

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 впливу бентоніт-полімерних композицій на  
властивості залізородних окатишів

Виконав  
студент групи МТ-22-1

Євген ІЛЬЧЕНКО

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

ІЛЬЧЕНКА ЄВГЕНА ОЛЕКСАНДРОВИЧА

1. Тема роботи: Дослідження впливу бентоніт-полімерних композицій на властивості залізородних окатишів

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

затверджено наказом по КНУ від «\_\_19\_\_»\_\_02\_\_2026 р. № 113с

2. Строк подання роботи студентом «\_\_09\_\_»\_\_06\_\_2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: хімічний та мінералогічний склад залізородного концентрату; бентонітове зв'язуюче; полімерні добавки Floform та Peridur (КМЦ); результати лабораторних досліджень міцності, пластичності, пористості сирих, сухих і обпалених окатишів; дані мікроструктурного та мінералогічного аналізу окатишів.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): визначення залежності показника індексу набухання від складу бентоніто-полімерного зв'язуючого матеріалу.

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

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів
1	ВПЛИВ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ РЕЧОВИН НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ЯКОСТІ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ	січень, лютий 2026 р.
2	МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	березень, квітень 2026 р.
3	ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ СИРИХ ТА ОБПАЛЕНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ БЕНТОНІТО–ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ	травень 2026 р.
4	ОФОРМЛЕННЯ ПОЯСНЮВАЛЬНОЇ ЗАПИСКИ ТА ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ	червень 2026 р.

Дата видачі завдання « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ Євген ІЛЬЧЕНКО

Керівник випускної кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Дмитро БАБОШКО

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи на тему «Дослідження впливу бентоніт-полімерних композицій на властивості залізорудних окатишів»: \_\_57\_\_ с., \_\_5\_\_ табл., \_\_8\_\_ рис., \_\_22\_\_ джерел.

**Об'єкт дослідження:** процес формування якості сирих, сухих та обпалених залізорудних окатишів при використанні різних типів зв'язуючих матеріалів.

**Предмет дослідження:** вплив складу та властивостей бенто-полімерних композицій на фізико-механічні та металургійні характеристики залізорудних окатишів.

**Мета роботи:** дослідження закономірностей формування якості залізорудних окатишів при використанні бенто-полімерних композицій та визначення оптимального складу зв'язуючого для забезпечення високих фізико-механічних і металургійних властивостей окатишів.

**Методи дослідження:** у роботі використано визначення хімічного складу досліджуваних матеріалів завдяки рентгенофлуоресцентному аналізатору EXPERT 4L, визначення фізико-механічних властивостей сирих і сухих окатишів (пластичність, міцність, пористість); мікроструктурний і мінералогічний аналіз із використанням оптичної мікроскопії. Вимірювання технологічних параметрів параметрів окатишів проводили за стандартними методиками.

**Результати роботи:** встановлено вплив бенто-полімерних композицій на властивості окатишів та визначено оптимальний склад зв'язуючого. Показано, що введення полімерних добавок сприяє формуванню дрібнопористої структури та покращенню металургійних характеристик окатишів.

КОНЦЕНТРАТ, ОКАТИШІ, БЕНТОНІТ, ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИЦІЇ, ПОЛІМЕРУ FLOFORM, ПОЛІМЕРНИХ PERIDUR (КМЦ)

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.Р			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	РЕФЕРАТ	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	Ільченко						1	1
<i>Перевірив</i>	Бабошко							
<i>Н. контр.</i>	Бабошко							
<i>Затвердив</i>	Бабошко							
						МТ-22-1		



## ЗМІСТ

### ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ РЕЧОВИН НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ЯКОСТІ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ.....	8
1.1. Актуальні вимоги до властивостей залізорудних окатишів у металургійному виробництві.....	8
1.2. Вплив бентонітового зв'язуючого на якість залізорудних окатишів.....	14
1.3. Взаємодія бентоніту із залізорудним концентратом та використання полімерних зв'язуючих матеріалів у виробництві окатишів: переваги та недоліки.....	20
1.4. Особливості формування структури та властивостей сирих окатишів із полімерними добавками.....	25
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	34
2.1. Методика визначення в'язкості водних суспензій зв'язуючих добавок, що використовуються при окомкуванні залізорудних концентратів.....	34
2.2. Визначення залежності показника індексу набухання від складу бентоніто-полімерного зв'язуючого матеріалу.....	37
2.3. Методика експериментального дослідження якості сирих і сухих та обпалених окатишів.....	41
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ СИРИХ ТА ОБПАЛЕНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ БЕНТОНІТО-ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ.....	44
3.1. Визначення фізико-механічних показників окатишів.....	44
3.2. Дослідження металургійних показників обпалених залізорудних окатишів.....	47
ВИСНОВКИ.....	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.3					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ЗМІСТ			<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Ільченко</i>							1	1	
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>									
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							МТ-22-1		
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>									

## ВСТУП

Сучасний стан світового та внутрішнього ринків залізорудної сировини характеризується стрімким зростанням конкуренції та безперервним підвищенням вартості енергоносіїв. У таких умовах перед виробниками залізорудних окатишів постає критичне завдання: одночасне підвищення якості готової продукції та суттєве зниження витрат на її виробництво. Традиційні підходи до вирішення цих проблем часто є взаємовиключними, оскільки покращення якісних характеристик зазвичай вимагає додаткових витрат, а економія ресурсів може негативно позначатися на властивостях продукту.

Одним із найбільш перспективних напрямів розв'язання цієї суперечності є вдосконалення технології підготовки сирих окатишів, що дозволяє оптимізувати роботу випалювальних машин та забезпечити стабільність властивостей випаленого продукту. При цьому слід враховувати різницю в пріоритетах: якщо споживачів (металургів) цікавить насамперед вміст заліза та відновлюваність, то для виробників пріоритетною є якість сирих окатишів (міцність, пластичність, гранулометричний склад), оскільки саме вони визначають техніко-економічні показники виробництва та кінцеву ціну реалізації.

Останнім часом активно пропонуються альтернативні полімерні зв'язуючі. Проте їх використання має суперечливий характер: з одного боку, полімери значно покращують металургійні властивості (відновлюваність), з іншого – дещо знижують міцність окатишів у сирому та сухому стані. На противагу їм, традиційний якісний бентоніт забезпечує необхідну міцність під час сушіння та випалу, але не дає такого приросту металургійних характеристик. Брак системного підходу до вивчення взаємодії цих матеріалів у складі шихти робить питання розробки науково обґрунтованої класифікації та пошуку найефективніших складів композицій надзвичайно затребуваним для сучасної промисловості.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.ВС			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВСТУП	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	Ільченко						1	1
<i>Перевірив</i>	Бабошко							
<i>Н. контр.</i>	Бабошко							
<i>Затвердив</i>	Бабошко							
						МТ-22-1		

# 1. ВПЛИВ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ РЕЧОВИН НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ЯКОСТІ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ

1.1 Актуальні вимоги до властивостей залізорудних окатишів у металургійному виробництві.

