрати окалино-торф’яної суміші до 16 кг·т$^{-1}$ агломерату, реалізоване у третьому та четвертому дослідних періодах, супроводжувалося помітним зниженням питомої продуктивності агломераційного процесу. Зазначена тенденція може бути пояснена зміщенням фізико-хімічної рівноваги процесу спікання внаслідок відхилень компонентного та хімічного складу агломераційної шихти від оптимальних значень (табл. 4.1), а також істотним впливом зовнішніх температурних факторів. Зокрема, у період проведення четвертого етапу досліджень спостерігалося значне зниження

температури навколишнього середовища, що призвело до збільшення теплових втрат і, як наслідок, зумовило необхідність незначного підвищення питомої витрати коксової дрібниці з метою часткової компенсації дефіциту теплової енергії в зоні спікання.

Результати хімічного аналізу агломерату, наведені в табл. 4.7, демонструють монотонне зростання масової частки заліза зі збільшенням вмісту окалино-торф'яної суміші в аглошихті, що підтверджує доцільність її використання як ефективного джерела вторинної залізовмісної сировини. Паралельно з цим фіксується помірне підвищення основності агломерату (CaO/SiO_2) з 1,11 до 1,14, що перебуває в межах технологічно припустимого інтервалу та не чинить негативного впливу на подальший доменний переділ.

Оцінка фізико-механічних характеристик агломерату засвідчила, що введення окалино-торф'яної суміші не призводить до деградації його експлуатаційних властивостей. Навпаки, спостерігається певна тенденція до підвищення показника міцності на удар, тоді як показники стирання та вміст дрібних фракцій у скіповому агломераті залишаються практично незмінними, що підтверджується експериментальними даними табл. 4.8. Це свідчить про збереження стабільної якості готового агломерату навіть за умов варіювання складу агломераційної шихти.

Узагальнюючи наведені результати, можна констатувати, що введення окалино-торф'яної суміші до складу агломераційної шихти в оптимальному інтервалі витрат створює передумови для підвищення техніко-економічної ефективності процесу спікання за рахунок зростання питомої продуктивності, раціональнішого використання шихтових і паливно-енергетичних ресурсів та одночасного покращення або збереження на належному рівні якісних характеристик агломерату, що повністю узгоджується з сучасними науковими уявленнями та тенденціями розвитку ресурсоефективних і екологічно орієнтованих технологій у галузі металургії та матеріалознавства.

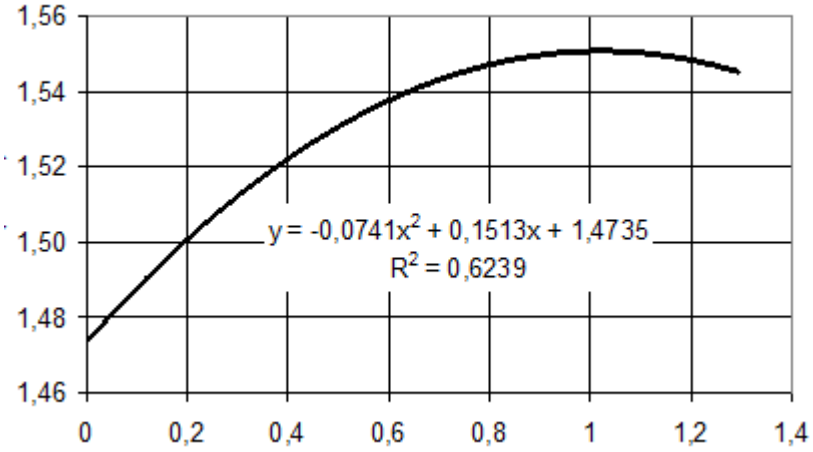


Рис.4.4 Вплив вмісту в шихті окалино-торф'яної суміші на питому продуктивність агломашини

У ході проведення дослідно-промислових випробувань зафіксовано виражене підвищення питомої продуктивності агломераційного процесу — до 5 % — у другому періоді за умови збільшення питомої витрати окалино-торф’яної суміші до 13 кг·т$^{-1}$ агломерату. Проте подальше нарощування питомої витрати ОТС до 16 кг·т$^{-1}$ у третьому та четвертому періодах супроводжувалося помітним зниженням продуктивності, що, з високою ймовірністю, обумовлено зміною фізико-хімічних умов спікання, викликаною відхиленнями компонентного та хімічного складу аглошихти (табл. 4.1), а також суттєвим зниженням температури навколишнього середовища. Внаслідок останнього у четвертому періоді спостерігалося необхідне незначне підвищення питомої витрати коксової дрібниці для компенсації дефіциту теплової енергії в зоні спікання.

Одночасно аналіз даних щодо хімічного складу агломерату (табл. 4.7) демонструє монотонне збільшення масової частки заліза з підвищенням вмісту окалино-торф’яної суміші в аглошихті, що свідчить про ефективність введення ОТС як вторинного джерела залізовмісної сировини та його позитивний вплив на металургійні характеристики кінцевого продукту.

Таблиця 4.7

Хімічний склад агломерата

Період		Хімічний склад агломерата, %				CaO/SiO_2
		Fe	FeO	Mn	MgO	
Базовий		54,52	15,87	0,33	1,37	1,11
Дослідні	1	54,73	15,51	0,34	1,49	1,14
	2	55,02	15,88	0,33	1,48	1,14
	3	55,25	15,80	0,32	1,47	1,14
	4	55,24	16,05	0,33	1,45	1,14

Слід підкреслити, що внаслідок введення окалино-торф'яної суміші відбулося помірне підвищення основності агломерату (CaO/SiO_2) з 1,11 до 1,14, що знаходиться в межах технологічно допустимого діапазону і не створює негативних наслідків для подальшого доменного переділу. Паралельно відзначається незначне підвищення міцності на удар, що свідчить про покращення механічної стійкості продукту, тоді як показники стирання та частка дрібних фракцій у скіповому агломераті залишаються практично незмінними (табл. 4.8), що підтверджує стабільність гранулометричної та механічної структури агломерату за умов застосування досліджуваної суміші.

Таблиця 4.8

Прочностні властивості агломерата

Період		Прочність на удар, фр +5 мм,%	Прочність на истирание, фр –0,5мм,%	Розсів агломерата під бункерами доменного цеха №1, фр. -5 мм, %
Базовий		68,0	5,7	20,40
Дослідні	1	68,1	5,6	20,37
	2	68,2	5,6	20,42
	3	68,3	5,7	20,44
	4	68,4	5,6	20,43

У третьому дослідному періоді для окремих проб промислового агломерату проведено комплексні дослідження відновлюваності та мінерографічного складу за методологією, викладеною в Розділі 3. Проби агломерату були отримані в різні

часові моменти протягом зазначеного періоду спікання, що дозволяє врахувати можливі варіації фізико-хімічних параметрів у промислових умовах. Дані щодо хімічного складу та відновлюваності зазначених агломератів узагальнені у таблиці 4.9, що забезпечує підґрунтя для кількісної оцінки впливу варіацій складу шихти та технологічних умов на кінцеві металургійні властивості продукту.

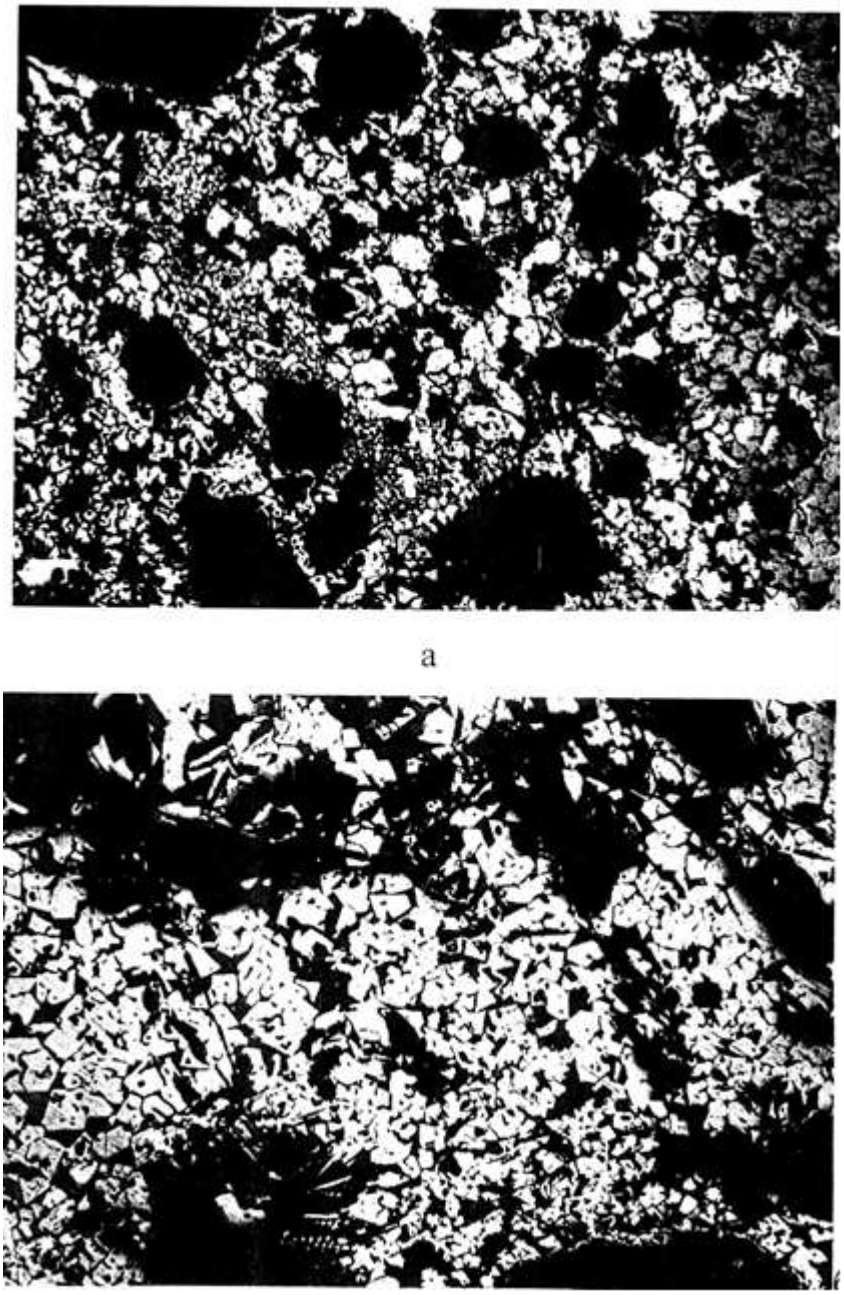
Таблиця 4.9.

