

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: Розробка технології переробки дріб'язку залізорудних
окатишів методом брикетування.

Виконала:

студентка групи МТ-22-2

Анна КОНОВАЛЕНКО

Керівник випускної роботи

Дмитро БАБОШКО

Нормоконтролер

Дмитро БАБОШКО

Т.в.о. завідувача кафедри

Дмитро БАБОШКО

Кривий Ріг
2026 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійний

Кафедра: металургії чорних металів і ливарного виробництва

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 136 Металургія

Затверджую

Т.в.о. зав. кафедрою

_____ Дмитро БАБОШКО

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

до випускної атестаційної роботи бакалавра

КОНОВАЛЕНКО АННИ ВАДИМІВНИ

1. Тема роботи: Розробка технології переробки дріб'язку залізорудних окатишів методом брикетування.

керівник роботи: к.т.н., доцент Бабоско Д.Ю.

затверджено наказом по КНУ від «__19__»__02____2026 р. № 113с

2. Строк подання роботи студентом «__27__»__05____2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: хімічний склад, гранулометричний склад і вологість вихідних матеріалів; технологічні параметри брикетування та умови відновлення брикетів воднем.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): випробування брикетів, визначення вологості, вибір зв'язувальних матеріалів, брикетування та випробування, аналіз відновлюваності брикетів, вибір зв'язувальних матеріалів, оптимізація складу брикетів методом планування експерименту, вплив добавок біовуглецю на властивості брикетів

5. Перелік графічного матеріалу: презентація (9 стор. формату А4)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів
1	СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕРОБКИ ДРІБ'ЯЗКУ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ	січень 2026 р.
2	МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ВИПРОБУВАННЯ БРИКЕТІВ	лютий, березень 2026 р.
3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БРИКЕТІВ ТА ПРОЦЕСУ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ	квітень 2026 р.
4	ОФОРМЛЕННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ ТА ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ	травень 2026 р.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Анна КОНОВАЛЕНКО

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Дмитро БАБОШКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до роботи бакалавра на тему «Розробка технології переробки дріб'язку залізорудних окатишів методом брикетування»: __56__с., __26__рис., __15__табл., 31 літературне джерело

Об'єктом дослідження є процес переробки дріб'язку залізорудних окатишів методом брикетування та його використання у процесах прямого відновлення.

Предметом дослідження є вплив складу брикетної суміші (зв'язувальні, біовуглець, вологість, тиск пресування) на фізико-механічні властивості брикетів та їх поведінку при відновленні воднем.

У розділі 1 наведено аналіз сучасного стану виробництва сталі, проблем утворення дріб'язку залізорудних окатишів та існуючих підходів до їх переробки; обґрунтовано доцільність брикетування та використання органічних зв'язувальних і біовуглецю.

У розділі 2 описано методику підготовки проб, вибору зв'язувальних матеріалів, проведення брикетування, планування експерименту та методи дослідження властивостей брикетів і їх відновлення.

У розділі 3 наведено результати експериментальних досліджень, визначено оптимальні склади та параметри брикетування, досліджено вплив біовуглецю, встановлено закономірності відновлення та підтверджено можливість масштабування процесу.

ДРІБ'ЯЗОК ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ, БРИКЕТУВАННЯ, ЗВ'ЯЗУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, БІОВУГЛЕЦЬ, ВІДНОВЛЕННЯ, МЕХАНІЧНА МІЦНІСТЬ

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.Р			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літера	Аркцш	Аркцшів
Розробив		Коноваленко					1	1
Перевірив		Бабошко						
Н. контр.		Бабошко						
Затвердив		Бабошко				МТ-22-2		

[illegible]

ЗМІСТ

ВСТУП

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕРОБКИ ДРІБ'ЯЗКУ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ.....	9
2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ВИПРОБУВАННЯ БРИКЕТІВ.....	17
2.1 Підготовка проб та їх характеристика.....	17
2.1.1 Хімічний аналіз.....	17
2.1.2 Гранулометричний склад.....	18
2.1.3 Визначення вологості.....	19
2.2 Вибір зв'язувальних матеріалів.....	20
2.3 Брикетування та випробування.....	21
2.4 Додавання біовуглецю.....	22
2.5 Аналіз відновлюваності брикетів.....	23
2.6 Масштабування процесу.....	24
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БРИКЕТІВ ТА ПРОЦЕСУ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ.....	25
3.1 Характеристика вихідних матеріалів.....	25
3.1.1 Хімічний склад.....	25
3.1.2 Гранулометричний склад.....	25
3.1.3 Вологість.....	27
3.2 Вибір зв'язувальних матеріалів.....	28
3.3 Оптимізація складу брикетів методом планування експерименту.....	31
3.4 Вплив добавок біовуглецю на властивості брикетів.....	39
3.5 Дослідження процесу відновлення брикетів.....	42
3.6 Масштабування процесу брикетування та оцінка властивостей брикетів...	46
ВИСНОВКИ.....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	52

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.3			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	ЗМІСТ			
Розробив	Коноваленко							
Перевірив	Бабошко							
Н. контр.	Бабошко							
Затвердив	Бабошко				МТ-22-2			

ВСТУП

Сучасний розвиток металургійної галузі характеризується одночасним зростанням попиту на сталь та посиленням екологічних вимог до її виробництва. Урбанізація, розвиток інфраструктури, транспортного машинобудування та енергетики обумовлюють стабільно високий рівень споживання металопродукції, що, у свою чергу, вимагає підвищення ефективності використання сировинних ресурсів. Разом із цим традиційні технології виробництва чавуну і сталі супроводжуються значними викидами парникових газів, що формує необхідність переходу до низьковуглецевих та безвуглецевих рішень.

Одним із ключових напрямів модернізації металургії є впровадження технологій прямого відновлення заліза з використанням водню як відновлювального газу. Такі технології дозволяють істотно знизити викиди CO₂ та відповідають концепції «зеленої» металургії. Однак ефективність процесів прямого відновлення значною мірою залежить від якості шихтових матеріалів, зокрема від їх гранулометричного складу, міцності та газопроникності. Використання дрібнодисперсних матеріалів без попереднього окускування призводить до погіршення умов протікання процесу, зниження продуктивності агрегатів і збільшення втрат матеріалу.

У процесі виробництва, транспортування та підготовки залізородних окатишів утворюються значні обсяги дріб'язку, який є цінним залізовмісним побічним продуктом. Незважаючи на високий вміст заліза, цей матеріал не може бути безпосередньо використаний у металургійних агрегатах через невідповідність вимогам до крупності та міцності. Традиційні напрями його використання, зокрема в агломераційному виробництві або доменних процесах, поступово втрачають актуальність у зв'язку з переходом до нових екологічно орієнтованих технологій.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.ВС								
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата									
Розробив	Коноваленко				ВСТУП				Літера	Аркцш	Аркцшів		
Перевірив	Бабошко										1	2	
									МТ-22-2				
Н. контр.	Бабошко												
Затвердив	Бабошко												

У зв'язку з цим актуальним є пошук ефективних способів переробки дріб'язку окатишів із можливістю його повернення у виробничий цикл.

Перспективним напрямом вирішення зазначеної проблеми є брикетування, яке дозволяє отримувати окускований матеріал із заданими фізико-механічними та металургійними властивостями. Важливу роль у цьому процесі відіграють зв'язувальні речовини, що визначають міцність брикетів, їх стійкість до руйнування та поведінку під час відновлення. Особливий інтерес становить застосування органічних зв'язувальних матеріалів, які, на відміну від традиційних неорганічних, не призводять до зростання вмісту пустої породи в кінцевому продукті та можуть покращувати його відновлюваність.

Додатковим напрямом підвищення екологічності металургійного виробництва є використання біовуглецю як відновлюваного джерела вуглецю. Його застосування дозволяє знизити залежність від викопних палив, сприяє зменшенню викидів CO₂ та позитивно впливає на перебіг металургійних процесів. У поєднанні з водневими технологіями це відкриває можливості для створення високоефективних і низьковуглецевих виробничих схем.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності розробки ефективної технології переробки дріб'язку залізрудних окатишів, яка б забезпечувала його повернення у виробничий цикл без погіршення якості металургійної продукції та відповідала сучасним екологічним вимогам.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕРОБКИ ДРІБ'ЯЗКУ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ

Урбанізація зумовила стрімке зростання попиту на виробництво різноманітних будівельних матеріалів. Завдяки високому співвідношенню міцності до маси, а також винятковій міцності на розтяг і стиск, сталь є більш переважним матеріалом порівняно з бетоном у будівництві. Крім того, сталь широко застосовується у зведенні будівель, виробництві автомобілів, залізничного транспорту, побутової техніки та інших об'єктів інфраструктури.

Сировина, що подається до відновлювальних печей у процесах виробництва чавуну і сталі, надходить або у вигляді кускового матеріалу, або у вигляді окускованих дрібних залізних руд. Використання окускованих дрібних фракцій дозволяє досягти кращих відновлювальних властивостей, підвищити газопроникність шихти та загальну ефективність печі. Як зазначено у роботі Mohassab et al. [1], процеси окускування можуть здійснюватися двома основними способами — агломерацією або виробництвом окатишів. При цьому виробництво окатишів є домінуючим напрямом серед інших технологічних маршрутів завдяки таким перевагам:

- Висока вихідність і продуктивність: за рахунок високого вмісту заліза, а також високої пористості та однорідної сферичної форми, окатиші сприяють підвищенню продуктивності процесу.
- Економічні та енергетичні аспекти: споживання енергії зменшується до 30% завдяки зниженню утворення шлаку, що, у свою чергу, зменшує потребу в енергоємних операціях його очищення. Завантаження окатишів також зменшує утворення спечених кусків, що підвищує тривалість кампанії агрегатів і знижує потребу в ремонті вогнетривкої футерівки.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.01.ПП			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕРОБКИ ДРІБ'ЯЗКУ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ	Літера	Аркцш	Аркцшів
Розробив	Коноваленко						1	8
Перевірив	Бабошко					МТ-22-2		
Н. контр.	Бабошко							
Затвердив	Бабошко							

- Екологічний аспект: використання окатишів обмежує викиди забруднюючих речовин, зменшуючи загальний негативний вплив на довкілля. У порівнянні з процесом агломерації, при виробництві окатишів можливе зниження викидів SO_x до 90%, CO_x — до 85% і NO_x — до 20%.

Разом із тим зростання попиту на сталь супроводжується негативним впливом на навколишнє середовище, зокрема утворенням значних обсягів парникових газів у процесі виробництва. За наявними оцінками, на виробництво чавуну і сталі припадає близько 25% промислових викидів CO_2 у Європі, що робить декарбонізацію галузі одним із пріоритетних завдань.

Перехід від традиційного доменного способу виробництва сталі до більш екологічного процесу прямого відновлення із застосуванням водню як відновлювального газу розглядається як перспективне рішення цієї проблеми. Концепція «зеленої» сталі передбачає інтегроване виробництво з використанням наскрізної цифровізації, електроенергії з безвуглецевих джерел та «зеленого» водню замість вуглецю. Над реалізацією цього підходу активно працюють провідні металургійні компанії.

Шихта для установок прямого відновлення повинна подаватися у вигляді окатишів із мінімальним вмістом дріб'язку для забезпечення високої ефективності процесу. Наявність дрібних фракцій негативно впливає на газопроникність шару та збільшує кількість пилу, який необхідно видаляти в процесі виробництва. Тому перед завантаженням сировини обов'язковим є грохочення залізорудних окатишів.

Близько 4–5% окатишів у процесі виробництва сталі відсіюються як недорозмірні фракції [2] і класифікуються як дріб'язок окатишів. Дріб'язок окатишів є залізовмісними побічними продуктами, розмір яких зазвичай менше 6,3 мм. Згідно з даними попередніх досліджень [3,4], у світі щорічно утворюється близько 24 млн тонн такого дріб'язку. Основними причинами його утворення є транспортування та перевантаження залізорудних окатишів, а також операції підготовки руди, зокрема дроблення, подрібнення та грохочення.

Наразі утворений дріб'язок окатишів використовується як шихта для агломерації, а також для виробництва брикетів, призначених для доменних печей. Проте цілі сталого розвитку, задекларовані європейськими країнами, роблять такі підходи застарілими. Зокрема, у Швеції агломераційні продукти вже не застосовуються, а дріб'язок окатишів використовується лише як компонент брикетної шихти для доменного виробництва. Водночас і цей напрям втратить актуальність у найближчі роки через заміну доменних печей установками прямого відновлення на основі водню.

Проведено значну кількість досліджень щодо можливості рециклінгу дріб'язку окатишів. Однак, окрім проблеми втрат матеріалу, залишається актуальною проблема їх окускування. Вона обумовлена відносно малими розмірами частинок (<6 мм), що унеможлиблює їх безпосереднє використання у відновлювальних агрегатах без попереднього окускування. Крім того, отримані окусковані матеріали повинні мати оптимальні міцнісні характеристики, а застосування зв'язувальних речовин забезпечує ефективне формування таких матеріалів.

Брикетування, у порівнянні з виробництвом окатишів, дозволяє використовувати як сировину частинки більшого розміру, тоді як при виробництві окатишів допустимий розмір частинок зазвичай не перевищує 5 мм [5].

Зв'язувальна речовина забезпечує зчеплення дрібних частинок матеріалу за рахунок формування міцних адгезійних зв'язків при додаванні оптимальної кількості води. Оптимальний вміст вологи визначається шляхом аналізу металургійних характеристик кінцевого окускованого продукту. Загалом ефективний зв'язувальний матеріал повинен відповідати таким вимогам [6]:

- високі механічні властивості: опір руйнуванню, міцність на стиск, зносостійкість і стійкість до деформації під навантаженням;
- хімічний склад без компонентів, що реагують із сировиною з утворенням шлакових фаз (зокрема Al_2O_3 і SiO_2);

- належні металургійні властивості: висока відновлюваність, низька схильність до набухання, малий перепад тиску під час відновлення;

- технологічність застосування — простота введення і перемішування, а також відсутність ускладнень при формуванні сирих гранул;

- доступність і низька вартість.