Підвищення якості залізорудної сировини є одним із ключових напрямів розвитку сучасної гірничо-металургійної промисловості. Рівень якості залізорудних матеріалів безпосередньо впливає на техніко-економічні показники металургійного виробництва, ефективність доменної плавки та конкурентоспроможність кінцевої продукції. Основними чинниками, що визначають економічну доцільність виробництва залізорудної сировини (ЗРС), є вартість її видобутку та збагачення, а також витрати на подальшу металургійну переробку. Як правило, між цими показниками існує певна альтернативна залежність: підвищення якості сировини супроводжується збільшенням витрат на її підготовку, проте сприяє зниженню витрат на наступних стадіях металургійного переділу.

У зв'язку з високою енерго- та матеріаломісткістю металургійних процесів у світовій практиці спостерігається тенденція до посилення вимог до споживчих властивостей залізорудної сировини. Зокрема, особлива увага приділяється зменшенню вмісту пустої породи та стабільності показників якості. Одним із основних параметрів, що характеризує якість ЗРС, є вміст кремнезему ( $\text{SiO}_2$ ), який для сучасної доменної плавки загальноновизначеним вважається на рівні приблизно 3–4 % (таблиця 1.1) [4, 5].

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.01.ВЗР			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ВПЛИВ ЗВ'ЯЗУЮЧИХ РЕЧОВИН НА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ЯКОСТІ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Ільченко</i>						1	26
<i>Перевірив</i>	<i>Бабошко</i>					МТ-22-1		
<i>Н. контр.</i>	<i>Бабошко</i>							
<i>Затвердив</i>	<i>Бабошко</i>							

Таблиця 1.1 Характеристика залізорудних продуктів з різним вмістом SiO<sub>2</sub> в різних країнах

Назва країни	Вид залізорудних продуктів по вмісту SiO <sub>2</sub> , %			
	аглоруда	кускова руда	концентрат	окатиш
Бразилія	0,6-2,4	0,7-2,0	-	2,6-3,1
Австралія	-	2,75-3,0	-	-
Канада	-	-	4,6	5,1
Швеція	-	-	1,3	2,6
Україна			7,8-9,9	4,75-8,51

Ефективність роботи металургійних агрегатів значною мірою визначається споживчими властивостями залізорудних окатишів, які використовуються як сировина у подальших технологічних процесах. Незалежно від способу їх подальшої переробки – доменної плавки або процесів прямого відновлення заліза – основою технологічного процесу є відновлення оксидів заліза. У ході відновлення відбувається послідовна трансформація гематиту в магнетит, вюстит та, зрештою, в металеве залізо.

Кристалохімічні особливості зазначених фазових перетворень достатньо детально досліджені у наукових роботах. Установлено, що структурні зміни, які відбуваються під час відновлення оксидів заліза, а також пов'язаний з ними напружений стан матеріалу істотно впливають на поведінку окатишів у процесі їх відновлення. Зокрема доведено, що між показниками механічної міцності окатишів та їх відновлюваністю існує певна суперечність. Явища розм'якшення, розбухання та руйнування окатишів пов'язані з утворенням мікротріщин, які збільшують площу реакційної поверхні та сприяють інтенсифікації процесу відновлення. У зв'язку з цим під час вибору технологічних параметрів виробництва металу необхідно досягати раціонального співвідношення між показниками відновлюваності та міцності окатишів [1,2].

Однією з важливих вимог до якості окатишів, незалежно від технології їх подальшого використання, є стабільність гранулометричного складу в обмеженому інтервалі крупності. Однорідність розмірів окатишів забезпечує оптимальну

газопроникність шару шихти та сприяє стабільному перебігу відновних процесів. Разом з тим більшість існуючих моделей відновлення залізорудної сировини не враховує можливих змін гранулометричного складу, які можуть виникати внаслідок руйнування окатишів у процесі відновлення. Умови відновлення окатишів у доменній печі та в установках прямого відновлення мають певні відмінності, що зумовлено як температурними режимами, так і характером фазових перетворень. У доменній печі процес відновлення оксидів заліза відбувається послідовно в часі та просторі за схемою  $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$ . Натомість у процесах прямого відновлення, зокрема в технологіях HYL або Midrex, зазначені стадії протікають практично одночасно в об'ємі одного окатиша.

Зазначена особливість, яка певною мірою зменшує ризик крихкого низькотемпературного руйнування матеріалу, водночас висуває підвищені вимоги до показників відновлюваності окатишів. У випадку доменної плавки, де шихта зазнає значних механічних навантажень, першочергового значення набуває забезпечення високої механічної міцності окатишів.

Для оцінювання комплексу металургійних властивостей окатишів, призначених для доменної плавки, у світовій практиці застосовують різноманітні методики випробувань. Серед факторів, що істотно впливають на результати таких досліджень, важливу роль відіграє характер нагрівання матеріалу, тобто форма температурно-часової залежності [6].

На основі узагальнення даних про виробництво окатишів на різних підприємствах, умов їх транспортування та зберігання, а також результатів промислового використання у доменних печах було визначено оптимальні значення показників комплексу металургійних властивостей окатишів, які відповідають вимогам доменної плавки (табл. 1.1) [4-6].

Разом з тим існуючі методи оцінювання відновлюваності залізорудних матеріалів не можна вважати повністю досконалими. Для отримання більш об'єктивної інформації доцільно проводити випробування у режимах нагрівання та

відновлення, максимально наближених до умов роботи того технологічного агрегату, в якому планується використання досліджуваного матеріалу.

Таблиця 1.2 – Показники властивостей окатишів у відвантажувальній продукції, що відповідають вимогам доменного виробництва

Показники	Величина показників
Масова частка окатишів, %	2,0-3,0
Фракція окатишів, мм	8-18
Масова частка окатишів визначеної фракції, %	95,0
Масова частка дріб'язку (0-5 мм), %	< 3,0
Показник набухання, %	< 12,0
Стабільність складу	
Доступні коливання:	
масова частка Fe, %	+0,25
основність, частки од.	+0,25

Примітка. Абсолютна величина масової частки заліза в окатишах повинна бути максимально можливою; величина основності повинна виключати введення сирого флюсу в доменну піч і прагнути до 1,20-1,25.