Хімічний склад і відновлюваність проб промислових агломератів (расход 80:20 ОТС - 16 кг/т агломерата)

№ проби	Масовий склад елементів (об'єднань), %							R,%
	$Fe_{общ}$	FeO	SiO_2	Mn	CaO	MgO	Al_2O_3	
244	54,9	12,0	10,5	0,43	11,4	1,69	1,48	96,36
245	53,9	10,4	9,88	0,49	11,2	1,53	1,36	88,20
246	54,8	12,1	9,09	0,30	10,5	1,29	1,21	86,66

Агломерат усіх досліджуваних проб характеризується високим рівнем відновлюваності, що свідчить про ефективність технологічного процесу спікання та належну якість компонентів шихти. Відмінності у величинах досягнутого ступеня відновлення можуть бути пояснені випадковими і випадково-варіативними чинниками, такими як локалізація місць відбору проб у загальному об’ємі агломерату, незначні відхилення режимів спікання, а також неповнота протікання металургійних реакцій у рідких фазах, що зумовлює локальні дисперсійні та фазові неоднорідності.

За результатами мінерографічного аналізу встановлено, що структура та фазовий склад досліджуваних проб агломерату відповідають типовим характеристикам офлюсованих промислових агломератів. Зокрема, проба № 244 відзначається високим ступенем тріщинуватості, наявністю численних макро- та мікропор (рис. 4.5) та складається переважно з магнетиту, вторинного гематиту і незначної кількості кальцієвих феритів. Основну масу кристалічних фаз становить магнетит, зерна якого мають характерну світло-сіру забарвлену форму та рівномірно диспергувані в силікатній скляній матриці, що забезпечує стійку структурно-фазову організацію та сприятливі умови для високої відновлюваності заліза в наступних стадіях доменного відновлення.



а

Рис.4.5. Мікроструктура промислового агломерату № 244 (збільшення х200): біле - гематит, світло-сіре - магнетит, сіре - ферити кальцію (праве поле рис.4.5, а), темно-сіре - скло, чорне - пори

У досліджуваному зразку фіксується значна кількість вторинного гематиту (рис. 4.5, б), морфологічні контури якого майже повністю відтворюють первинну форму зерен магнетиту; при мінералогічному аналізі він чітко ідентифікується за інтенсивнішим світло-білим забарвленням у відбитому світлі. Найбільша концентрація зазначеної фази характерна для зон, приурочених до крупних пор, а також до периферійних ділянок окремих фрагментів агломерату.

Кількісне співвідношення між гематитом і магнетитом варіює в досить широких межах: в одних мікрообластях гематит домінує, тоді як в інших займає підлегле, другорядне положення.

Епізодично у межах проби виявляються локальні ділянки, мінералогічний склад яких визначається переважним розвитком феритів кальцію. Зазначені новоутворення формуються по магнетиту та гематиту, частково або повністю їх заміщуючи, при цьому зберігаючи реліктові обриси первинних зерен (рис. 4.6, а). В окремих випадках ферити кальцію представлені у вигляді голчастих кристалів із високим ступенем щільності упаковки (рис. 4.6, б); міжкристалічний простір у таких агрегатах заповнений склоподібною фазою. Середній вміст скла становить близько 10 %. Як правило, скло характеризується оптичною однорідністю та відсутністю видимих включень, однак у відносно великих скляних скупченнях («озерах») інколи спостерігаються дендритоподібні виділення силікатних фаз. Саме для цього різновиду агломерату встановлено максимальні показники відновлюваності, які досягають значення R = 96 %.

Агломерат № 245 вирізняється істотно меншою однорідністю як за мінеральним складом, так і за структурно-текстурними ознаками. Порівняно з агломератом попередньої проби, він характеризується підвищеним вмістом феритних фаз, представлених переважно двома різновидами, морфологічно та мінералогічно подібними до описаних вище. Зазначені ферити часто формують великі мономінеральні поля. Крім того, у приповерхневих зонах фрагментів і навколо крупних пор широко розвинені мономінеральні скупчення вторинного гематиту, складені щільно зростками кристалів, між якими наявні незначні прошарки силікатного скла.

У межах цієї проби також ідентифіковано прошарок залізистого кварциту, що інтерпретується як незасвоєна рудна складова. Він представлений чергуванням смуг первинного гематиту та кварциту, останній при цьому інтенсивно пігментований тонкодисперсним гематитовим пилом (рис. 4.7, а).

Первинний гематит має вигляд скритокристалічної, високопористої та сильно тріщинуватої маси, внутрішній простір якої заповнений найдрібнішими включеннями кварцитової речовини, представленої сукупністю зерен інтенсивно розтрісканого кварцу, який зазнав кристобалітизації. Зазначені кварцові агрегати характеризуються розвиненою системою мікротріщин і вторинних меж зерен, що свідчить про глибоку термічну та фазову перебудову мінеральної матриці в процесі агломерації.

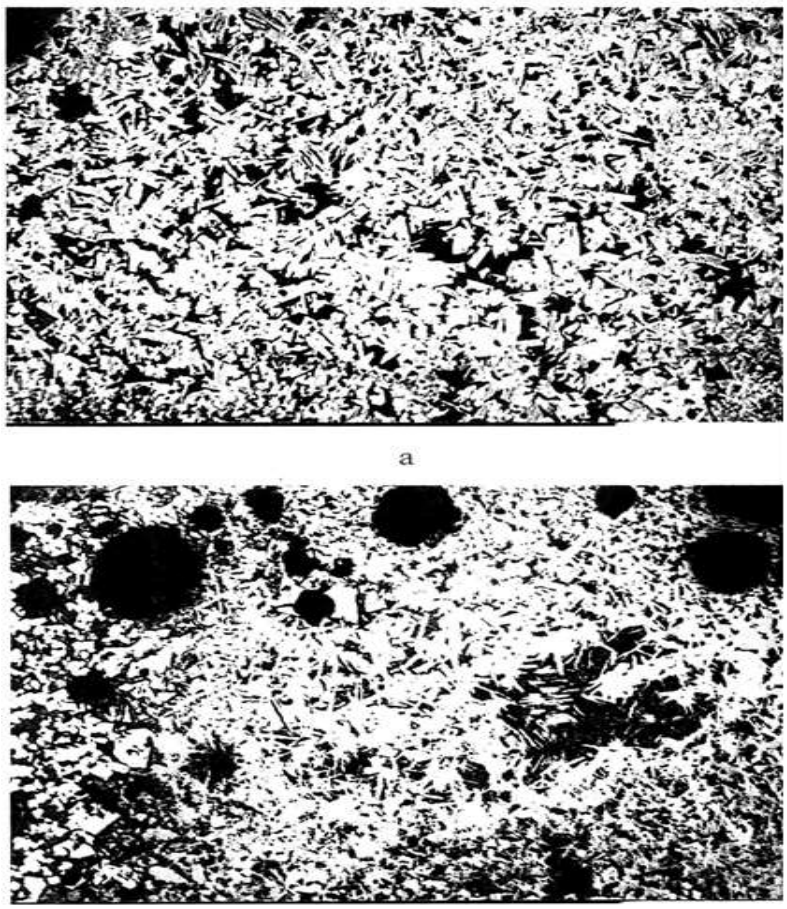


Рис.4.6. Мікроструктура промислового агломерату (збільшення х250): а - виділення феритів Са по магнетиту; б - мономінеральні поля феритів Са голчастого типу; біле - гематит, світло-сіра - магнетит, сіра - ферити Са, чорне - пори

а

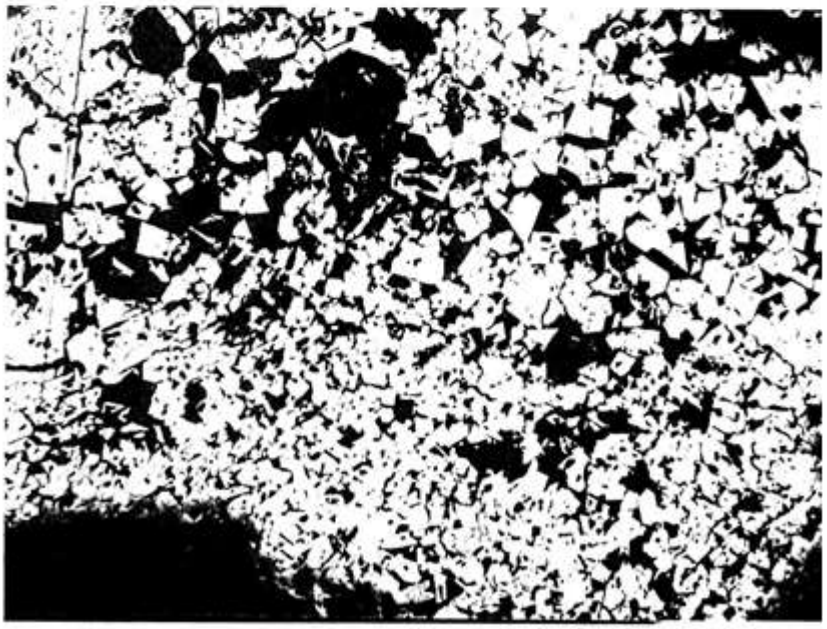


Рис.4.7. Мікроструктура промислового агломерату (збільшення х250): а - ділянка незасвоєний руди (темна смуга - кварцит); б - "магнетитовий" ділянку структури агломерату

Мікроструктурна організація агломерату № 246 (рис. 4.7, б) у цілому корелює з характеристиками попередньо дослідженого зразка. Його структурний каркас сформований переважно ідіоморфними кристалами магнетиту, які зцементовані силікатною склоподібною фазою; по поверхні та в об’ємі

магнетитових зерен простежується розвиток вторинного гематиту як результат окиснювальних перетворень. У мінеральному складі чітко ідентифікуються кальцієві ферити двох різновидів. Характерною особливістю є наявність протяжних полів голчастих агрегатів феритів кальцію з високим ступенем щільності упаковки, міжкристалічний простір яких заповнений силікатним склом і частково фазами двокальцієвого силікату. Порівняно з раніше проаналізованими пробами, у даному агломераті зафіксовано підвищену частку склоподібної фази, що вказує на інтенсифікацію рідкофазних процесів під час спікання.

Аналогічно результатам лабораторних досліджень, агломерат, отриманий із застосуванням окалино-торф'яних сумішей у промислових умовах, також вирізняється зростанням вмісту кальцієвих феритів, що свідчить про сталість виявлених закономірностей формування фазового складу при масштабуванні технологічного процесу.