Зв'язувальні матеріали поділяються на органічні та неорганічні, і процес брикетування дріб'язку окатишів може здійснюватися із застосуванням як органічних (меляса, крохмаль, лігнін, бітум тощо), так і неорганічних (силікат натрію, цемент, бентоніт тощо) зв'язувальних речовин.

Неорганічні зв'язувальні, зокрема бентоніт і цемент, забезпечують формування міцних міжчастинкових контактів за рахунок утворення жорсткої зв'язуючої матриці, що позитивно впливає на холодну міцність і стійкість до стирання. Однак їх застосування супроводжується внесенням додаткових баластних компонентів (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO), які не беруть участі у відновленні, що призводить до погіршення відновлюваності та зниження швидкості відновлення, зростання об'єму шлаку та підвищення питомих витрат енергії у подальших металургійних процесах. Окрім того, зростання вмісту пустої породи у готовому продукті, який повинен бути обмежений рівнем менше 2 мас.%, викликає збільшення інтенсивності зносу вогнетривких матеріалів.

Органічні зв'язувальні матеріали, навпаки, практично не збільшують вміст пустої породи в брикетах, оскільки при нагріванні вони термічно розкладаються з утворенням газоподібних продуктів і твердого вуглецевого залишку [7]. Це сприяє формуванню додаткової пористості структури, що покращує дифузію відновлювального газу та кінетику відновлення. Разом із тим, через термічну нестабільність органічні зв'язувальні не забезпечують достатньої міцності брикетів при високих температурах, що може призводити до їх руйнування на ранніх стадіях термообробки [8].

У зв'язку з цим найбільш ефективним підходом є комбіноване використання органічних і неорганічних зв'язувальних матеріалів. Така комбінація дозволяє

поєднати високу початкову механічну міцність, яку забезпечують неорганічні компоненти, із покращеними металургійними характеристиками, що досягаються завдяки органічним складовим. Введення вуглецевмісних органічних речовин також сприяє формуванню додаткових активних центрів відновлення та скороченню дифузійних шляхів для газів, що в цілому підвищує ефективність процесу прямого відновлення [7]. Такий підхід є особливо актуальним при розробці брикетів, призначених для використання у водневих технологіях виробництва сталі, де висувуються підвищені вимоги до реакційної здатності та структурної стабільності матеріалу.

Часткова або повна заміна викопних палив відновлюваними біомасовими ресурсами розглядається як один із ключових інструментів декарбонізації металургійного виробництва та зниження питомих викидів CO₂. Як показано в ряді досліджень [9–11], використання біоенергетичних матеріалів замість традиційного вугілля не лише зменшує вуглецевий слід процесу, але й відкриває можливості для формування замкнених матеріальних потоків у межах циркулярної економіки. Біомаса, як відновлюване джерело вуглецю, характеризується нижчим рівнем чистих викидів CO₂ за рахунок попереднього поглинання вуглецю в процесі фотосинтезу, що робить її привабливою альтернативою викопному паливу. З урахуванням цих переваг у даній роботі біовуглець застосовується як джерело вуглецю та вводиться до складу брикетів на завершальних стадіях їх формування, що дозволяє цілеспрямовано регулювати його вміст і розподіл у структурі матеріалу.

Введення біовуглецю забезпечує комплексний позитивний ефект як з екологічної, так і з технологічної точки зору. Зокрема, його використання дозволяє частково або повністю замінити викопне паливо у металургійних процесах, зменшуючи залежність від традиційних енергоресурсів. Завдяки високій реакційній здатності та розвиненій пористій структурі біовуглець інтенсифікує процеси відновлення, сприяючи підвищенню швидкості хімічних реакцій. Крім того, він

позитивно впливає на формування шлакової фази, зокрема сприяє її спінюванню, що покращує умови видалення домішок та стабілізує тепловий режим процесу [12].

З економічної точки зору застосування біовуглецю дозволяє знизити витрати на електроди за рахунок покращення умов електроплавки та зменшення їх зносу, що, відповідно, скорочує частоту їх заміни та експлуатаційні витрати. У поєднанні з технологіями прямого відновлення із використанням водню це забезпечує суттєве скорочення викидів парникових газів і формує передумови для створення низьковуглецевого або практично безвуглецевого металургійного виробництва. Разом із тим, використання біовуглецю потребує оптимізації його кількості та способу введення до складу брикетів, оскільки надмірний вміст може негативно впливати на їх механічну міцність і стабільність у процесі відновлення.

Ряд дослідників запропонував використання водню як відновлювального газу та здійснив комплексні дослідження фізико-механічних і металургійних властивостей окискованих матеріалів у процесах прямого відновлення [13–15]. Встановлено, що водень, завдяки високій дифузійній здатності та відсутності вуглецевмісних побічних продуктів, забезпечує інтенсивніший перебіг відновлювальних реакцій у порівнянні з традиційними газовими агентами. При цьому ключовими параметрами, що визначають ефективність процесу, є температура, тривалість відновлення, а також структурні характеристики окискованого матеріалу — пористість, розподіл пор і щільність брикетів. Оптимальний підбір цих параметрів дозволяє досягати високого ступеня металізації при мінімальних енергетичних витратах і рівномірному протіканні реакцій у всьому об’ємі матеріалу.

Разом із тим встановлено, що при використанні водню, особливо у поєднанні з біовуглецем, відбуваються суттєві зміни в структурі брикетів. Інтенсивне видалення кисню та летких компонентів супроводжується формуванням додаткової пористості, що, з одного боку, позитивно впливає на кінетику відновлення, а з іншого — може призводити до зниження механічної міцності матеріалу та підвищення його схильності до руйнування й стирання. У роботах [16]

відзначається, що такі ефекти особливо проявляються на високих ступенях відновлення, коли структура матеріалу зазнає істотної перебудови.

Таким чином, незважаючи на значні екологічні переваги водневого відновлення, існує необхідність комплексної оптимізації складу брикетів, зокрема співвідношення біовуглецю та зв'язувальних речовин, а також параметрів їх формування. Це дозволить забезпечити баланс між високою реакційною здатністю та достатньою механічною міцністю окускованих матеріалів як у процесі відновлення, так і на подальших стадіях металургійної переробки.

Практична реалізація наведених технологічних підходів створює передумови для суттєвого підвищення ресурсоефективності металургійного виробництва за рахунок залучення до повторного використання дрібнодисперсних побічних продуктів, які раніше втрачалися або використовувалися нерационально. Інтеграція процесів брикетування дріб'язку окатишів, застосування ефективних зв'язувальних систем та використання відновлюваних вуглецевмісних матеріалів дозволяє сформувати замкнені матеріальні потоки, зменшити потребу у первинній сировині та знизити обсяги відходів.

Крім того, впровадження водневих технологій відновлення у поєднанні з оптимізованими параметрами окускування забезпечує не лише екологічний ефект у вигляді скорочення викидів парникових газів, але й підвищення технологічної ефективності процесів за рахунок покращення кінетики відновлення та керованості структури матеріалу. У сукупності це сприяє переходу до більш гнучких, енергоефективних і низьковуглецевих виробничих схем.

Таким чином, комплексне впровадження розглянутих рішень відповідає сучасним тенденціям розвитку металургійної галузі та принципам циркулярної економіки, забезпечуючи не лише техніко-економічні переваги, але й довгостроковий позитивний вплив на екологічну стійкість промисловості та суспільства в цілому.

Дана робота зосереджена на дослідженні потенціалу рециклінгу відбракованого дріб'язку залізорудних окатишів для виробництва сталі шляхом їх

окусування із застосуванням органічних зв'язувальних речовин без погіршення якості та механічних властивостей отриманих окускованих матеріалів. Таким чином, основною метою роботи є підвищення ефективності переробки дріб'язку залізородних окатишів відповідно до вимог процесів прямого відновлення нового покоління на основі водню, що сприятиме більш раціональному використанню ресурсів і розвитку циркулярної економіки.

На основі аналізу літературних джерел сформульовано такі основні завдання роботи:

- визначити найбільш ефективний органічний зв'язувальний матеріал для брикетування та рециклінгу дріб'язку окатишів;
- забезпечити необхідну міцність брикетів шляхом оптимізації вмісту зв'язувального, вологості та тиску пресування;
- оцінити вплив добавок біовуглецю на механічні та хімічні характеристики брикетів;
- дослідити поведінку брикетів у процесі відновлення під час прямого відновлення воднем;
- визначити оптимальні умови отримання брикетів із біовуглецем із необхідною міцністю до та після відновлення;
- проаналізувати ступінь металізації на різних стадіях відновлення із застосуванням методу рентгенівської дифракції;
- перевірити відтворюваність результатів, отриманих у лабораторних умовах, при масштабуванні процесу до промислового рівня шляхом виготовлення брикетів за допомогою екструдера.

2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ВИПРОБУВАННЯ БРИКЕТІВ

2.1 Підготовка проб та їх характеристика

У даній роботі вихідний дріб'язок залізорудних окатишів потребує попередньої підготовки з метою відбору репрезентативної проби для подальших досліджень.

Це досягається шляхом перемішування всього об'єму вихідного матеріалу з використанням інтенсивного змішувача типу Eirich, який є компактним обладнанням, призначеним для отримання однорідних сумішей у випадках, коли матеріал подається у значних кількостях і його ручне перемішування є ускладненим.

Характеризація проб також відіграє ключову роль у даному дослідженні, оскільки саме вона дозволяє ідентифікувати хімічні компоненти та визначити їх фізико-хімічні властивості. З урахуванням мети роботи — визначення найбільш ефективного органічного зв'язувального для підвищення механічних властивостей брикетів — необхідно проаналізувати три основні параметри вихідних матеріалів:

- хімічний склад;
- гранулометричний склад;
- вміст вологи.

2.1.1 Хімічний аналіз

Хімічний склад досліджуваного матеріалу визначається із застосуванням рентгенофлуоресцентного аналізатору EXPERT 4L (рис. 2.1).

Аналіз проводили в лабораторних умовах шляхом розміщення підготовлених зразків у вимірювальній камері приладу.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.02.ВБ			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ВИПРОБУВАННЯ БРИКЕТІВ	Літера	Аркцш	Аркцшів
Розробив	Коноваленко						1	8
Перевірив	Бабошко							
Н. контр.	Бабошко							
Затвердив	Бабошко					МТ-22-2		



Рисунок 2.1 – Рентгенофлуоресцентний аналізатор EXPERT 4L

2.1.2 Гранулометричний склад

Розмір частинок суттєво впливає на питому поверхню, ущільнюваність і механічні властивості кінцевого матеріалу. Вміст дрібних фракцій визначає ступінь ущільнення брикетів у процесі їх формування.

З метою визначення гранулометричного складу досліджуваної проби у роботі використовується механічний ситовий аналізатор (рис. 2.2). Для цього застосовується набір сит із розмірами отворів 0,063; 0,25; 0,5; 1; 2; 2,8; 4; 5,6; 7,1; 10 та 11,2 мм, які встановлюються у колонку у порядку зростання розміру отворів знизу догори.



Рисунок 2.2 – Механічний ситовий аналізатор

Після завантаження всієї проби у верхнє сито та встановлення системи у ситовий аналізатор проводиться процес просіювання. Тривалість вібраційного впливу становить 5 хвилин, що забезпечує достатній час для ефективного розподілу частинок за фракціями.

2.1.3 Визначення вологості

Технологічність процесу брикетування та міцність отриманих брикетів значною мірою залежать від вмісту вологи, тому визначення початкової вологості як вихідної сировини, так і зв'язувальних матеріалів є обов'язковим етапом дослідження. Це дозволяє коректно розрахувати сумарний вміст вологи у брикетній суміші.

Визначення вологості кожного компонента проводиться за стандартною методикою шляхом точного зважування з подальшим сушінням проби матеріалу в сушильній шафі при температурі 105 °С до досягнення сталої маси з подальшим охолодженням та зберіганням у ексикаторі.

2.2 Вибір зв'язувальних матеріалів

На першому етапі дослідження необхідно оцінити потенціал окускування дріб'язку залізорудних окатишів із використанням як органічних, так і неорганічних зв'язувальних матеріалів. На основі аналізу попередніх наукових досліджень, а також рекомендацій виробників зв'язувальних речовин, для подальших експериментальних досліджень було відібрано шість органічних і один неорганічний зв'язувальний матеріал (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Зв'язувальні матеріали

Вибрані зв'язувальні матеріали	Тип	Склад
Силікат натрію	Неорганічний	Na_2SiO_3
Kempel	Органічний	Аніонний поліакриламід
Лігнін	Органічний	$\text{C}_{81}\text{H}_{92}\text{O}_{28}$
Лігносульфонат	Органічний	$\text{C}_{20}\text{H}_{24}\text{Na}_2\text{O}_{10}\text{S}_2$
Крохмаль	Органічний	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)$
Alcotac® CB6	Органічний	Поліакрилат ($\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{O}_6\text{S}$)
Alcotac® FE14	Органічний	Аніонний поліакриламід

Першочерговим завданням є проведення скринінгу зв'язувальних матеріалів з метою визначення найбільш перспективних із них для використання у процесі брикетування. Критерієм відбору є здатність отриманих брикетів забезпечувати необхідні механічні характеристики, зокрема витримувати навантаження на стиск у межах 60–100 кг/см² [17], що відповідає вимогам до окускованої сировини для металургійних процесів.

2.3 Брикетування та випробування

Брикетування є процесом ущільнення дрібнодисперсних частинок у цілісний шматок матеріалу із застосуванням обладнання, такого як екструдери, вібропреси, валкові преси або штампи. Якість отриманих брикетів визначається низкою технологічних параметрів, серед яких ключовими є тип і кількість зв'язувального, тиск пресування, умови змішування, поверхневі властивості частинок та гранулометричний склад сировини [18].

У даному дослідженні виготовлялися брикети циліндричної форми, які забезпечують приблизно у п'ять разів вищу міцність при точковому стиску порівняно з брикетами овальної або подушкоподібної форми. Для кожного циклу пресування у прес-форму діаметром 20 мм (рис. 2.3) завантажувалася рівна маса матеріалу (~20 г).



