

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: Дослідження та розробка технології виробництва окатишів із
заміною бентоніту органічним зв'язуючим.

Виконав:

студент групи МТ-23-2ск

Олександр ГОРБАЛЬ

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

ГОРБАЛЯ ОЛЕКСАНДРА ВІКТОРОВИЧА

1. Тема роботи: Дослідження та розробка технології виробництва окатишів із заміною бентоніту органічним зв'язуючим.

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

затверджено наказом по КНУ від «__19__»__02____2026 р. № 112с

2. Строк подання роботи студентом «__09__»__06____2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: органічне поліакриламідне зв'язуюче Floform, результати лабораторних та промислових досліджень процесів огрудкування і термічного зміцнення залізорудних окатишів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): дослідження властивостей шихтових матеріалів; механізм формування залізорудних окатишів; дослідження процесу сушіння окатишів.

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів
1	РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РИНКУ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ	січень 2026 р.
2	РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	лютий 2026 р.
3	РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ІЗ ОРГАНІЧНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ	березень, квітень 2026 р.
4	ОФОРМЛЕННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ ТА ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ	травень 2026 р.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Олександр ГОРБАЛЬ

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Дмитро БАБОШКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи на тему «Дослідження та розробка технології виробництва окатишів із заміною бентоніту органічним зв'язуючим»: _56_ с., _9_ табл., _9_ рис., _49_ використаних джерел.

Об'єкт дослідження: процес виробництва залізорудних окатишів із використанням органічних зв'язуючих матеріалів.

Предмет дослідження: закономірності окомкування, сушіння та формування металургійних властивостей залізорудних окатишів при заміні бентоніту органічним полімерним зв'язуючим.

Мета роботи: дослідження впливу органічного зв'язуючого на процеси формування, сушіння та металургійні властивості залізорудних окатишів, а також розроблення технології виробництва окатишів.

Методи дослідження: рентгенофлуоресцентний аналіз хімічного складу, визначення вологості, пористості та міцності окатишів, лабораторне огрудкування, термічна обробка, дослідження процесів сушіння та відновлення залізорудних окатишів.

Результати роботи: встановлено особливості механізму формування окатишів із органічним зв'язуючим, визначено вплив поліакриламідного зв'язуючого на пористість, розподіл вологи, міцність та процес сушіння окатишів. Доведено, що застосування органічного зв'язуючого забезпечує підвищення вмісту загального заліза, покращення відновлюваності та інтенсифікацію процесу сушіння порівняно з використанням бентоніту.

ЗАЛІЗОРУДНІ ОКАТИШІ, ОРГАНІЧНЕ ЗВ'ЯЗУЮЧЕ, БЕНТОНІТ,
ПОЛІАКРИЛАМІД, ОКОМКУВАННЯ, СУШІННЯ, ПОРИСТІСТЬ,
ВІДНОВЛЮВАНІСТЬ, МІЦНІСТЬ ОКАТИШІВ

					КНУ.РБ.136.26.112с-02.Р			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літера	Аркцш	Аркцшів
Розробив	Горбаль						1	1
Перевірив	Бабошко							
Н. контр.	Бабошко					МТ-23-2ск		
Затвердив	Бабошко							

[illegible]

3MICT

ВСТУП

1. АНАЛІЗ РИНКУ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ.....	8
1.1. Якісні характеристики залізорудних окатишів та функціональне призначення зв'язуючих матеріалів.....	8
1.2. Вплив типу зв'язуючого на властивості залізорудних окатишів.....	10
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
2.1. Дослідження властивостей шихтових матеріалів.....	26
2.2. Вивчення процесу грануляції та властивостей сирих окатишів.....	27
2.3. Вивчення металургійних показників окатишів.....	29
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ІЗ ОРГАНІЧНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ.....	31
3.1. Властивості шихтових матеріалів.....	31
3.2. Механізм формування залізорудних окатишів.....	33
3.3. Дослідження процесу сушіння окатишів.....	42
3.4. Металургійні показники випалених залізорудних окатишів.....	48
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	54

					КНУ.РБ.136.26.112с-02.3							
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	ЗМІСТ			Літера	Аркцш	Аркцшів		
Розробив	Горбаль									1	1	
Перевірив	Бабошко							МТ-23-2ск				
Н. контр.	Бабошко											
Затвердив	Бабошко											

ВСТУП

Одним із пріоритетних завдань сучасної металургійної галузі в умовах сталого розвитку є розроблення та впровадження ресурсоефективних технологій. Найбільш доцільним напрямом реалізації заходів ресурсозбереження є галузі з високим рівнем споживання сировинних і матеріальних ресурсів, до яких належить виробництво залізорудних окатишів.

Сучасні умови функціонування ринку залізорудної продукції характеризуються жорсткою конкуренцією, що спонукає виробників до зниження собівартості продукції та одночасного підвищення її якісних показників. Особливої актуальності набуває питання вдосконалення складу шихти та оптимізації витрат на допоміжні матеріали.

Важливою проблемою також є поступове скорочення запасів високоякісного бентоніту, який традиційно застосовується як зв'язуючий компонент у технології виробництва залізорудних окатишів. Погіршення його мінералогічного складу, дефіцитність та постійне зростання вартості обумовлюють необхідність пошуку альтернативних видів зв'язуючих матеріалів.

У зв'язку з цим значний науковий і практичний інтерес становлять нові зв'язуючі композиції, використання яких дозволяє скоротити споживання природних ресурсів, зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та забезпечити стабільність технологічного процесу. При цьому альтернативні зв'язуючі добавки повинні відповідати комплексу технологічних, експлуатаційних та економічних вимог, а також сприяти отриманню окатишів високої якості з мінімальним вмістом пустої породи.

					КНУ.РБ.136.26.112с-02.ВС			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата				
Розробив	Горбаль							
Перевірив	Бабошко							
Н. контр.	Бабошко							
Затвердив	Бабошко							

			Літера			Аркцш		Аркцшів	
						1		1	
			ВСТУП			МТ-23-2ск			

1. АНАЛІЗ РИНКУ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ

1.1 Якісні характеристики залізорудних окатишів та функціональне призначення зв'язуючих матеріалів

Окатиші є одним із найбільш поширених видів окускованої металургійної сировини. Частка залізорудних окатишів у структурі сировинного забезпечення металургійних підприємств постійно зростає, що обумовлено їх високими технологічними характеристиками та ефективністю використання у доменному й металізаційному виробництві. У ряді випадків частка окатишів у залізорудній складовій доменної шихти досягає до 100 %, тому саме їх якість значною мірою визначає техніко-економічні показники процесів виплавки чавуну та отримання металізованої продукції.

До основних показників якості залізорудних окатишів належать хімічний і гранулометричний склад, холодна та гаряча міцність, відновлюваність і температури розм'якшення [1-3].

Найважливішою характеристикою окатишів є їх хімічний склад. Високоякісні окатиші повинні характеризуватись підвищеним вмістом загального заліза, оптимальним складом пустої породи та мінімальною кількістю шкідливих домішок, що негативно впливають на роботу шахтних печей і якість кінцевого продукту. Підвищення вмісту заліза у залізорудній частині доменної шихти сприяє зменшенню витрат коксу та підвищенню продуктивності доменного процесу.

Гранулометричний склад окатишів визначає газодинамічні умови руху газів у шахтних печах. Загальноприйнято, що оптимальний розмір окатишів для доменної плавки повинен перебувати в межах 5-20 мм. Використання дрібніших окатишів призводить до їх винесення газовим потоком через колошник, тоді як збільшення розміру понад 20 мм погіршує процеси відновлення.

					КНУ.РБ.136.26.112с-02.01.АР									
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	АНАЛІЗ РИНКУ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ				Літера		Аркцш		Аркцшів	
Розробив	Горбаль										1		18	
Перевірив	Бабошко													
Н. контр.	Бабошко													
Затвердив	Бабошко								МТ-23-2ск					

Холодна міцність характеризує здатність окатишів витримувати транспортування, перевантаження та механічні навантаження у верхній частині шахтних агрегатів. Для оцінювання даного показника визначають міцність на стиск, ударну міцність та стираність. Відповідно до нормативних вимог міцність окатишів на стиск повинна бути не меншою за 2 кН на окатиш, вихід фракції понад 5 мм після барабанних випробувань – не менше 95 %, а вміст фракції менше 0,5 мм – не більше 4 % [3, 2].

Важливою характеристикою є поведінка окатишів в умовах одночасного нагрівання та відновлення. Якісні окатиші повинні мати високу гарячу міцність, підвищену температуру початку розм'якшення та мінімальний інтервал перебування у в'язкопластичному стані.

Відновлюваність окатишів залежить від їх розміру, пористості та мінералогічного складу. Підвищення відновлюваності залізорудної сировини забезпечує зниження питомих витрат коксу та покращення техніко-економічних показників доменного процесу.

Аналогічні вимоги до якості окатишів висуваються і при виробництві металізованої сировини. Висока температура розм'якшення дозволяє інтенсифікувати процес металізації, підвищити продуктивність шахтних печей та знизити витрати відновника [3-5].

Сучасна технологія виробництва залізорудних окатишів включає процеси окомкування шихти та подальшого зміцнення отриманих окатишів. До складу шихти входять залізорудний концентрат, флюсуючі компоненти, зв'язуючі та інші добавки. Основним призначенням зв'язуючих матеріалів є забезпечення необхідних якісних характеристик окатишів та стабільності технологічного процесу.

На різних стадіях виробництва зв'язуючі матеріали виконують такі функції:

- поглинання надлишкової вологи залізорудного концентрату;
- забезпечення стабільного утворення зародків та формування окатишів заданої крупності;

- надання сирим окатишам необхідної транспортної міцності та формування структури, придатної для безударного сушіння;
- участь у процесах формування шлакової зв'язки та структури обпалених окатишів під час термічної обробки.

1.2 Вплив типу зв'язуючого на властивості залізорудних окатишів

На сучасному етапі розвитку технологій огрудкування застосовується значна кількість різноманітних зв'язуючих матеріалів, які відрізняються за складом, походженням і механізмом дії. Водночас універсальної класифікації таких добавок наразі не сформовано, що пов'язано з постійним розширенням номенклатури зв'язуючих та різноманітням умов їх використання у виробництві окатишів.

Одним із найбільш поширених підходів є поділ зв'язуючих матеріалів за характером їх впливу на процес зміцнення окатишів. Відповідно до цього підходу виділяють тверднучі та зміцнювальні добавки. Тверднучі зв'язуючі переважно застосовуються у технологіях безвипалювального отримання окатишів, де формування міцності відбувається внаслідок процесів гідратації або тверднення. Зміцнювальні добавки використовують переважно у випалювальних технологіях, де вони беруть участь у формуванні структури та фазового складу окатишів під час термічної обробки [6-8].

Поряд із цим у науковій літературі зустрічаються класифікації, засновані на хімічній природі та походженні зв'язуючих компонентів. Такий підхід дозволяє більш детально враховувати особливості взаємодії добавок із мінеральною частиною шихти, а також оцінювати їх вплив на технологічні та металургійні властивості готової продукції.

З точки зору впливу на хімічний склад залізорудних окатишів зв'язуючі матеріали умовно поділяють на дві основні категорії: розубожуванні та нерозубожуванні. Використання розубожувальних добавок супроводжується збільшенням кількості пустої породи в окатишах, що призводить до зниження вмісту заліза та погіршення окремих технологічних показників. Нерозубожуванні

зв'язуючі, навпаки, забезпечують мінімальний вплив на хімічний склад продукції, що дозволяє підтримувати високий вміст заліза та покращувати якість готових окатишів.

Зв'язуючі добавки, що розубожують залізорудні окатиші. Глинисті матеріали займають провідне місце серед зв'язуючих добавок, що використовуються у виробництві залізорудних окатишів. Найбільшого поширення в процесах огрудкування набули бентонітові глини, які характеризуються високими зв'язуючими властивостями та здатністю забезпечувати необхідну міцність сирих окатишів.

Бентоніти належать до осадових глин морського походження, утворених унаслідок геологічного перетворення вулканічних лав, попелу та туфів. Їх хімічний склад може суттєво відрізнятися залежно від родовища, однак основні технологічні властивості визначаються насамперед мінералогічним складом. Головним мінералом, що забезпечує зв'язуючу здатність бентонітів, є монтморилоніт $((Al,Mg)_{2-3}(OH)_2(Si_4O_{10}) \cdot nH_2O)$ – алюмосилікат із шаруватою структурою, здатний активно взаємодіяти з водою.

Під час зволоження бентонітові глини інтенсивно поглинають воду, значно збільшуються в об'ємі 15-20 раз та формують високодисперсні гелеподібні системи з розвиненою питомою поверхнею 600-900 м²/г. Саме ця особливість обумовлює їх ефективність як зв'язуючих матеріалів у процесах грануляції та формування окатишів [8].

Залежно від складу обмінного комплексу бентоніти поділяють на лужні та лужноземельні. Лужні бентоніти, в яких переважають іони натрію (Na⁺), характеризуються високою здатністю до набухання та забезпечують формування окатишів із підвищеною міцністю як у вологому, так і у висушеному стані. Лужноземельні різновиди містять переважно іони кальцію та магнію, мають меншу набухаючу здатність і потребують більших витрат для досягнення необхідних показників міцності сирих окатишів. Водночас для таких бентонітів характерна вища пластичність.

На технологічні властивості бентонітів значною мірою впливають умови їх використання, зокрема жорсткість води, яка може погіршувати показники набухання та ефективність дії зв'язуючого.

Для визначення придатності бентонітових глин до застосування в процесах огрудкування використовують комплекс лабораторних методів. Найчастіше оцінюють ступінь набухання, в'язкість суспензії, пластичність та електрокінетичні характеристики. Вважається, що якісні бентоніти повинні забезпечувати високі показники набухання та достатню пластичність суспензії. Найбільш об'єктивною оцінкою ефективності бентоніту є лабораторні технологічні випробування, під час яких визначають міцність сирих окатишів, отриманих за стандартних умов підготовки шихти та грануляції. Кращими вважаються ті бентоніти, які забезпечують необхідні показники міцності при мінімальних витратах добавки [7, 8].