4.3. Дослідження складу відхідних газів при використанні окалино-торф'яних сумішей

З метою оцінювання впливу введення до агломераційної шихти замасленої окалини у вигляді окалино-торф'яних сумішей на повноту згоряння масляних компонентів у промислових умовах було виконано комплекс експериментальних досліджень параметрів відхідних газів уздовж тракту агломераційного процесу на агломашині № 5 аглоцеху «Криворіжсталі». Додатково на агломашині № 4 апробовано технічні рішення для допалювання парів масел у вакуум-камерах відповідно до способу [69], розробленого за участю автора.

Вимірювальний комплекс включав інжекційний відсмоктувальний пристрій із рівнем розрідження до 30 кПа, а також вузли контролю витрати газового потоку, його тиску та температури. Для відбору і збереження проб газу застосовувалися аспіраційні судини. Очищення газової суміші від пилу, парів масел і вологи здійснювалося у кварцових алонжах, де на комбінованих насадках

реалізовувалося роздільне осадження та накопичення твердих частинок, масляного конденсату і вологи.

Аналіз експериментальних результатів, узагальнених на рис. 4.8, свідчить, що максимум інтенсивності виділення масляних компонентів просторово зміщений відносно максимуму виділення вологи у бік хвостової частини агломераційної машини та хронологічно передує етапу істотного зростання температури відхідних газів у процесі розвитку спікання.

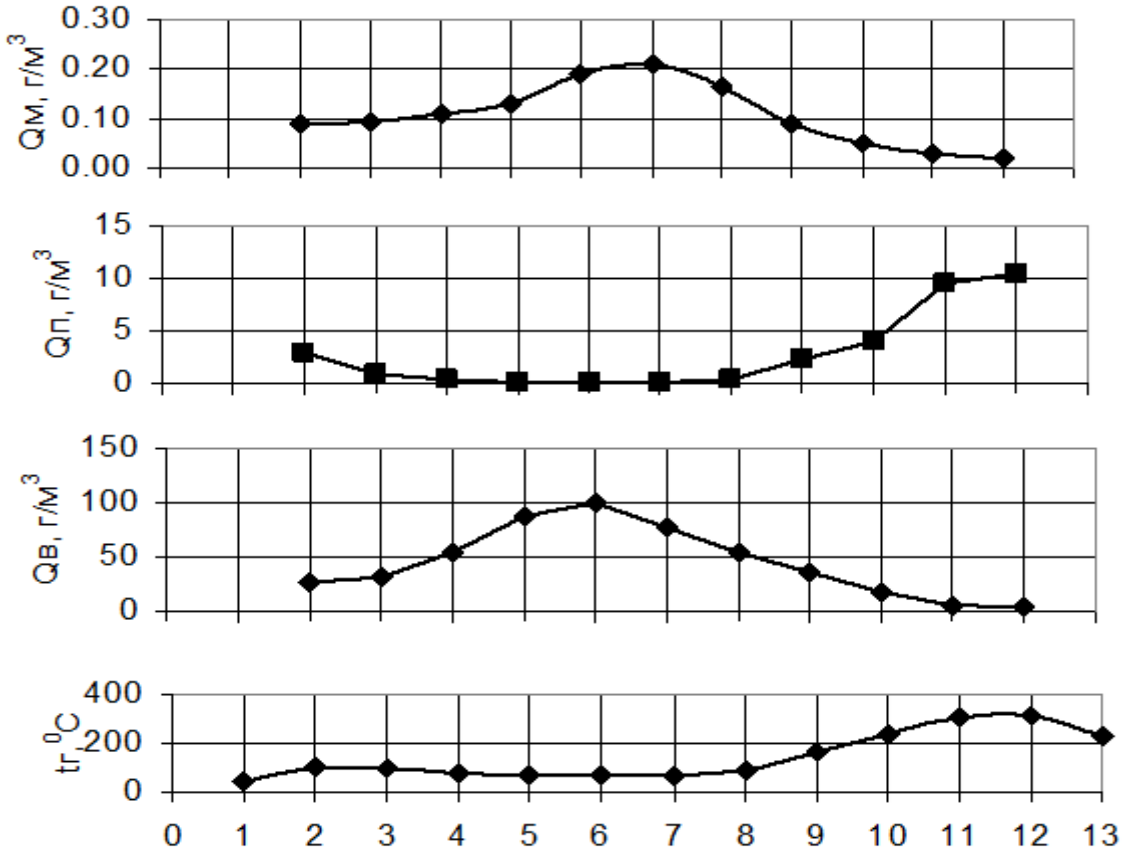


Рис.4.8. Параметри газового потоку по довжині агломашини:

$Q_м$, $Q_п$, $Q_в$ - зміст олій, пилу і вологи, відповідно, г/м^3; $t_г$ - температура газу, °С

Такий характер розподілу концентрації масел в газах по довжині агломашини свідчить про те, що значна частина випаровуючих масел конденсується в зоні перезволоження.

Зменшення концентрації масел в 8-9 вакуум-камерах збігається зі стрибкоподібним зростанням температури газів і більш інтенсивним виділенням пилу, що свідчить про повне видалення вологи з шару. Почасти зниження концентрації масел можна пояснити виникненням умов для їх займання; крім того, матеріал, що спікається втрачає до цього моменту основну частину масел. Далі концентрація масел плавно знижується практично до нуля, що свідчить про майже повне видаленні масел з шару в міру досягнення готовим агломератом розвантажувальної ділянки агломашини.

У подальшому при проведенні випробувань відбір та аналіз газів проводився тільки для 6, 7 і 8 вакуум-камер, де, як видно з рис.4.8, виділяється основна частина масел.

Результати дослідження складу газів для різних режимів застосування ОТЗ, в тому числі з використанням пристрою для допалювання (описано нижче в 4.5), представлені в табл.4.10 (дані середньозважені величини по 6, 7 і 8 вакуум-камерам).

З даних, представлених в табл.4.10, видно, що введення замасленої прокатної окалини вторинних відстійників у вигляді ОТС при витраті суміші, що містить 5% торфу, рівному 7 кг / т агломерату, супроводжується збільшенням змісту незгорілих масел в газах на 40% при збільшенні приходу масел в шихту на 50% (див. табл.4.3). З цього можна зробити висновок про те, що не менше 75% масел, що вводяться в шихту у вигляді ОТС, в даному випадку виноситься з шару.

Таблиця 4.10

Аналіз складу вихідного газа
(середьозважені величиниы по 6-8 вакуум-камерам)

Удільна витрата ОТС, кг/т	Склад ОТС, окалина;торф,%	Склад вихідного газа,%			Кількість парів масел, мг/м^3	Примітка
		CO_2	H_2	O_2		
-	-	6,2	0,03	19,3	235	Без дожигаючого обладнання
7,0	95:5	5,6	0,05	18,9	330	
11,0	80:20	7,9	0,04	20,06	260	
12,0	80:20	8,1	0,03	19,25	10	З дожигаючим обладнанням
12,0	80:20	7,8	0,04	19,85	290	Без дожигаючого обладнання
13,0	80:20	7,7	0,05	19,73	290	
16,0	80:20	7,7	0,04	20,15	300	

Водночас встановлено, що введення до складу агломераційної шихти 16 кг окалино-торф’яної суміші з підвищеним вмістом органічної складової (20 % торфу) супроводжується порівняно помірним зростанням концентрації незгорілих масляних компонентів у відхідних газах — лише на 28 % — навіть за умов двократного збільшення сумарного надходження масел у шихту (див. табл. 4.3). Така невідповідність між зростанням масляного навантаження та інтенсивністю їх виносу з агломерованого шару свідчить про суттєву зміну механізмів термічного перетворення та окиснювального розкладу органічних фракцій. Зокрема, отримані дані дозволяють стверджувати, що за вказаного режиму з шару виноситься не більше 28 % масел, введених у вигляді ОТС, тоді як переважна їх частка зазнає глибокого термічного окиснення безпосередньо в зоні спікання.

Таким чином, реалізація рекомендованої технології підготовки замасленої прокатної окалини вторинних відстійників у формі окалино-торф’яної суміші з масовою часткою торфу 20 % забезпечує кратне — приблизно у 2,7 раза — підвищення ступеня згоряння масел, що надходять у процес агломерації разом із даним матеріалом. Це підтверджує ефективність керованої модифікації органо-

мінерального складу шихти як інструмента інтенсифікації внутрішньошарових теплових та окиснювальних процесів.

4.4. Дослідження закономірностей акумуляції масляних компонентів у елементах газовідвідного тракту

Як було показано на попередніх етапах дослідження, надходження пароподібних масляних фракцій у газовідвідний тракт агломераційної машини відбувається переважно починаючи з вакуум-камери № 6, що зумовлено особливостями температурного профілю та фазового стану шихти в цій зоні. Температура відхідних газів у колекторі, як правило, не перевищує 150 °С, унаслідок чого формуються термодинамічні умови, сприятливі для конденсації вуглеводневих парів як на внутрішніх поверхнях газовідвідних каналів, так і на дисперсних частинках пилу та агломераційного просипу.

У процесі спікання газовим потоком інтенсивно виноситься дрібнодисперсна фракція матеріалу, тоді як через колосникові ґрати просипається значна частина шихти у вигляді крупніших агломераційних уламків. Крупнозернисті фракції просипу та пилу з розміром частинок понад 1 мм транспортуються у газовий колектор і під дією інерційних сил осаджуються в локальних зонах накопичення, відомих як «пилові мішки». Аналіз відібраних із цих елементів проб свідчить, що вміст масляних компонентів у них зазвичай досягає 1,0 %, що підтверджує інтенсивне сорбційне поглинання органічних сполук твердою фазою.

Батарейні циклони, оснащені лопатевими пристроями з кутом нахилу лопатей 25–30°, забезпечують примусове закручування газового потоку та інтенсифіковане відокремлення пилових частинок на виході з газовідвідної труби. Пилові частинки, на поверхні яких сконденсовані масляні фракції, потрапляючи в мультициклонні апарати, формують адгезійні відкладення на лопатях «розеток» і внутрішніх поверхнях труб.

Акумуляція таких нашарувань призводить до прогресивного зменшення ефективного прохідного перерізу каналів, що, своєю чергою, викликає зростання газодинамічного опору системи, зниження вертикальної швидкості фронту спікання та, в кінцевому підсумку, деградацію продуктивності агломераційних машин.