Рисунок 2.3 – Прес-форма для виготовлення брикетів

Процес брикетування здійснювався із використанням лабораторного гідравлічного преса (рис. 2.4), який забезпечує максимальний тиск до 200 кН. Після формування кожного зразка визначалися його маса та висота, на основі чого розраховувалась щільність брикетів.



Рисунок 2.4 – Гідравлічний прес

Подальші випробування проводилися на гідравлічній машині для визначення міцності, де визначалися показники холодної міцності при стиску та міцності при розколюванні. Для визначення холодної міцності при стиску брикети встановлювалися у вертикальному положенні, тоді як при випробуванні на міцність при розколюванні — у горизонтальному.

Після кожного циклу пресування для різних складів сумішей (рецептур) зруйновані брикети відбиралися та піддавалися аналізу вологості з метою подальшої оцінки впливу вологи на їх властивості.

2.4 Додавання біовуглецю

Використання біовуглецю як джерела вуглецю замість традиційного вугілля сприяє підвищенню екологічності виробництва сталі. Як зазначалося раніше, перед використанням біовуглецю необхідно провести його характеристику з метою визначення гранулометричного складу та хімічного складу.

Наступним етапом є розробка рецептур, що є ключовим елементом для подальшого проведення експериментів. Згідно з літературними даними [19], додавання біовуглецю суттєво знижує міцність окускованих матеріалів. Біовуглець вводиться з метою забезпечення карбюризациї, при цьому рекомендований його вміст у брикетах становить 1,5–4 мас. %.

У даній роботі брикети виготовлялися з варіюванням вмісту біовуглецю в межах 0–10%. Отримані брикети випробовувалися на міцність із використанням випробувальної машини, оскільки міцність при розколюванні може бути меншою за 1 бар, що унеможлиблює її вимірювання на стандартному гідравлічному обладнанні з мінімальною ціною поділки 1 бар.

2.5 Аналіз відновлюваності брикетів

Для оцінки відновлювальної здатності брикетів застосовувався термогравіметричний аналіз, який проводився для всіх перспективних рецептур як із додаванням біовуглецю, так і без нього. Аналіз дозволяє визначити стабільність брикетів та вміст летких компонентів шляхом реєстрації зміни маси зразків при нагріванні.

Нагрівання здійснювалося зі швидкістю 100 °C/хв до температури 950 °C, після чого експеримент продовжувався до досягнення заданого ступеня відновлення (25%, 50%, 75% або 100%). Як відновлювальний газ використовувався водень із витратою 100 мл/хв. Після дегазації та створення вакууму в камері приладу подавали водень одночасно з підвищенням температури.

Додатково проводилися переривчасті випробування відновлення для визначення залежності втрати маси та зміни міцності брикетів при різних ступенях відновлення. Отримані значення міцності після відновлення порівнювалися з нормативним рівнем 15–20 кг/см² [17].

2.6 Масштабування процесу

Масштабування є важливим етапом при переході від лабораторних досліджень до промислових випробувань. Його метою є підтвердження можливості відтворення отриманих результатів у більших масштабах.

У даній роботі для масштабування процесу брикетування використовувався екструдер, який дозволяє отримувати брикети при менших значеннях тиску пресування, але з більшою продуктивністю. Для екструзії обиралася рецептура зі зв'язувальним, що забезпечує найвищу «зелену» міцність, оскільки екструдовані брикети є більш чутливими до руйнування під час транспортування та обробки.

Перспективні склади, як із додаванням біовуглецю, так і без нього, були виготовлені методом екструзії та випробувані на міцність при стиску і розколюванні з метою порівняння з результатами, отриманими при ручному брикетуванні на лабораторному пресі.

Крім того, для екструдованих брикетів проводилися додаткові випробування, зокрема випробування на ударну міцність, а також аналіз їх відновлювальної здатності.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БРИКЕТІВ ТА ПРОЦЕСУ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

3.1 Характеристика вихідних матеріалів

3.1.1 Хімічний склад

Проведено хімічний аналіз вихідних матеріалів, результати якого наведені в таблиці 3.1 (дріб'язок залізорудних окатишів) та таблиці 3.2 (біовуглець).

Таблиця 3.1 – Хімічний склад дріб'язку залізорудних окатишів, % мас.

Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	V ₂ O ₅	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	C
95,11	0,48	1,98	0,1	0,02	0,42	1,16	0,03	0,21	0,22	0,03	0,06

Таблиця 3.2 – Хімічний склад біовуглецю, % мас.

C _{ТВ}	Леткі речовини	Зола	Вологість
91,19	7,74	1,04	0,03

Використаний у роботі біовуглець є піролізованим матеріалом із високим вмістом твердого вуглецю (C_{ТВ}), що свідчить про його високу якість. Твердий вуглець визначається як твердий горючий залишок, який залишається після нагрівання біовуглецю та видалення всіх летких компонентів.

Домішки, такі як зола та леткі речовини, можуть спричиняти експлуатаційні проблеми у відновлювальних агрегатах [20], зокрема погіршувати газодинамічні умови процесу та впливати на якість кінцевого продукту. Тому їх вміст у біовуглеці повинен бути мінімізований.

3.1.2 Гранулометричний склад

Визначення гранулометричного складу дріб'язку окатишів і біовуглецю проводилося за допомогою механічного ситового аналізатора, результати якого представлені на рисунках 3.1 і 3.2 відповідно.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.03.ЕД			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дат				
Розробив	Коноваленко				ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БРИКЕТІВ ТА ПРОЦЕСУ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ	Літера	Аркцш	Аркцшів
Перевірив	Бабошко						1	27
						МТ-22-2		
Н. контр.	Бабошко							
Затвердив	Бабошко							



Рисунок 3.1 – Гранулометричний склад дріб'язку залізорудних окатишів



Рисунок 3.2 – Гранулометричний склад біовугілля

З аналізу рисунка 3.1 встановлено, що дріб'язок окатишів переважно складається з дуже дрібних частинок розміром менше 0,063 мм. Водночас значна частка матеріалу знаходиться у фракційному інтервалі 1,0–5,6 мм, що свідчить про доцільність застосування брикетування як основного методу окускування, оскільки виробництво окатишів є менш ефективним для матеріалів із таким розподілом частинок.

Згідно з рисунком 3.2, біовуглець переважно представлений частинками розміром 0,125–0,25 мм, що забезпечує достатню реакційну поверхню та сприятливі умови для його участі у процесах відновлення.

3.1.3 Вологість

Вміст води у вихідних матеріалах (дріб'язок окатишів і біовуглець), а також у вибраних зв'язувальних речовинах наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Вологість вихідних матеріалів

Матеріал	Вміст води, %
Дріб'язок залізорудних окатишів	0,03
Силікат натрію	6,55
Лігнін	6,63
Лігносульфонат	4,44
FE14	6,04
CB6	5,20
Kempel	4,49
Крохмаль	10,14
Біовугілля	0,03

З отриманих даних видно, що дріб'язок окатишів і біовуглець постачаються у практично сухому стані з незначним вмістом води. Це є важливим фактором для подальшого коригування рецептур брикетних сумішей, оскільки дозволяє точно контролювати загальний вміст води при підготовці шихти для брикетування.

3.2 Вибір зв'язувальних матеріалів

На основі проведеного аналізу літературних джерел для дослідження було обрано сім зв'язувальних матеріалів. Кожен із них вводився у кількості 1 мас.% від загальної маси суміші та використовувався для виготовлення брикетів методом ручного пресування. Попередньо розроблені рецептури для проведення скринінгу наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Рецептури для дослідження ефективності зв'язувальних матеріалів

Матеріал	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Дріб'язок залізоруд. окатишів	100	99	99	99	99	99	99	99
СВ6	0	1	0	0	0	0	0	0
FE14	0	0	1	0	0	0	0	0
Kempel	0	0	0	1	0	0	0	0
Крохмаль	0	0	0	0	1	0	0	0
Силікат натрію	0	0	0	0	0	1	0	0
Лігнін	0	0	0	0	0	0	1	0
Лігносульфонат	0	0	0	0	0	0	0	1

Оцінка ефективності зв'язувальних матеріалів здійснювалася шляхом порівняння показників холодної міцності при стиску та міцності при розколюванні для кожного окремого зразка. Відповідно до таблиці 3.3 було виготовлено вісім рецептур на основі дріб'язку залізорудних окатишів. При цьому рецептура R0 приймалася як еталонна і містила лише вихідний матеріал без додавання зв'язувального.

Випробування холодної міцності при стиску та міцності при розколюванні проводилися безпосередньо після пресування, а також через 24, 96 і 168 годин витримки, і після сушки зразків у сушильній шафі при температурі 105 °C протягом 2 годин. Паралельно визначався вміст вологи з метою оцінки здатності різних

зв'язувальних матеріалів утримувати воду та оптимізації її кількості для досягнення максимальних механічних характеристик брикетів.

З аналізу результатів (рисунки 3.3 і 3.4) встановлено, що рецептури R1 (СВ6), R3 (Kempel), R5 (силікат натрію) та R7 (лігносульфонат) забезпечують найвищі значення міцності при стиску та розколюванні після сушки у порівнянні з іншими зв'язувальними. Досягнення високого ступеня ущільнення брикетів пояснюється наявністю значної кількості дрібних частинок у вихідному матеріалі — дріб'язку окатишів.

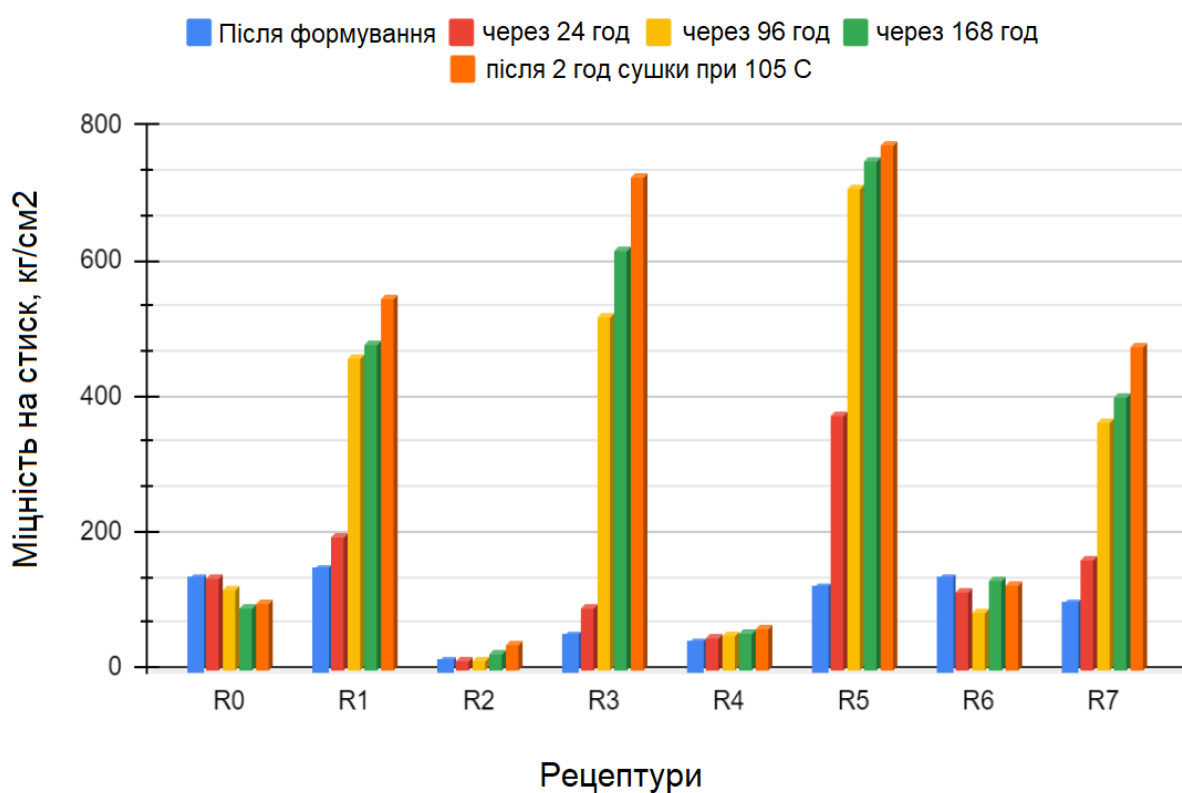


Рисунок 3.3 – Міцність на стиск брикетів з досліджуваними зв'язувальними матеріалами

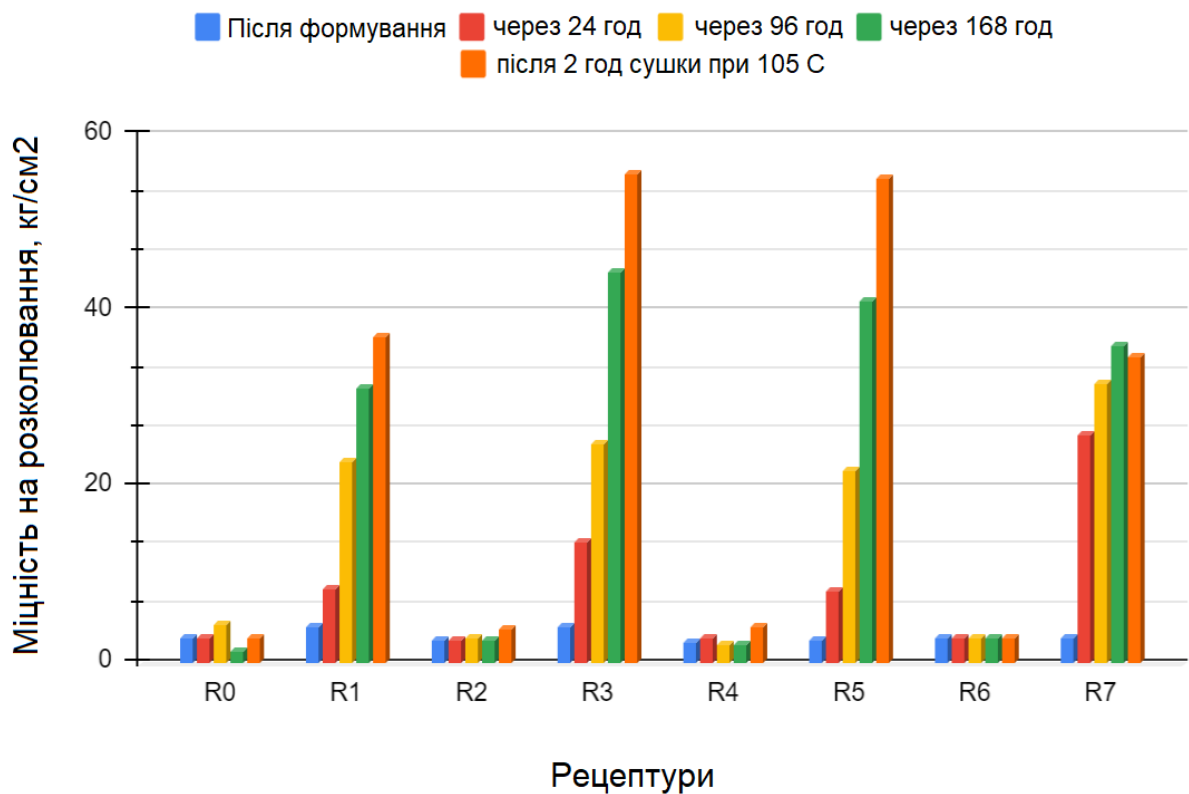


Рисунок 3.4 – Міцність на розколювання брикетів з досліджуваними зв’язувальними матеріалами

Разом із тим встановлено, що еталонна рецептура R0 характеризується зниженням міцності як при повітряній сушці, так і після сушіння у печі. Це пояснюється відсутністю зв’язувального, яке могло б зв’язувати додану воду (5 мас.%). На відміну від цього, у рецептурах R1, R3 та R5 зв’язувальні матеріали ефективно утримували вологу, що забезпечило підвищення значень холодної міцності при стиску та міцності при розколюванні.