Витрата та тип бентоніту визначаються індивідуально для кожного підприємства, оскільки вони залежать від характеристик концентрату, складу шихти та особливостей технологічного процесу. Один і той самий бентоніт може демонструвати різну ефективність за різних умов виробництва, що обумовлює необхідність оптимізації режимів його використання [24-26].

Основною перевагою бентонітів є здатність забезпечувати формування сирих окатишів необхідної крупності та міцності, а також підвищувати їх пористість і термостійкість. Крім того, застосування якісних бентонітів сприяє зменшенню кількості структурних дефектів у випалених окатишах.

Разом із тим використання бентонітових глин має низку суттєвих недоліків. Бентоніт є компонентом пустої породи, тому його введення до складу шихти призводить до зниження вмісту заліза в окатишах. Окрім цього, бентоніти вносять до складу окатишів кислі оксиди, що спричиняє зменшення їх основності. Важливим фактором є також обмеженість родовищ високоякісного бентоніту та значні транспортні витрати, пов'язані з його доставкою до фабрик огрудкування [9].

З метою зниження витрат бентоніту були розроблені різні технологічні підходи. Одним із напрямів є підвищення однорідності шихти шляхом попереднього змішування компонентів або використання вискоефективного змішувального обладнання. Інший підхід передбачає активацію бентонітів содою, що полягає у заміщенні іонів обмінного комплексу бентоніта на іонами натрію. Така модифікація дозволяє підвищити здатність бентоніту до набухання та покращити його зв'язуючі властивості [9-11].

Активація може здійснюватися сухим або вологим способом із використанням холодного чи нагрітого содового розчину. Найбільш ефективні результати досягаються при введенні соди 3 % у вигляді гарячого розчину 80 °С з подальшою тривалою витримкою суміші, що забезпечує більш повне протікання процесу модифікації бентоніту.

Здатність бентонітів до активації оцінюють за коефіцієнтом модифікованості:

$$M = 0,053 \cdot E/C \cdot (K - K_0)$$

де: E – обмінна ємність, мг/100 г;

C – витрата соди відносно маси глини, %;

0,053 – коефіцієнт перерахунку вмісту натрію в соді, мг/100 г;

K і K₀ – реологічні показники активованого та вихідного бентоніту відповідно.

Поряд із традиційними бентонітами, які характеризуються високою вартістю та обмеженими запасами, у технології огрудування залізорудної сировини можуть використовуватись й інші типи глинистих матеріалів. Зокрема, у дослідженнях Марганецького ГЗК була доведена можливість застосування тонкодисперсного глинистого продукту, отриманого під час збагачення марганцевих руд і такого, що містить монтморилонітові компоненти. Практичне використання подібної «марганцевої» глини також було реалізовано на Центральному ГЗК Кривого Рогу [14].

У наукових роботах [14-16] розглянуто можливість часткової або повної заміни бентонітових добавок нонтронітовими глинами. Такі глини можуть утворювати окремі родовища або входити до складу розкривних порід, що супроводжують поклади залізних руд. Нонтроніт належить до залізовмісних силікатних мінералів глинистого типу. Для нього характерний підвищений вміст оксидів заліза – на рівні 30...40 % Fe_2O_3 , а також 35...40 % SiO_2 , 5...8 % Al_2O_3 та 4...6 % MgO . Частка нонтроніту в природних глинах може досягати 60 %. За показниками набухання та в'язкості суспензії нонтронітові глини наближені до лужноземельних бентонітів. Результати промислових випробувань показали, що отримання окатишів із близькими технологічними характеристиками можливе за умови введення нонтронітових глин у кількості, приблизно удвічі більшій порівняно з витратами лужноземельного бентоніту. Унаслідок цього, попри підвищений вміст заліза в самому нонтроніті, сумарний вміст Fe у випалених окатишах дещо знижується – орієнтовно на 0,1...0,3 %. Для ефективного використання нонтронітових добавок у процесі грануляції необхідне коригування режимів роботи тарілчастих грануляторів, а саме збільшення кута нахилу тарелі та зменшення швидкості її обертання. Дослідно-промислова плавка окатишів із нонтронітом у доменних печах засвідчила, що за металургійною цінністю вони практично не поступаються окатишам, виготовленим із використанням бентонітових зв'язуючих.

Подібними за функціональними властивостями до нонтронітових глин є бідні залізні руди Лисаківського родовища, які містять глиноземисті компоненти. Проведені промислові випробування підтвердили можливість використання суміші подрібненої руди та гравітаційного концентрату Лисаківського ГЗК у виробництві окатишів. Витрата такої добавки становила 3...10 %, при цьому були отримані окатиші з прийнятними технологічними властивостями. Ефективність використання Лисаківської руди додатково підтверджена результатами доменної плавки дослідних окатишів на Карагандинському металургійному комбінаті, де були забезпечені задовільні техніко-економічні показники процесу [29].

Економічно доцільним є використання як зв'язуючих матеріалів місцеві глинисті поріди, що розташовані поблизу фабрик огрудкування. Прикладом таких матеріалів є бентонітоподібні юрські розкривні глини келовейського ярусу Михайлівського залізорудного родовища. Незважаючи на порівняно невисокі реологічні характеристики, після активації кальцинованою содою келовейські глини стають придатними для використання в процесах огрудкування, що дозволило Михайлівському ГЗК повністю відмовитися від привізного бентоніту та перейти на використання місцевої природної сировини [45]. Для забезпечення стабільного постачання зв'язуючого на Михайлівському ГЗК був створений усереднювальний склад селективно видобутої келовейської глини з покращеними властивостями. Встановлено, що у верхніх шарах штабеля під час тривалого зберігання в осінньо-весняний період під впливом кліматичних факторів зменшується вміст монтморилоніту та інших набухаючих глинистих мінералів. З цієї причини активацію келовейської глини здійснюють шляхом її спільного помелу із содою.

Також у роботі показано можливість використання глауконітової глини як зв'язуючої добавки. Така глина є розкривною породою при видобутку залізистих кварцитів у кар'єрі Полтавського ГЗК. Для зниження витрат глауконітової глини застосовують її активацію шляхом спільного подрібнення з карбоксиметилцелюлозою та фосфатами натрію — триполіфосфатом і тринатрійфосфатом [20,25].

До розкривних порід також належить мергель крейдоподібного типу, який займає проміжне положення між глинами та вапняком. Значні поклади мергелю поширені серед нерудних товщ залізорудних родовищ [25-27]. Мінералогічний склад мергелю представлений карбонатною частиною, основою якої є CaCO_3 , та некарбонатною складовою, до якої входять монтморилоніт, гідрослюда, галуазит, каолініт і змішаношарові мінерали. Завдяки цьому мергель може одночасно виконувати функції зв'язуючого матеріалу та флюсу.

Середній вміст CaO у мергелі становить близько 40 %, SiO₂ — 14...20 %, природна вологість — приблизно 14 %, а кратність набухання складає 2,7...3,2 [52]. Лабораторні дослідження показали, що для досягнення міцності сирих окатишів, співставної з окатишами, що містять 0,8 % бентоніту, необхідно вводити до 7 % мергелю [53]. Окатиші, отримані з використанням мергелю, характеризуються нижчим вмістом заліза, підвищеною основністю та дещо більшим вмістом сірки. Дослідження на установці «Бурхарда» показали, що зі збільшенням витрати мергелю ступінь металізації окатишів підвищується, а їх реакційна здатність перевищує показники окатишів із бентонітом [30].

Промислові випробування технології окомкування з використанням мергелю проводились на Лебединському ГЗК [30, 35]. Для отримання окатишів необхідної якості витрата мергелю становила відповідно 4,8 і 2,9 %. Водночас на обох підприємствах спостерігалось помітне зниження вмісту заліза у випалених окатишах.

Окрім зазначених матеріалів, у ролі глинистих зв'язуючих можуть використовуватись гідрослюдисті глини, аморфно-кремністі породи, боратові руди.

Поширеною зв'язуючою добавкою у виробництві окатишів є також вапно, основною перевагою якого є широке поширення сировини для його отримання – вапняку. Крім того, вапно виконує функцію флюсу, що підвищує металургійну цінність окатишів. Як зв'язуючий матеріал вапно застосовується на одному з найбільших у світі підприємств із виробництва окатишів – фабриці у місті Тубаран (Бразилія), а також на ряді підприємств Бразилії, Мексики, Індії та Бахрейну [30-35].

У країнах колишнього пострадянського простору основна увага приділялась використанню негашеного вапна [27, 25]. Випробування на Центральному ГЗК (Кривий Ріг) показали, що застосування вапна дозволяє отримувати окатиші, придатні для доменного виробництва, за умови повної гідратації вапна в шихті до початку огрудкування [68].

На Північний ГЗК (Кривий Ріг) встановлено, що оптимальна витрата вапна становить близько 1,5 % при вмісті активних компонентів 55 %. Заміна бентоніту вапном практично не вплинула на міцність сирих окатишів, однак міцність висушених окатишів зросла, а температура «шоку» знизилася. Випалені окатиші характеризувалися вищою міцністю та збільшенням вмісту заліза на 0,4 %. Під час доменної плавки дослідних окатишів було встановлено зниження питомої витрати коксу на 0,8 % та підвищення продуктивності печі на 1,3 % [20].

Для забезпечення максимальної ефективності зв'язуючих властивостей вапна процес підготовки шихтових матеріалів повинен бути організований таким чином, щоб гасіння вапна відбувалося одночасно зі зневодненням залізородного концентрату та частковим підсушуванням шихти. У зв'язку з цим ступінь подрібнення вапна має відповідати не менше ніж 90 % класу $-0,1$ мм, а термін зберігання меленого негашеного вапна не повинен перевищувати 8 годин. Крім того, необхідним є ретельне перемішування вапна з концентратом та створення умов для повного проходження процесу гідратації у силосах [21].

Як зв'язуючу добавку також застосовують карбонатне вапно, яке являє собою частково випалений вапняк або суміш вапна з вапняком чи залізокремністими породами. Використання таких матеріалів сприяє підвищенню ступеня десульфурзації окатишів, дозволяє працювати з концентратами підвищеної вологості та зменшувати витрати палива на випал. Під час доменної плавки окатишів із карбонатним вапном було зафіксовано зниження питомих витрат коксу на 5,3 % та збільшення продуктивності доменної печі на 3,5 %.

Вапно також використовується при виробництві автоклавованих і безвипалювальних окатишів, а також окатишів із хромових концентратів [82]. На дослідно-промисловій установці Лисаківського ГЗК були виготовлені партії автоклавованих окатишів, використання яких у доменному процесі забезпечило зростання продуктивності агрегатів і зменшення питомої витрати коксу.

Дослідження, виконані в Єгипетському інституті металургійних досліджень, показали, що при окомкуванні концентратів із добавкою прокатної окалини

доцільним є використання гашеного вапна. Зі збільшенням витрати зв'язуючого зростає міцність сирих окатишів, однак одночасно спостерігається певне зниження їх відновлюваності після випалу. Оптимальна кількість гашеного вапна в шихті становить близько 4 % [31, 33].

У промислових умовах Полтавського ГЗК (Горішні Плавні) було досліджено технологію отримання окатишів із використанням активного магнезійного вапна. Встановлено, що збільшення тривалості контакту вапна з концентратом позитивно впливає на міцність як сирих, так і висушених окатишів. Разом із тим завершення процесу гідратації вапна в структурі сирих окатишів може супроводжуватись їх частковим руйнуванням, що призводить до погіршення газопроникності шару та збільшення вмісту дрібної фракції.

Дослідження, проведені в із концентратами Костомукшського та Соколовсько-Сарбайського ГЗК, підтвердили позитивний вплив вапна на процеси зміцнення окатишів та окиснення магнетиту. Встановлено, що інтенсифікація процесу випалу під дією вапновмісних добавок зростає у такій послідовності: вапняк → гашене вапно → негашене вапно. Це пояснюється нижчою температурою розкладання Ca(OH)_2 порівняно з CaCO_3 , а також більш розвиненою поверхнею контакту між реагуючими частинками.

Зв'язуючі матеріали на цементній основі здебільшого застосовують при виробництві безвипалювальних окатишів [30, 31]. За умови забезпечення стабільних показників холодної міцності такі окатиші можуть розглядатися як перспективний вид сировини для сучасного доменного виробництва. Порівняно з випаленими окатишами вони краще витримують руйнівні навантаження, що виникають під час нагрівання та відновлення.

При виготовленні безвипалювальних окатишів із цементними зв'язуючими, як правило, застосовується тепло-волога обробка за температур 70...250 °С. Попередня витримка на повітрі, нагрівання та додаткова обробка у водних розчинах хлоридів сприяють зменшенню деструкції окатишів і підвищенню їх міцності та ступеня десульфурзації [35].

Результати досліджень із використанням високозалізного цементу показали, що при витраті зв'язуючого близько 7,5 % отримані окатиші характеризуються достатньою механічною міцністю, яка додатково підвищується після пропарювання [36].

Також можливим є використання феритного та портландцементу. Встановлено, що окатиші з феритно-цементною зв'язкою мають нижчі показники міцності порівняно з окатишами на основі портландцементу, а структура їх пор відрізняється більшими розмірами.

У Японії була розроблена технологія отримання безвипалювальних окатишів і брикетів із використанням 7...8 % цементу та спеціальних прискорювачів тверднення.

З точки зору процесів металізації безвипалювальні окатиші є менш привабливими через підвищений вміст цементу, який виступає джерелом пустої породи. Водночас результати аналізу сумарних енергетичних витрат показують, що при зменшенні витрати цементу до 3...4 % безвипалювальна технологія стає економічно більш вигідною.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням техногенних матеріалів як зв'язуючих компонентів. Для виробництва традиційних і безвипалювальних окатишів можуть застосовуватись відходи різних виробництв, зокрема феритно-кальцієві суміші із замасленої окалини та шламів, відходи вапна і вапняку, шлами глиноземного виробництва, а також відходи полірувального виробництва й матеріали, що містять оксиди рідкісноземельних елементів [38].