Визначення оптимальних значень показників металургійних властивостей окатишів, що найбільшою мірою відповідають вимогам доменної плавки, дає можливість цілеспрямовано впливати на окремі елементи технології їх виробництва з метою покращення відповідних характеристик. При цьому слід зазначити, що окремі показники комплексу металургійних властивостей можуть перебувати у взаємній суперечності. Зокрема, це стосується відновлюваності та гарячої міцності окатишів. Природа залізорудної сировини зумовлює те, що зі збільшенням відновлюваності матеріалу зростає його схильність до руйнування під час процесу відновлення. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку оптимального співвідношення між цими властивостями, яке забезпечує ефективну роботу доменної печі.

У роботі [21] запропоновано здійснювати оцінку якості залізорудних окатишів за допомогою узагальненого комплексного показника. Для цього використовується коефіцієнт вагомості окремих параметрів, що визначається на основі експертного опитування фахівців.

Питання підготовки окатишів для подальшої металізації також широко досліджувалися за кордоном.

Залізородні матеріали, що використовуються для виробництва губчастого заліза, повинні відповідати певним технологічним вимогам [9-11]:

- високий вміст заліза при низькому вмісті сірки, фосфору, лужних елементів і домішок кольорових металів (мідь, нікель, хром, цинк, свинець тощо), які негативно впливають на якість отриманої сталі та погіршують техніко-економічні показники її виплавки в електричних печах;
- висока відновлюваність;
- достатньо висока міцність під час відновлення;
- забезпечення високої газопроникності шихти в агрегаті;
- відсутність схильності шихти до злипання при підвищених температурах відновлення.

Незважаючи на специфіку процесів металізації, справедливим є підхід, запропонований авторами [1], згідно з яким найбільш небезпечним щодо руйнування гематитових окатишів у процесі відновлення є порівняно вузький температурний інтервал 600–700 °С, у якому спостерігається їх крихке руйнування.

За нижчих температур реакція відновлення гематиту не набуває достатнього розвитку, тоді як за вищих температур починають проявлятися пластичні властивості реагуючих оксидів. Це сприяє релаксації внутрішніх напружень, що виникають у структурі окатишів.

Отже, зменшення відносного часу перебування окатишів у зоні небезпечних температур сприяє зниженню ступеня їх руйнування. Такого ефекту можна досягти шляхом підвищення швидкості нагрівання окатишів у верхній частині доменної печі. Встановлено, що збільшення швидкості нагрівання до 8 °С/хв призводить до зменшення ступеня самовільного руйнування, тоді як подальше її підвищення не має істотного впливу на цей показник.

Отже, зміна міцнісних характеристик окатишів під час їх відновлення у верхній зоні шахтної печі визначається не лише властивостями самих окатишів, але й умовами протікання процесу, зокрема швидкістю зміни температури.

Для оцінювання технологічних властивостей окатишів і визначення можливості їх використання в різних металургійних процесах застосовується міжнародна методика випробувань [3], яка включає сім основних тестів. Для окатишів, призначених для металізації у шахтних печах із використанням газоподібних відновників, встановлено такі основні вимоги:

- хімічний склад, вміст загального заліза ( $Fe_{\text{заг}}$ ) не менше 67–70 %;
- гранулометричний склад, вміст фракції 9–16 мм не менше 95 %;
- межа міцності при стисканні («холодна» міцність) — не менше 250 кг/окатиш;
- випробування в обертовому барабані: вміст фракції +6,3 мм не менше 95 %, фракції –0,5 мм не більше 4,0 %;
- випробування на відновлюваність, показник  $K'$  при 800 °C  $\geq 3,0$ ; при 950 °C  $\geq 4,0$ ;
- випробування на руйнування при відновленні, вміст фракції +6,3 мм не менше 88 %, фракції –3,2 мм не більше 10 %;
- випробування на спікання, індекс спікання не більше 30 %.

Слід підкреслити, що більшість наведених показників якості окатишів значною мірою визначається їх внутрішньою структурою. Більшість сучасних досліджень як вітчизняних, так і зарубіжних авторів підтверджують цю закономірність. Водночас зазначається [12], що структура обпалених окатишів формується не лише в процесі термічної обробки та залежить не тільки від їх хімічного й фазового складу, але й від кількості та фізико-хімічних властивостей сполучних матеріалів, які застосовуються під час огрудкування.

## 1.2 Вплив бентонітового зв'язуючого на якість залізорудних окатишів

Згідно з даними вітчизняної та зарубіжної практики виробництва офлюсованих і неофлюсованих окатишів із залізорудних концентратів, для забезпечення необхідних механічних властивостей окатишів у сирому та сухому стані, а також для оптимізації процесу видалення вологи з сирих гранул до шихти додають зв'язуючі речовини органічного та неорганічного походження [15, 16].

Одним із найбільш універсальних зв'язуючих матеріалів, що застосовується під час огрудкування залізорудних концентратів, є бентоніт. Його властивості суттєво впливають як на процес формування гранул, так і на якісні характеристики сирих і обпалених окатишів.

Вирішальне значення при використанні бентонітів у технології огрудкування має їх мінералогічний склад, основним компонентом якого є монтморилоніт. Встановлено, що високоякісні бентонітові глини повинні містити не менше 70 % монтморилоніту алюмомагнієвого типу з обмінним комплексом лужного характеру. Залежно від складу обмінних катіонів бентонітові глини поділяють на натрієві (лужні), кальцієві (лужноземельні) та змішані. Для надання кальцієвим бентонітам необхідних технологічних властивостей проводять їх активацію. Суть хімічної активації полягає у заміщенні катіонів кальцію в дифузійному шарі частинок бентоніту катіонами натрію [19].

У ряді досліджень [17, 18] запропоновано альтернативні методи активації бентонітів без використання соди. Різноманітність підходів до покращення природних властивостей бентонітових глин свідчить про їх важливу роль у технології виробництва залізорудних окатишів.

У численних роботах вітчизняних і зарубіжних дослідників детально досліджено вплив таких факторів, як вологість, гранулометричний склад, вміст пустої породи, наявність лужних сполук та інші фізико-хімічні й мінералогічні характеристики концентратів на гранулометричний склад і міцність сирих та випалених окатишів. Крім того, у працях розглянуто вплив режимних параметрів роботи огрудкувачів на формування структури сирих гранул, їх гранулометричний

склад і механічну міцність. При цьому більшість дослідників підкреслюють важливу роль зв'язуючих матеріалів у процесі утворення сирих окатишів.

Останніми роками більшість фабрик огрудкування відмовилися від використання місцевих низькоякісних глин бентонітоподібного типу на користь високоякісних бентонітових глин. Доцільність застосування певного виду бентоніту визначається такими його властивостями, як сорбційна здатність, пластичність та здатність забезпечувати необхідну міцність сирих окатишів.