Також встановлено, що брикети, висушені у сушильній шафі при 105 °C протягом 2 годин, мають вищу міцність у порівнянні з брикетами, висушеними на повітрі.

Важливим параметром є також міцність брикетів одразу після формування, яка забезпечує їх стійкість до незначних механічних впливів на початкових етапах обробки [21]. З урахуванням як міцності брикетів після формування, так і міцності після сушки, найкращі результати продемонстрували рецептури R1, R3, R5 та R7.

З метою подальшого спрощення експериментальної частини для детального дослідження було обрано зв'язувальні СВ6, Kempel і силікат натрію. Водночас використання лігносульфонату як органічного зв'язувального залишається перспективним напрямом для подальших досліджень, зокрема завдяки його повністю відновлюваному походженню [22].

3.3 Оптимізація складу брикетів методом планування експерименту

Обрані три зв'язувальні матеріали (СВ6, Kempel та силікат натрію), які показали найкращі результати за підсумками попереднього відбору, були використані для подальшого аналізу із застосуванням методу планування експерименту. За допомогою відповідного програмного забезпечення було визначено необхідну кількість експериментальних дослідів.

Попередні дослідження вологості в діапазоні 0–10 мас.% показали, що оптимальним є вміст води на рівні 5 мас.%, оскільки при перевищенні цього значення під час брикетування спостерігалось витікання води з прес-форми. У зв'язку з цим у межах планування експерименту варіювалися такі параметри: вміст води — від 0 до 5 мас.%, тиск пресування — від 50 до 200 кН, вміст зв'язувального — від 0 до 2 мас.%. Склад усіх досліджених рецептур наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Досліджувані рецептури брикетів

№ рецепту-ри	Дріб'язок залізоруд. окатишів, %	СВ6, %	Kempel, %	Силікат натрію, %	Вологість, %	Тиск пресування, кН
N1	100	0	0	0	0	50
N2	98	2	0	0	0	50
N3	98	0	2	0	0	50
N4	96	2	2	0	0	50
N5	98	0	0	2	0	50
N6	96	2	0	2	0	50

N7	96	0	2	2	0	50
N8	94	2	2	2	0	50
N9	95	0	0	0	5	50
N10	93	2	0	0	5	50
N11	93	0	2	0	5	50
N12	91	2	2	0	5	50
N13	93	0	0	2	5	50
N14	91	2	0	2	5	50
N15	91	0	2	2	5	50
N16	89	2	2	2	5	50
N17	100	0	0	0	0	200
N18	98	2	0	0	0	200
N19	98	0	2	0	0	200
N20	96	2	2	0	0	200
N21	98	0	0	2	0	200
N22	96	2	0	2	0	200
N23	96	0	2	2	0	200
N24	94	2	2	2	0	200
N25	95	0	0	0	5	200
N26	93	2	0	0	5	200
N27	93	0	2	0	5	200
N28	91	2	2	0	5	200
N29	93	0	0	2	5	200
N30	91	2	0	2	5	200
N31	91	0	2	2	5	200
N32	89	2	2	2	5	200
N33	94,5	1	1	1	2,5	125
N34	94,5	1	1	1	2,5	125
N35	94,5	1	1	1	2,5	125

Кожен отриманий брикет піддавався випробуванням на стиск, результати яких були систематизовані. Незважаючи на те, що рецептура R5 (силікат натрію) забезпечувала найвищу міцність після сушки, такі брикети виявилися схильними до тріщиноутворення та руйнування під час відновлення [23]. Тому виникла

необхідність комбінування неорганічного зв'язувального з органічними (СВ6 або Kempel).

Аналіз результатів (рис. 3.5 і 3.6) показав, що найкращими комбінаціями зв'язувальних є N14/N30 (СВ6 + силікат натрію) та N15/N31 (Kempel + силікат натрію), які забезпечують максимальні значення міцності при стиску та розколюванні.

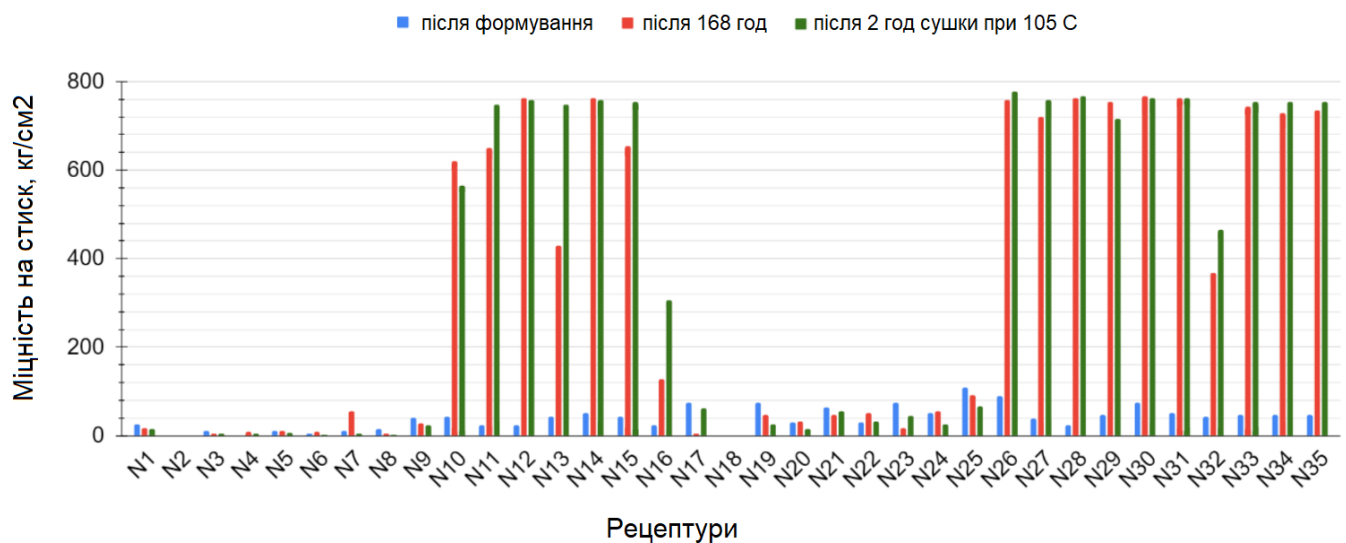


Рисунок 3.5 – Результати випробування брикетів на стиск

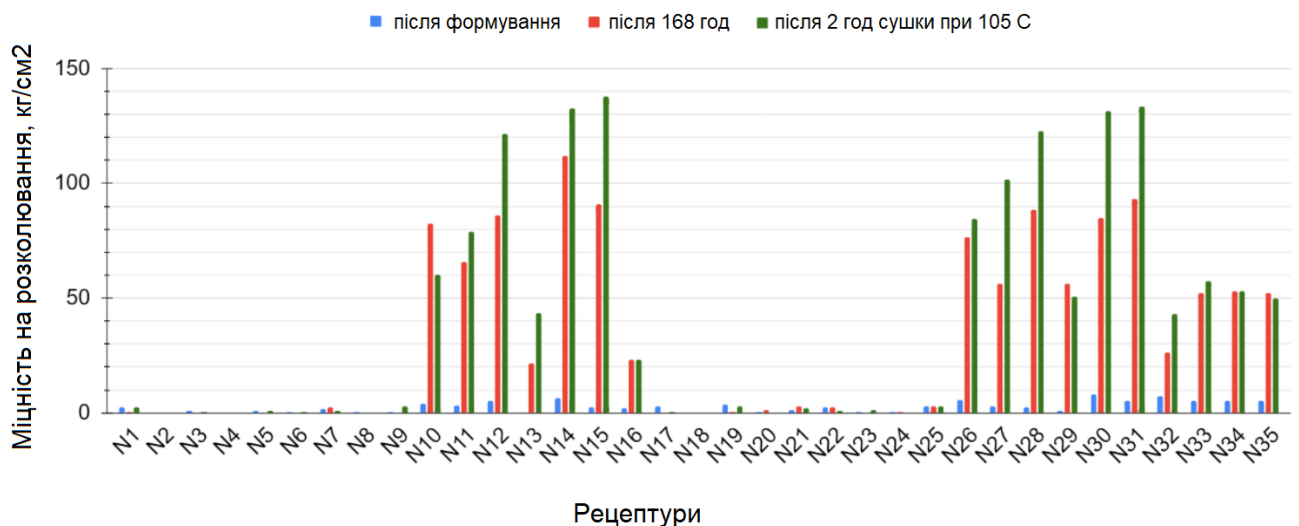


Рисунок 3.6 – Результати випробування брикетів на розколювання

На першому етапі було побудовано та проаналізовано контурні графіки для кожного відгуку системи. Оскільки ключовими параметрами є міцність після формування та після сушки, їх вплив детально досліджувався для кожної комбінації зв'язувальних. На рисунках 3.7–3.10 наведено контурні графіки для системи СВ6 + силікат натрію, а на рисунках 3.11–3.14 – для системи Kempel + силікат натрію. Перелік параметрів дослідження наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Параметри дослідження

Параметр дослідження	Визначення
Міцність на стиск після формування	Міцність при стиску одразу після формування брикетів
Міцність на стиск після повітряної сушки	Міцність при стиску після сушіння брикетів на повітрі протягом 7 діб
Міцність на стиск після сушки	Міцність при стиску після сушіння брикетів в печі протягом 2 год при 105 °С
Міцність при розколюванні після формування	Міцність при розколюванні одразу після формування брикетів
Міцність при розколюванні після повітряної сушки	Міцність при розколюванні після сушіння на повітрі протягом 7 діб
Міцність при розколюванні після сушки	Міцність при розколюванні після сушіння в печі протягом 2 год при 105 °С

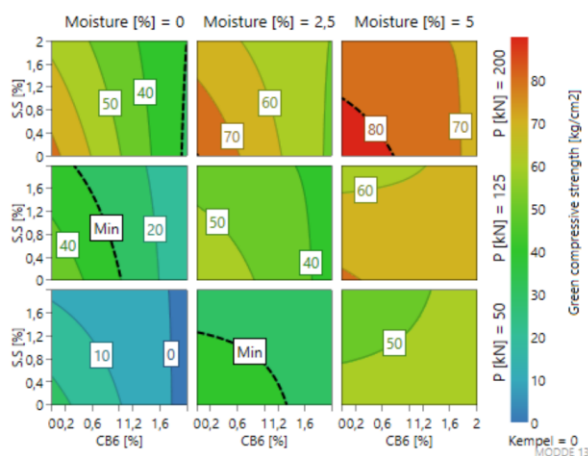


Рисунок 3.7 – Контурні залежності міцності на стиск після формування для комбінації зв’язувальних СВ6 + силікат натрію

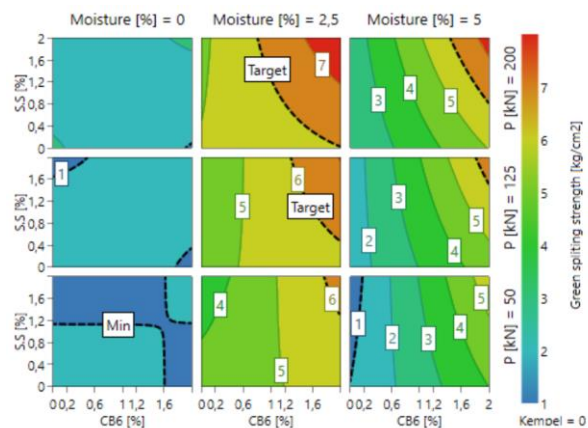


Рисунок 3.8 – Контурні залежності міцності на розколювання після формування для комбінації зв’язувальних СВ6 + силікат натрію