Зв'язуючі добавки, які не знижують вміст заліза в окатишах. Збереження концентрації заліза в шихті на рівні вихідного концентрату може бути досягнуте двома основними способами: шляхом введення мінімальної кількості зв'язуючого або використанням таких зв'язуючих матеріалів, які повністю видаляються під час подальшої термічної обробки окатишів. Реалізація обох підходів можлива при застосуванні органічних зв'язуючих природного або синтетичного походження. У процесі випалу органічні речовини практично повністю вигорають, а витрата

окремих синтетичних зв'язуючих не перевищує 1 %. Завдяки цьому використання органічних добавок замість бентоніту забезпечує підвищення вмісту заліза в окатишах приблизно на 0,6...0,8 % [39].

Значну групу органічних зв'язуючих матеріалів, що застосовуються при виробництві окатишів, становлять продукти переробки горючих копалин та рослинної сировини. Як зв'язуючі добавки запропоновано використовувати торф, різноманітні смоли та гудронне мило, бітуми, бітумовмісні доломіти та інші органічні матеріали. При витраті таких речовин на рівні 0,6...1,0 % техніко-економічні показники виробництва окатишів є співставними з використанням близько 1 % бентоніту, а в окремих випадках навіть перевищують їх.

У роботі [40] розглянуто можливість використання розчину тростинної меляси як органічного зв'язуючого при окомкуванні залізорудних концентратів, шламів і пилоподібних відходів. Високі металургійні характеристики одержаних окатишів забезпечуються завдяки попередньому твердненню сирих гранул за температури близько 70 °С із подальшим сушінням при 110 °С.

Серед органічних зв'язуючих матеріалів значне поширення отримали сульфітно-спиртова барда (ССБ) та сульфітно-дріжджова барда (СДБ), що є побічними продуктами переробки деревини. За своєю природою ці речовини являють собою технічні лігносульфонати, які містять певну кількість редуруючих компонентів. Оптимальна кількість таких добавок у шихті становить 3,0...3,3 % у перерахунку на суху речовину. Встановлено, що введення приблизно 5 % соди дозволяє скоротити витрату зв'язуючого до 2,0...2,4 %. Також доведена можливість застосування ССБ у технології виробництва рудовугільних окатишів [41].

Для покращення експлуатаційних властивостей окатишів, зокрема їх водостійкості та механічної міцності, запропоновано різні способи модифікації ССБ. З цією метою до складу зв'язуючого вводять 40...60 % талового пеку, 3...20 % акрилової кислоти та 1...7 % персульфату амонію. Також можливе використання 10...30 % смоли кубового залишку фурфурольного виробництва.

Разом із перевагами застосування ССБ і СДБ має низку суттєвих недоліків. Насамперед це підвищене надходження сірки до складу окатишів разом зі зв'язуючим, унаслідок чого її вміст у готовій продукції може збільшуватися майже втричі. Крім того, використання зазначених зв'язуючих призводить до зниження міцності випалених окатишів приблизно у два рази [43].

Також були проведені промислові дослідження технології окускування із використанням флюсолігносульфонатної суміші (ФЛС). Приготування суміші здійснювалося шляхом введення рідкого лігносульфонату марки «В» безпосередньо в млин під час подрібнення вапняку. Оптимальна витрата лігносульфонату в шихті становила 0,03...0,06 %, тоді як загальна витрата ФЛС складала 0,93...1,96 %. Застосування такої суміші дозволило знизити вміст кремнезему у випалених окатишах на 0,4...0,8 % [44].

Синтетичні органічні зв'язуючі можуть вводитися до складу шихти як у рідкому, так і у сухому вигляді. Проте використання рідких добавок у процесі огрудкування є недостатньо ефективним, оскільки залізорудні концентрати зазвичай характеризуються підвищеною вологістю. У зв'язку з цим до сучасних синтетичних зв'язуючих висуваються вимоги щодо їх порошкоподібного стану, доброї розчинності у воді та високої клейкої здатності.

Синтетичні добавки. Одним із найбільш поширених синтетичних органічних зв'язуючих є карбоксиметилцелюлоза (КМЦ), що являє собою натрієву сіль простого ефіру целюлози та гліколевої кислоти. КМЦ отримують шляхом взаємодії лужної целюлози з натрієвою сіллю монохлороцтової кислоти. При цьому для потреб гірничо-збагачувальних комбінатів виробництво КМЦ може бути організоване безпосередньо у відділеннях підготовки бентоніту [45].

Для оцінювання клейких властивостей КМЦ у порівнянні з іншими зв'язуючими визначали сили адгезії між двома алюмінієвими пластинами після нанесення на їх поверхню клейкої композиції та витримування за кімнатної температури. До складу суміші входили залізорудний концентрат – 87 %, зв'язуючий компонент – 4 % та вода – 9 %. Результати досліджень показали, що за

рівнем адгезійної здатності зв'язуючі матеріали розташовуються у такій послідовності: бентоніт, клей «Екстра», полівініловий спирт, казеїн, клей ПВА та натрієва сіль КМЦ.

Полівініловий спирт при витраті 0,2...0,4 % запропоновано використовувати у виробництві безвипалювальних залізрудних окатишів.

Значного поширення у США набуло органічне зв'язуюче «Перидур». Його витрата у 5–10 разів нижча порівняно з високоякісним бентонітом. Під час термічної обробки зв'язуюче практично повністю вигорає, що сприяє формуванню більш пористої структури окатишів та покращує їх відновлюваність. Проведені дослідження показали, що використання «Перидуру» дозволяє збільшити висоту шару окатишів завдяки підвищенню газопроникності шару, а також забезпечує більш повне окиснення магнетиту [47, 48].

У літературі також розглядається можливість використання інших синтетичних органічних речовин. Зокрема, у роботі запропоновано застосовувати нагрітий до 80...90 °С водний розчин моноетаноламиду синтетичних жирних кислот фракції C10–C16. Витрата такого розчину становить 0,01...0,03 %.

У поєднанні з каустичними реагентами пропонується використовувати карбоксиметилцелюлозу, гідроксипропілцелюлозу, карбоксиметилгідроксипропілцелюлозу, желатинізований крохмаль, пектини, поліакриламід, поліакрилати, натрієву сіль співполімеру стиролу та малеїнової кислоти, а також відходи деревообробного виробництва. Як каустичні компоненти можуть застосовуватись гідроксиди натрію, калію, амонію, кальцію, барію або магнію. Частка синтетичного полімеру у таких композиціях повинна становити 10...95 %, а вміст каустичного реагенту — 2...50 % [49].

Компанією Golden West Industries (м. Прайс, США) запатентовано зв'язуючу композицію, що складається із суміші полімеру та поверхнево-активної речовини. Співвідношення полімерного компонента до ПАР у такій системі змінюється в межах від 0,001:1 до 0,1:1 [48].

Основним стримувальним фактором широкого використання синтетичних полімерів у виробництві окатишів залишається їх висока вартість, унаслідок чого застосування таких зв'язуючих при витраті 0,02...0,04 % часто є економічно не вигідним. Водночас необхідно враховувати позитивний економічний ефект, який досягається на стадії доменного переділу завдяки зменшенню кількості пустої породи в окатишах та покращенню їх металургійних характеристик.

Комплексні зв'язуючі. Застосування комплексних або комбінованих зв'язуючих систем, що формуються шляхом поєднання декількох типів зв'язуючих матеріалів, обумовлене прагненням отримати синергетичний ефект від їх спільної дії.

У науково-технічній літературі наведено різні варіанти поєднання бентонітових глин з органічними зв'язуючими речовинами. Використання таких композицій дозволяє підвищити вміст заліза у випалених окатишах без погіршення їх фізико-механічних і металургійних характеристик, а також зменшити витрати дороговартісних бентонітових матеріалів. Як органічні компоненти у складі комбінованих зв'язуючих можуть застосовуватись метас, поліакриламід, співполімери акрилату натрію з бутадієн-стирольними фрагментами, плави дикарбонових кислот та натрієва сіль карбоксиметилцелюлози. Крім того, розглядається можливість спільного використання бентоніту з гідрослюдистими глинами або вапном.

Інститутом «Механобрчермет» запропоновано використовувати як зв'язуючу добавку суміш тонкодисперсного металізованого повернення та вапна у співвідношенні 3:1. Дослідження показали, що окатиші, отримані з концентрату із введенням 5 % такої суміші, характеризуються вищими металургійними показниками порівняно з окатишами, що містять 0,7 % бентоніту. Також вапно пропонується застосовувати у поєднанні з портландцементом і доменним або конвертерним шлаком, кремнеземом і гіпсом, а також гідроксамат-полімерними композиціями.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням низькоякісних розкривних глин Північного та Центрального Криворізьких ГЗК у суміші з лігносульфонатами, бішофіту разом із карбамідоформальдегідною смолою, а також композицій на основі модифікованого природного крохмалю, диспергованих полімерів, лігносульфонатів і кальцинованої соди у різних співвідношеннях. Крім того, запропоновано використання портландцементу з добавкою 10...40 % глиноземистої породи, у ролі якої може виступати бокситова руда.

До перспективних технологій, що забезпечують виробництво нерозубожувальних окатишів, належить окускування із частковою або повною заміною бентоніту модифікованою водою. Так, запропоновано замінювати 50...75 % бентонітової добавки водою, активованою асиметричним змінним струмом промислової частоти. За результатами досліджень авторів, при використанні асиметричного змінного струму з частотою 720...780 Гц можлива повна відмова від застосування бентоніту у процесі окомкування.

Проведений аналіз наукових праць і технічних джерел свідчить про наступне:

— на даний час бентонітові глини залишаються основним видом зв'язуючих матеріалів, що застосовуються у виробництві залізорудних окатишів. Використання бентоніту забезпечує формування сирих окатишів із достатнім рівнем механічної міцності, високою пористістю та стійкістю до термічних навантажень. Разом із цим застосування бентонітових добавок супроводжується низкою недоліків, зокрема зниженням концентрації заліза в окатишах, дефіцитністю якісної сировини, високою собівартістю та значними енергетичними витратами, пов'язаними з транспортуванням і підготовкою зв'язуючого до технологічного процесу;

— сучасні дослідження пропонують широкий спектр альтернативних зв'язуючих матеріалів, серед яких різні типи глинистих порід, вапно, торф'яні продукти, смоли, метас, цементні композиції для безвипалювального зміцнення, а також комплексні зв'язуючі системи, що поєднують декілька компонентів. У більшості випадків застосування таких матеріалів дозволяє знизити витрати на

зв'язуючі добавки, однак їх широке промислове впровадження обмежується недостатньо стабільними технологічними характеристиками;

– найбільш перспективними є технології, спрямовані на покращення якості випалених окатишів, насамперед шляхом підвищення вмісту заліза. У зв'язку з цим значний інтерес викликають нерозумовувальні зв'язуючі матеріали, використання яких не супроводжується внесенням додаткової пустої породи до складу окатишів. До цієї групи належать, передусім, синтетичні органічні зв'язуючі речовини;

– однією з основних причин, що стримує активне використання альтернативних зв'язуючих матеріалів, є недостатня ефективність процесу окомкування. До найбільш характерних проблем належать підвищені витрати зв'язуючих, нестабільний гранулометричний склад окатишів, а також недостатня якість сирих гранул, яка проявляється у зниженій міцності та невисокій термостійкості. Подальший розвиток і вдосконалення таких технологій ускладнюється недостатнім рівнем вивчення механізмів окомкування шихт із використанням альтернативних зв'язуючих та особливостей формування структури сирих окатишів.

Метою роботи є комплексне дослідження закономірностей процесів окомкування та термічного зміцнення залізорудних окатишів при використанні органічних зв'язуючих замість традиційного бентоніту, а також розроблення раціональної технології виробництва окатишів із підвищеними металургійними властивостями на основі органічних зв'язуючих матеріалів.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Дослідження властивостей шихтових матеріалів.

Відбір проб шихтових матеріалів для проведення хімічного аналізу здійснювали відповідно до вимог ДСТУ ISO 3082:2019 «Руди залізнi. Методи відбирання та підготовки проб». Визначення хімічного складу матеріалів проводили згідно з серією стандартів ДСТУ ISO 9516-1:2016 на апараті EXPERT 4L (рисунок 2.1), вологість матеріалів визначали відповідно до ДСТУ ISO 3087:2019, а показники щільності та пористості — за методиками, наведеними у ДСТУ ISO 3852-2 та профільних стандартах для залізорудних окатишів.



Рисунок 2.1 – Рентгенофлуоресцентний спектрометр EXPERT 4L

Здатність зв'язуючих матеріалів до набухання при взаємодії з вологою оцінювали за двома показниками: бентонітовим числом відповідно до ДСТУ EN ISO 13500 та індексом вільного набухання. Основна відмінність між методами полягає в умовах контакту зв'язуючого з водою. При визначенні бентонітового числа зв'язуючий матеріал інтенсивно перемішують із водою до отримання однорідної суспензії, тоді як при визначенні індексу вільного набухання наважку поступово додають у мірний циліндр із водою без перемішування або струшування.

					КНУ.РБ.136.26.112с-02.02.МД			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	Літера	Аркцш	Аркцшів
Розробив	Горбаль						1	5
Перевірив	Бабошко					МТ-23-2ск		
Н. контр.	Бабошко							
Затвердив	Бабошко							

Дослідження реологічних властивостей розчинів зв'язуючих проводили за допомогою ротаційного віскозиметра ВСН-3 відповідно до загальних вимог ДСТУ ISO 3219. Для проведення випробувань готували 10 %-ву суспензію зв'язуючого, яку перемішували магнітною мішалкою протягом 30...40 хвилин та витримували 14...16 годин. Перед вимірюванням суспензію додатково перемішували протягом 30 секунд. Визначення в'язкості здійснювали при швидкості обертання гільзи віскозиметра 600 та 300 об/хв.