У випадках, коли потужність ексгаустера забезпечує підтримання заданої витрати повітря через агломерований шар, зростання лінійної швидкості газів у мультициклоні неминуче супроводжується зниженням ефективності пиловловлення, що додатково ускладнює експлуатаційні умови газоочисного обладнання.

Експериментально встановлено, що відкладення на внутрішніх поверхнях мультициклонів мають шарувату, тонкодисперсну морфологію з пилоподібною текстурою, при цьому вміст масляних компонентів у цих відкладеннях монотонно зростає зі збільшенням тривалості використання замасленої окалини у складі агломераційної шихти. Конструктивні особливості застосовуваних мультициклонів забезпечують ефективне видалення з газового потоку частинок пилу з розміром понад 10 мкм, унаслідок чого пил, що надходить із камери чистого газу на ексгаустер, представлений переважно фракцією менш ніж 10 мкм.

Згідно з даними, наведеними в роботі [68], такі тонкодисперсні пилові частинки характеризуються специфічною кулясто-голчастою морфологією, де роль «голок» відіграють кристали гематиту. Враховуючи те, що твердість гематиту істотно перевищує твердість конструкційних сталей, які застосовуються для виготовлення лопаток, дисків і вала ротора ексгаустера, абразивний знос останнього виявляється безпосередньо залежним від концентрації пилу в газовому потоці після мультициклонного очищення.

Статистичні матеріали аглодоменної лабораторії ВАТ «Криворіжсталь» свідчать, що в періоди інтенсивного використання замасленої окалини (1972 р., а також 1990–1992 рр.) напрацювання роторів ексгаустерів не перевищувало 1,0–2,5 місяця. Натомість у ході дослідно-промислових випробувань на агломераційній машині № 5 ротор, установлений у червні 2004 р., тобто ще до

початку експериментального циклу (вересень 2004 р.), залишався в експлуатації станом на лютий 2005 р., причому протягом восьми місяців жодних ознак критичного зносу або необхідності заміни зафіксовано не було.

У табл. 4.11 наведено результати кількісного визначення вмісту масляних компонентів у пробах відкладень і пилу, відібраних із мультициклонних апаратів. Слід підкреслити, що з огляду на відсутність регламентного очищення мультициклонів у період проведення випробувань, наведені дані відображають кумулятивний характер акумуляції масел у газовідвідному тракті в міру поступового збільшення частки окалино-торф'яної суміші у складі агломераційної шихти.

Таблиця 4.11

Склад масел в пилу і відкладеннях з мультициклонів

Кількість ОТС в аглошихті, кг/т агломерата	Склад масел, мас. %		
	Камера брудного газа	Камера чистого газу	Смивні мішки
0	1,02	1,08	1,92
3,0	1,4	0,96	1,54
7,0	1,32	0,3	9,18
16	1,64	0,54	17,6

Наведений масив експериментальних і аналітичних даних дає підстави для формулювання таких узагальнених висновків.

1. Установлено, що зростання вмісту масляних компонентів у відкладеннях, які формуються на елементах мультициклонної установки, фіксується виключно в змивних (пилозбірних) мішках. Це свідчить про те, що переважна частина возгонів масел адсорбується та конденсується на частинках пилу з характерним розміром понад 10 мкм, які після накопичення у змивних мішках надходять до шламової системи агломераційного цеху. Таким чином, основний потік масляних домішок виводиться з газовідвідного тракту разом із крупнодисперсною твердою фазою, не залучаючись до подальшого транспортування газовим потоком.

2.Вміст масел у відкладеннях, локалізованих у камері брудного газу та камері чистого газу, змінюється в значно меншому ступені й не демонструє чітко вираженої закономірної тенденції. Відсутність однозначної динаміки, імовірно, зумовлена сукупністю методичних факторів, насамперед похибками відбору проб, оскільки на теперішній час не розроблено стандартизованої методики формування репрезентативної проби для таких різновидів відкладень, що ускладнює коректну кількісну інтерпретацію результатів.

3.Показано, що дворазове збільшення надходження масел до агломераційної шихти при використанні окалино-торф’яних сумішей (див. табл. 4.6) не супроводжується відповідним зростанням їх потрапляння на робочі поверхні лопаток ексгаустера. Це дозволяє зробити висновок про те, що в умовах проведених випробувань мультициклонні апарати зберігали високу ефективність пиловловлювання та виконували свою функцію без погіршення експлуатаційних характеристик, навіть за підвищеного масляного навантаження газового потоку.

Конструктивно-компонувальне виконання зазначеного пристрою, а також взаємне розташування його основних функціональних елементів у робочому просторі вакуум-камери наведено на рис. 4.9, де схематично

відображено принципову будову та компоновочні особливості дослідного зразка.

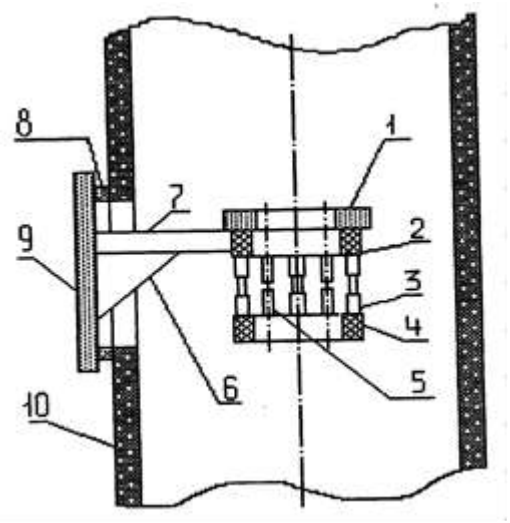


Рис.4.9. Конструкція пристрою допалювання масел у вакуум-камері: 1 - захисне кільце, 2 - електропровідне кільце, 3 - електричні ізолятори, 4 - електропровідне кільце, 5 - робочі електроди, 6 - ребро жорсткості, 7 - кронштейн, 8 - прокладка, 9 - кришка люка, 10 - нижній патрубок

Конструктивне розташування та функціональна архітектура дослідного електроіскрового запальника передбачають монтаж таким чином, що центр кільця запальника співпадає з геометричною віссю газоходу вакуум-камери. Основний елемент запальника формують два паралельних електропровідних кільця (2 і 4), на яких розташовані зустрічно спрямовані робочі електроди у вигляді загострених стрижнів (5). Контрольований зазор між стрижнями забезпечує стабільний об’ємний електричний розряд. Фторопластові ізолятори (3) запобігають міжкільцевому замиканню та забезпечують електричну стійкість конструкції, тоді як захисне кільце (1) мінімізує вплив твердих дисперсних часток, що містяться в газовому потоці, на робочу поверхню електродів.

Розробка пристрою захищена патентом [74], що підтверджує новизну технічного рішення та його промислову придатність.

Оскільки процес допалювання масляних фракцій можливий лише при досягненні критичної концентрації парів масел у газовому потоці, основна частина експериментальних досліджень виконувалася у 7-й вакуум-камері агломашини

№ 5. Для кількісного визначення складу газової фази застосовували гірничорятувальний хроматограф «Пошук-2». Отримані результати систематизовані в табл. 4.12, із паралельним порівнянням із даними табл. 4.10, що дозволяє оцінити ефективність електроіскрового допалювання парів масел у реальних промислових умовах.

Таблиця 4.12

Склад газовоі фази в 7 вакуум-камері в умовах використання обладнання дожигання

Точка відбору	Склад в газі, %					Кількість масла, г/м^3
	CO_2	H_2	O_2	CH_4	CO	
До обладнання дожигания	4,75	0,040	17,0	-	-	0,25
Після обладнання дожигания	5,50	0,055	15,85	-	-	0,012

Наведений масив експериментальних та розрахункових даних переконливо свідчить про те, що за початкової масової концентрації масляних аерозолів у газовому середовищі досліджуваної вакуум-камери на рівні 0,25 г/м³ унаслідок впровадження спеціалізованого пристрою для допалювання відбувається термічне окиснення понад 95 % органічної складової, представленої вуглеводневими фракціями мастил. Такий високий ступінь деструкції масляних домішок свідчить про ефективність реалізованого принципу інтенсифікації процесів допалювання та стабільність формування зони високотемпературного окисного реагування в об’ємі газового потоку.

Аналіз узагальнених даних, наведених у табл. 4.12, підтверджує, що застосування розробленого допалювального вузла забезпечує суттєве зниження залишкової концентрації масляних компонентів у відхідних газах, що відводяться з вакуум-камер.

Водночас результати промислових випробувань засвідчили наявність вираженої залежності ефективності роботи пристрою від газодинамічних та фізико-хімічних характеристик середовища, зокрема від співвідношення вмісту масляних аерозолів і водяної пари. Установлено, що максимальна результативність допалювання досягається в умовах експлуатації

7–8 вакуум-камер, для яких характерні підвищені концентрації масляних домішок за одночасно відносно низького вмісту вологи в газовій фазі, що створює сприятливі умови для повного перебігу окисних реакцій.

4.6. Оцінка трансформації обсягів шкідливих викидів в атмосферне повітря агломераційного виробництва за умов використання окалино-торф’яних композицій

Результати кількісної оцінки вмісту забруднюючих компонентів у відхідних газах агломераційного виробництва, отримані спеціалізованою службою екологічного контролю металургійного комбінату в період проведення дослідно-промислових випробувань, систематизовано та наведено в табл. 4.13, що дозволяє здійснити комплексний аналіз впливу впровадження окалино-торф’яних сумішей на рівень техногенного навантаження на атмосферне середовище.

Таблиця 4.13

Характеристика шкідливих викидів в умовах застосування ОТС

Найменування джерела викидів	Номер джерела	Найменування Забруднюючих речовин	Кількість забруднюючих речовин					
			Базовий період			Дослідний період		
			С, г/нм^3	М, г/с	ВСВ, г/с	С, г/нм^3	М, г/с	ВСВ, г/с
			2013 год			02.12.2014		
В штабелі 783,4 т ОТС, заміри відтворені 14.09.14								
Зона спікання АМ №3	1	Пил	0,486	32,284	245,560	0,576	42,727	245,560
		SO_2	0,616	40,919	286,773	0,623	46,213	286,773
		CO	4,158	276,203	2098,71	3,485	248,937	2098,71
		NO_X	0,045	2,989	88,897	0,125	9,272	88,897
В штабелі 1470,5 т ОТС, заміри відтворені 15.10.14								
Зона спікання АМ №5	2	Пил	0,420	42,537	72,314	0,556	40,224	72,314
		SO_2	0,640	64,819	77,616	0,689	49,846	77,616
		CO	4,167	422,029	455,347	3,125	226,08	455,347
		NO_X	0,062	6,279	15,529	0,112	8,103	15,529
В штабелі 2120 т ОТС, заміри відтворені 28.10.14								
Зона спікання АМ №5	2	Пил	0,420	42,537	72,314	0,582	38,463	72,314
		SO_2	0,640	64,819	77,616	0,684	45,204	77,616
		CO	4,167	422,029	455,347	3,125	206,52	455,347
		NO_X	0,062	6,279	15,529	0,109	7,203	15,529

У результаті комплексних інструментальних та розрахунково-аналітичних досліджень установлено, що фактичні рівні викидів основних інгредієнтів техногенного забруднення, зокрема пилоподібних частинок, діоксиду сірки, монооксиду вуглецю та оксидів азоту, протягом усього періоду дослідно-промислової експлуатації не перевищували граничних значень, регламентованих показниками тимчасово погодженого викиду (ВСВ). При цьому нормативи ВСВ були диференційовано встановлені за окремими стаціонарними джерелами

викидів: джерело № 1 відповідало сумарному газовому потоку від зон спікання агломераційних машин № 1–4, тоді як джерело № 2 характеризувало викиди зони спікання агломераційної машини № 5.