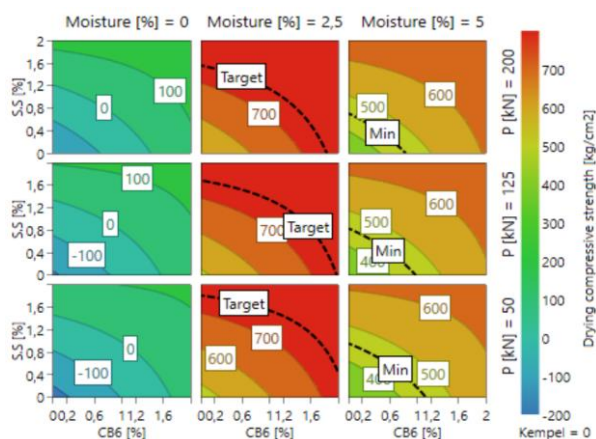


Рисунок 3.9 – Контурні залежності міцності на стиск після сушки для комбінації зв’язувальних СВ6 + силікат натрію

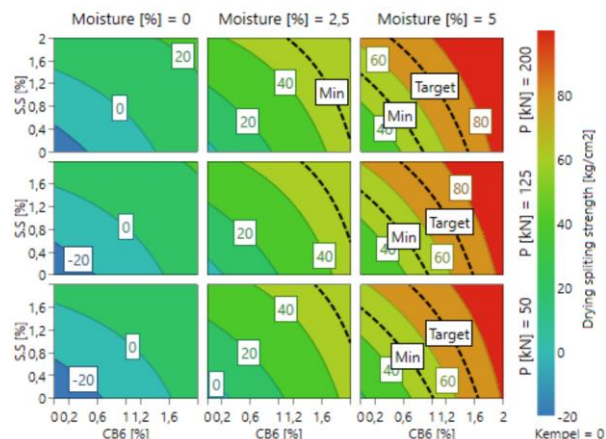


Рисунок 3.10 – Контурні залежності міцності на розколювання після сушки для комбінації зв’язувальних СВ6 + силікат натрію

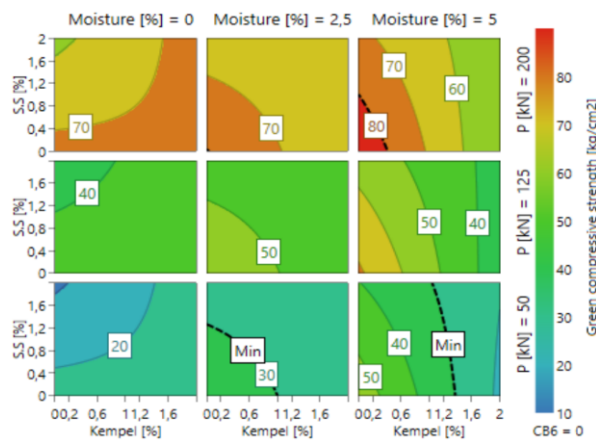


Рисунок 3.11 – Контурні залежності міцності на стиск після формування для комбінації зв’язувальних Kempel + силікат натрію

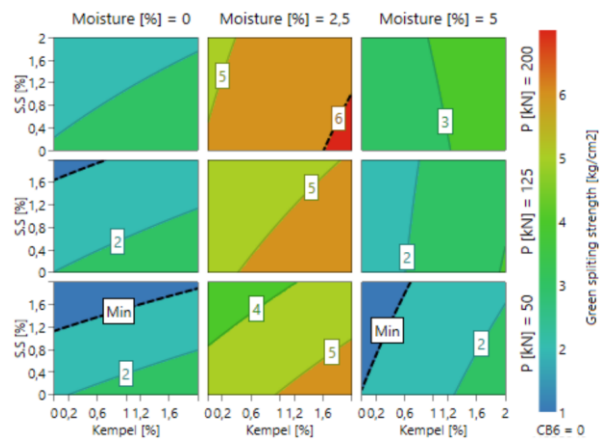


Рисунок 3.12 – Контурні залежності міцності на розколювання після формування для комбінації зв’язувальних Kempel + силікат натрію

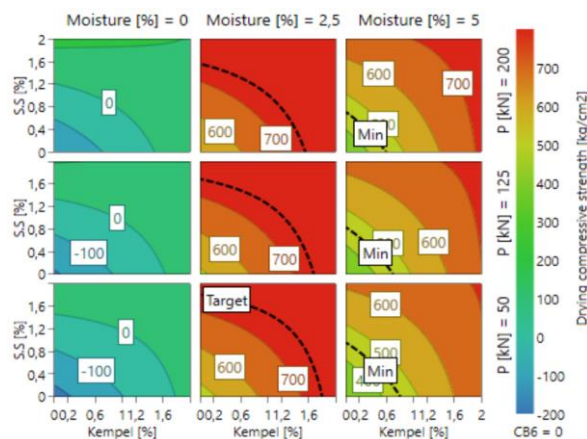


Рисунок 3.13 – Контурні залежності міцності на стиск після сушки для комбінації зв’язувальних Kempel + силікат натрію

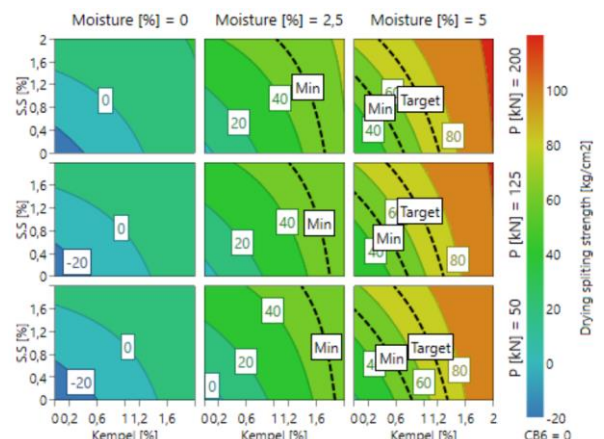


Рисунок 3.14 – Контурні залежності міцності на розколювання після сушки для комбінації зв’язувальних Kempel + силікат натрію

Аналіз контурних графіків дозволив встановити такі закономірності:

- значення міцності на стиск після формування для обох комбінацій є подібними, а для досягнення рівня понад 70 кг/см² при мінімальному вмісті зв'язувального оптимальними є умови: 5 % вологи та тиск пресування 200 кН;

- міцність при розколюванні після формування є максимальною при вологості близько 2,5 %, аналогічна тенденція спостерігається і для міцності на стиск після сушки, хоча її значення є значно вищими;

- заданий рівень міцності після сушки при розколюванні (≈ 40 кг/см²) досягається при вологості 2,5 % незалежно від тиску пресування, однак підвищення вологості до 5 % дозволяє отримати ще вищі значення цього показника.

Отримані результати свідчать про різницю в оптимальних умовах для різних характеристик: вологість 2,5 % є оптимальною для досягнення максимальних значень міцності на стиск після формування і міцності при розколюванні після сушки, тоді як 5 % — для міцності при розколюванні після формування і міцності на стиск після сушки.

Крім того, для повного аналізу було враховано показники міцності на стиск і розколювання після повітряної витримки, а також щільність і вміст вологи в суміші, що дозволяє більш точно визначити область оптимальних параметрів при зміні технологічних умов [24].

З метою комплексної оптимізації всіх характеристик у програмному середовищі MODDE було задано мінімальні, максимальні та цільові значення для всіх показників міцності, після чого побудовано графіки «зони оптимуму». На рисунках 3.15 і 3.16 наведено ці області для комбінацій СВ6 + силікат натрію та Kempel + силікат натрію відповідно.

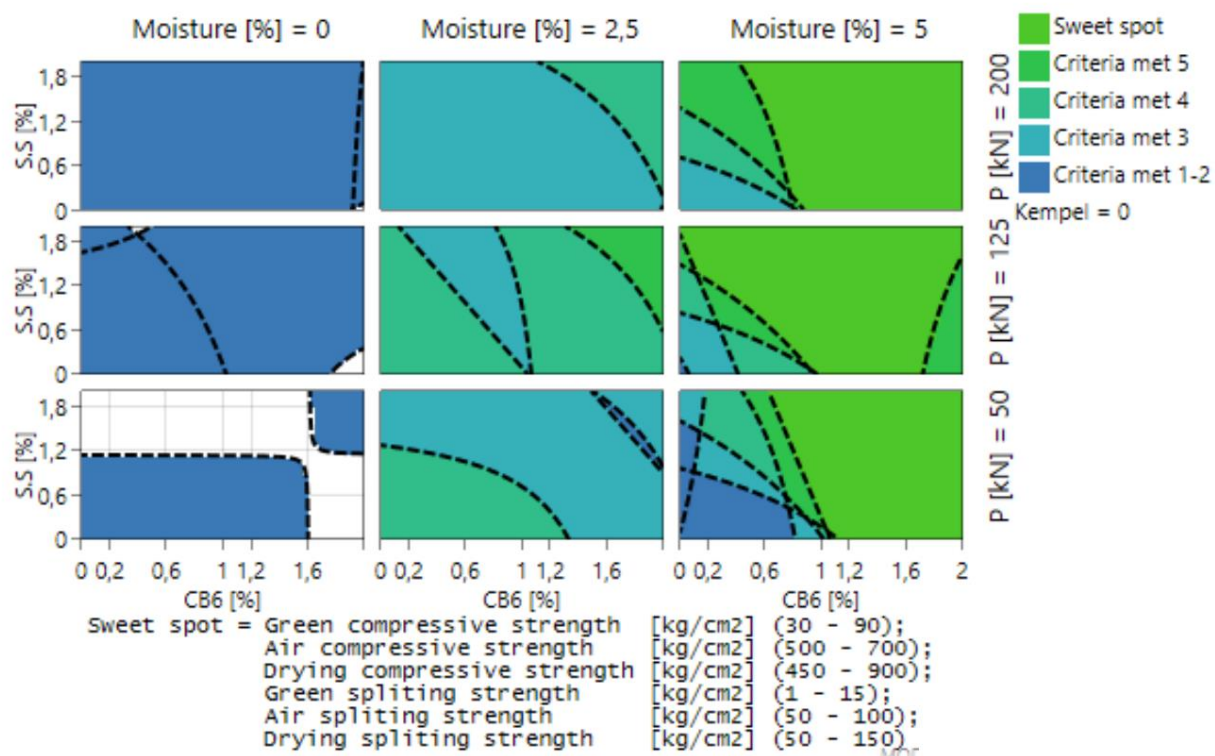


Рисунок 3.15 – Графік оптимального співвідношення матеріалів при брикетуванні з комбінованим зв'язувальним СВ6 + силікат натрію

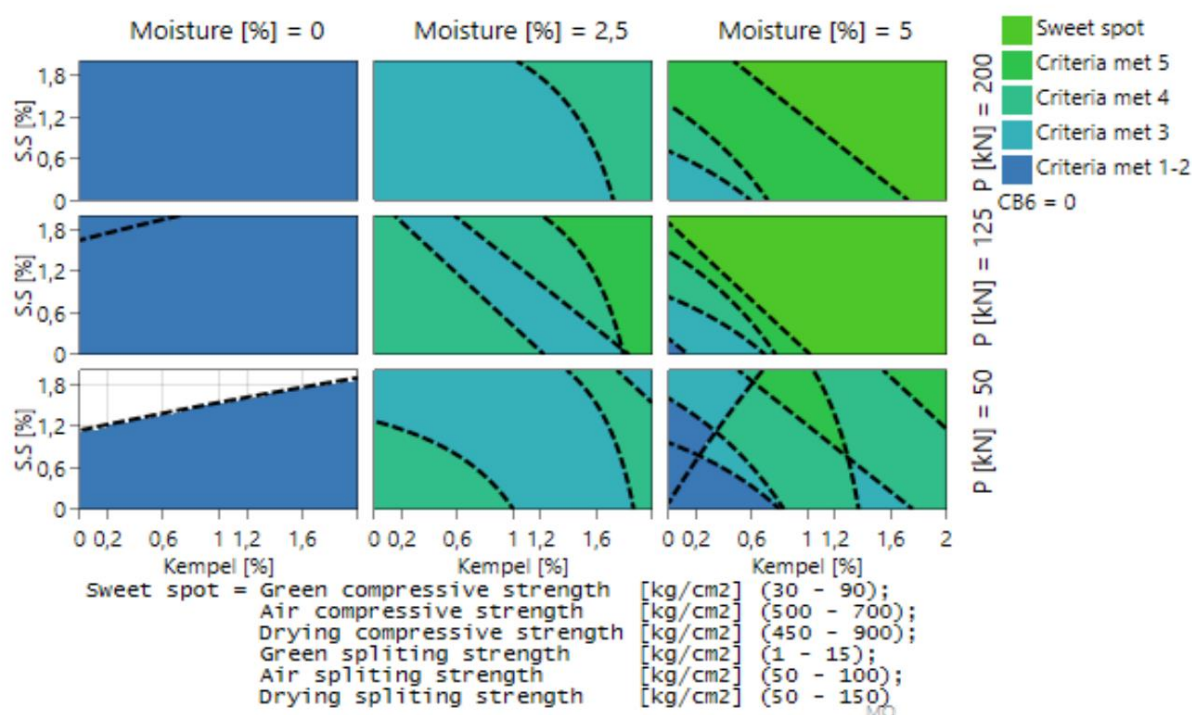


Рисунок 3.16 – Графік оптимального співвідношення матеріалів при брикетуванні з комбінованим зв'язувальним Kempel + силікат натрію

Аналіз отриманих результатів показав, що в обох випадках оптимальні умови досягаються при вологості 5% та мінімально можливому вмісті зв'язувального, який визначається величиною тиску пресування. Для забезпечення коректного порівняння було обрано тиск пресування 125 кН, при якому склад суміші становив 1,5 мас.% органічного зв'язувального (СВ6 або Kempel) та 0,5 мас.% неорганічного (силікат натрію).

Невелика добавка неорганічного зв'язувального необхідна для забезпечення достатньої міцності після сушки, оскільки органічні компоненти частково розкладаються при високих температурах [25,26].

Додатково було проведено оцінку якості побудованих моделей (рисунок 3.17).