Пластичну в'язкість суспензії розраховували за формулою:

$$\eta_{\text{пл}} = \varphi_{600} - \varphi_{300}$$

де: $\eta_{\text{пл}}$ – пластична в'язкість суспензії, Па·с;

φ_{600} – кут повороту шкали віскозиметра при швидкості обертання 600 об/хв, град;

φ_{300} – кут повороту шкали віскозиметра при швидкості обертання 300 об/хв, град.

Динамічну в'язкість визначали за формулою:

$$\eta_d = A \cdot \varphi / n$$

де: η_d – динамічна в'язкість, Па·с;

A – константа віскозиметра;

φ – кут повороту шкали віскозиметра, град;

n – швидкість обертання гільзи віскозиметра, об/хв.

2.2. Вивчення процесу грануляції та властивостей сирих окатишів

Під час підготовки шихтових матеріалів до процесу окомкування наважку сухого залізорудного концентрату рівномірно наносили тонким шаром на поверхню гідрофобного матеріалу. Після цього по поверхні концентрату розподіляли флюсуючі та зв'язуючі компоненти з подальшим інтенсивним перемішуванням суміші. Далі до шихти вводили воду у кількості, необхідній для забезпечення заданого рівня вологості. Для досягнення більш рівномірного

зволоження суміш додатково протирали через сито з розміром 1 мм і повторно перемішували.

Підготовлену шихту витримували в ексикаторі протягом 40...60 хвилин. Така витримка моделювала умови промислового транспортування шихти від змішувального обладнання до огрудкувача через систему конвеєрів та накопичувальних бункерів. Крім цього, протягом зазначеного часу відбувалась взаємодія води зі зв'язуючими компонентами та завершувались процеси їх гідратації.

Після витримки частину підготовленої шихти використовували для формування зародків окатишів. У подальшому для окомкування застосовували зародки крупністю 5...8 мм, на які впродовж 5...7 хвилин порційно наносили шихту. За необхідності здійснювали додаткове зволоження матеріалу за допомогою пульверизатора. Після введення всієї кількості шихти процес окомкування продовжували ще протягом двох хвилин з метою ущільнення та зміцнення сформованих окатишів.

У кожному експерименті маса сухого залізорудного концентрату становила 2 кг, тоді як кількість флюсуючих і зв'язуючих добавок змінювали відповідно до заданого складу шихти. Для отримання зародків використовували 600 г попередньо зволоженої та витриманої шихти. Формування окатишів здійснювали із застосуванням 200 г зародків фракції 5...8 мм та 1 кг підготовленої шихти.

Процес окомкування проводили у лабораторному барабанному окомковувачі з гумовою футеровкою діаметром 0,45 м і довжиною 0,21 м. Частота обертання барабана становила 33 об/хв.

Отримані сирі окатиші оцінювали за показниками вологості, гранулометричного складу та міцності. Для вологих окатишів визначали опір роздавлюванню та стійкість до руйнування при падінні на металеву поверхню з висоти 0,5 м. Для висушених окатишів визначали міцність на стиск. У промислових умовах зазначені характеристики є основними критеріями оцінки якості сирих окатишів, ефективності процесу окомкування та правильності підбору складу

шихти. В умовах лабораторних досліджень ці показники дозволяють оцінити вплив різних типів зв'язуючих і флюсуючих добавок, а також їх витрати, на процес формування окатишів.

Для визначення гранулометричного складу отримані зародки та сирі окатиші піддавали розсіву на ситах із виділенням таких класів крупності: +16 мм, 16...12,0 мм, 12,0...10 мм, 10...8 мм, 8...5 мм та -5 мм. Властивості сирих окатишів окремо досліджували для фракцій 16...12,0 мм та 12,0...10 мм.

2.3 Вивчення металургійних показників окатишів

Хімічний склад окатишів визначали відповідно до вимог **ДСТУ ISO 9516** та профільних стандартів на залізорудну сировину. Визначення міцності окатишів на стиск проводили на розривній машині згідно з вимогами **ДСТУ ISO 4700**, а пористість оцінювали відповідно до **ДСТУ ISO 3852-2**. Аналогічну методику застосовували також при визначенні пористості висушених окатишів.

Для оцінювання відновлюваності окатишів використовували запропоновану А. М. Похвисневим. У сучасному варіанті установка оснащена лабораторними вагами електронними вагами, що забезпечують можливість безперервного зважування з точністю $\pm 0,001$ г.

Перед початком експерименту електропіч нагрівали до температури 800 °С та продували нейтральним газом, у якості якого використовували азот. Кошик із ніхромового дроту підвішували до ваг та поміщали у піч для визначення маси кошика в потоці нейтрального газу. Після цього кошик виймали, завантажували в нього наважку випалених окатишів і повторно встановлювали в нагріту піч. Дослідний зразок витримували у печі протягом декількох хвилин для видалення залишкової вологи. Після стабілізації маси визначали початкову масу наважки в середовищі нейтрального газу. Далі розпочинали подачу відновлювального газу – водню. Для запобігання потраплянню надлишку водню в атмосферу лабораторії у верхній частині печі підтримували факельне горіння. Подачу нейтрального газу при цьому припиняли.

Відлік часу починали з моменту подачі газу-відновника. Упродовж перших п'яти хвилин масу наважки фіксували щохвилини, а надалі – через кожні три хвилини. Передбачалась можливість підключення ваг до персонального комп'ютера для автоматичного безперервного запису зміни маси зразка під час експерименту.

Протягом усього дослідження температуру в печі підтримували на заданому рівні, що забезпечувало стабільність умов відновлення та достовірність отриманих результатів.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ІЗ ОРГАНІЧНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ

3.1 Властивості шихтових матеріалів

Для проведення експериментальних досліджень використовували шихтові матеріали, до складу яких входили залізорудний концентрат, вапняк, грецький бентоніт, а також органічне зв'язуюче. Основні фізико-хімічні та технологічні характеристики застосованих матеріалів наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристика шихтових матеріалів

Матеріал	Fe _{заг.} , %	CaO, %	SiO ₂ , %	Фракція, мм	Вміст фракції, %	Питома поверхня, см ² /г	Густина, г/см ³
Концентрат	69,5	0,3	3,0	−0,045	95...97	2100	5,2
Вапняк	н/д	52,6	2,3	−0,070	>80	5470	2,7
Бентоніт	3,8	4,3	51,1	−0,070	>80	н/д	2,6
Органічне зв'язуюче	–	–	–	−0,212	99,7...99,9	н/д	0,9

Як альтернативу традиційним бентонітовим зв'язуючим у роботі досліджували органічний полімерний реагент Floform виробництва компанії SNF Floerger, основною діючою речовиною даного зв'язуючого є поліакриламід.

Досліджуване органічне зв'язуюче являє собою сипкий порошок білого кольору. Вологість матеріалу знаходиться в межах 3-5 %, вміст фракції крупністю менше 0,212 мм становить близько 99,8 %, а насипна густина дорівнює 0,85 т/м³.

Оцінювання властивостей органічного зв'язуючого та окатишів, отриманих із його використанням, проводили у порівнянні з грецьким бентонітом. За своїми технологічними характеристиками бентоніт родовища (о. Мелос) належить до високоякісних зв'язуючих матеріалів, що широко використовуються у світовій практиці виробництва залізорудних окатишів. Зазначений бентоніт відноситься до групи лужних бентонітів. Вологість бентонітового порошку становить близько 2 %, крупність частинок – менше 70 мкм, а насипна густина – 0,98 т/м³.

					КНУ.РБ.136.26.112с-02.03.ДХЗО			
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ІЗ ОРГАНІЧНИМИ ЗВ'ЯЗУЮЧИМИ			
Розробив	Горбаль							
Перевірив	Бабошко							
Н. контр.	Бабошко							
Затвердив	Бабошко				Літера Аркцш Аркцшів 1 21 МТ-23-2ск			

Основними традиційними показниками, що характеризують ефективність зв'язуючих у процесах окомкування залізорудних концентратів, є здатність до набухання та в'язкість суспензій.

Під час взаємодії з водою високоякісний бентоніт здатний збільшувати свій об'єм у 15-20 разів. На відміну від нього, органічне зв'язуюче на основі поліакриламідну повністю розчинялося у воді з утворенням колоїдного розчину. Згідно з теорією набухання полімерних речовин, у даному випадку спостерігається явище необмеженого набухання, а сформований розчин відноситься до III типу колоїдних систем – молекулярних колоїдів. Розбавлені розчини таких колоїдів за своїми властивостями близькі до істинних розчинів і підпорядковуються загальним закономірностям поведінки розбавлених систем. При цьому збільшення об'єму системи порівняно з об'ємом розчинника практично не відбувається. Отже, поліакриламідне органічне зв'язуюче фактично не проявляє характерної для бентонітів здатності до набухання.

Визначення в'язкості суспензій виконували при різних концентраціях зв'язуючих у системі «зв'язуюче – дистильована вода» залежно від типу досліджуваного матеріалу. Для мінеральних зв'язуючих аналізували 10 %-ві суспензії, тоді як для органічного зв'язуючого використовували 0,2 %-вий розчин. Відмінність у концентраціях пояснюється необхідністю моделювання реальних виробничих умов, оскільки витрата органічних і мінеральних зв'язуючих у процесі окомкування суттєво відрізняється.

Прийняті концентрації визначалися з урахуванням ймовірної концентрації порового розчину при вологості залізорудного концентрату на рівні 10 %, а також при витраті мінеральних зв'язуючих близько 10 кг/т концентрату та органічного зв'язуючого – 0,2 кг/т. Результати визначення в'язкості розчинів зв'язуючих наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – В'язкість розчинів зв'язуючих

Тип зв'язуючого	Найменування	Концентрація розчину, %	В'язкість розчину, мПа·с
–	Вода дистильована (розчинник)	–	$1,0 \pm 0,0$
Мінеральне	Грецький бентоніт	10,0	$26,9 \pm 0,2$
	Індійський бентоніт	10,0	$25,5 \pm 0,1$
	глина (активована содою)	10,0	$3,6 \pm 0,3$
Органічне	Поліакриламід	0,2	$9,2 \pm 0,1$
		1,0	$14,1 \pm 0,1$
		3,0	$57,0 \pm 0,1$

Встановлено, що в'язкість суспензій мінеральних зв'язуючих, а отже і їх здатність забезпечувати ефективне окомкування, може змінюватися у широкому діапазоні – від 3,6 до 26,9 мПа·с для матеріалів із високими зв'язуючими властивостями.

Органічне зв'язуюче при своїй робочій концентрації, яка є значно нижчою порівняно з мінеральними добавками, характеризується в'язкістю 9,2 мПа·с і займає проміжне положення серед досліджених зв'язуючих матеріалів.

Той факт, що значення в'язкості розчину органічного зв'язуючого відповідають рівню показників традиційних зв'язуючих, які застосовуються у виробництві окатишів, свідчить про перспективність його використання в процесах окомкування залізорудних концентратів.

3.2 Механізм формування залізорудних окатишів

Для забезпечення ефективного процесу огрудкування необхідною умовою є рівномірний розподіл зв'язуючого матеріалу по всьому об'єму шихти.

За умови, що насипна густина залізорудного концентрату при вологості близько 10 % становить приблизно 2,97 т/м³, об'єм 1 т концентрату дорівнює близько 0,34 м³. При витраті бентоніту 4 кг/т його об'ємна концентрація у шихті безпосередньо перед процесом окомкування досягає 18-24 %. Таким чином, достатньо висока об'ємна частка бентоніту забезпечує його рівномірний розподіл у шихті.

Для органічного зв'язуючого при витраті 0,2 кг/т об'ємна концентрація становить близько 0,07 %. За таких низьких концентрацій рівномірний розподіл органічного зв'язуючого у шихті можливий лише за умови його переходу у розчинений стан.

Формування розчину органічного зв'язуючого у вологі шихти перед окомкуванням підтверджується даними щодо кінетики зміни в'язкості його розчинів (рисунок 3.1). Для повного розчинення органічного зв'язуючого необхідний певний проміжок часу, а максимальні значення в'язкості досягаються лише через декілька хвилин після початку взаємодії з водою.