Узагальнений аналіз експериментальних результатів, наведених у табл. 4.13, свідчить, що використання окалино-торф'яних сумішей, незважаючи на цілеспрямоване введення до складу агломераційної шихти замасленої прокатної окалини, не призводить до виходу показників атмосферних викидів агломераційного цеху за межі встановлених значень ВСВ. Більше того, зафіксовано помітне скорочення вмісту монооксиду вуглецю у відхідних газах, що з високою ймовірністю зумовлено інтенсифікацією окиснювальних реакцій у шарі шихти внаслідок покращення його газопроникності та більш рівномірного розподілу газового потоку. Водночас зазначені умови сприяють підвищенню концентрації оксидів азоту, що є закономірним наслідком інтенсифікації процесів повного згоряння, оскільки фактори, які забезпечують зменшення частки недоокиснених продуктів, зазвичай активізують механізми термічного та паливного утворення NOx [78].

Показано, що вміст діоксиду сірки у відхідних газах залишається практично незмінним, тоді як концентрація пилу зазнає лише незначного зростання, незважаючи на введення до складу шихти істотної кількості тонкодисперсного матеріалу, що свідчить про ефективність процесів агломерації та пиловловлювання.

У табл. 4.14 наведено результати екологічної оцінки ефективності застосування допалювальних пристроїв, аналіз яких підтверджує аналогічну тенденцію: зменшення вмісту монооксиду вуглецю в агломераційних газах супроводжується зростанням концентрації оксидів азоту. Це дозволяє зробити обґрунтований висновок, що окиснення масляних домішок відбувається переважно з утворенням діоксиду вуглецю, викиди якого на теперішній час не підлягають прямому нормативному обмеженню. При цьому слід підкреслити, що

зафіксоване підвищення концентрації NOx не виходить за межі встановлених нормативів ВСВ.

Загалом, сукупність отриманих експериментальних даних переконливо доводить, що залучення замасленої прокатної окалини у складі окалино-торф'яних сумішей не супроводжується істотним зростанням викидів досліджуваних шкідливих компонентів в атмосферне повітря. Водночас впровадження зазначеної технології має виражений екологічно-економічний ефект, оскільки забезпечує відмову від складування замасленої окалини, яке традиційно пов'язане з ризиком інфільтрації масляних фракцій у ґрунтові води та необхідністю відведення значних площ земель під шламонакопичувачі. Додатково реалізація даного підходу сприяє раціональному використанню невідновлюваних природних ресурсів, зокрема залізорудної сировини, флюсів і палива, що в сукупності підвищує загальну ресурсну та екологічну ефективність агломераційного виробництва.

Таблиця 4.14

Характеристика шкідливих викидів виробництва агломерату в умовах роботи з допалюванням масел

Найменування джерела викидів	Номер джерела	Найменування Забруднючих речовин	Кількість забруднюючих речовин					
			Базовий період			Дослідний період		
			С, г/нм^3	М, г/с	ВСВ, г/с	С, г/нм^3	М, г/с	ВСВ, г/с
			2013 год			2014 год		
Встановлене обладнання дожигання, заміри виконані 02.12.2014г.								
Зона спікання АМ №4	1	Пил	0,409	28,463	245,560	0,407	29,072	245,560
		SO_2	0,756	52,612	286,773	0,621	44,359	286,773
		CO	6,250	434,95	2098,71	3,446	255,617	2098,71
		NO_X	0,071	4,941	88,897	0,121	8,643	88,897

4.7. Промислова доменна плавка агломерату, синтезованого з агломераційних шихт із включенням окалино-торф'яної композиції

З метою формування науково обґрунтованого уявлення щодо закономірностей впливу агломерату, одержаного із застосуванням у складі агломераційної шихти замасленої прокатної окалини, попередньо кондиційованої шляхом спікання з торф'яним компонентом, на перебіг та інтегральні техніко-економічні показники доменної плавки, в умовах доменної печі № 1 ВАТ «Криворіжсталь» у часовому інтервалі з 9 вересня по 10 листопада 2004 р. було реалізовано комплекс дослідно-промислових випробувань, результати яких систематизовано та узагальнено в табл. 4.15. Зазначені дослідження були зорієнтовані на встановлення причинно-наслідкових зв'язків між змінами фізико-хімічних та структурно-механічних характеристик агломерату й параметрами функціонування доменного агрегату в умовах промислової експлуатації.

Програма експериментів передбачала поетапну реалізацію чотирьох експлуатаційних періодів, тривалість кожного з яких становила в середньому близько двох тижнів, у межах яких було апробовано три відмінні технологічні режими, що характеризувалися варіацією питомого вмісту замасленої прокатної окалини в агломераційній шихті на рівні 7, 13 і 16 кг на 1 т готового агломерату. Як референтний (базовий) було обрано період роботи доменної печі у серпні 2004 р., який, за сукупністю шихтових, теплотехнічних, газодинамічних і кінетичних параметрів, характеризувався максимальною близькістю до умов дослідних плавок, що забезпечило коректність порівняльного аналізу. При цьому частка агломерату аглоцеху в загальній залізорудній складовій доменної шихти впродовж усього експериментального циклу підтримувалася на квазістаціонарному рівні 68–69 %, що дозволило мінімізувати вплив флуктуацій сировинного фактора на результати досліджень.

Порівняльний аналіз інтегральних показників роботи доменної печі, редукованих до умов базового періоду, засвідчив статистично значуще зростання

продуктивності агрегату на 6,8 %, 4,6 % і 7,7 % відповідно для режимів із вмістом 7, 13 і 16 кг окалино-торф'яної композиції на 1 т агломерату. Одночасно було зафіксовано стале та відтворюване зниження питомої витрати коксу на 5,4 %, 5,8 % і 3,8 %, що свідчить про підвищення термодинамічної ефективності доменного процесу, інтенсифікацію відновних реакцій та покращення умов тепломасообміну в шахті печі за рахунок оптимізації структури шихтового стовпа.

Отримане зростання техніко-економічних показників доменної плавки зумовлювалося синергетичною дією комплексу факторів, серед яких домінуючу роль відігравали підвищення механічної та структурної міцності агломерату, зниження вмісту дрібнодисперсних фракцій, а також зростання його відновлюваності в температурно-газовому полі доменної шахти. Особливо показовим є зафіксоване істотне, а в одному з експлуатаційних періодів — майже дворазове, зменшення виносу колошникового пилу, що корелює з результатами випробувань агломерату на ударну та стиральну міцність, а також із показниками його стійкості при відновленні. У сукупності зазначені ефекти свідчать про формування більш стабільного та однорідного шихтового шару, що забезпечує покращення газопроникності, зниження гідродинамічних опорів і, як наслідок, стабілізацію режиму доменної плавки та зменшення втрат твердих компонентів із відхідними газами.

Таблиця 4.15

Техніко-економічні показники ДП № 1 під час дослідно-промислового експерименту з використанням у шихті агломерату, отриманого з застосуванням окалино-торф'яної суміші

Показники	Базовий період	Дослідні періоди			
	18.06.-28.06.04	09.09.-19.09.04	02.10.-14.10.04	15.10.-28.10.04	29.10.-10.11.04
1	2	3	4	5	6
Витрати ОТС при спіканні агломерата, кг/т агломерата	0	7	13	16	16
Номінальний час роботи, доба	11	11	13	14	6
Середньодобове виробництво, т					
фактичне	1510,9	1619	1610,2	1524,8	1716
приведене		1516,3	1541,2	1595,2	1592,6
Удільна витрати кокса, кг/т чугуна					
фактичний	510	455	447	492	487
приведений		482,7	476,4	489,3	506,4
Витрати антрацита, кг/т чугуна	8,7	46,3	42,8	27,2	15,9
Витрати дуття, $м^3$/т чугуна	1861	1853	1851	1746	1809
Тиск дуття, атм	1,59	1,57	1,47	1,46	1,50
Температура гарячого дуття,°С	898	909	995	971	928
Тиск колошникового газа, атм	0,5	0,45	0,37	0,35	0,40
Склад кисню в дутті, %	26,98	27,9	27,6	29	28,4
Витрати природного газа, $м^3$/т чугуна	103,5	97	97	104,1	96
Витрати вапняку, кг/т чугуна	21	7	13,5	18,3	12

1	2	3	4	5	6
Виніс колошникового пилу (уловленного), кг/т чугуна	22,8	н. д.	16,4	25,1	12,6
Склад Fe в рудной частині шихти, %	56,52	55,85	56,02	56,16	56,01
Витрати агломерата аглоцеха, кг/т чугуна	1278	1057	1099	1122	1041
Витрати агломерата АФ-1 ГОК, кг/т чугуна	557	500	492	517)	480
Витрати окатишів, кг/т чугуна	36	-	-	17	-
Витрати залізноіі руди, кг/т чугуна	35	95	82	92	89
Витрати скрапа металічного, кг/т чугуна	146	127	129	136	124
Витрати шлака збагаченого, кг/т чугуна	79	107	108	115	108
Вихід шлака, кг/т чугуна	468	408	441	485	448
Рудна нагрузка, т/т	4,21	4,14	4,28	4,06	3,78
Простоі, %	2,74	3,79	2,67	1,79	0,35
Склад в чугуні, %: Si	0,89	0,79	0,84	0,81	0,83
Mn	0,66	0,76	0,71	0,67	0,72

Узагальнення результатів комплексу дослідно-промислових доменних плавок дозволяє зробити обґрунтований висновок про високу технологічну та техніко-економічну доцільність використання в доменному процесі агломерату, виготовленого із застосуванням розробленої окалино-торф'яної технології підготовки агломераційної шихти. Сукупність зафіксованих змін у показниках роботи доменної печі свідчить не лише про відсутність негативного впливу модифікованого агломерату на стабільність перебігу процесу, але й про формування комплексу позитивних ефектів, що реалізуються на різних ієрархічних рівнях доменної плавки — від мікроструктурних характеристик агломерату до інтегральних параметрів функціонування агрегату.