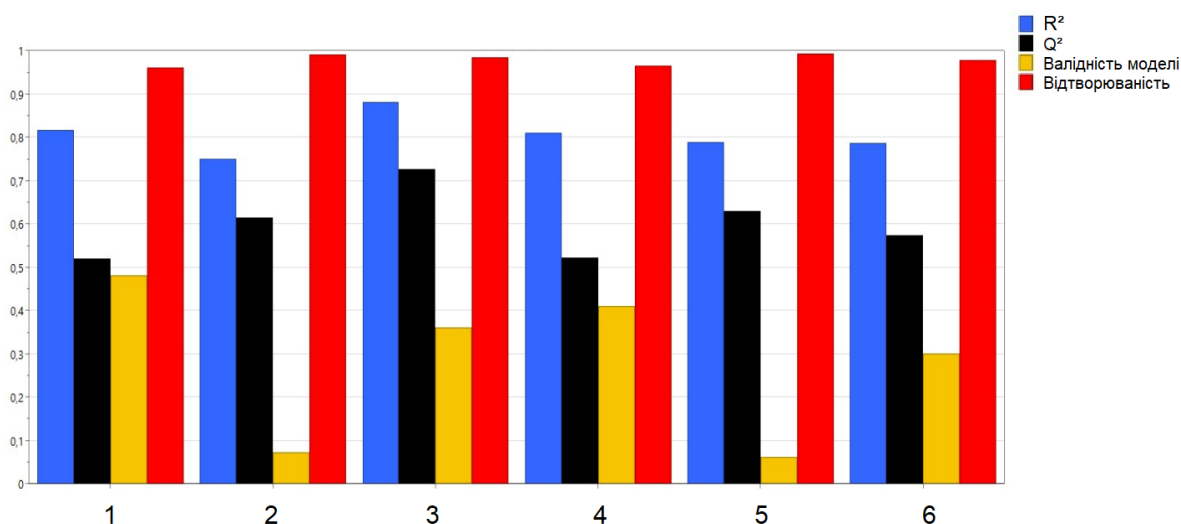


Рисунок 3.17 – Оцінка якості моделей:

1 – міцність на стиск після формування; 2 – міцність на стиск після повітряної витримки; 3 – міцність на стиск після сушки; 4 – міцність на розколювання після формування; 5 – міцність на розколювання після повітряної витримки; 6 – міцність на розколювання після сушки

Усі параметри відповідали необхідним критеріям: коефіцієнт детермінації R^2 ($>0,5$) свідчить про адекватність моделі, коефіцієнт Q^2 ($>0,5$) — про високу прогностичну здатність, показник валідності моделі ($>0,25$) — про коректність опису процесу, а низька похибка моделі та висока відтворюваність підтверджують надійність отриманих результатів [27].

3.4 Вплив добавок біовуглецю на властивості брикетів

Для переходу до досліджень із додаванням біовуглецю необхідно було визначити оптимальні значення вологості, тиску пресування та мінімально можливого вмісту зв'язувальних у суміші. На основі аналізу «зон оптимуму» та з метою забезпечення однакового вмісту зв'язувальних у двох досліджуваних системах, до складу суміші вводили 1,5 г органічного зв'язувального (СВ6 або Kempel) у поєднанні з 0,5 г неорганічного (силікат натрію).

Оскільки біовуглець здатний інтенсивно поглинати вологу із суміші [16,28], виникла необхідність збільшення її вмісту порівняно з раніше визначеним оптимальним значенням (5%). У рамках попередніх досліджень були виготовлені брикети з вмістом води 5, 10 та 15%. Отримані результати показали, що при вологості 15% спостерігається погіршення властивостей брикетів через надлишок води. Зокрема, під час пресування надлишкова вода витікала з прес-форми, що негативно впливало на структуру та якість брикетів.

Крім того, встановлено, що при використанні біовуглецю та тиску пресування 50 кН спостерігається суттєве зниження щільності брикетів. Це пояснюється збільшенням висоти зразків порівняно з брикетами без біовуглецю, що призводить до зростання відношення довжини до діаметра (L/D) та зниження ступеня ущільнення. Таким чином, за результатами попереднього аналізу встановлено, що тиск пресування повинен перевищувати 50 кН для забезпечення необхідної щільності та якості структури брикетів.

З урахуванням зазначеного, подальші рецептури розроблялися при вмісті води 5–10% та тиску пресування в межах 125–200 кН. У таблицях 3.7 і 3.8 наведено склади сумішей для брикетування з додаванням біовуглецю при використанні комбінацій зв'язувальних СВ6 + силікат натрію та Kempel + силікат натрію відповідно.

Таблиця 3.7 – Рецептури брикетів із використанням зв'язувальних СВ6 + силікат натрію

Компонент, %	Рецептури											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
Дріб'язок окатишів	93	93	88	88	83	83	88	88	83	83	78	78
СВ6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Силікат натрію	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Біовуглець	0	0	5	5	10	10	0	0	5	5	10	10
Волога	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10
Тиск пресування, кН	125	200	125	200	125	200	125	200	125	200	125	200

Таблиця 3.8 – Рецептури брикетів із використанням зв'язувальних Kempel + силікат натрію

Компонент, %	Рецептури											
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12
Дріб'язок окатишів	93	93	88	88	83	83	88	88	83	83	78	78
Kempel	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Силікат натрію	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Біовуглець	0	0	5	5	10	10	0	0	5	5	10	10
Волога	5	5	5	5	5	5	10	10	10	10	10	10
Тиск пресування, кН	125	200	125	200	125	200	125	200	125	200	125	200

Аналіз результатів (рисунки 3.18 і 3.19) показав, що в усіх випадках міцність після сушки перевищує міцність після формування. Водночас додавання

біовуглецю призводить до суттєвого зниження механічної міцності брикетів. Це може бути зумовлено як негативним впливом біовуглецю на ефективність зв'язувальних матеріалів, так і збільшенням відношення довжини до діаметра брикетів (L/D), що узгоджується з результатами досліджень Rahman et al. [18].

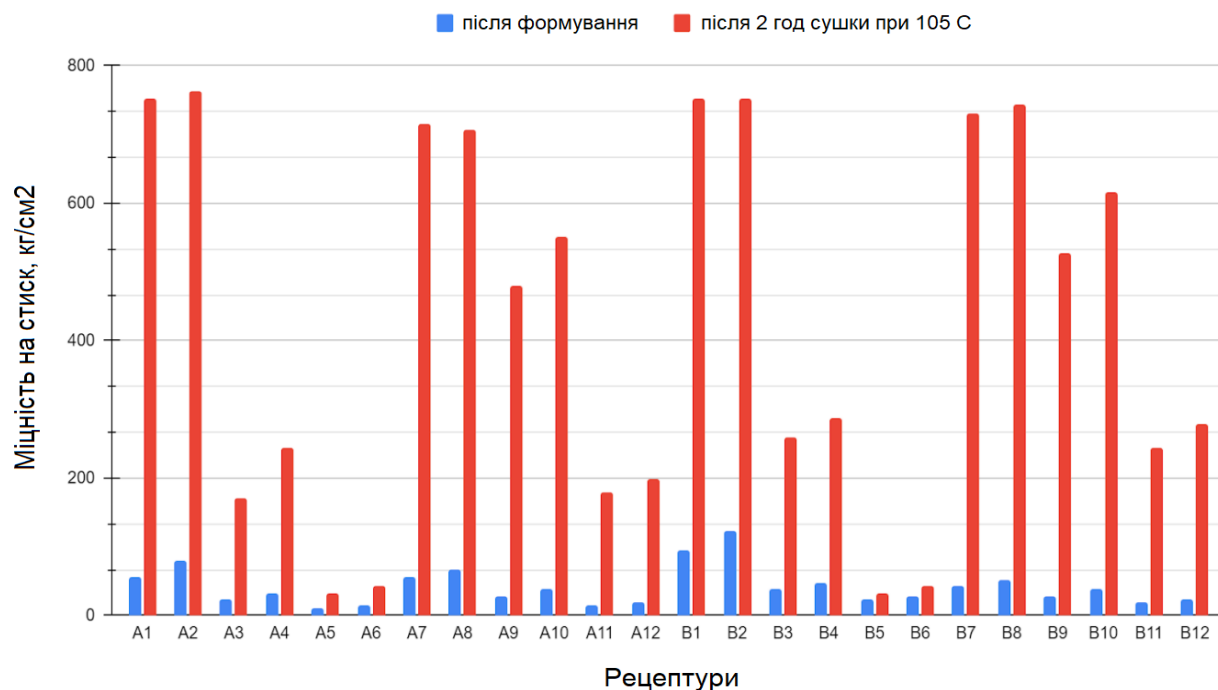


Рисунок 3.18 – Міцність брикетів з біовуглецем на стиск

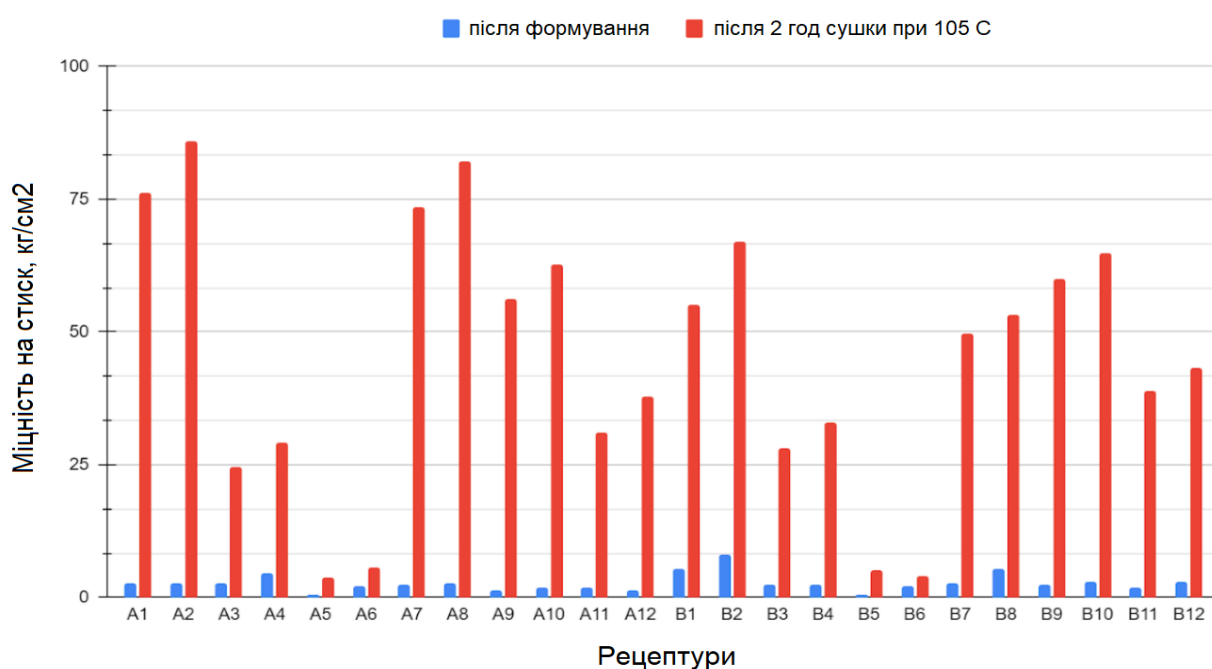


Рисунок 3.19 – Міцність брикетів з біовуглецем на розколювання

Аналіз отриманих залежностей показав, що оптимальний вміст біовуглецю становить близько 5% від загальної маси, оскільки подальше його збільшення (до 10 %) призводить до помітного зниження як міцності після формування, так і міцності після сушки.

Крім того, встановлено, що використання 10% вологи забезпечує вищі значення міцності порівняно з брикетами, виготовленими при вологості 5 мас.%, що пов'язано з покращенням умов формування структури та взаємодії компонентів суміші.

3.5 Дослідження процесу відновлення брикетів

На основі аналізу літературних джерел [29,30] встановлено, що оптимальний температурний інтервал для процесів прямого відновлення становить 600–1000 °С. З метою досягнення повного ступеня металізації за мінімальний час у даному дослідженні температура відновлення була обрана на рівні 950 °С [31]. За таких умов забезпечується високий ступінь металізації вже протягом 1 години.

Для проведення відновлювальних випробувань було обрано дві найбільш ефективні рецептури — з додаванням біовуглецю та без нього (табл. 3.9).

Таблиця 3.9 – Відібрані рецептури для дослідження відновлення

Рецептура	Дріб'язок окатишів, %	Kempel, %	СВ6, %	Силікат натрію, %	Біовуглець, %	Волога, %
R1	93	1,5	0	0,5	0	5
R2	93	0	0,5	0,5	0	5
R3	83	1,5	0	0,5	5	10
R4	83	0	1,5	0,5	5	10

Аналіз кривих відновлення (рисунок 3.20) показав, що повний ступінь відновлення (100%) досягається приблизно через 1 годину процесу. При цьому

встановлено, що додавання біовуглецю сприяє прискоренню швидкості відновлення порівняно з брикетами без нього. Це підтверджує доцільність використання біовуглецю як компонента, що інтенсифікує процес відновлення.