У роботах [13, 14] при оцінці якості глин особлива увага приділяється їх здатності утворювати колоїдні системи. Чим вищий вміст колоїдних частинок у вихідній глині, тим більш стабільний колоїдний розчин утворюється при взаємодії бентонітового порошку з водою. При цьому показник в'язкості водних суспензій бентонітів може використовуватися як відносна характеристика їх здатності зміцнювати окатиші.

Ефективність застосування бентоніту у виробництві окатишів зумовлена також його здатністю під час зволоження утворювати гелеподібні структури з надзвичайно розвиненою питомою поверхнею, що може досягати 600–900 м<sup>2</sup>/г, а також здатністю поступово віддавати воду при нагріванні, що вигідно відрізняє його від інших видів глин.

На думку окремих дослідників, за значеннями характеристичних вологоємностей можна оцінювати як якісно, так і кількісно вплив різних добавок на швидкість гранулоутворення та міцність сформованих окатишів.

Значна кількість досліджень, виконаних у 1970–1980-х роках, була спрямована на розроблення методів оцінки властивостей зв'язуючих добавок, що визначають якість залізородних окатишів. Важливий внесок у дослідження цього питання зробили фахівці НДІКМА. На основі аналізу фізико-хімічних і мінералогічних характеристик бентонітів різних родовищ України, Поволжя, Середньої Азії, Казахстану та Закавказзя автори виділили комплекс властивостей, що дозволяє оцінити їх металургійну цінність при виробництві окатишів.

У роботі [8] запропоновано оцінювати якість бентонітової сировини для огрудкування за певним співвідношенням лужних і лужноземельних катіонів в обмінному комплексі. За даними Т. В. Смут, ємність катіонного обміну полімінеральних глин, придатних для огрудкування, знаходиться в межах 30–70 мг на 100 г породи.

У практиці огрудкування для оцінювання вологоємності глин використовується показник, відомий як число Енсліна. Для незавершеного процесу набухання, характерного для умов огрудкування шихти, важливо, щоб об'єм набухлої глини не перевищував об'єм пор у сформованих окатишах. Результати досліджень показують, що більшість бентонітів, поглинаючи воду через пори зразка протягом 30 хвилин, характеризуються значенням числа Енсліна (вологи набухання) менше 200 %. Це свідчить про наявність певного резерву вологи в концентраті, яка не бере участі у взаємодії з бентонітом під час транспортування шихти до огрудкувача.

Для високоякісних бентонітів рівноважне поглинання води, що відповідає вологі набухання, зазвичай не перевищує 800 %. Визначення цього показника широко застосовується у дослідницькій практиці для оцінювання швидкості поглинання води бентонітами і, відповідно, для прогнозування грудкуватості шихти. Водночас дані про прямий зв'язок між значенням числа Енсліна та міцністю окатишів у літературі практично відсутні.

В.М. Вітюгін [22] запропонував оцінювати сукупність реологічних властивостей за показником відносної пластичності, який характеризує співвідношення твердої і рідкої фаз у порових суспензіях матеріалів, що піддаються огрудкуванню, а також відображає кінетику колоїдно-хімічних процесів. До таких процесів, на думку автора, належать набухання частинок, їх поверхневе диспергування та часткове розчинення твердої фази.

Автори роботи [7] висловлюють припущення, що динамічна міцність вологих гранул значною мірою визначається пластичною в'язкістю суспензії зв'язуючої

добавки, яка формує умови пружно-пластичного руйнування гранул у процесі їх механічного навантаження.

Таким чином, незважаючи на значну кількість запропонованих методів оцінювання якості зв'язуючих матеріалів і їх окремих властивостей, літературні джерела свідчать про неоднозначність їх впливу як на процес огрудкування, так і на якість отриманих окатишів. Ряд дослідників [6-8] вважає, що ефективність застосування бентоніту, як і будь-якої іншої зв'язуючої добавки, визначається не лише його фізико-хімічними характеристиками, але й технологічними параметрами процесу, в якому ці властивості реалізуються.

Так, за результатами досліджень, проведених на ряду гірничо-збагачувальних комбінатах, було зроблено висновок про обмежену придатність бентонітів Черкаського родовища для виробництва залізорудних окатишів. Водночас випробування, виконані на Північному гірничо-збагачувальному комбінаті, продемонстрували принципову можливість використання глин Черкаського та Григорівського родовищ. При цьому встановлено, що на міцність обпалених окатишів вирішальний вплив має режим термічної обробки, тоді як тип бентоніту та його витрата відіграють другорядну роль.

На думку Ш. Маєрчака, збільшення кількості зв'язуючого матеріалу до економічно обґрунтованого рівня сприяє підвищенню міцності сирих окатишів. Однак ступінь зміцнення значною мірою залежить від типу використаного зв'язуючого. Дослідником було встановлено загальну закономірність, відповідно до якої схильність окатишів до руйнування при швидкому нагріванні зростає зі зменшенням пористості та крупності частинок концентрату, зі збільшенням діаметра окатишів і вмісту вологи в них, а також зі зростанням температури та швидкості сушіння і розширенням інтервалу гранулометричного складу концентрату. Водночас недостатня вивченість ролі зв'язуючих матеріалів не дозволила автору включити властивості бентоніту до проведеного аналізу.

У роботах показано вплив бентонітових добавок на міцність сирих і підсушених окатишів. Крім того, у дослідженні зазначено, що бентоніт також

впливає на міцність окатишів у процесі їх відновлення, причому цей вплив більш виражений для окатишів, отриманих із бідніших залізородних концентратів.

Одними з найбільш цікавих досліджень впливу бентонітових добавок на властивості окатишів є роботи, у яких встановлено закономірний зв'язок між дією зміцнювальних добавок і міцністю окатишів у процесі сушіння. Було показано, що якщо добавка впливає на структурні параметри окатиша, то це призводить до зміни кінетики сушіння, що, у свою чергу, відображається на міцності висушених окатишів. Дослідники відзначають, що у присутності бентоніту процес видалення води з окатиша сповільнюється через фізико-хімічну взаємодію води з поверхнею частинок бентоніту. У результаті межі температурного інтервалу видалення вологи зміщуються в область вищих температур, що створює передумови для інтенсифікації процесу сушіння.

Разом із тим додавання бентоніту може призводити до зменшення перерізу пор і загальної пористості окатиша. У випадку підвищених витрат бентоніту це може ускладнювати видалення пароповітряної суміші з тіла окатиша та негативно впливати на його цілісність. У роботі показано залежність міцності сирих окатишів від вмісту соди в бентоніті: при збільшенні її концентрації понад 3,5 % спостерігається зниження міцності обпалених окатишів. Таким чином, було зроблено спробу встановити взаємозв'язок між якістю та кількістю бентоніту, умовами сушіння і властивостями готової продукції.