Водночас слід наголосити, що в період проведення дослідних випробувань мали місце неминучі флуктуації компонентного та хімічного складу агломераційної суміші, зумовлені як варіабельністю властивостей вихідної сировини, так і особливостями промислової експлуатації агломераційного та доменного устаткування. Зазначена обставина істотно ускладнює пряме кількісне виділення внеску саме окалино-торф'яної складової у досягнуті покращення техніко-економічних показників доменної плавки та не дозволяє в межах натурного експерименту однозначно відокремити її вплив від дії супутніх факторів.

У зв'язку з цим для орієнтовної, але методично коректної оцінки ефекту, зумовленого безпосередньо впровадженням окалино-торф'яної технології, доцільно скористатися розрахунковим підходом, що ґрунтується на приведенні експериментальних даних до порівняльних умов та аналізі узагальнених показників ефективності використання агломерату в доменному процесі. Наведені нижче розрахунки дозволяють у наближеній формі кількісно окреслити вклад зазначеної технології у підвищення ресурсної та енергетичної ефективності доменної плавки, зберігаючи при цьому необхідну узгодженість з реальними умовами промислового виробництва.

Зміна вмісту заліза в залізорудній частині шихти може бути оцінений як

$$\Delta Fe = A \cdot Y/100,\% \quad (4.5)$$

де: А - частка в залізорудній частині шихти агломерату, отриманого з застосуванням ОТЗ,%;

Y - зміна вміст заліза в шихті при даному витраті ОТС по рівнянню (4.4).

Тоді зміна питомої витрати коксу і добового виробництва складе, відповідно:

$$\Delta К = К_{исх}\Delta Fe \cdot 1,0/100, \text{ кг/т чугуна}, \quad (4.6)$$

$$\Delta П = П_{исх}\Delta Fe \cdot 1,7/100, \text{ т}, \quad (4.7)$$

де: $К_{исх}$, $П_{исх}$ - вихідні значення питомої витрати коксу та добової продуктивності, відповідно;

1,0; 1,7 - норми приведення питомої витрати коксу та добової продуктивності печі, відповідно, при збільшенні $\Delta Fe = 1,0\%$ [79].

На рис. 4.10 наведено результати розрахункової оцінки, виконаної із застосуванням системи рівнянь (4.5–4.7), які відображають закономірності зміни питомої витрати коксу та добової продуктивності доменної печі в абсолютному вимірі залежно від питомого споживання окалино-торф’яної суміші (ОТС) у процесі виробництва агломерату. Зазначені розрахунки дозволяють кількісно інтерпретувати вплив варіації вмісту ОТС у складі агломераційної шихти на ключові техніко-економічні показники доменного процесу в умовах часткової заміни традиційної сировини модифікованим агломератом.

Як вихідний (базовий) варіант для проведення порівняльного аналізу було прийнято режим роботи доменної печі, що характеризується питомою витратою коксу на рівні 450 кг/т чавуну та середньодобовою продуктивністю 1600 т, за умови, що частка агломерату, виготовленого із застосуванням окалино-торф’яної технології, у загальній залізорудній складовій доменної шихти становить 50 %. Обрані базові параметри відповідають типовим умовам стабільної експлуатації агрегату та слугують репрезентативною відправною точкою для оцінки відносних і абсолютних ефектів від впровадження досліджуваної технології.

Поряд з абсолютними значеннями зміни питомої витрати коксу та добової

продуктивності печі на графічних залежностях також представлено відповідні відносні прирости зазначених показників, що забезпечує можливість більш наочного порівняльного аналізу ефективності використання агломерату, отриманого з різними рівнями питомого введення ОТС, та дозволяє узагальнити отримані результати з урахуванням масштабного фактора доменного виробництва.

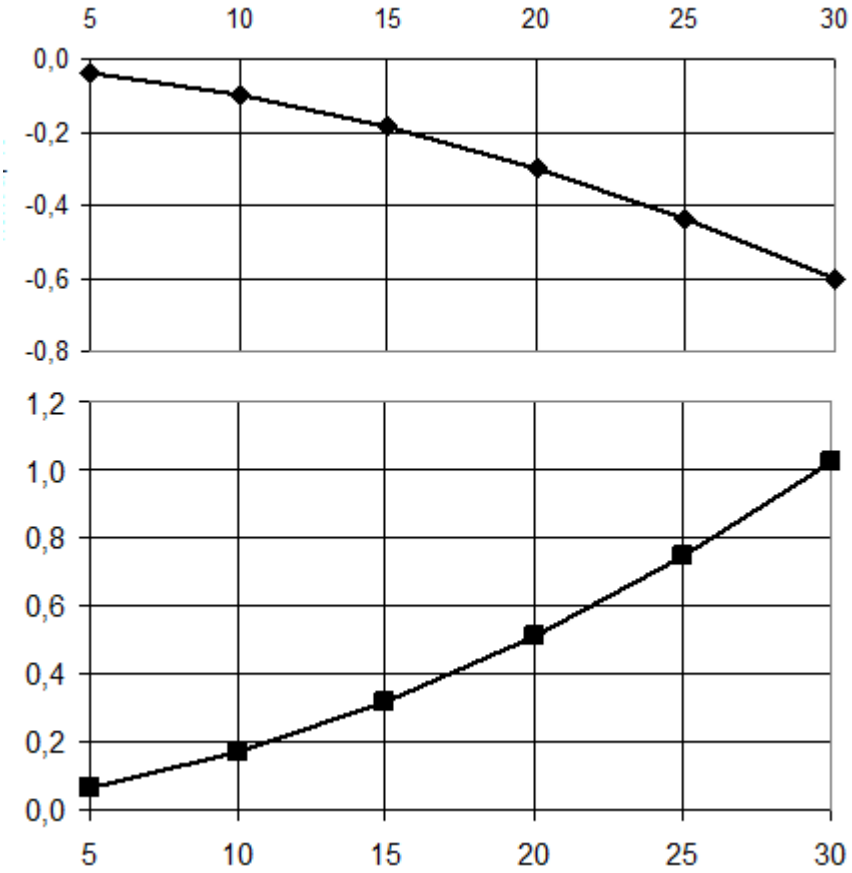


Рис.4.10. Зміна питомої витрати коксу та добової продуктивності печі в результаті застосування ОТЗ при виробництві агломерату

З аналізу наведених розрахункових залежностей випливає, що за прийнятих вихідних умов функціонування доменного агрегату залучення до виробництва агломерату окалино-торф'яної суміші в кількості 15 кг на 1 т готового продукту супроводжується формуванням помірно вираженого, проте статистично фіксованого позитивного ефекту. Зокрема, реалізація зазначеного рівня утилізації ОТС обумовлює зростання добової продуктивності доменної

печі приблизно на 0,32 %, що свідчить про інтенсифікацію перебігу доменного процесу та покращення умов газодинаміки й тепломасообміну в шахті агрегату.

Одночасно із зазначеним приростом продуктивності відбувається зниження питомої витрати коксу на близько 0,19 %, що вказує на підвищення енергоефективності доменної плавки та більш повну реалізацію відновного потенціалу шихтових матеріалів. У сукупності отримані результати підтверджують, що навіть відносно невеликі питомі обсяги введення окалино-торф'яної суміші в агломераційну шихту здатні забезпечити відчутний позитивний вплив на інтегральні техніко-економічні показники доменного виробництва.

4.8. Висновки

4.8.1. Сукупність результатів дослідно-промислових випробувань, виконаних у процесі підготовки агломераційної шихти, у цілому підтверджує наукову обґрунтованість і практичну доцільність раніше сформульованих рекомендацій щодо оптимального співвідношення компонентів окалино-торф'яної суміші, а саме масового співвідношення *окалина : торф* на рівні 80 : 20, а також щодо раціонального діапазону питомої витрати ОТС. Установлено, що впровадження окалино-торф'яної технології підготовки шихти сприяє суттєвому поліпшенню її гранулометричного складу, що проявляється у формуванні більш однорідної за фракційним складом і газопроникної аглошихти.

4.8.2. Максимальний приріст питомої продуктивності агломераційного процесу, який досягає близько 5 %, зафіксовано за умов питомої витрати ОТС на рівні 13 кг на 1 т готового агломерату. При цьому відбувається одночасне скорочення витрат основних шихтових компонентів, зокрема залізорудного концентрату — приблизно на 9 %, вапняку — на 1,6 %, а коксової дрібниці — на 1,55 %, що свідчить про підвищення ресурсної ефективності агломераційного виробництва.

4.8.3. Промисловий агломерат, отриманий із застосуванням окалино-торф’яної

суміші, характеризується підвищеним рівнем механічної міцності, а також збільшеним масовим вмістом заліза. Дані петрографічних досліджень засвідчують зростання частки вторинного гематиту в мікроструктурі такого агломерату, що зумовлює підвищення його відновлюваності та покращення кінетичних умов перебігу відновних реакцій у доменному процесі.

4.8.4. Застосування рекомендованої технології підготовки замасленої прокатної окалини вторинних відстійників у вигляді окалино-торф’яної суміші з часткою торфу близько 20 % забезпечує майже трикратне підвищення ступеня вигоряння масляних компонентів, що надходять до агломераційної шихти з даним матеріалом, у процесі спікання.

4.8.5. Використання спеціалізованого пристрою для допалювання газів дозволяє досягти найбільшого ефекту щодо зниження вмісту масляних домішок у відхідних газах у межах 7–8 вакуум-камер, для яких характерні підвищені концентрації масел за умов відносно низького вмісту водяної пари, що створює сприятливі передумови для повного перебігу процесів термічного окиснення.

4.8.6. Установлено, що навіть дворазове збільшення надходження масляних компонентів до агломераційної шихти у разі застосування окалино-торф’яної технології не супроводжується зростанням осадження мастил на робочих елементах ексгаустера та не призводить до порушення ефективності роботи системи газоочищення, зокрема мультициклону.