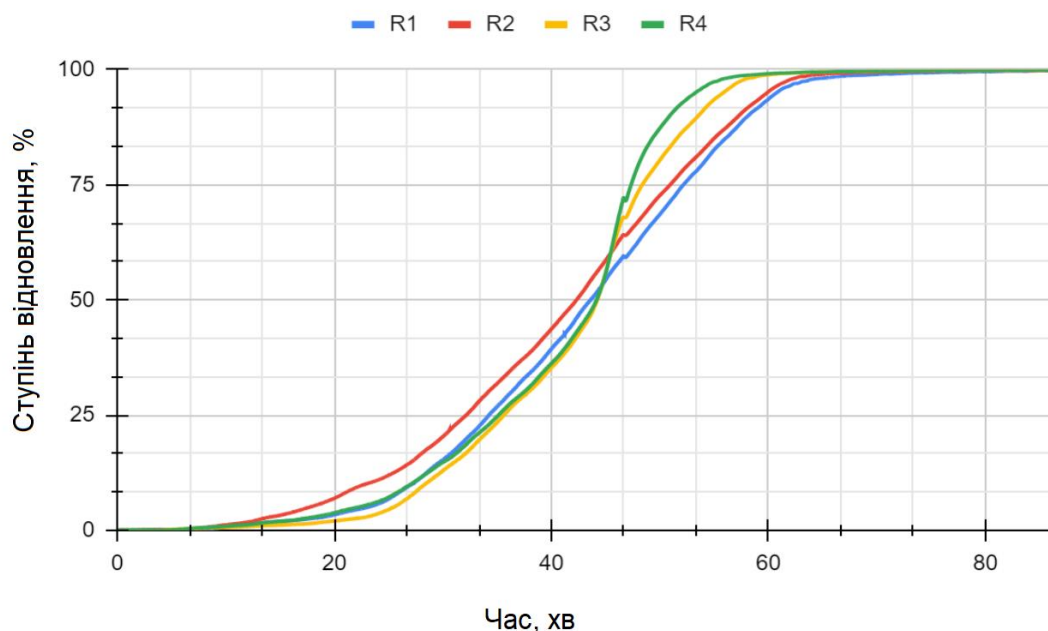


Рисунок 3.20 – Результати відновлення брикетів з біовуглецем

Додатково було визначено втрату маси зразків шляхом їх зважування до та після відновлення у середовищі водню. Отримані результати свідчать, що введення біовуглецю призводить до деякого збільшення втрат маси, що пояснюється його вигоранням та видаленням летких компонентів у процесі нагрівання. Загальні значення втрат маси для брикетів досліджуваних рецептур наведені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Загальні втрати маси досліджуваних брикетів

Рецептура	Загальна втрата маси, %
R1	27
R2	30
R3	31
R4	33

Оскільки обидва органічні зв'язувальні (СВ6 і Kempel) продемонстрували подібні криві відновлення з незначними відмінностями у величині втрат маси, для детальнішого аналізу було обрано лише один із них (СВ6), що дозволило зосередитися на дослідженні впливу біовуглецю.

Для рецептур із використанням СВ6 проведено переривчасті випробування відновлення з визначенням втрат маси та зміни міцності при ступенях відновлення 25%, 50%, 90% і 100%. Відповідні криві наведено на рисунках 3.21 і 3.22 (для рецептур R2 та R4 згідно з таблицею 3.9).

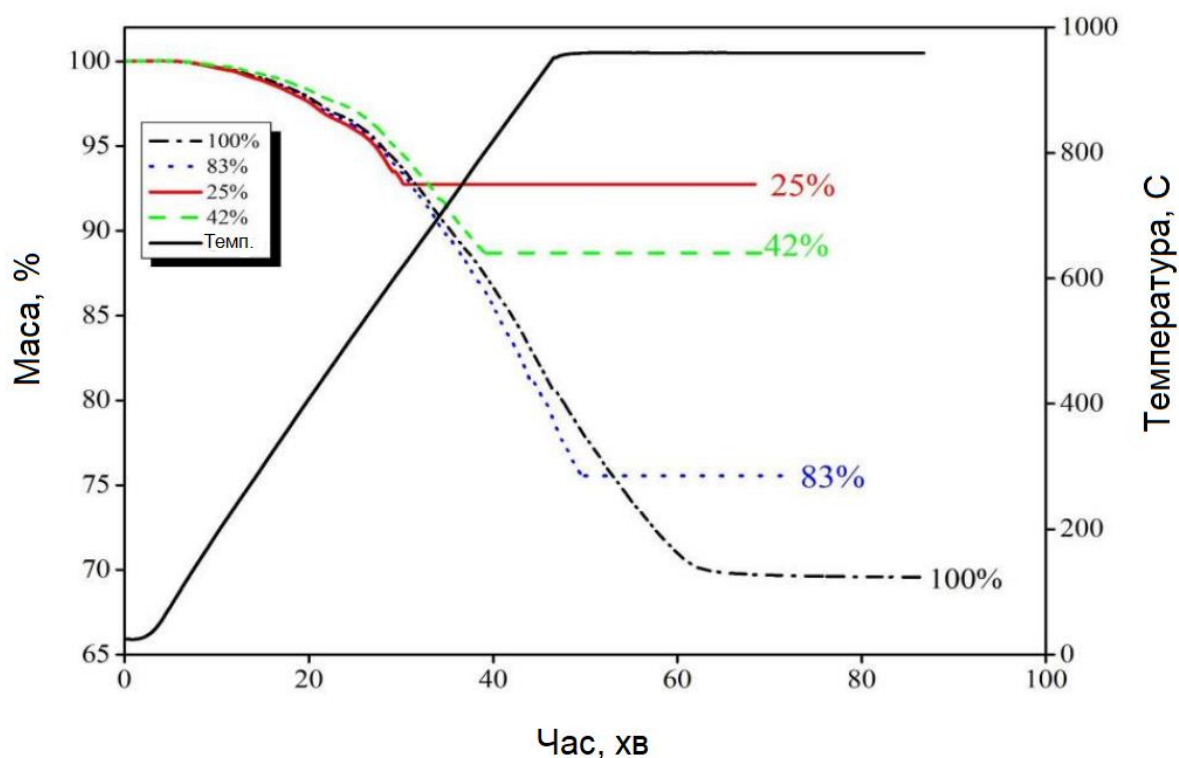


Рисунок 3.21 – Результати переривчастих випробувань з відновлення брикетів без біовуглецю

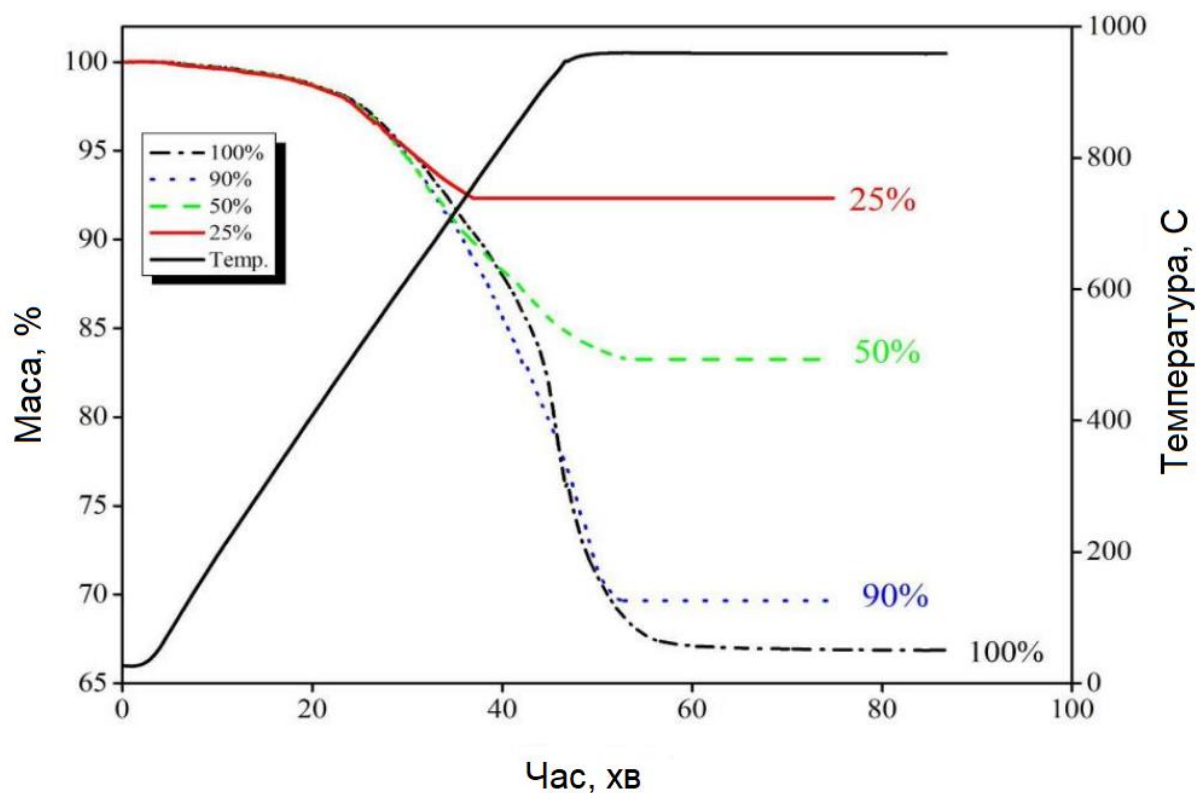


Рисунок 3.22 – Результати переривчастих випробувань з відновлення брикетів з біовуглецем

Аналіз результатів (табл. 3.11) показав, що зі збільшенням ступеня відновлення міцність брикетів зростає. Це пояснюється їх усадкою під дією високих температур, що супроводжується видаленням летких компонентів і ущільненням структури.

Таблиця 3.11 – Зміна міцності та втрат маси для досліджуваних брикетів

Ступінь відновлення, %	Втрата маси, %		Міцність, кг/см ²	
	R2	R4	R2	R4
0	—	—	150	70
25	7	8	14	5
50	10,5	16,5	21	11
90	26	31	42	18
100	30	33	56	24

Незважаючи на те, що міцність відновлених брикетів є нижчою порівняно з вихідними, у всіх випадках вона відповідає необхідному рівню 15–20 кг/см², рекомендованому Mousa et al. [17].

Крім того, результати переривчастих випробувань підтвердили поступове зростання втрат маси зі збільшенням ступеня відновлення, що свідчить про інтенсивніше видалення вуглецю та летких речовин із брикетів.

3.6 Масштабування процесу брикетування та оцінка властивостей брикетів

За результатами аналізу механічних властивостей для масштабування процесу методом екструзії було обрано комбінацію зв'язувальних: 1,5 мас.% Kempel та 0,5 мас.% силікату натрію. Вибір Kempel як основного зв'язувального обумовлений необхідністю забезпечення високої міцності брикетів після формування, незважаючи на те, що СВ6 демонструє дещо кращі відновлювальні характеристики.

Склад сумішей для масштабування наведено в таблиці 3.12. Під час подачі приблизно 8 кг кожної суміші з постійною швидкістю встановлено, що температура в зоні попереднього ущільнення та остаточного пресування знаходиться в межах 30–38 °С. На рисунках 3.23 і 3.24 показано зміну тиску у зонах попереднього та остаточного ущільнення для рецептур R1 та R2 залежно від часу роботи установки. Встановлено, що формування брикетів відбувалося при тиску близько 13 кН для рецептури R1 та 10 кН для R2.

Таблиця 3.12 – Рецептури для дослідження масштабування

Рецептура	Дріб'язок окатишів, %	Kempel, %	Силікат натрію, %	Біовуглець, %	Волога, %
R1	88	1,5	0,5	0	10
R2	81	1,5	0,5	5	12



Рисунок 3.23 – Зміна тиску в екструдері при виготовленні брикетів складу R1 (без біовуглецю)

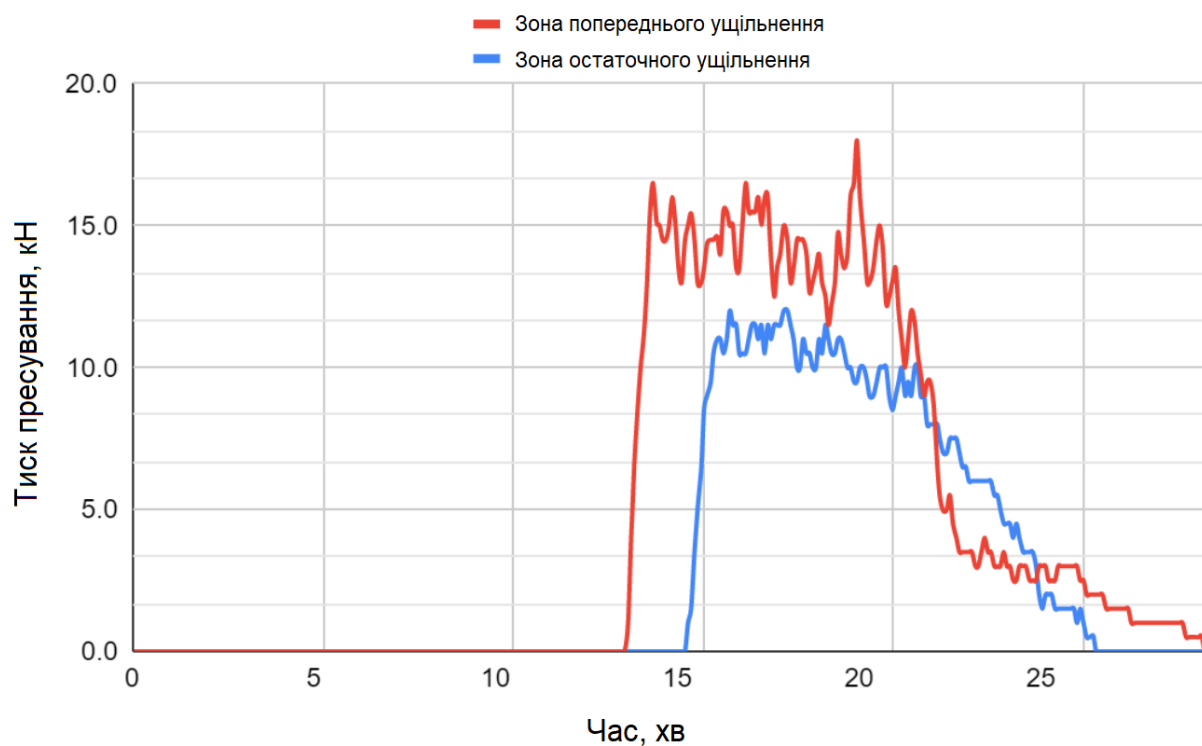


Рисунок 3.24 – Зміна тиску в екструдері при виготовленні брикетів складу R2 (з біовуглецем)

Для оцінки експлуатаційної придатності брикетів визначено їх механічну міцність, яка є критично важливою для запобігання руйнуванню під час транспортування та завантаження у шахтні печі. З цією метою проведено випробування на ударну міцність, яке полягало у скиданні брикетів з висоти 2 м на сталеву поверхню.

Згідно з результатами (таблиця 3.13), рецептура R1 характеризується високою стійкістю до руйнування (втрата маси 0,95%), тоді як для рецептури R2 цей показник становить 29,51% після 10 скидань.