Під час дослідження впливу бентонітів на формування структури та властивостей сирих і обпалених окатишів В.Є. Мальцева систематизувала їх характеристики відповідно до металургійної цінності. У роботі показано, що всі зв'язуючі матеріали можуть бути розділені на три групи залежно від типу катіонів і конфігурації їх розташування навколо частинок монтморилоніту, що визначає характер зв'язку в його структурі. Встановлено, що в результаті активації лужноземельних монтморилонітовмісних бентонітів формується натрієва форма зв'язку, яка забезпечує високу ефективну в'язкість суспензії при мінімальній

товщині плівки між частинками концентрату і, відповідно, сприяє максимальному зміцненню сирих окатишів.

Дослідження кінетики сушіння бентонітів із різною структурою показали, що на початковому етапі швидкість сушіння вища для бентонітів з меншим значенням ефективної в'язкості. Надалі процес сповільнюється і триває довше для високоактивованих бентонітів. Встановлено, що закономірності сушіння окатишів багато в чому повторюють особливості сушіння бентонітів, які входять до їх складу.

У ході досліджень впливу ударних навантажень на міцність сирих окатишів підтверджено модельні уявлення щодо механізмів їх розм'якшення, а також ролі розміру окатиша і ефективної в'язкості бентоніту. Було встановлено, що чотириразові перевантаження можуть зменшувати міцність окатишів у 1,5–2 рази. При цьому використання високоактивованих бентонітів призводить до втрати міцності приблизно на 20 %, тоді як для менш активованих бентонітів цей показник перевищує 30 %.

Також було визначено залежність міцності сирих, сухих та обпалених окатишів від часу витримки шихти перед огрудкуванням. Характер цієї залежності має максимум, який спостерігається приблизно через 90 хвилин витримки. Встановлено, що ймовірність виникнення дефектів структури окатишів значною мірою визначається ефективною в'язкістю зв'язуючого матеріалу, тоді як розкид значень міцності сирих і сухих окатишів пов'язаний із виникненням структурних дефектів під дією механічних навантажень. Саме ці дефекти формують спадковий зв'язок між якістю сирих і висушених окатишів.

На основі виконаних досліджень та масштабних промислових випробувань були сформульовані підходи до вибору оптимальної кількості та властивостей зв'язуючих матеріалів з метою удосконалення технології огрудкування, сушіння і випалу окатишів. Встановлено, що для сучасних вимог доменного виробництва і процесів металізації доцільно застосовувати бентоніти з показником ефективної в'язкості не менше 45 мПа·с. Це дозволяє зменшити витрату зв'язуючого матеріалу

у 1,5–2 рази, оптимізувати гранулометричний склад і підвищити міцність обпалених окатишів на 20–30 %.

Таким чином, застосування високоякісних активованих бентонітів сприяє покращенню властивостей окатишів. Однак підвищені витрати бентоніту можуть призводити до зниження вмісту заліза в обпалених окатишах і неоднозначно впливати на їх металургійні характеристики. У зв'язку з цим актуальним напрямом досліджень залишається пошук альтернативних зв'язуючих матеріалів, які потребують менших витрат і водночас забезпечують покращені металургійні властивості окатишів.

1.3 Взаємодія бентоніту із залізородним концентратом та використання полімерних зв'язуючих матеріалів у виробництві окатишів: переваги та недоліки

Механізм взаємодії бентоніту з частинками залізородного концентрату включає кілька послідовних етапів. На початковій стадії частинки бентоніту взаємодіють з вологою, що міститься у концентраті. Далі відбувається проникнення молекул води у міжшарові зв'язки мінералу монтморилоніту, що супроводжується набуханням бентоніту, диспергуванням його частинок та утворенням бентонітової суспензії. На завершальному етапі утворена суспензія розтікається по поверхні частинок концентрату, формуючи на них тонку плівку. Загальна тривалість цих процесів зазвичай становить 60–90 хвилин.

Під час огрудкування залізородного концентрату із застосуванням бентонітового зв'язуючого міцність сирих окатишів визначається двома основними факторами: капілярними силами взаємодії між частинками концентрату та силою їх зв'язку з бентонітовою суспензією [8]. Обидва чинники відіграють важливу роль у формуванні механічної міцності гранул. Енергія взаємодії поверхні рудної частинки із суспензією диспергованого бентоніту є вищою, ніж з водою. Тому плівка бентонітової суспензії, що покриває поверхню рудних зерен, разом із капілярними силами, зумовленими наявністю вільної вологи, забезпечує високі показники міцності системи. Однак зі збільшенням товщини такої плівки

відбувається роз'єднання частинок концентрату, що призводить до зменшення капілярних сил і, відповідно, зниження міцності сирих окатишів. Найбільш сприятливими умовами є утворення тонкої плівки (моношару) бентонітової суспензії при збереженні тісного контакту між рудними частинками, що забезпечує максимальний прояв капілярних сил. Потовщення плівки призводить до зменшення кількості контактів між зернами через шар бентоніту, внаслідок чого знижується міцність не лише сирих, а й сухих окатишів. Зростання товщини плівки зумовлене процесом набухання бентоніту, який, як відомо, протікає відносно повільно.

Попередня витримка шихти перед процесом огрудкування впливає на перерозподіл сил взаємодії між частинками концентрату та бентоніту. Незалежно від швидкості водонасичення бентонітів розвиток міжфазних взаємодій має подібний характер: одночасно з набуханням бентоніту відбувається його диспергування та розтікання утвореної суспензії по поверхні частинок концентрату. Ці процеси відбуваються з різною швидкістю. Їх порівняння дозволяє встановити, що швидкість покриття рудних частинок суспензією є максимальною порівняно з іншими процесами, які відбуваються паралельно.

Якщо припустити, що питома енергія межі розділу «магнетит – суспензія» приблизно однакова для різних типів суспензій, то час повного покриття частинок концентрату тонким шаром суспензії буде залежати насамперед від крупності рудних частинок, а не від властивостей бентоніту. Повне покриття частинок концентрату тонкою плівкою відповідає максимальній міцності сирих і сухих окатишів. Подальше збільшення товщини цієї плівки, яке відбувається внаслідок набухання та диспергування бентоніту, призводить до роз'єднання рудних частинок і, відповідно, до зменшення міцності окатишів.

Таким чином, використання бентоніту як зв'язуючої добавки сприяє підвищенню міцності сирих і сухих окатишів під час їх термічної обробки. Разом з тим застосування бентоніту може призводити до зниження вмісту заліза в обпалених окатишах, а також до зменшення їх відновлюваності.

У зв'язку з цим останнім часом активно ведуться дослідження, спрямовані на пошук альтернативних зв'язуючих матеріалів, зокрема різних полімерних сполук, наприклад частково гідролізованого поліакриламідю. Такі матеріали потребують значно менших дозувань у шихті, але водночас здатні забезпечувати необхідну якість окатишів і навіть покращувати їх металургійні властивості.