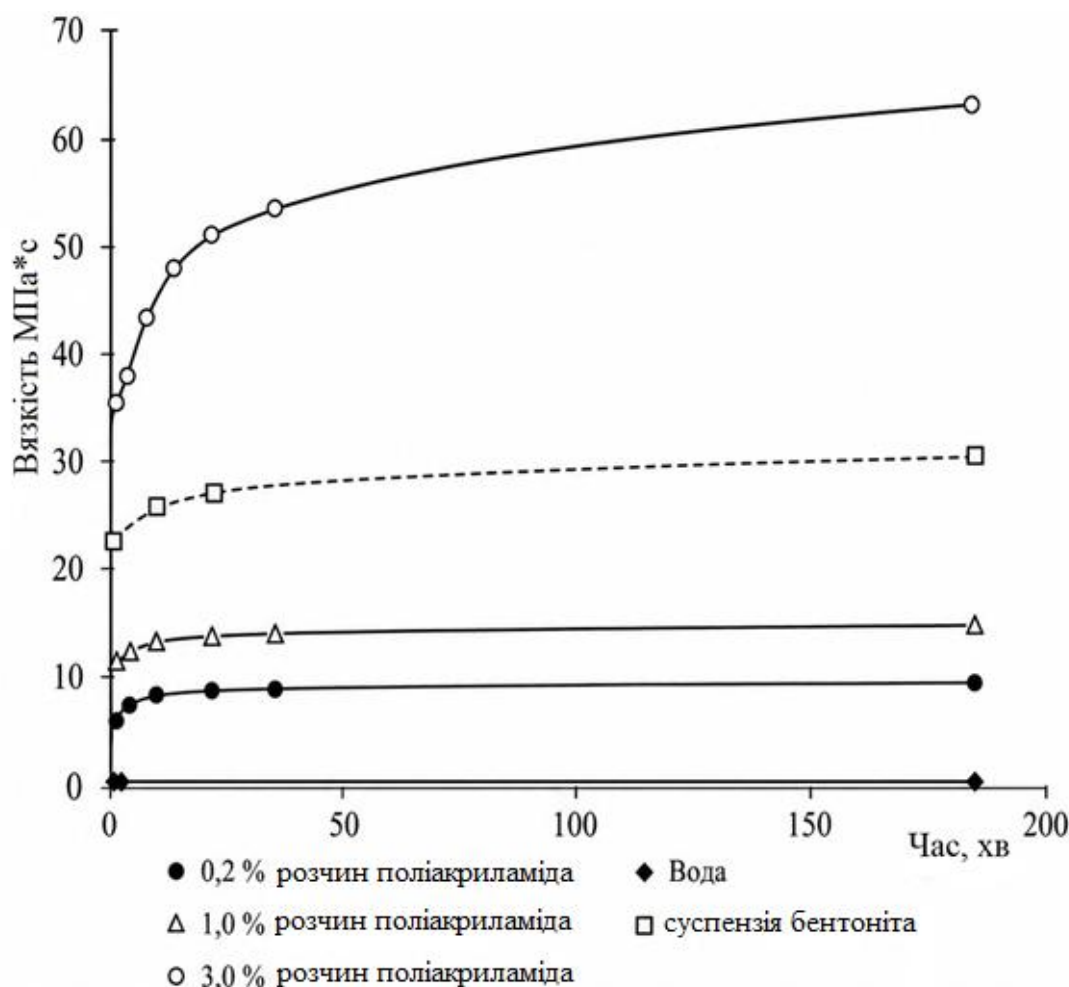


Рисунок 3.1 – Зміна в'язкості розчинів зв'язуючих у час

Поступове зростання в'язкості пов'язане з процесами набухання полімеру, розгортанням макромолекул поліакриламідів та формуванням колоїдної структури розчину. Експериментальні результати (рисунок 3.1) задовільно описуються

логарифмічною залежністю виду $Y = A \ln(t) + B$, де коефіцієнти рівняння наведені у таблиці 5. Встановлено, що властивості розчину суттєво залежать від концентрації органічного зв'язуючого. Збільшення концентрації від 0,2 до 3,0 % призводить до приблизно шестикратного підвищення в'язкості – від 9,2 до 57,0 мПа·с, а також до зростання часу повного розчинення з 7 до 17 хвилин.

Таблиця 3.3 – Кінетика утворення розчину органічного зв'язуючого

Концентрація розчину, %	A	B	Коефіцієнт кореляції, R	Час розчинення, хв
0,2	$0,42 \pm 0,01$	$7,61 \pm 0,12$	0,70	7
1,0	$0,48 \pm 0,01$	$12,36 \pm 0,21$	0,63	10
3,0	$5,28 \pm 0,09$	$35,64 \pm 0,34$	0,82	17

В'язкість бентонітової суспензії також зростає з часом. Експериментальні результати зміни в'язкості 10 %-ї суспензії бентоніту в часі, аналогічно до розчинів органічного зв'язуючого. Під час дослідження властивостей бентоніту грецького родовища були отримані такі значення коефіцієнтів: $A=1,35 \pm 0,29$; $A=22,72 \pm 0,73$. Кореляційна залежність є статистично значущою, а коефіцієнт кореляції становить $R=0,85$ $R_{\text{крит}} = 0,44$. Час формування суспензії, в'язкість якої досягає 90 % від максимального значення, складає близько 19 хвилин.

Перед утворенням зародків при краплинному зволоженні відбуваються процеси розподілу вологи в об'ємі шихти. Ефективність формування водної манжети у міжчастинкових контактах при використанні зв'язуючих матеріалів визначається співвідношенням сил змочування, які забезпечують розтікання рідкої фази (порового розчину) по поверхні частинок, та в'язкісних сил, що перешкоджають переміщенню рідини.

Взаємодію розчинів зв'язуючих із поверхнею матеріалу, що піддавався огрудкуванню, досліджували за характером розтікання каліброваної краплі об'ємом 0,3 мл по поверхні природного магнетиту, виконаного у вигляді полірованої пластини. Результати проведених досліджень наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Характеристика змочувальної здатності розчинів зв'язуючих частинок магнетитового концентрату

Склад краплі	Площа краплі, мм ²
Дистильована вода	38,5 ± 0,9
Поровий розчин бентоніту (4 кг/т)	35,20 ± 2,0
0,2 % розчин органічного зв'язуючого	43,00 ± 2,64
1,0 % розчин органічного зв'язуючого	63,90 ± 4,75
3,0 % розчин органічного зв'язуючого	38,8 ± 3,7

Розмір водної манжети, який оцінювали за площею розтікання краплі розчину на поверхні магнетитової підкладки, для дистильованої води (за мінімального в'язкісного опору) становить 38,50 мм², тоді як для бентонітового розчину з в'язкістю близько 30 мПа·с – 35,20 мм². Використання розчинів поліакриламідів, який проявляє поверхнево-активні властивості, суттєво змінює характер розподілу вологи в шихті (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Крапля води (ліворуч) та розчин органічного зв'язуючого (праворуч) на полірованій поверхні.

Збільшення протяжності водної манжети, що характеризується зростанням площі краплі, пов'язане як зі зміною міжфазного натягу на межі «поверхня частинки – водний розчин», так і зі зміною поверхневого натягу самого розчину.

Підвищення концентрації поліакриламід у розчині супроводжується переважним впливом на міжфазний натяг, формування якого є більш складним з кінетичної точки зору. Одночасно спостерігається збільшення протяжності водної манжети до 63,90 мм². Це свідчить про більш ефективне змочування частинок концентрату розчином зв'язуючого, що значною мірою визначає характер розподілу вологи у шихті.

Відносне збільшення протяжності водної манжети при переході від води до 0,2 %-го розчину поліакриламід становило близько 10 %. Одночасно зі зростанням площі манжети приблизно на 10 % підвищувалась і міцність сирих окатишів (рисунок 3.3).

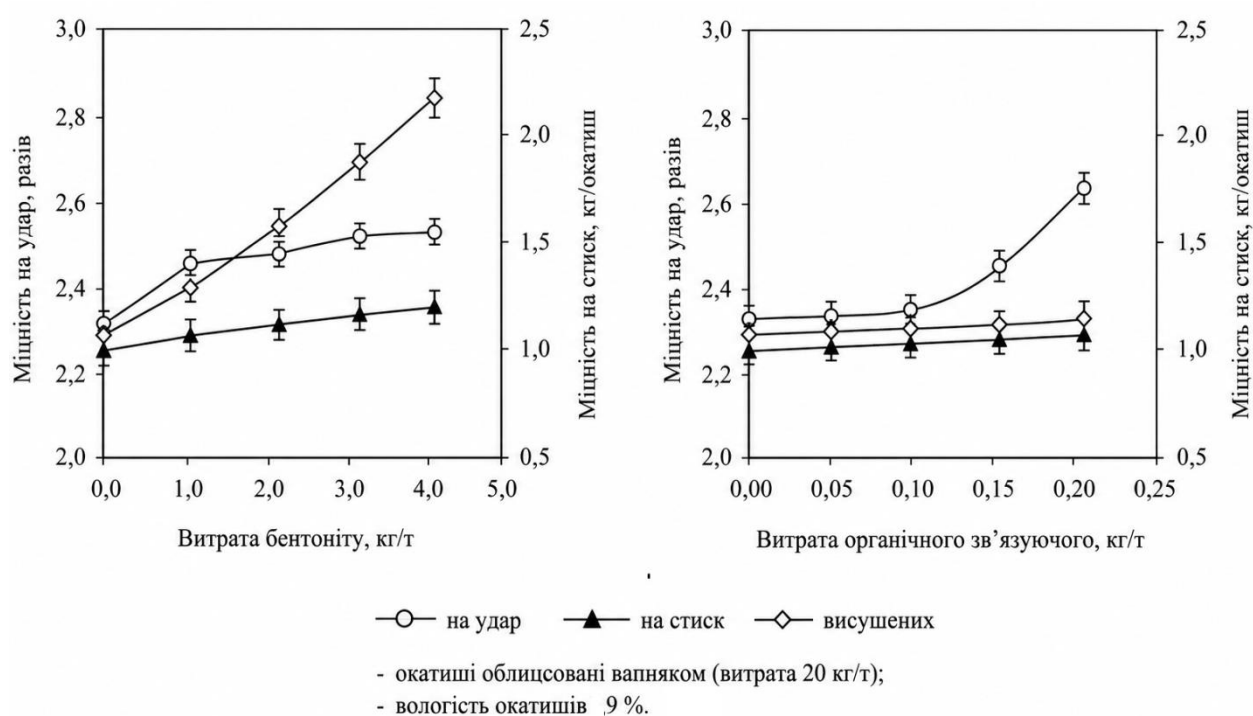


Рисунок 3.3 – Показники міцності сирих окатишів

Аналогічний ефект раніше спостерігався під час окомкування агломераційних шихт із використанням поверхнево-активних речовин, зокрема стічних вод коксохімічного виробництва. Подальше збільшення концентрації поліакриламідного розчину понад 1 % не супроводжується збільшенням протяжності манжети, що пояснюється посиленням впливу в'язкісних сил, які обмежують розтікання рідкої фази.

Отже, на відміну від бентоніту, який після набухання займає значний об'єм у структурі шихти, органічне зв'язуюче розподіляється переважно шляхом утворення розчину. Формування такого розчину забезпечує краще змочування поверхні частинок концентрату та сприяє більш рівномірному розподілу вологи у шихті. При використанні органічного зв'язуючого для забезпечення оптимального розподілу вологи необхідно підтримувати концентрацію розчину в достатньо вузькому інтервалі, а також витримувати шихту протягом певного часу перед огрудкуванням.

Механізм утворення зародків при огрудкуванні. У дисперсних системах, що застосовуються для виробництва окатишів, зародки, які є центрами подальшого гранулоутворення, формуються у вигляді локальних флуктуаційних об'ємів із підвищеною вологістю.

Для окатишів, виготовлених із використанням бентоніту, такі локальні області підвищеної вологості приурочені до зон концентрації частинок бентоніту, що активно поглинають воду. Це підтверджується залежністю кількості зародків фракції 5–8 мм від витрати бентоніту (рисунк 3.4).

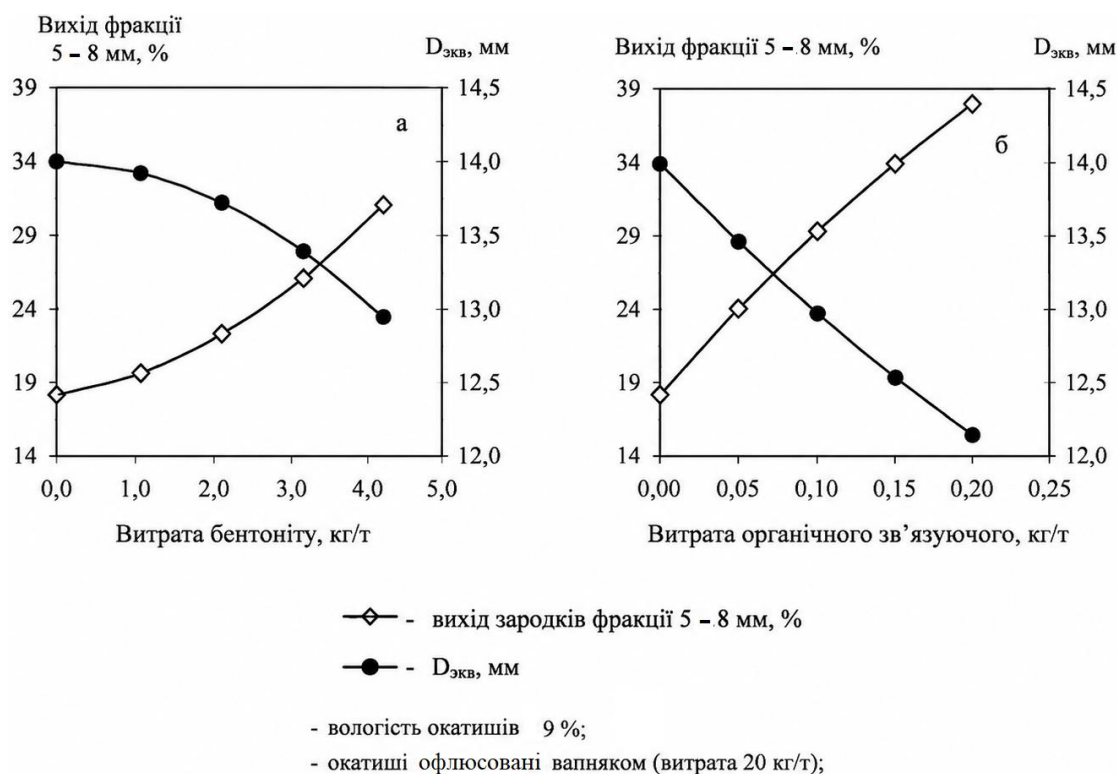


Рисунок 3.4 – Гранулометричний склад сирих окатишів

Збільшення витрати бентоніту до 4 кг/т сприяє зростанню кількості флуктуаційних об'ємів і, відповідно, підвищенню виходу зародків з одиниці об'єму шихти з 18 до 31 %. У цьому випадку стійкість сформованих зародків забезпечується здатністю бентоніту до набухання 15-20 раз забезпечує збільшення кількості механічних контактів між частинками шихти, що підвищує стійкість сформованих зародків.

Формування стійких зародків під час огрудкування шихт з органічним зв'язуючим відбувається за рахунок утворення просторової коагуляційної структури, сформованої полімерними ланцюгами, які рівномірно розподіляються в усьому об'ємі матеріалу. Наявність такої структури підтверджується результатами досліджень в'язкості розчинів зв'язуючого (рисунк 3.1), а також показниками міцності висушених окатишів. У цьому випадку підвищення міцності забезпечується формуванням каркасної структури та виникненням локальних контактів між рудними зернами і макромолекулами поліакриламід (рисунк 3.3).