4.8.7. Використання замасленої прокатної окалини у складі окалино-торф’яної суміші не зумовлює помітного зростання викидів основних шкідливих речовин в атмосферне повітря. Водночас упровадження даної технології дозволяє повністю відмовитися від складування замасленої окалини, яке традиційно супроводжується фільтрацією масляних фракцій у ґрунтові води та

відведенням значних площ земель під шламосховища, а також забезпечує економію дефіцитних і невідновлюваних природних ресурсів.

4.8.8. Утилізація окалино-торф’яної суміші в кількості 15 кг на 1 т агломерату супроводжується зростанням продуктивності доменної печі приблизно на 0,32 % і зниженням питомої витрати палива на 0,19 %, що зумовлено комплексним покращенням якості агломерату, а саме підвищенням його міцності, зменшенням вмісту дрібних фракцій і зростанням відновлюваності в умовах доменної плавки.

5 Узагальнені наукові висновки та практичні рекомендації

1. Утилізація замасленої прокатної окалини, що акумулюється у вторинних відстійниках металургійних підприємств, репрезентує багатофакторну інженерно-технологічну задачу, обумовлену комплексною взаємодією фізико-хімічних параметрів матеріалу, зокрема високим вмістом адсорбованих масляних фракцій та вологи. Критичним аспектом є збіг температурних інтервалів інтенсивного виділення масел і випаровування вологи під час термічного впливу, що призводить до нестабільності процесів у шихті та значно ускладнює інтеграцію даного відходу у агломераційний цикл. Додатково утилізацію обмежують несприятливі фізико-механічні властивості окалини, зокрема низька сипучість, незадовільна змішуваність із традиційними шихтовими компонентами та низька транспортувальна придатність, що обумовлює необхідність розробки спеціалізованих технологічних підходів.

2. Значні масштаби утворення та високі темпи накопичення замасленої прокатної окалини формують критичну науково-технічну проблему, ефективне вирішення якої є визначальним для підвищення ресурсозбереження, мінімізації техногенного навантаження на навколишнє середовище та зниження екологічних ризиків, пов’язаних із тривалим складуванням масловмісних відходів.

3. У промислових умовах експериментально доведено принципову можливість утилізації замасленої прокатної окалини шляхом часткового введення її у вугільну шихту коксохімічного виробництва без погіршення механічних характеристик готового коксу. Забезпечення рівномірного розподілу окалини у

вугільній масі досягається попередньою кондицією з торфом, що реалізує адсорбцію водомасляної фази та формування сипучої, технологічно стабільної композиції. Водночас слід зазначити, що отощувальна природа окалини обмежує можливості її прямого використання у шихті без негативного впливу на якість коксу, особливо у разі дефіциту жирного вугілля, характерного для коксохімічного виробництва України.

4. Розроблено технологічну схему низькотемпературного крекінгу замасленої окалини з отриманням твердого обезмасленого та зневодненого продукту, придатного для введення у агломераційну шихту, а також рафінованої олії, яка може бути повторно використана у прокатному виробництві. Конструкція апаратурного комплексу забезпечує автономне ведення процесу без залучення зовнішніх енергоносіїв. Водночас промислове впровадження даного технологічного рішення вимагає значних капітальних вкладень та спеціалізованого обладнання, що робить актуальним питання економічної та технологічної оптимізації.

5. Безпосереднє застосування замасленої прокатної окалини в агломераційному виробництві обмежується її низькою змішуваністю із шихтовими компонентами та значним надходженням масляних фракцій у газовідвідний тракт, що створює додаткові бар'єри для нормальної роботи газоочисного обладнання, призводить до передчасного виходу з ладу ексгаустерів та потенційно збільшує ризики екологічного забруднення навколишнього середовища.

6. Експериментальні дослідження засвідчили, що попередня підготовка замасленої окалини з торфом радикально модифікує кінетику переходу масел у газову фазу при нагріванні; інтервал між температурою початку випаровування масляних компонентів і температурою їх займання скорочується з 85 °C до 19 °C, що сприяє більш контрольованому протіканню спікання та зменшенню ризиків локального перегріву шихти.

7. Встановлено, що введення окалино-торф’яної суміші у шихту істотно коригує гранулометричну структуру агломераційного шару: відбувається зменшення частки дрібної фракції (<3 мм) при одночасному збільшенні сумарного вмісту фракцій 3–10 мм. Найбільш ефективними є варіанти інтеграції суміші спільно з компонентами, що характеризуються низькою грудкувальною здатністю, такими як подрібнений черепашник та колошниковий пил.

8. Максимальні значення газопроникності спікаємого шару спостерігаються при вмісті окалино-торф’яної суміші 1,50–2,25 %. При збільшенні висоти шихтового шару положення максимуму газопроникності зміщується у бік вищих концентрацій суміші, що вказує на наявність нелінійної залежності між структурою шару та оптимальним вмістом добавки для забезпечення ефективного проходження газового потоку.

9. Введення окалино-торф’яних сумішей у склад агломераційної шихти сприяє поліпшенню механічних характеристик готового агломерату: спостерігається зростання індексу на удар та зниження індексу стирання. Оптимальний вихід придатного продукту досягається при утриманні суміші в межах 2,00–2,75 %, що визначає технологічно доцільний інтервал для забезпечення комплексного покращення якості агломерату.

СПИСОК ВИКОРИСТАНХ ДЖЕРЕЛ

1. Постанова Кабінету Міністрів України №1556 від 13.10.2000 р. «Про Національний план дій з гігієни довкілля на 2000–2005 роки».

2. Постанова Кабінету Міністрів України №668 від 28.06.1997 р. «Про Програму використання відходів виробництва і споживання на період до 2005 року».

3. Ресурсно-екологічна оцінка аглодоменного виробництва / Ю.С. Юсфін, П.І. Черноусов, С.В. Недєлін // Сталь. – 2001. – №4. – С. 1–5.

4. Лисін В.С., Юсфін Ю.С. Ресурсно-екологічні проблеми XXI століття і металургія. – М.: Вища школа, 1998. – 447 с.

5. Проблеми організації маловідходних процесів у чорній металургії / Г.С. Клягін, В.І. Ростовський, А.В. Кравченко // Доповіді науково-практичної конференції «Донбас 2002: наука і техніка – виробництву», 5–6 лютого 2002 р., м. Донецьк. – С. 310–314.

6. Утилізація окалини зі стічних вод прокатних станів / Д.С. Воронін, В.В. Разумовський, С.І. Спиридонова // Сталь. – 1983. – №1. – С. 89–90.

7. Носков В.А. Підготовка і переробка залізовмісних відходів у металургійному виробництві України // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2000. – №2. – С. 109–113.

8. Модернізація коксохімічного виробництва комбінату «Криворіжсталь» / І.Г. Крилов, Г.Д. Соловйов, І.З. Шатоха // Сталь. – 1998. – С. 6–9.

9. Про використання масловмісних відходів прокатного виробництва в аглошихті / Ю.І. Коваль, Т.А. Андрієнко, В.С. Євстаф'єв // Тези доповідей Всесоюзної наук.-техн. конф. «Теорія і технологія підготовки металургійної сировини до доменної плавки», Дніпропетровськ, 1985. – С. 235.

10.Використання замасленої окалини прокатних цехів в агломераційній шихті Криворізького металургійного заводу / В.М. Кравцов, Л.А. Горський, І.Л. Холмецький // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 1974. – №4. – С. 5–6.

11.Кривоносов І.В. Утилізація замасленої прокатної окалини в агломераційному виробництві // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1985. – №15. – С. 38–39.

12.Деякі особливості процесу агломерації при використанні в шихті окалини прокатного виробництва / Ю.Г. Єфименко, Є.І. Лещинська, І.М. Сальников, Ю.І. Коваль, А.К. Іванов // Відомості вищих навчальних закладів. Чорна металургія. – 1986. – №4. – С. 21–24.

13.Технологія підготовки до агломерації залізовмісних відходів металургійного виробництва / Б.М. Носовицький, В.І. Ростовський, Л.П. Жилін, В.Н. Муравйов, Н.П. Запорожець // Сталь. – 1980. – №1. – С. 4–7.

14.Поліпшення якості агломерату при підвищеному вмісті в шихті залізовмісних відходів / А.З. Крижевський, І.М. Міщенко, Н.А. Чиглинцев та ін. // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1988. – №8. – С. 35–46.

15.Використання відходів в аглодоменному виробництві Карагандинського металургійного комбінату / В.А. Мірко, А.Н. Клімушкін, А.І. Кузнецов // Сталь. – 1992. – №5. – С. 86–91.

16.Використання підготовленої замасленої окалини прокатних цехів в агломераційній шихті / Ф.Ф. Колесанов, В.М. Кравцов, Л.А. Горський // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1974. – №9. – С. 37–38.

17.Галкін Ю.А., Березюк В.Г. Дослідження сорбції нафтопродуктів твердими відходами підприємств чорної металургії // Тези доповідей конф. «Методи видалення твердих домішок із промислових стічних вод», Челябінськ, 1984. – С. 30–31.

18.Супрун Ю.М. Зневоднення шламів металургійного виробництва на фільтр-пресах за кордоном // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1988. – №8. – С. 14–23.

19.Лотош В.Є., Галкін Ю.А. Удосконалення технології утилізації окалино-масловмісних осадів стічних вод машинобудівних підприємств // Сталь. – 1996. – №8. – С. 65–67.

20.Борисов В.М., Яценко-Жук А.Д., Матюх І.Я. Перспективи використання дисперсних відходів прокатного виробництва в чорній металургії // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1981. – №21. – С. 45–60.

21.Використання відходів металургійного виробництва в аглодоменному переділі / В.Н. Прохоров, Н.М. Устьянцев, А.В. Сивець та ін. // Сталь. – 1983. – №11. – С. 4–7.

22.Федоренко Н.В., Данілов В.І., Коротких А.Т. Використання залізовмісних відходів в агломераційному та доменному виробництвах // Металург. – 1985. – №12. – С. 13–14.

23.Використання шламу зі шламонакопичувачів і замасленої окалини прокатного виробництва в агломераційній шихті / М.В. Рогов, Є.Ф. Шкурко, І.Я. Матюх // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1983. – №14. – С. 46–47.

24.Касс В. Переробка шламу прокатної окалини // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1981. – №13. – С. 29–31.

25.Шурхал В.А. Інтенсифікація процесів окускування залізорудних матеріалів // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1985. – №13. – С. 7–27.

26.Воропаєв Є.М., Борисов В.М. Використання пилу і шламів металургійних заводів в агломераційному виробництві // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1980. – №1. – С. 35–46.