Механізм взаємодії полімерних частинок з водою суттєво відрізняється від процесів, характерних для бентоніту. Час гідратації полімеру є відносно коротким і становить 10–60 секунд, тоді як взаємодія утвореного водного розчину з частинками рудного концентрату триває від 1 до 2 хвилин. За цей час розчин полімеру, що виступає як поверхнево-активна речовина для рудних зерен, рівномірно покриває їх поверхню. Однак занадто тривала взаємодія полімерного розчину з частинками концентрату може призвести до впорядкування ненасичених зв'язків, зменшення дипольних моментів і, як наслідок, до ослаблення сил зчеплення між рудними частинками.

Промислові випробування щодо заміни бентоніту органічними зв'язуючими на основі поліакриламідю були проведені на підприємстві **ОЕМК** спільно зі спеціалістами компанії «Екополіпром» [20, 22]. Для подачі органічного зв'язуючого матеріалу марки **Floform 1049V** (порошкоподібного поліакриламідного продукту виробництва SNF Floerger) у цехах окомкування та металізації були встановлені спеціальні дозувальні пристрої. Ефективність застосування цього матеріалу оцінювали шляхом порівняння з традиційним бентонітовим зв'язуючим.

Отримані результати показали, що окатиші, виготовлені із застосуванням органічного зв'язуючого, характеризуються задовільними показниками якості: міцність обпалених окатишів на стиск перевищує 300 кг/окатиш, а ударна міцність становить близько 96,5 %. При цьому витрата зв'язуючого матеріалу зменшується у 8–20 разів порівняно з використанням бентоніту. Одночасно спостерігається підвищення вмісту заліза в готових окатишах. Одночасно підвищується вміст заліза в обпалених і металізованих окатишах приблизно на 0,4 % та 0,7 % відповідно.

Одночасно відзначається зменшення пористості обпалених окатишів приблизно на 7,8 %.

Разом з тим виробництво окатишів із використанням органічного зв'язуючого характеризується певними технологічними особливостями. Зокрема, вологість таких окатишів є дещо нижчою порівняно з окатишами, виготовленими із застосуванням бентоніту. Крім того, розподіл вологи в їх об'ємі є нерівномірним: центральна частина окатиша містить менше вологи, ніж його поверхневий шар. Зазначена особливість впливає на гранулометричний склад продукції, що було встановлено під час промислових випробувань. Частка великих окатишів розміром понад 15 мм зросла з 7,5 до 8,8 %. Водночас вихід окатишів оптимальної крупності 9–15 мм залишився практично незмінним і становив 87,1 % при використанні бентоніту та 86,4 % при застосуванні органічного зв'язуючого. Оптимальна вологість окатишів, сформованих із застосуванням органічного зв'язуючого, що запобігає збільшенню частки фракції +15 мм, становить 8,6–8,7 %, що приблизно на 0,1–0,2 % нижче, ніж при використанні бентоніту. При цьому частка дрібної фракції –5 мм становить близько 0,1 % і практично не залежить від типу зв'язуючого матеріалу.

Особливості формування сирих окатишів із застосуванням органічного зв'язуючого можна простежити при порівнянні характеристик окатишів, отриманих за різних витрат зв'язуючої добавки. Дослідження показали, що зі зменшенням кількості органічного зв'язуючого дещо знижується міцність окатишів. Проте практика свідчить, що їх технологічна транспортабельність зберігається навіть за витрати зв'язуючого на рівні 0,2 кг/т. При цьому продуктивність випалювальної машини та кількість утворюваної дрібної фракції залишаються на попередньому рівні.

Таблиця 1.3 – Вплив витрати зв’язуючого матеріалу на властивості сирих окатишів

Тип зв’язуючого	Витрата, кг/т	Вологість, %	Пластичність, раз/окатиш	Міцність на стиск сирих окатишів, кг/ок	Міцність на стиск сухих окатишів, кг/ок
Бентоніт	4,0	10,5	6,0 ± 0,5	1,2 ± 0,16	3,0 ± 0,04
Floform 1049V	0,5	8,6	5,4 ± 0,4	1,5 ± 0,05	2,5 ± 0,07
Floform 1049V	0,3	8,4	2,1 ± 0,6	1,4 ± 0,10	1,5 ± 0,06
Floform 1049V	0,2	8,3	1,4 ± 0,4	1,0 ± 0,07	

Для забезпечення необхідних технічних вимог щодо вмісту сірки в обпалених окатишах температуру їх випалу було підвищено до 1300 °С, що спричинило збільшення витрати природного газу приблизно на 5 %.

Металізацію окатишів здійснювали в шахтній печі де в період проведення випробувань вироблялася продукція, призначена для експортного постачання. Ефективність роботи печі значною мірою залежить від її продуктивності, оскільки саме цей показник визначає питомі витрати природного газу.

Крім того, під час досліджень було встановлено підвищену реакційну здатність дослідних окатишів під впливом солоної води.

Результати промислових випробувань показали, що використання полімерних матеріалів як зв’язуючих добавок має як позитивні, так і негативні сторони. До основних переваг належать збільшення вмісту заліза в обпалених окатишах, а також підвищення їх «холодної» міцності. Водночас застосування полімерних зв’язуючих може призводити до зниження якісних характеристик сирих і сухих окатишів, а також до збільшення питомих витрат енергоресурсів на їх переробку.

Однією з важливих переваг полімерних зв’язуючих є їх низька витрата, яка може становити до 200 г на тонну концентрату, що дозволяє підвищити загальний вміст заліза в обпалених окатишах приблизно на 0,2–0,4 %. Крім того, полімери сприяють модифікації пористої структури окатишів. У результаті поряд зі збільшенням загальної пористості зростає частка мікропор, які мають значно

більшу питому поверхню. Така структура полегшує доступ газів до внутрішніх зон окатиша, що покращує процеси окиснення під час термообробки, а також відновлення під час металізації та доменного переділу.

Разом з тим застосування лише полімерних зв'язуючих має і певні недоліки, зокрема:

- зниження міцності та пластичності сирих окатишів, що може призводити до збільшення їх просипання з роликового укладальника;
- відсутність можливості інтенсифікувати процес сушіння шару окатишів на випалювальній машині;
- зменшення газопроникності шару окатишів і, відповідно, зниження продуктивності випалювальної машини.

Вказані недоліки значною мірою відсутні у випадку використання бентоніту як зв'язуючого матеріалу. Проте його застосування супроводжується зменшенням вмісту заліза в обпалених окатишах і зниженням їх відновлюваності. У зв'язку з цим найбільш ефективним рішенням вважається комбіноване використання бентоніту та полімерних зв'язуючих, що дозволяє поєднати їх переваги та мінімізувати недоліки.