Зростання стійкості зародків, яке обумовлюється збільшенням витрати органічного зв'язуючого та підвищенням щільності просторової коагуляційної структури, супроводжується збільшенням виходу зародків фракції 5-8 мм. При підвищенні витрати органічного зв'язуючого до 0,2 кг/т, що одночасно викликає збільшення в'язкості порового розчину з 1,0 до 9,2 мПа·с, вихід зародків зростає з 18 до 38 %, тоді як еквівалентний діаметр сирих окатишів зменшується з 14,0 до 12,9 мм.

На відміну від бентонітових зв'язуючих, використання органічного полімерного зв'язуючого завдяки покращенню змочування та більш рівномірному розподілу вологи у шихті сприяє формуванню більш однорідного гранулометричного складу окатишів. При цьому сумарний вихід придатних фракцій 8-16 мм для окатишів з органічним зв'язуючим досягає 98,7 %, тоді як для окатишів із бентонітом цей показник не перевищує 93,2 %.

Отримані результати дозволяють описати механізм зародкоутворення у шихтах, що містять бентоніт або органічне зв'язуюче, наступним чином. На

початковій стадії процесу у шихті присутні вільні об'єми, які містять рудні частинки та частинки зв'язуючого матеріалу. У процесі змішування і транспортування шихти до огрудкувача відбувається взаємодія зв'язуючого з вологою шихти, що супроводжується набуханням бентоніту і утворення розчину органічного зв'язуючого. При цьому рівномірний розподіл бентоніту в об'ємі шихти забезпечується його значною об'ємною концентрацією, тоді як органічне зв'язуюче розподіляється завдяки формуванню високорухомого розчину, який характеризується підвищеною змочувальною здатністю відносно поверхні рудних частинок. У процесі огрудкування під дією механічних навантажень шихта розділяється на велику кількість окремих локальних об'ємів, які зазнають ущільнення. У результаті цього відбувається формування гранул – зародків окатишів, що характеризуються різною структурною будовою та відмінними фізико-механічними властивостями.

Міцність сирих окатишів при ударних навантаженнях зростає зі збільшенням витрати зв'язуючих матеріалів незалежно від їх типу. Підвищення витрати бентоніту до 4 кг/т забезпечує збільшення кількості скидань окатишів з 2,3 до 2,5 разів. У випадку застосування органічного зв'язуючого в кількості 0,2 кг/т кількість скидань зростає до 2,7 разів.

При випробуваннях на стиск сирі окатиші з органічним зв'язуючим (0,2 кг/т) та окатиші з бентонітом (4 кг/т) характеризуються практично однаковими показниками міцності – на рівні 1,1...1,2 кг/окатиш.

Водночас різний механізм зміцнення окатишів із бентонітом та органічним зв'язуючим суттєво впливає на властивості висушених окатишів. Для бентонітових систем підвищення міцності забезпечується формуванням розвинених механічних контактів між частинками при значній об'ємній концентрації зв'язуючого. У випадку органічного зв'язуючого зміцнення визначається утворенням просторової каркасної молекулярної структури з локальними точковими контактами між полімерними макромолекулами та рудними зернами. У результаті цього окатиші з

органічним зв'язуючим після висушування практично не демонструють додаткового зміцнення (рисунок 3.3).

Пористість. Найменшою пористістю характеризуються окатиші, виготовлені без використання додаткових компонентів – лише із залізорудного концентрату. Введення до складу шихти різних добавок супроводжується зниженням її щільності та одночасним підвищенням пористості сформованих окатишів. При цьому встановлено, що зміна пористості не має прямої пропорційної залежності від зміни щільності шихти. Для різних складів шихти відносна щільність змінюється лише на 0,1...3,4 %, тоді як пористість окатишів зростає на 30...50 %.

Пористість окатишів із бентонітовим зв'язуючим виявилась близькою до пористості окатишів із добавкою вапняку, хоча об'єм введеного бентоніту приблизно у десять разів менший. Враховуючи, що ступінь набухання бентоніту становить 15-20 разів, можна зробити висновок, що в умовах процесу окомкування потенціал бентоніту реалізується не повністю. Ймовірно, це обумовлено нестачею вологи у локальних мікрооб'ємах шихти або структурними обмеженнями, пов'язаними з будовою сформованої гранули.

Найвищу пористість забезпечує використання органічного зв'язуючого. Під час розчинення у воді поліакриламід формує довгі макромолекулярні ланцюги з просторово розвиненою структурою. Такі полімерні утворення створюють каркас, який забезпечує формування та збереження міцності сирих окатишів. При нагріванні до 105 °С органічне зв'язуюче повністю втрачає вологу, що супроводжується зменшенням об'єму полімерних ланцюгів. Після остаточного видалення води формується більш розвинена високопориста структура окатиша.

Отже, пористість сирих окатишів при використанні різних зв'язуючих матеріалів визначається переважно механізмом окомкування та особливостями формування структури гранул, а не лише початковою щільністю шихти.

Вологість сирих окатишів знаходиться у межах 9,0 %, що відповідає оптимальному ступеню зволоження шихти для досліджуваних складів. Аналіз розподілу вологи по перерізу окатиша показав її нерівномірний характер:

підвищений вміст води спостерігається у центральній частині зародка та у зовнішній сферичній оболонці, тоді як проміжна зона характеризується меншою вологістю.

Подібна закономірність розподілу води є характерною для всіх досліджених типів шихт.

Отримані результати щодо нерівномірного розподілу води по перерізу окатиша узгоджуються з основними положеннями теорії формування окатишів. Процес окомкування починається з утворення зародка, вологість якого дещо перевищує середню вологість шихти.

Під дією механічних навантажень у процесі окомкування відбувається ущільнення зародка, внаслідок чого частина води витискається спочатку на його поверхню, а надалі – на поверхню окатиша. Зволоження зовнішнього шару окатиша є необхідною умовою його подальшого росту.

У міру збільшення розмірів окатиша вологість центральної частини поступово зменшується, однак до завершення процесу окомкування повного перерозподілу води не відбувається. У результаті ядро окатиша залишається найбільш зволоженою зоною структури.

3.3 Дослідження процесу сушіння окатишів

Початкова стадія термічної обробки окатишів – процес сушіння – є однією з найважливіших з точки зору забезпечення цілісності гранул та формування їх подальших експлуатаційних характеристик. Одним із ключових завдань зв'язуючої добавки є створення такої структури окатиша, яка забезпечує стабільне видалення води та запобігає руйнуванню гранул під час нагрівання.

Дослідження особливостей сушіння окатишів діаметром 14 мм із різними типами добавок проводили при температурі 105 °С та швидкості фільтрації повітря 0,03 м/с. Характеристики складу та структурних параметрів досліджуваних окатишів наведені у таблицях 3.5.

Таблиця 3.5 – Характеристика окатишів

№	Добавка до концентрату	Витрата, кг/т	$W_{ок}, \%$	Абсолютна вологість шарів, % W^1	Абсолютна вологість шарів, % W^2	Абсолютна вологість шарів, % W^3	KW^*
1	Без добавок	–	9,1	9,2	8,3	11,1	0,32
2	Вапняк	40,0	9,2	10,2	6,4	11,6	0,67
3	Бентоніт	4,0	8,3	8,8	6,9	9,3	0,35
4	Органічне зв'язуюче	0,2	9,3	9,5	8,8	10,2	0,17

Результати експериментального вивчення процесу сушіння представлені на рисунку 3.5. Форма отриманих кривих сушіння відповідає закономірностям, характерним для колоїдних капілярно-пористих матеріалів, до яких належать і залізорудні окатиші.

Кінетичні залежності сушіння окатишів різного складу мають подібний характер (рисунк 3.6), а відмінності між ними визначаються переважно кількісними параметрами, що характеризують інтенсивність процесу. У процесі сушіння окатишів (рисунк 3.6) виділяють три характерні стадії: період зростаючої швидкості сушіння, період сталої швидкості та період спадної швидкості сушіння.

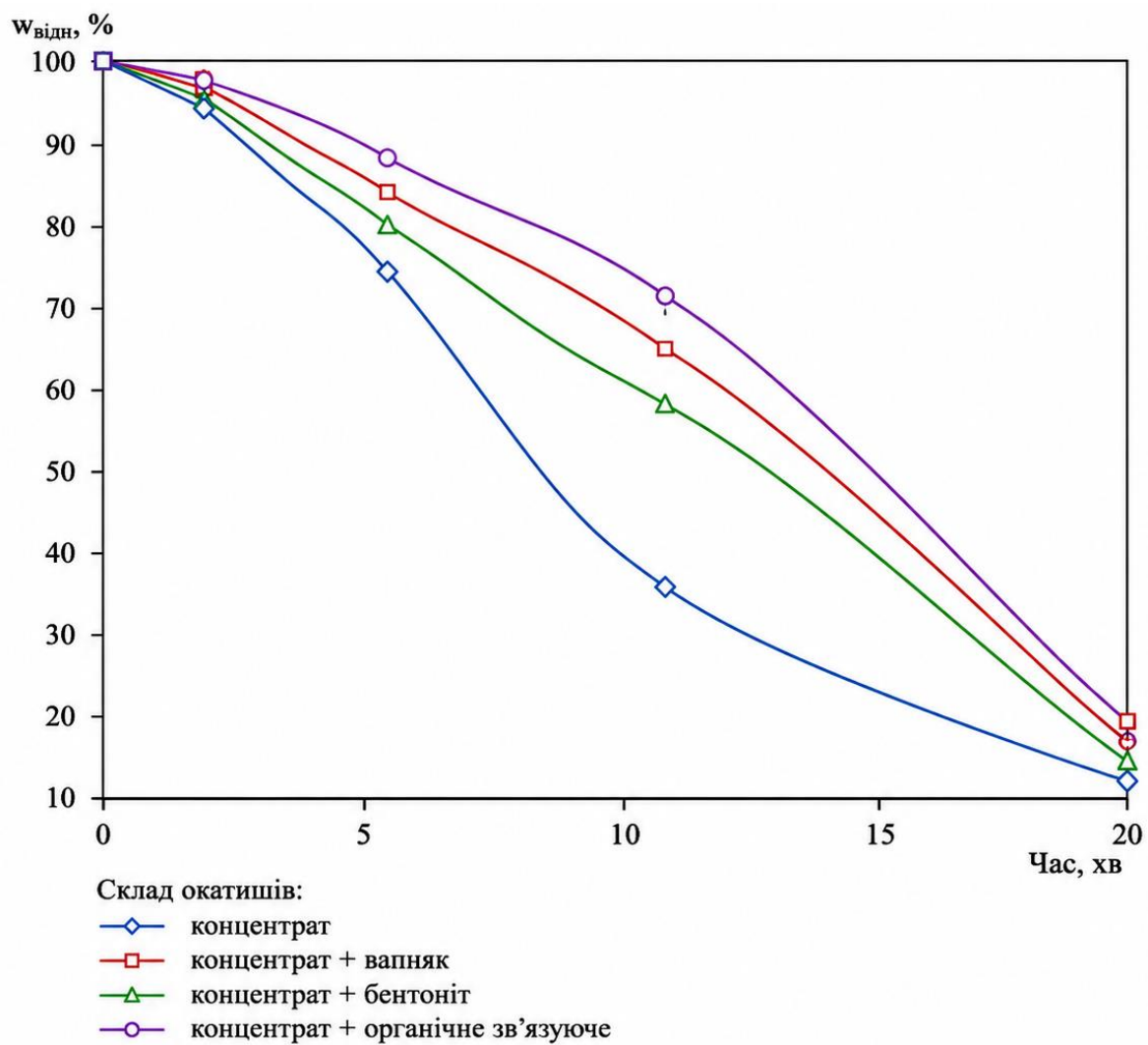


Рисунок 3.5 – Зміна вологості окатишів у процесі сушіння

Період зростаючої швидкості сушіння пов'язаний із формуванням поверхні випаровування та прогріванням окатиша до температури мокрого термометра. Для всіх досліджених моделей його тривалість не перевищує 20 % від загального часу сушіння (таблиця 3.6).

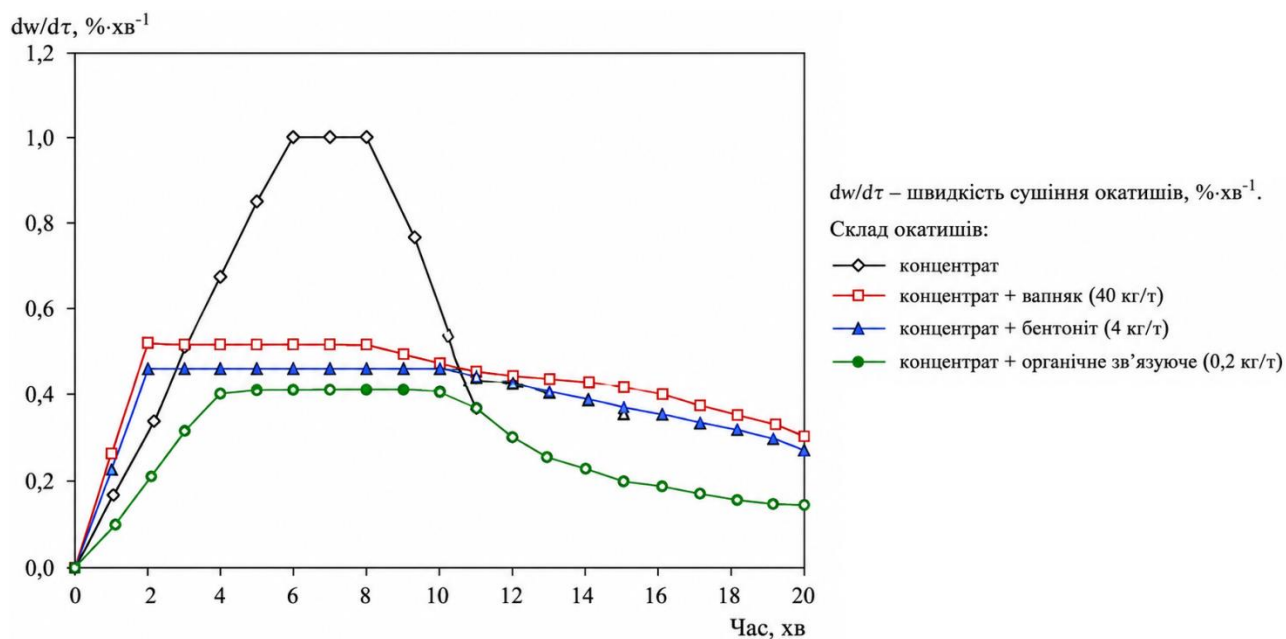


Рисунок 3.6 – Швидкість видалення вологи з окатишів

Таблиця 3.6 – Період сушіння окатишів

№	Вид добавки	Період зростаючої швидкості		Період сталої швидкості		Період спадної швидкості	
		абсолютна, хв	відносна, %	абсолютна, хв	відносна, %	абсолютна, хв	відносна, %
1	Без добавок	4	11,1	13	36,1	19	52,8
2	Вапняк	2	4,7	6	14,0	35	81,4
3	Бентоніт	2	5,0	13	32,5	25	62,5
4	Органічне зв'язуюче	6	16,7	2	5,6	28	77,8

Інтенсивність сушіння, що визначається другою похідною зміни загальної вологості у часі, на цій стадії значною мірою залежить від характеру розподілу вологи по об'єму окатиша, зокрема від відносної вологості поверхневого шару. Коефіцієнт кореляції між зазначеними параметрами становить 0,9168, а інтенсивність сушіння змінюється у межах 0,11...0,26 %·хв⁻¹.