27.Шатоха І.З., Боклан Б.В. Досвід утилізації замасленої окалини прокатного виробництва // Тези доповідей II Міжнар. конф. «Теорія і практика вирішення екологічних проблем у гірничодобувній та металургійній промисловості», Дніпропетровськ, 1995. – С. 49–50.

28.Використання залізної окалини для виробництва паливно-плавильних матеріалів / В.Ф. Гончаров, В.М. Єгоров, Т.Ф. Медведєва, М.В. Семененко // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1977. – №13. – С. 37.

29.Джакелі Т.Н., Трофімова В.Г. Використання відходів прокатного виробництва при брикетуванні вугілля // Кокс і хімія. – 1986. – №2. – С. 16–17.

30.Термічна переробка маслоокалиносодержащих відходів прокатного виробництва з отриманням товарних продуктів / В.П. Ульянов, В.Я. Дмитрієв, В.Д. Помінов та ін. // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1989. – №2. – С. 79–80.

31.Сиськов К.І., Вербицька О.В. Залізококс. – М.: Металургія, 1966. – 156 с.

32.Перспективні напрями утилізації промислових відходів в умовах ВАТ «ДМЗ ім. Петровського» / В.А. Носков, В.П. Бобильов, В.А. Петренко, А.Є. Бардах // Метал і лиття України. – 2003. – №5. – С. 32–33.

33.Ейдельман Л.П. Обладнання і технологія брикетування у вітчизняній та зарубіжній чорній металургії // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1988. – №8. – С. 2–12.

34.Експериментальні дослідження основних параметрів і режимів брикетування дрібнофракційних техногенних відходів у валкових пресах / В.А. Носков, Б.Н. Маймур, В.І. Петренко, А.Т. Лебідь // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 1999. – №6. – С. 104–107.

35.Єфименко Г.Г., Смирнов С.В. Розвиток підготовки металургійної сировини до плавки // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1987. – №3. – С. 2–17.

36.Установка для утилізації окалино-масловмісних осадів стічних вод трубопрокатних цехів / Ю.А. Галкін, В.І. Аксенов, А.А. Чесноков та ін. // Сталь. – 1985. – №10. – С. 91–93.

37.Лотош В.Є., Чесноков А.А. Механізм зміцнення безвипалювальних окатишів прискореного твердіння зі шламів прокатної окалини на вапняково-шлаковому в'яжучому // Комплексне використання мінеральної сировини. – 1986. – №11. – С. 49–52.

38.Зупп А., Циммерман К. // Чорні метали. – 1976. – №23. – С. 34.

39.Відділення масел від окалини у шламах прокатного виробництва з метою подальшого використання // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1977. – №17. – С. 47–48.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Постанова Кабінету Міністрів України №1556 від 13.10.2000 р. «Про Національний план дій з гігієни довкілля на 2000–2005 роки».
2. Постанова Кабінету Міністрів України №668 від 28.06.1997 р. «Про Програму використання відходів виробництва і споживання на період до 2005 року».
3. Ресурсно-екологічна оцінка аглодоменного виробництва / Ю.С. Юсфін, П.І. Черноусов, С.В. Недєлін // Сталь. – 2001. – №4. – С. 1–5.
4. Лисін В.С., Юсфін Ю.С. Ресурсно-екологічні проблеми XXI століття і металургія. – М.: Вища школа, 1998. – 447 с.
5. Проблеми організації маловідходних процесів у чорній металургії / Г.С. Клягін, В.І. Ростовський, А.В. Кравченко // Доповіді науково-практичної конференції «Донбас 2002: наука і техніка – виробництву», 5–6 лютого 2002 р., м. Донецьк. – С. 310–314.
6. Утилізація окалини зі стічних вод прокатних станів / Д.С. Воронін, В.В. Разумовський, С.І. Спиридонова // Сталь. – 1983. – №1. – С. 89–90.
7. Носков В.А. Підготовка і переробка залізовмісних відходів у металургійному виробництві України // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 2000. – №2. – С. 109–113.
8. Модернізація коксохімічного виробництва комбінату «Криворіжсталь» / І.Г. Крилов, Г.Д. Соловйов, І.З. Шатоха // Сталь. – 1998. – С. 6–9.
9. Про використання масловмісних відходів прокатного виробництва в аглошихті / Ю.І. Коваль, Т.А. Андрієнко, В.С. Євстаф'єв // Тези доповідей Всесоюзної наук.-техн. конф. «Теорія і технологія підготовки металургійної сировини до доменної плавки», Дніпропетровськ, 1985. – С. 235.
10. Використання замасленої окалини прокатних цехів в агломераційній шихті Криворізького металургійного заводу / В.М. Кравцов, Л.А. Горський, І.Л. Холмецький // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 1974. – №4. – С. 5–6.

11. Кривоносов І.В. Утилізація замасленої прокатної окалини в агломераційному виробництві // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1985. – №15. – С. 38–39.
12. Деякі особливості процесу агломерації при використанні в шихті окалини прокатного виробництва / Ю.Г. Єфименко, Є.І. Лещинська, І.М. Сальников, Ю.І. Коваль, А.К. Іванов // Відомості вищих навчальних закладів. Чорна металургія. – 1986. – №4. – С. 21–24.
13. Технологія підготовки до агломерації залізовмісних відходів металургійного виробництва / Б.М. Носовицький, В.І. Ростовський, Л.П. Жилін, В.Н. Муравйов, Н.П. Запорожець // Сталь. – 1980. – №1. – С. 4–7.
14. Поліпшення якості агломерату при підвищеному вмісті в шихті залізовмісних відходів / А.З. Крижевський, І.М. Міщенко, Н.А. Чиглинцев та ін. // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1988. – №8. – С. 35–46.
15. Використання відходів в аглодоменному виробництві Карагандинського металургійного комбінату / В.А. Мірко, А.Н. Клімушкін, А.І. Кузнецов // Сталь. – 1992. – №5. – С. 86–91.
16. Використання підготовленої замасленої окалини прокатних цехів в агломераційній шихті / Ф.Ф. Колесанов, В.М. Кравцов, Л.А. Горський // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1974. – №9. – С. 37–38.
17. Галкін Ю.А., Березюк В.Г. Дослідження сорбції нафтопродуктів твердими відходами підприємств чорної металургії // Тези доповідей конф. «Методи видалення твердих домішок із промислових стічних вод», Челябінськ, 1984. – С. 30–31.
18. Супрун Ю.М. Зневоднення шламів металургійного виробництва на фільтр-пресах за кордоном // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1988. – №8. – С. 14–23.

19. Лотош В.Є., Галкін Ю.А. Удосконалення технології утилізації окалино-масловмісних осадів стічних вод машинобудівних підприємств // Сталь. – 1996. – №8. – С. 65–67.
20. Борисов В.М., Яценко-Жук А.Д., Матюх І.Я. Перспективи використання дисперсних відходів прокатного виробництва в чорній металургії // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1981. – №21. – С. 45–60.
21. Використання відходів металургійного виробництва в аглодоменному переділі / В.Н. Прохоров, Н.М. Устьянцев, А.В. Сивець та ін. // Сталь. – 1983. – №11. – С. 4–7.
22. Федоренко Н.В., Данілов В.І., Коротких А.Т. Використання залізовмісних відходів в агломераційному та доменному виробництвах // Металург. – 1985. – №12. – С. 13–14.
23. Використання шламу зі шламонакопичувачів і замасленої окалини прокатного виробництва в агломераційній шихті / М.В. Рогов, Є.Ф. Шкурко, І.Я. Матюх // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1983. – №14. – С. 46–47.
24. Касс В. Переробка шламу прокатної окалини // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1981. – №13. – С. 29–31.
25. Шурхал В.А. Інтенсифікація процесів окускування залізорудних матеріалів // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1985. – №13. – С. 7–27.
26. Воропаєв Є.М., Борисов В.М. Використання пилу і шламів металургійних заводів в агломераційному виробництві // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1980. – №1. – С. 35–46.
27. Шатоха І.З., Боклан Б.В. Досвід утилізації замасленої окалини прокатного виробництва // Тези доповідей II Міжнар. конф. «Теорія і практика вирішення екологічних проблем у гірничодобувній та металургійній промисловості», Дніпропетровськ, 1995. – С. 49–50.
28. Використання залізної окалини для виробництва паливно-плавильних матеріалів / В.Ф. Гончаров, В.М. Єгоров, Т.Ф. Медведєва, М.В.

Семененко // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1977. – №13. – С. 37.

29. Джакелі Т.Н., Трофімова В.Г. Використання відходів прокатного виробництва при брикетуванні вугілля // Кокс і хімія. – 1986. – №2. – С. 16–17.

30. Термічна переробка маслоокалиносодержащих відходів прокатного виробництва з отриманням товарних продуктів / В.П. Ульянов, В.Я. Дмитрієв, В.Д. Помінов та ін. // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1989. – №2. – С. 79–80.

31. Сиськов К.І., Вербицька О.В. Залізококс. – М.: Металургія, 1966. – 156 с.

32. Перспективні напрями утилізації промислових відходів в умовах ВАТ «ДМЗ ім. Петровського» / В.А. Носков, В.П. Бобильов, В.А. Петренко, А.Є. Бардах // Метал і лиття України. – 2003. – №5. – С. 32–33.

33. Ейдельман Л.П. Обладнання і технологія брикетування у вітчизняній та зарубіжній чорній металургії // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1988. – №8. – С. 2–12.

34. Експериментальні дослідження основних параметрів і режимів брикетування дрібнофракційних техногенних відходів у валкових пресах / В.А. Носков, Б.Н. Маймур, В.І. Петренко, А.Т. Лебідь // Металургійна та гірничорудна промисловість. – 1999. – №6. – С. 104–107.

35. Єфименко Г.Г., Смирнов С.В. Розвиток підготовки металургійної сировини до плавки // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1987. – №3. – С. 2–17.

36. Установка для утилізації окалино-масловмісних осадів стічних вод трубопрокатних цехів / Ю.А. Галкін, В.І. Аксенов, А.А. Чесноков та ін. // Сталь. – 1985. – №10. – С. 91–93.

37. Лотош В.Є., Чесноков А.А. Механізм зміцнення безвипалювальних окатишів прискореного твердіння зі шламів прокатної окалини на

вапняково-шлаковому в’яжучому // Комплексне використання мінеральної сировини. – 1986. – №11. – С. 49–52.

38. Зупп А., Циммерман К. // Чорні метали. – 1976. – №23. – С. 34.

39. Відділення масел від окалини у шламах прокатного виробництва з метою подальшого використання // Бюлетень Ін-ту «Черметінформація». Чорна металургія. – 1977. – №17. – С. 47–48.