#### 1.4 Особливості формування структури та властивостей сирих окатишів із полімерними добавками

У світовій практиці для виробництва окатишів як добавки пропонуються численні органічні природні та синтетичні полімерні сполуки. Більшість органічних зв'язувальних агентів мають аніонний характер (ПАА, КМЦ тощо). Аніонність таких полімерів змінюється від 0 до 100 % залежно від природи та співвідношення мономерів. Як правило додавання, органічних добавок до бентоніту покращують металургійні властивості обпалених окатишів унаслідок зниження вмісту діоксиду кремнію. Водночас доцільність використання виключно полімерів як зв'язувального залишається дискусійною.

Полімери характеризуються різною молекулярною масою, ступенем іонізації та природою мономерних ланок, тому становить інтерес оцінка технологічної ефективності полімерних зв'язувальних на основі спеціально розроблених модельних уявлень. Для формування об'єктивного критерію такої оцінки на першому етапі необхідно розробити тривимірну структурну модель, що відповідає фізико-хімічним властивостям зв'язувального та особливостям технології виробництва окатишів.

Згідно з уявленнями, залізородний окатиш складається щонайменше з двох зон: щільного ядра та накатаної оболонки. Ці зони розділені сферичною межею, віддаленою від центру окатиша на відстань  $L$ . Припускається, що макромолекули полімеру адсорбуються переважно на сферичній межі розділу радіуса  $R$ , тобто ядро окатиша та накатаний шар розділені адсорбційними шарами полімерних макромолекул, сформованими на межі твердої фази, а також тонкими плівками бентонітової суспензії, представленими гідратними оболонками функціональних груп макромолекул. Крім того, такі плівки, ймовірно, містять певну кількість вільної води, яка виконує роль розчинника для полімерних реагентів. Концентричні шари окатиша з'єднані між собою міцним, але пластичним зв'язком, що не руйнується навіть при проникненні води. Водночас при насиченні агрегату водою виникають сили, що прагнуть розсунути частинки.

На поверхнях залізородних зерен, розташованих поруч і розділених плівкою суспензії, як правило, формується від'ємний електричний заряд, джерелом якого є негативно заряджені карбоксилатні групи полімерного адсорбату. До таких поверхонь із розчину спрямовуються позитивно заряджені катіони, формуючи приповерхневий шар.

Відомо, що концентрації речовин у водному середовищі вирівнюються внаслідок дифузії. Тому молекули води переміщуються в зону, насичену іонами (тобто у міжшаровий простір), до встановлення рівноваги хімічних потенціалів. Це призводить до «підкачування» суспензії між шарами окатиша, що викликає їх

розклинювання. Такий розклинювальний тиск може досягати кількох десятків атмосфер.

Однак у присутності полімеру змінюється заряд поверхні залізорудних агрегатів, і механізм цементування окатиша набуває амфіфільного характеру. При цьому макромолекули полімеру повинні містити як гідрофільні, так і гідрофобні структурні елементи. У такому разі на міжшаровій поверхні окатиша молекула полімеру однією своєю частиною (гідрофільною) міцно закріплюється на поверхні залізорудних частинок, а іншою (гідрофобною) орієнтується всередину – у міжшаровий простір окатиша (рис. 1.1).

Надходження води в пори такого типу відбувається поступово, без їх блокування та без руйнування структури агрегатів защемленим повітрям. Унаслідок цього окатиші дещо збільшуються в об'ємі, формуючи цілісну зцементовану систему. Взаємодія полімерних макромолекул реалізується через їх гідрофобні фрагменти, що перешкоджає проникненню води з бентонітової суспензії та запобігає руйнуванню міжмолекулярних зв'язків. Зі зростанням кількості таких гідрофобних елементів підвищується стійкість внутрішніх контактів між шарами окатиша, а також їх опір механічному зношенню та впливу розклинювальних сил води.

Схема взаємодії бентонітової суспензії з частинками концентрату

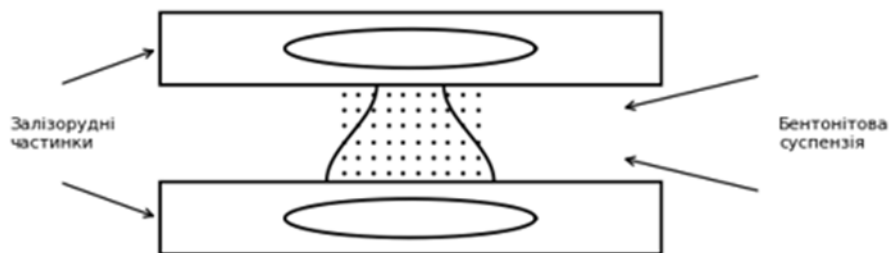


Схема взаємодії бенто-полімерної суспензії з частинками концентрату

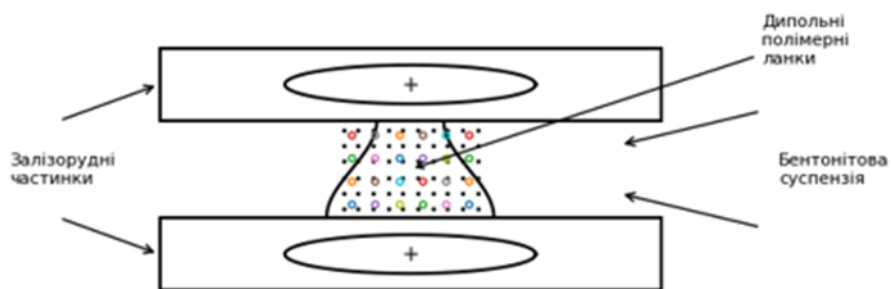


Рисунок 1.1 – Схема взаємодії полімеру із залізорудною поверхнею

Таким чином, формування стійкої структури залізорудного окатиша з полімерною складовою можна описати як процес утворення сорбційних прошарків амфіфільних макромолекул між поверхнями рудних частинок. При цьому полярні (гідрофільні) ділянки макромолекул адсорбуються на поверхні залізорудних зерен, тоді як неполярні (гідрофобні) частини забезпечують міжшарове «зчеплення», формуючи просторово зв'язану структуру. Такі взаємодії характеризуються достатньою міцністю, а доступ води до міжшарових зон обмежується внаслідок часткової гідрофобізації поверхні. Утворений комплекс «руда–полімер» забезпечує стабільність і цілісність окатиша. З огляду на це можна припустити, що найбільш ефективними є полімерні реагенти амфіфільної природи з переважанням гідрофобних властивостей, які сприяють зміцненню шаруватої будови окатишів.