Таблиця 3.13 – Результати випробування на ударну міцність для екструдованих брикетів

Рецептура	Номер скидання										Загальна втрата маси, г
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
R1 (маса, г)	0	0	0	0	0,1	0	0,1	0	0,15	0	0,35 з 36,62
R2 (маса, г)	0	0	0	0	0,2	0,3	0,1	8,34	0,1	0,2	9,24 з 31,32

Додатково проведено порівняння екструдованих брикетів із брикетами, отриманими методом ручного пресування, за показником холодної міцності при стиску. У таблиці 3.14 наведено значення міцності до та після відновлення. Отримані результати підтверджують ефективність масштабування, оскільки екструдовані брикети відповідають вимогам до міцності як до відновлення (60–100 кг/см²), так і після нього (15–20 кг/см²) [17].

Таблиця 3.14 – Зміна міцності та втрат маси для екструдованих і лабораторних брикетів

Параметр	Екструдовані брикети		Лабораторні брикети	
	R1	R3	R1	R3
Міцність до відновлення, кг/см ²	103	84	122	98
Міцність після відновлення, кг/см ²	70	32	81	43
Втрата маси, %	33	29	31	27

Порівняння кривих відновлення показало, що екструдовані брикети характеризуються кращими відновлювальними властивостями порівняно з брикетами, отриманими методом ручного пресування. Це пояснюється більш розвиненою пористою структурою, яка формується внаслідок нижчого тиску пресування (10–15 кН) під час екструзії. Така структура забезпечує кращу проникність відновлювального газу, що сприяє підвищенню швидкості відновлення, як показано на рисунку 3.25.

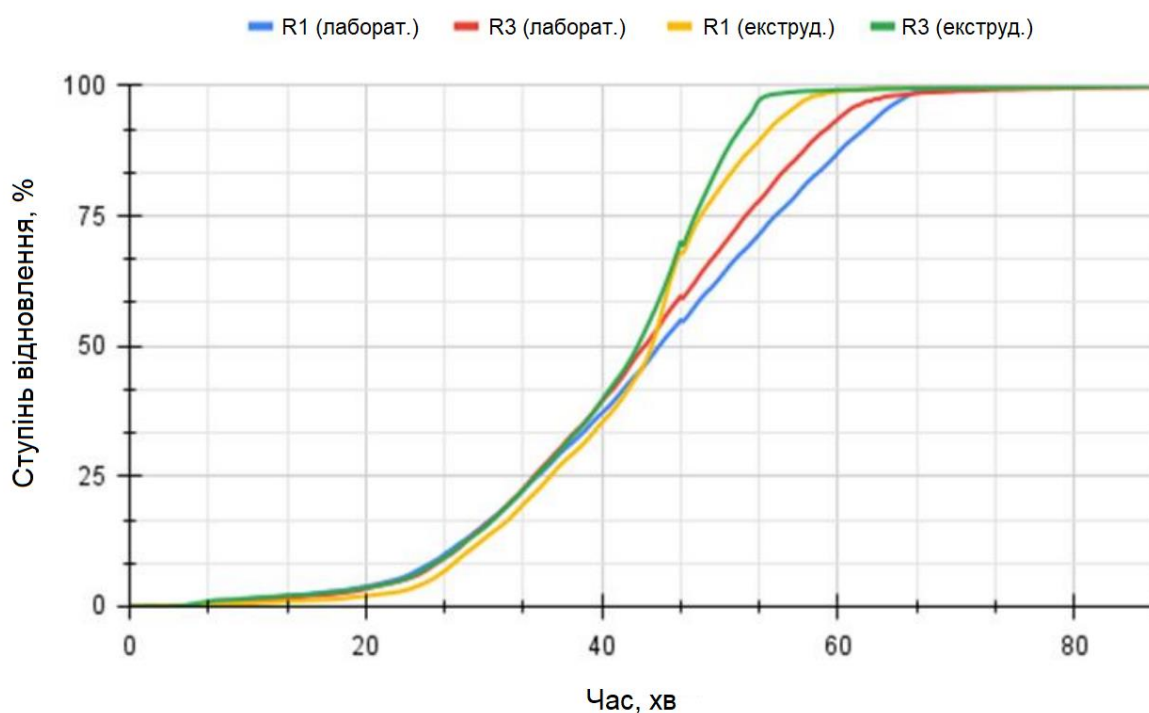


Рисунок 3.25 – Результати відновлення лабораторних та екструдованих брикетів

Таким чином, дослідження показали, що поєднання органічних і неорганічних зв'язувальних дозволяє забезпечити необхідний рівень механічної міцності брикетів як до, так і після відновлення, а також покращити кінетику процесу відновлення. Проведене масштабування довело можливість відтворення отриманих характеристик у наближених до промислових умовах. Отримані результати створюють науково-практичну основу для розробки ефективної технології переробки дріб'язку залізорудних окатишів із використанням сучасних екологічно орієнтованих підходів.

ВИСНОВКИ

1. Випробування зв'язувальних матеріалів показало, що найбільш ефективними органічними зв'язувальними є лігносульфонат, СВ6 та Kempel. Оптимальний вміст води для отримання брикетів із переважними механічними властивостями та мінімальними втратами води під час пресування становить 5%.

2. Аналіз планування експерименту показав, що оптимальним є використання 1,5 мас.% органічного зв'язувального (СВ6 або Kempel) у поєднанні з 0,5 мас.% неорганічного зв'язувального (силікат натрію) при вологості 5 мас.% та тиску пресування 125 кН.

3. Додавання біовуглецю суттєво знижує міцність отриманих брикетів. Для забезпечення високих механічних властивостей необхідно підвищити тиск пресування до 200 кН та вміст води до 10 мас.%.

4. Термогравіметричний аналіз підтвердив, що введення біовуглецю прискорює процес відновлення, що супроводжується збільшенням втрати маси внаслідок видалення вуглецю та летких компонентів із брикету.

5. Результати переривчастих випробувань показали, що ступінь відновлення повинен становити близько 90% для досягнення необхідної міцності брикетів після відновлення (15–20 кг/см²). Крім того, термогравіметричний аналіз засвідчив поступове зростання втрат маси зі збільшенням ступеня відновлення.

6. Масштабування процесу з використанням екструдера дозволило отримати брикети з необхідною міцністю як до, так і після відновлення. Крім високої міцності, брикети, отримані методом екструзії, характеризуються покращеними відновлювальними властивостями завдяки більш розвиненій пористій структурі.

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.В								
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата									
Розробив	Коноваленко				ВИСНОВКИ				Літера	Аркцш	Аркцшів		
Перевірив	Бабошко										1	1	
Н. контр.	Бабошко								МТ-22-2				
Затвердив	Бабошко												

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Mohassab, Yousef. (2013). Phase equilibria between iron and slag in CO/CO₂/H₂/H₂O atmospheres relevant to a novel flash ironmaking technology. University of Utah 359. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1207.2807>
2. Morales Comercial, R. G. (2000). Flexibility in using iron ores for direct reduction
3. Prusti, P., Barik, K., Sahu, D.K., Soren, S., Meikap, B.C., Biswal, S.K. (2022). Recycling and Reuse of Iron Ore Pellet Fines. Advancement in Materials Processing Technology. Springer Proceedings in Materials, vol 12. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3297-6_17
4. Y. Feng, X. Y. Luo, and W. A. Lin. (2013). Study on the engineering characteristics of sludge disposal in the repository. Rock and Soil Mechanics, vol. 1, pp. 115–122.
5. Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (n.d.). Recent developments in biomass pelletization-A review
6. Lohmeier, L., Thaler, C., Harris, C., Wollenberg, R., & Schröder, H. W. (2020). Briquetting of Fine-Grained Residues from Iron and Steel Production Using Organic and Inorganic Binders. Steel Research International, 91(12). <https://doi.org/10.1002/srin.202000238>
7. Drobíková, K., Vallová, S., Motyka, O., Mamulová Kutláková, K., Plachá, D., & Seidlerová, J. (2018). Effects of binder choice in converter and blast furnace sludge briquette preparation. Environmental and practical implications. Waste Management, 79, 30–37. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.051>

					КНУ.РБ.136.26.113с-05.СВД									
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ					Літера		Аркцш	Аркцшів	
Розробив	Коноваленко												1	4
Перевірив	Бабошко													
Н. контр.	Бабошко													
Затвердив	Бабошко									МТ-22-2				

8. Suopajarvi, H., Umeki, K., Mousa, E., Hedayati, A., Romar, H., Kemppainen, A., Wang, C., Phounglamcheik, A., Tuomikoski, S., Norberg, N., Andefors, A., Öhman, M., Lassi, U., & Fabritius, T. (2018). Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies. *Applied Energy*, 213, 384–407. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.01.060>
9. Mousa, E., Wang, C., Riesbeck, J., & Larsson, M. (2016). Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1247–1266. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.07.061>
10. Ng, K.W., Giroux, L., Todoschuk, T. (2018). Reduction in GHG Emission of Steel Production by Direct Injection of Renewable Biocarbon. *The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95022-8_72
11. Riva, L., Nielsen, H. K., Skreiberg, Ø., Wang, L., Bartocci, P., Barbanera, M., Bidini, G., & Fantozzi, F. (2019). Analysis of optimal temperature, pressure and binder quantity for the production of biocarbon pellet to be used as a substitute for coke. *Applied Energy*, 256, 113933. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113933>
12. Yucel, O., Demirci, F., Turan, A., & Alkan, M. (2013). Determination of Direct Reduction Conditions of Mill Scale. *High Temperature Materials and Processes*, 32(4), 405–412. <https://doi.org/10.1515/HTMP-2012-0167>
13. Lemos, L. R., da Rocha, S. H. F. S., de Castro, L. F. A., Assunção, G. B. M., & da Silva, G. L. R. (2019). Mechanical strength of briquettes for use in blast 60 furnaces. *Revista Escola de Minas*, 72(1), 63–69. <https://doi.org/10.1590/0370-44672017720156>
14. Mombelli, D., Gonçalves, D. L., Mapelli, C., Barella, S., & Gruttadauria, A. (2021). Processing and Characterization of Self-Reducing Briquettes Made of Jarosite and Blast Furnace Sludges. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(4), 1603–1626. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00419-2>
15. Bhaskar, A.; Assadi, M.; Nikpey Somehsaraei, H. (2020). Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen. *Energies*, 13, 758. <https://doi.org/10.3390/en13030758>

16. Mousa, E.; Kazemi, M.; Larsson, M.; Karlsson, G.; Persson, E. (2019). Potential for Developing Biocarbon Briquettes for Foundry Industry. Appl. Sci. 9, 5288. <https://doi.org/10.3390/app9245288>
17. Mousa, E. A., Ahmed, H. M., & Wang, C. (2017). Novel approach towards biomass lignin utilization in ironmaking blast furnace. ISIJ International, 57(10), 1788–1796. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-127>
18. Rahman, A. N. E., Masood, M. A., Prasad, C. S. N., & Venkatesham, M. (1989). Influence of Size and Shape on the Strength of Briquettes*. In Fuel Processing Technology (Vol. 23).
19. Hodgson, D., Karadag, E., & Saillen, M. (n.d.). Influence of coal particle sizes on the mechanical strength of iron-carbon briquettes with focus on steelmaking applications.
20. Wang, C., Wei, W., Mellin, P., Yang, W., Mefos, S., Hultgren, A., Salman, H., & Förvaltnings, S. (n.d.). Utilization of biomass for blast furnace in Sweden Report I: Biomass availability and upgrading technologies.
21. Somerville, M.A. (2016). The Strength and Density of Green and Reduced Briquettes Made with Iron Ore and Charcoal. J. Sustain. Metall. 2, 228–238. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0057-5>
22. Gonçalves, S., Ferra, J., Paiva, N., Martins, J., Carvalho, L. H., & Magalhães, F. D. (2021). Lignosulphonates as an alternative to non-renewable binders in wood-based materials. In Polymers (Vol. 13, Issue 23). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym13234196>
23. Li, Y., Chen, H., Hammam, A., Wei, H., Nie, H., Ding, W., ... Yu, Y. (2021). Study of an organic binder of cold-bonded briquettes with two different iron bearing materials. Materials, 14(11). <https://doi.org/10.3390/ma14112952>
24. Energy Sources Briquetting Properties of Biomass Waste Materials. (2010). <https://doi.org/10.1080/00908310490251918>

25. Hu, Q., Shao, J., Yang, H., Yao, D., Wang, X., & Chen, H. (2015). Effects of binders on the properties of bio-char pellets. *Applied Energy*, 157, 508–516. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.05.019>

26. Srivastava, U., Kawatra, S.K. & Eisele, T.C. (2013). Study of Organic and Inorganic Binders on Strength of Iron Oxide Pellets. *Metall Mater Trans B* 44, 1000–1009. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9838-4>

27. Soema, P. C., Willems, G. J., Jiskoot, W., Amorij, J. P., & Kersten, G. F. (2015). Predicting the influence of liposomal lipid composition on liposome size, zeta potential and liposome-induced dendritic cell maturation using a design of experiments approach. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 94, 427–435. <https://doi.org/10.1016/J.EJPB.2015.06.026>

28. Ikelle, I. I., Nworie F S, Ogah A O, & Ilochi. (2017). Study on the Combustion Properties of Bio-Coal Briquette Blends of Cassava Stalk. In *CSJ* (Vol. 8, Issue 2)

29. Frazer, F. W., Westenberger, H., Boss, K. H., & Thumm, W. (1975). The relationship between basicity and swelling on reduction of iron-ore pellets. *International Journal of Mineral Processing*, 2(4), 353–365. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(75\)90028-9](https://doi.org/10.1016/0301-7516(75)90028-9)

30. Prakash, S. (1996). Reduction and sintering of Oxidized iron ore pellets-a comprehensive review. <https://www.saimm.co.za/Journal/v096n01p003.pdf>

31. Hamadeh, H., Mirgaux, O., & Patisson, F. (2018). Detailed modeling of the direct reduction of iron ore in a shaft furnace. *Materials*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/ma11101865>