Другий період сушіння, тривалість якого в окремих випадках досягає 36 % від загального часу процесу (таблиця 3.6), характеризується стабілізацією температури окатиша, а також практично незмінними положенням і площею поверхні випаровування. За таких умов теплова енергія, що підводиться до

окатиша, майже повністю витрачається на випаровування води. На цій стадії інтенсивність сушіння визначається переважно швидкістю переміщення води з внутрішніх зон окатиша до поверхні випаровування. Відповідно, вирішальний вплив на перебіг процесу має структура окатиша та особливості його порового простору.

За незмінних параметрів сушіння – температури, вологості та швидкості фільтрації теплоносія – швидкість видалення води виявляє пряму залежність від пористості окатишів. Між цими показниками встановлено достатньо тісний кореляційний зв'язок (коефіцієнт кореляції 0,8762). Отриману закономірність представлено на рисунку 3.7.

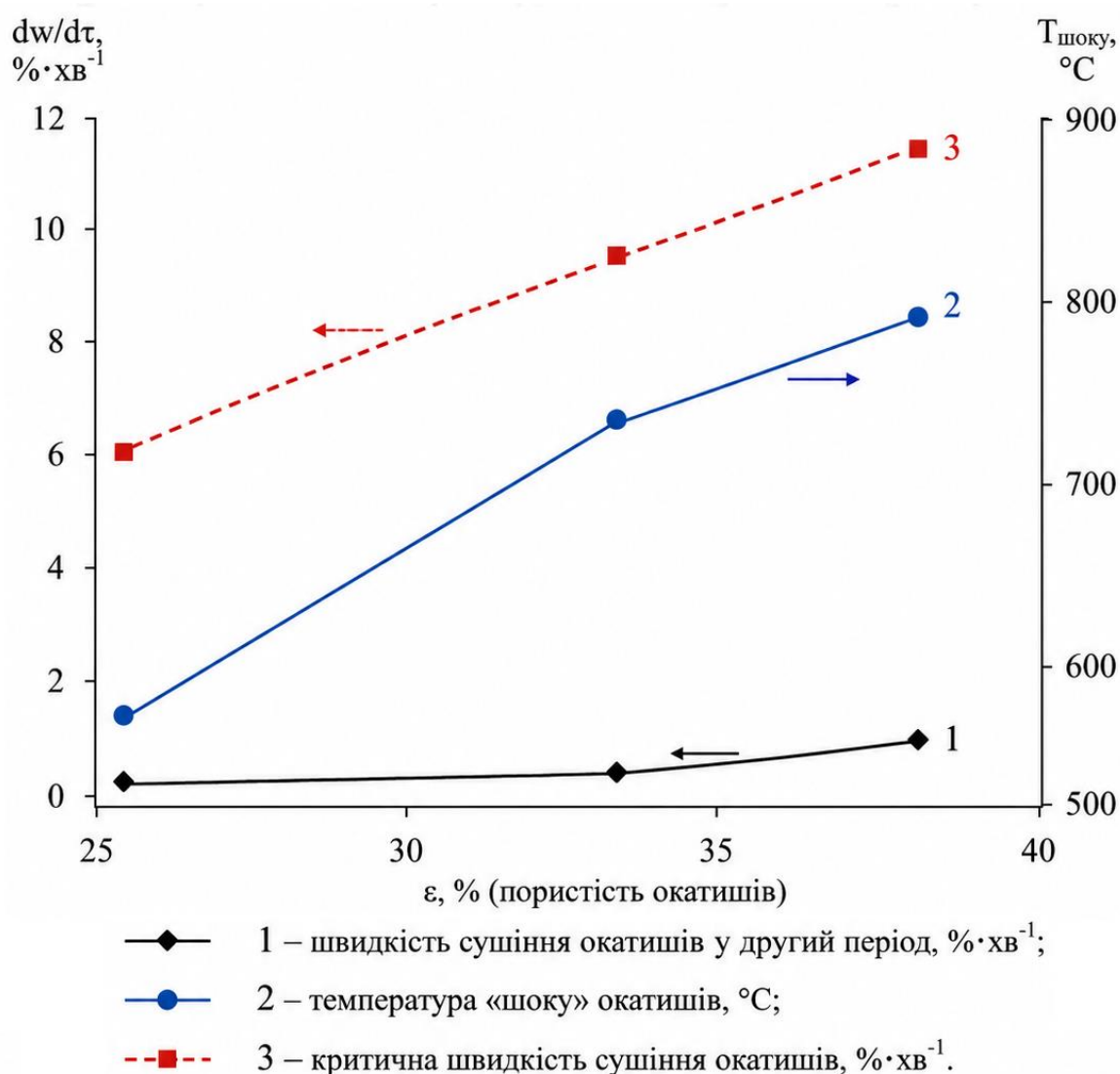


Рисунок 3.7 – Залежність сушіння окатишів у другий період та температура шоку від пористості окатишів

Підвищення пористості окатишів сприяє інтенсифікації внутрішньої дифузії вологи, що забезпечує прискорення процесу сушіння. Найбільша швидкість сушіння у другому періоді зафіксована для окатишів з органічним зв'язуючим, які характеризуються максимальною пористістю ($\varepsilon = 37,9 \%$).

Третя стадія сушіння – період спадної швидкості – є найдовшою та може становити до 81 % загальної тривалості процесу (таблиця 3.6). Для цього етапу характерне одночасне переміщення фронту випаровування вглиб окатиша та поступове підвищення температури гранули. У міру зміщення поверхні випаровування до внутрішніх зон окатиша зменшується площа активного випаровування, що спричиняє поступове зниження швидкості видалення вологи.

Найбільш виражене зменшення інтенсивності сушіння у третьому періоді спостерігається для окатишів із органічним зв'язуючим (рисунок 3.6), що пов'язано з особливостями їх порової структури та характером переміщення вологи всередині гранули.

Інтенсивність нагрівання окатишів у зоні сушіння, а отже і продуктивність випалювальної машини, значною мірою визначається здатністю окатишів видаляти вологу без утворення тріщин, деформацій і руйнування структури.

Значення температури «шоку» визначали на основі експериментально отриманих результатів, наведених у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Розрахункові значення критичної швидкості сушіння окатишів

Склад окатишів	$T_{\text{шоку}},$ °C	$(k + D)^{**},$ м²/год	$(dw/d\tau)_{\text{кр}},$ %/год	$(dw/d\tau)_{\text{кр}},$ %/хв
Концентрат	540	0,028	362,5	6,04
Концентрат + бентоніт	730	0,040	580,9	9,68
Концентрат + органічне зв'язуюче	770	0,043	664,0	11,07

Порівняльний аналіз результатів розрахунку критичної швидкості сушіння та експериментально отриманих даних щодо сушіння окатишів наведений на рисунку 3.7.

3.4 Металургійні показники випалених залізрудних окатишів

Одним із ключових показників, що визначають придатність випалених окатишів до подальшої металургійної переробки, є їх хімічний склад. Високоякісні окатиші повинні містити максимальну кількість основного корисного компонента – заліза, а також характеризуватись оптимальним співвідношенням компонентів пустої породи та необхідним рівнем основності. Важливим фактором також є мінімальний вміст важковідновлюваних оксидів і шкідливих домішок, здатних негативно впливати як на перебіг металургійних процесів, так і на якість кінцевої продукції.

У таблиці 3.8 наведено результати визначення хімічного складу окатишів, виготовлених у лабораторних умовах та випалених на промисловій випалювальній машині.

Таблиця 3.8 – Хімічний склад і міцність випалених окатишів

№	Вид добавки	Витрата добавки, кг/т концентрату	Fe _{заг.} , %	FeO, %	CaO, %	SiO ₂ , %	Міцність, кг/окатиш
1	Без добавок	–	67,78	0,27	0,26	2,95	239 ± 10
2	Вапняк	40,0	66,33	0,23	2,22	2,98	353 ± 11
3	Бентоніт	4,0	67,34	0,23	0,28	3,14	279 ± 15
4	Органічне зв'язуюче	0,2	67,77	0,16	0,26	2,95	259 ± 14

Встановлено, що значення Fe_{заг.} для окатишів без добавок та окатишів, виготовлених із використанням органічного зв'язуючого, практично однакові. Водночас для зразків, отриманих із введенням вапняку та бентоніту (зразки № 2 і № 3), характерний нижчий вміст загального заліза. Це пов'язано з тим, що введення до шихти додаткових компонентів пустої породи призводить до зменшення концентрації основного корисного компонента в готових окатишах.

При використанні вапняку зниження вмісту Fe_{заг.} порівняно з окатишами на органічному зв'язуючому становить 1,44 %, що обумовлено насамперед збільшенням частки CaO у складі окатишів. У випадку застосування бентоніту спостерігається підвищення вмісту SiO₂, при цьому концентрація загального заліза зменшується на 0,43 %.

Важливим критерієм оцінки якості випалених окатишів є їх механічна міцність. Найменшими показниками міцності характеризуються окатиші, виготовлені без використання добавок. Підвищення міцності спостерігається при застосуванні органічного зв'язуючого, бентоніту та вапняку відповідно.

Разом із тим встановлено, що всі досліджені типи окатишів відповідають нормативним вимогам щодо міцності, необхідної для транспортування та подальшого використання у шахтних металургійних агрегатах.

Дослідження відновлюваності окатишів діаметром 14 мм проводили при температурі 800 °С. Отримані результати наведені у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Відновлюваність окиснених окатишів

№	Вид добавки	Вміст FeO, %	Кисень оксидів заліза, %	Пористість, %	R ₄₀ , %
1	Без добавок	0,27	29,02	19,2	86,8
2	Вапняк	0,23	28,40	23,7	89,2
3	Бентоніт	0,23	28,83	22,1	88,3
4	Органічне зв'язуюче	0,16	29,03	31,2	89,1

Найменший ступінь відновлення через 40 хвилин після початку експерименту був характерний для окатишів, виготовлених виключно із залізрудного концентрату без введення будь-яких добавок. Це обумовлено їх недостатньо розвиненою пористою структурою, підвищеним вмістом кисню, зв'язаного в оксидах заліза, а також значною кількістю монооксиду заліза (FeO) .

Найвищі показники відновлюваності продемонстрували окатиші з використанням вапняку та органічного зв'язуючого. Проте механізми підвищення відновлюваності для цих матеріалів мають різну природу. У випадку вапнякових окатишів підвищення показника пояснюється меншим вмістом оксидів заліза і, відповідно, нижчою кількістю кисню, зв'язаного у цих сполуках. За однакової кількості вилученого під час відновлення кисню це забезпечує більшу частку відновлених оксидів заліза та, відповідно, вищий ступінь відновлення.

Для окатишів із органічним зв'язуючим підвищення відновлюваності обумовлене насамперед більшою пористістю структури та нижчим вмістом FeO.

Порівняння процесу відновлення окатишів із бентонітовим та органічним зв'язуючим показало, що зразки з органічною добавкою відновлюються інтенсивніше вже на початкових стадіях процесу (рисунок 3.8). Через 40 хвилин після початку експерименту різниця у ступені відновлення становила 0,9 %. Відомо, що збільшення відновлюваності металургійної сировини на 1 % дозволяє скоротити витрати коксу у доменному процесі приблизно на 4 кг на 1 т чавуну. Отже, застосування окатишів з органічним зв'язуючим у доменному виробництві може сприяти зменшенню витрат коксу, а у процесах металізації в шахтних агрегатах – зниженню споживання природного газу.

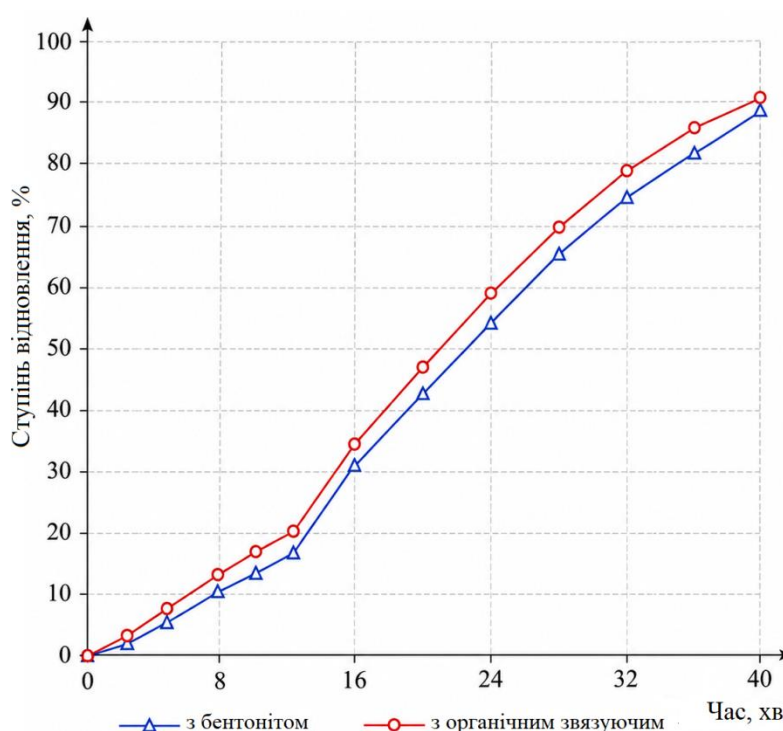


Рисунок 3.8 – Процес відновлення окатишів з бентонітом та органічним зв'язуючим

Проведений аналіз підтвердив, що окатиші з органічним зв'язуючим мають кращі металургійні характеристики порівняно з окатишами, виготовленими із застосуванням бентоніту. Для них характерні підвищений вміст загального заліза $Fe_{\text{заг.}}$, більш розвинена пориста структура та вищий ступінь відновлюваності.

Дослідження властивостей органічного полімерного зв'язуючого дозволило визначити основні особливості його використання у технології виробництва залізородних окатишів.

Принципова відмінність органічного зв'язуючого від традиційних мінеральних матеріалів проявляється вже на стадії аналізу його фізико-хімічних характеристик. Органічне зв'язуюче відрізняється специфічним хімічним складом, практично не проявляє здатності до набухання та характеризується значно вищою в'язкістю водних розчинів. Саме ці особливості визначають інший механізм перебігу технологічних процесів.

Встановлено, що характер розподілу органічного зв'язуючого в об'ємі шихти, а також особливості формування зародків і процесу грануляції сприяють утворенню сирих окатишів із меншою механічною міцністю, що пов'язано зі зменшенням площі контактів між рудними зернами та зв'язуючим компонентом. Разом із тим структура таких окатишів суттєво відрізняється від структури окатишів із бентонітовою добавкою. Для окатишів з органічним зв'язуючим характерний більш рівномірний розподіл вологи по перерізу та підвищена пористість.

Особливості сформованої структури сирих окатишів безпосередньо впливають на перебіг термічної обробки, особливо на стадії сушіння. Більш пориста структура та рівномірний розподіл вологи в окатишах із органічним зв'язуючим забезпечують підвищення допустимої інтенсивності сушіння і сприяють покращенню термостійкості окатишів.

Зазначені особливості структури сирих окатишів із органічним зв'язуючим безпосередньо впливають на властивості випалених окатишів. Для таких окатишів характерна більш розвинена пориста структура порівняно з окатишами, отриманими із застосуванням бентоніту. Підвищена пористість сприяє інтенсифікації процесів відновлення, що позитивно позначається на показниках відновлюваності окатишів. Додатковим фактором, який забезпечує покращення відновлюваності, є знижений вміст FeO в окиснених окатишах.

ВИСНОВКИ

1. Широкий спектр сучасних зв'язуючих матеріалів дає можливість підприємствам гірничо-металургійного комплексу оптимізувати технологію виробництва залізорудних окатишів з урахуванням поточних економічних і виробничих умов. Сучасні металургійні технології орієнтовані на зниження матеріальних та енергетичних витрат, а також на покращення якісних характеристик металургійної сировини. З цієї точки зору значний інтерес становлять технології огрудкування із застосуванням синтетичних органічних зв'язуючих, які не спричиняють зниження вмісту заліза в окатишах.

2. Особливості процесу огрудкування з використанням поліакриламідних зв'язуючих визначаються специфікою їх розподілу в об'ємі шихти до початку гранулоутворення та механізмом формування міцності окатишів після сушіння. На відміну від бентоніту, рівномірність розподілу якого забезпечується значною об'ємною концентрацією після набухання, органічне зв'язуюче розподіляється у вигляді розчину, що характеризується високою змочувальною здатністю по відношенню до поверхні магнетитових частинок. У зв'язку з цим для забезпечення рівномірного розподілу органічного зв'язуючого необхідною умовою є попередня витримка шихти перед огрудкуванням.

3. Міцність висушених окатишів з органічним зв'язуючим формується переважно за рахунок локальних контактів полімерних макромолекул з поверхнею рудних зерен. Саме тому їх міцність після сушіння є нижчою порівняно з окатишами, отриманими із застосуванням бентоніту, який забезпечує формування значно більшої площі контакту з поверхнею магнетиту.

4. Порівняно з бентонітовими зв'язуючими використання органічних полімерних добавок сприяє утворенню більш пористої структури сирих окатишів та забезпечує більш рівномірний розподіл вологи по їх перерізу.

					КНУ.РБ.136.26.112с-02.В										
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ					Літера	Аркцш	Аркцшів			
Розробив	Горбаль												1	2	
Перевірив	Бабошко														
Н. контр.	Бабошко												МТ-23-2ск		
Затвердив	Бабошко														

Такі структурні особливості позитивно впливають на термостійкість окатишів і створюють передумови для інтенсифікації процесу сушіння.

5. Випалені окатиші, виготовлені із застосуванням органічного зв'язуючого, характеризуються підвищеним вмістом загального заліза та кращими показниками відновлюваності у порівнянні з окатишами, отриманими з використанням бентоніту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Forsmo S. P. E., Apelqvist A. J., Björkman B., Samskog P. O. Binding mechanisms in wet iron ore green pellets with a bentonite binder // Powder Technology. 2006. Vol. 169. No. 3. P. 147–158.
2. V. v Bragin, A. A. Solodukhin, A. v Starodumov, Y. G. Yaroshenko, C. de Jesus Silva, and G. Costa Oliveire Hahn, “Specific Features of Thermal Systems of Induration Machines for Pellet Production from Iron-ore Concentrates of Different Types,” *KnE Engineering*, vol. 3, no. 5, p. 275, 2018, doi: 10.18502/keg.v3i5.2680.
3. Fan X., Jiang T., Gan M., Yin K., Chen X. Recent advances in iron ore pelletization technology // ISIJ International. 2021. Vol. 61. No. 7. P. 1817–1830.
4. Удосконалення технології та обладнання агломераційного виробництва / О. Д. Учитель, В. Й. Засельський, Д. В. Пополов, І. В. Засельський. — Кривий Ріг : Р. Козлов, 2018. — 182 с.
5. Kobayashi I., Tanigaki Y., Uragami A. A new process to produce iron directly from fine ore and coal // Iron and Steelmaker. 2001. Vol. 28, No. 9. P. 19–22.
6. Mohassab Y., Benali M., Rao Y. Alternative binders to bentonite for iron ore pelletizing: A review // Minerals Engineering. 2020. Vol. 145. Article 106089.
7. Qiu G., Jiang T., Li G., Fan X. Development and application of organic binders in iron ore pelletization // Powder Technology. 2019. Vol. 356. P. 832–841.
8. Y. Man, J. X. Feng, F. J. Li, Q. Ge, Y. M. Chen, and J. Z. Zhou, “Effect of particle size on reduction behavior in iron ore-coal composite pellets,” *Powder Technology*, vol. 256, no. 7, pp. 361–366, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.02.039.
9. Li K., Zhang Y., Wang X. Effects of polymer binders on green pellet properties and induration behavior // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 19. P. 3241–3254.

					КНУ.РБ.136.26.112с-02.СВД									
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ					Літера	Аркцш	Аркцшів		
Розробив	Горбаль												1	5
Перевірив	Бабошко													
Н. контр.	Бабошко													
Затвердив	Бабошко								МТ-23-2ск					

10. Srinivas D., Rao S. Characterization of iron ore pellets prepared using organic binders // Metals. 2021. Vol. 11. No. 9. Article 1408.
11. Ahmed H., Gupta R. Reduction behaviour of iron ore pellets in hydrogen atmosphere // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. No. 61. P. 26171–26184.
12. Mousa E. Hydrogen reduction of iron oxides: kinetics and mechanisms // Metals. 2023. Vol. 13. No. 5. Article 842.
13. Sahu A., Prakash S. Sustainable pelletizing technologies for ironmaking raw materials // Sustainability. 2023. Vol. 15. No. 3. Article 2715.
14. Zhang Y., Li K., Chen X. Influence of organic binders on the strength of iron ore pellets // Powder Technology. 2021. Vol. 389. P. 173–182.
15. Wang Z., Liu X., Fan X. Effect of carboxymethyl cellulose binder on iron ore pellet quality // Minerals. 2022. Vol. 12. No. 4. Article 478.
16. Jiang T., Fan X., Gan M. Pelletization behaviour of magnetite concentrates with organic binders // Ironmaking & Steelmaking. 2021. Vol. 48. No. 8. P. 903–912.
17. Dwarapudi S. Iron ore pelletization: theory and practice // Ironmaking & Steelmaking. 2018. Vol. 45. No. 7. P. 615–628.
18. Santos O., Moura F., Silva A. Mechanical and metallurgical properties of direct reduction pellets // Materials Research. 2021. Vol. 24. Article e20210087.
19. Lu W., Zhang Y., Fan X. Effect of binder composition on porosity and reducibility of fired pellets // Powder Technology. 2023. Vol. 425. Article 118620.
20. Mohassab Y., Benali M. Organic binder systems for sustainable iron ore pellet production // Minerals Engineering. 2022. Vol. 182. Article 107556.
21. International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap. Paris : IEA, 2023. 156 p.
22. World Steel Association. Sustainable Steel Indicators 2024. Brussels : World Steel Association, 2024. 98 p.
23. Metso Outotec. Pelletizing Handbook. Espoo : Metso Outotec, 2022. 245 p.

24. Primetals Technologies. Traveling Grate Pelletizing Plant Technology. Linz : Primetals Technologies, 2023. 87 p.
25. LKAB. Iron Ore Pellets for Blast Furnace and Direct Reduction Applications. Stockholm : LKAB Research Report, 2022. 134 p.
26. SNF Floerger. FLOFORM™ Iron Ore Pelletization Binders. Andrézieux-Bouthéon : SNF Technical Bulletin, 2023. 42 p.
27. Liu X., Wang Z., Fan X. Comparative study of bentonite and organic binders in pellet production // Minerals Engineering. 2024. Vol. 211. Article 108736.
28. E. Colombini, K. Papalia, S. Barozzi, F. Perugi, and P. Veronesi, “A Novel Microwave and Induction Heating Applicator for Metal Making: Design and Testing,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 5, p. 676, 2020, doi: 10.3390/met10050676.
29. S. Singh, D. Gupta, V. Jain, and A. K. Sharma, “Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: A Review,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 30, no. 1, pp. 1–29, 2015, doi: 10.1080/10426914.2014.952028.
30. Chen Y., Zhang H., Jiang T. Influence of binder dosage on microstructure and strength of iron ore pellets // Journal of Sustainable Metallurgy. 2024. Vol. 10. No. 1. P. 145–159.
31. Wang H., Li J., Fan X. Advances in low-silica binders for iron ore pelletization // Powder Technology. 2025. Vol. 438. Article 119542.
32. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза/ Г.В.Губін, В.О.Півень. -Кривий Ріг,: 2009. -328с.
33. Jiang T., Fan X., Chen X., Huang Y. Development of organic binders for iron ore pelletization // Ironmaking & Steelmaking. 2014. Vol. 41. No. 7. P. 505–511.
34. Sivrikaya O., Arol A. I. Alternative binders to bentonite for iron ore pelletizing // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2014. Vol. 50. No. 1. P. 45–59.

35. Haas L. A., Aldinger J. A. Organic binders for iron ore pelletization: Recent developments and applications // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2015. Vol. 36. No. 2. P. 83–96.
36. Forsmo S. P. E., Samskog P. O., Björkman B. Mechanisms of green pellet formation with organic binders // Powder Technology. 2015. Vol. 275. P. 261–269.
37. Fan X., Jiang T., Gan M. Effects of organic binders on the quality of iron ore pellets // Journal of Iron and Steel Research International. 2015. Vol. 22. No. 6. P. 497–503.
38. Qiu G., Jiang T., Li G. Influence of binder properties on pelletizing performance of magnetite concentrates // Powder Technology. 2016. Vol. 301. P. 1027–1034.
39. Gan M., Fan X., Chen X. Pelletizing behaviour of magnetite concentrates using composite binders // ISIJ International. 2016. Vol. 56. No. 9. P. 1568–1575.
40. Dwarapudi S., Ghosh T. K., Tathavadkar V. Pelletization of iron ore fines with organic additives // Ironmaking & Steelmaking. 2016. Vol. 43. No. 5. P. 351–359.
41. Ribeiro C. M., Nascimento R. C. Application of polymer binders in iron ore pellet production // Minerals Engineering. 2017. Vol. 109. P. 96–104.
42. Wang C., Zhang Y., Liu X. Effect of carboxymethyl □ cellulose on green pellet strength // Powder Technology. 2017. Vol. 314. P. 341–348.
43. Lu L., Holmes R. J., Manuel J. R. Iron ore pelletization and binders: Current status and future trends // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2017. Vol. 38. No. 4. P. 253–267.
44. Fan X., Jiang T., Gan M., Chen X. Influence of binder dosage on pellet quality and induration behaviour // Powder Technology. 2018. Vol. 326. P. 111–119.
45. Mohassab Y., Benali M., Rao Y. Evaluation of organic binders for sustainable pellet production // Minerals Engineering. 2018. Vol. 124. P. 104–112.
46. Wang Z., Liu X., Li K. Characterization of fired pellets produced with organic binders // Journal of Materials Research and Technology. 2018. Vol. 7. No. 4. P. 523–531.

47. Jiang T., Fan X., Qiu G. Binder selection for direct reduction pellets // Ironmaking & Steelmaking. 2019. Vol. 46. No. 8. P. 747–756.
48. Zhang Y., Li K., Wang C. Microstructure and reducibility of pellets bonded with polymers // Metals. 2019. Vol. 9. No. 10. Article 1068.
49. Mohassab Y., Benali M. Sustainable iron ore pelletizing using organic binders // Journal of Sustainable Metallurgy. 2019. Vol. 5. No. 4. P. 421–431.