У цих умовах ключовим чинником, що визначає властивості окатишів, виступає співвідношення робіт адгезії для меж «тверда поверхня – суспензія» та «тверда поверхня – тверда поверхня». Під поверхнею в даному випадку розуміють сферичну поверхню зародка окатиша радіуса  $R$ , модифіковану бентоніто-полімерною суспензією. Утворення нового шару можливе за умови, що міжфазний натяг на межі контакту двох твердих поверхонь є меншим, ніж на межі «поверхня – суспензія». З позицій фізико-хімічної механіки коефіцієнт поверхневого натягу є однією з базових характеристик систем із міжфазною поверхнею, оскільки він визначає енергетичний стан цієї поверхні та пов'язані з ним властивості. Важливою величиною також є робота, необхідна для розділення одиничної площі контакту на дві нові поверхні типу «конденсована фаза – газ», тобто робота адгезії.

Отже, оцінка цієї енергетичної характеристики є центральним завданням при дослідженні адгезійних взаємодій у системі. Відповідно до співвідношення, значення роботи адгезії визначає напрямок перебігу процесу формування нової поверхні: її збільшення супроводжується зменшенням міжфазного натягу та, відповідно, зниженням енергетичних витрат на утворення нової межі. Для окатишів, що містять полімерне зв'язувальне, стан термодинамічної рівноваги досягається за умови рівності робіт адгезії для двох конкуруючих меж розділу — «поверхня – суспензія» та «поверхня – поверхня». При цьому роботу адгезії для межі «поверхня – суспензія» необхідно враховувати з коефіцієнтом 2, оскільки руйнування контакту між твердими поверхнями супроводжується утворенням двох нових меж із суспензією.

Особливий інтерес становить можливість аналітичного визначення цієї величини. Протягом останніх десятиліть опубліковано значну кількість досліджень, присвячених аналізу змочування, розтікання рідин по твердих поверхнях і оцінці адгезійних властивостей фаз. У межах даного розділу наведено лише ключові теоретичні положення та експериментальні результати, необхідні для подальшого аналізу.

Розглянемо краплю рідини, розміщену на гладкій поверхні твердого тіла, що не зазнає деформацій (рис. 1.2).

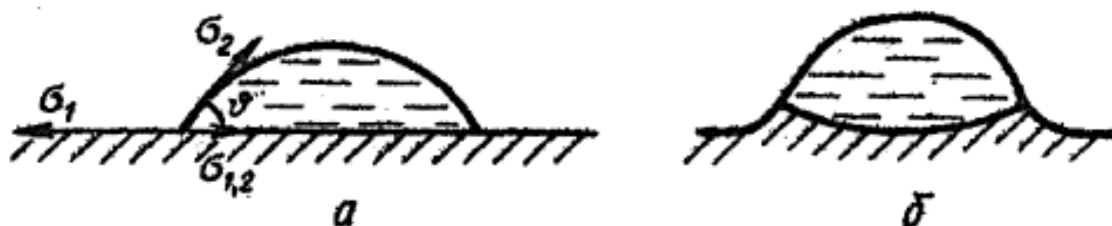


Рисунок 1.2 – Крапля на недеформованій (а) та деформованій (б) твердій поверхні

Кут, який утворює крапля в стані рівноваги, визначається співвідношенням питомих вільних енергій на межах розділу «тверде тіло – газ», «тверде тіло – рідина» та «рідина – газ» відповідно до рівняння Юнга.

$$\cos \vartheta = \sigma_1 - \sigma_{1,2} / \sigma_2$$

Цей кут називають кутом змочування або крайовим кутом. Із урахуванням рівняння Дюпре можна показати, що його значення визначається співвідношенням між роботою адгезії та когезійними силами в рідині. Зокрема, кут змочування залежить від відношення роботи адгезії до половини роботи когезії, що пояснюється особливостями визначення цих величин: у випадку адгезії розглядається одна поверхня розділу, тоді як при когезії формуються дві нові поверхні.

Якщо сили притягання між рідиною та твердою поверхнею перевищують сили взаємодії всередині самої рідини, спостерігається добре змочування (кут менший за  $90^\circ$ ). У протилежному випадку змочування є незадовільним. Таким чином, дослідження змочуваності дозволяє оцінити співвідношення між адгезійними та когезійними характеристиками системи, а також визначити роботу адгезії за відомими значеннями поверхневого натягу рідини.

Зазначений підхід дає можливість встановити основні закономірності розтікання рідини по твердій поверхні, зокрема бентоніто-полімерної суспензії по

частинках залізорудного концентрату. Швидкість і характер розтікання визначаються співвідношенням поверхневих і об'ємних сил. Переміщення лінії змочування зумовлене дією результуючої сили поверхневого натягу на межах розділу фаз, градієнтом капілярного (лапласового) тиску, а також дією сили тяжіння.

Сумарна сила, що діє вздовж периметра змочування, залежить від різниці між значеннями поверхневих натягів і контактного кута. Для реальних твердих поверхонь необхідно враховувати їхню шорсткість, яка впливає на ефективну площу контакту та змінює умови змочування.

У процесі розтікання краплі рушійною силою є різниця між миттєвим і рівноважним значеннями контактного кута. На початковій стадії, коли крапля лише контактує з поверхнею, ця сила є максимальною, після чого вона поступово зменшується в міру досягнення рівноважного стану.

Капілярний тиск у системі визначається кривизною поверхні рідини: чим більша кривизна, тим вищий тиск. Різниця цього тиску в різних ділянках спричиняє перерозподіл рідини та переміщення її по поверхні. Крім того, на рух рідини можуть впливати гравітаційні, температурні, електричні та інші поля. У загальному випадку розтікання можливе лише за умови зменшення вільної енергії системи.

Разом із рушійними силами діють і сили опору, зокрема інерційні та в'язкі, а також сили, пов'язані з кінетикою процесу змочування. На початкових етапах визначальну роль можуть відігравати інерційні ефекти або швидкість формування змочуваного контакту, тоді як на пізніших стадіях домінує в'язкий опір.

Загальне рівняння руху рідини враховує всі зазначені фактори, проте його аналітичне розв'язання є складним. Тому на практиці використовують спрощені співвідношення, які дозволяють оцінити швидкість розтікання краплі як функцію її фізичних параметрів і властивостей середовища.

У подальшому доцільно розглянути вплив полімерних добавок на енергетичні характеристики системи. Припускаючи, що міжфазний натяг на межі «рідина – газ» змінюється незначно, основну увагу слід приділити зміні роботи

адгезії. У присутності полімеру поблизу межі розділу формується система електричних зарядів (орієнтованих диполів), яка індукує появу протилежних зарядів на поверхні частинок.

Напруженість електричного поля визначається поверхневою густиною заряду та діелектричними властивостями середовища, а енергія цього поля робить додатковий внесок у загальну енергію взаємодії. У результаті введення полімеру призводить до зростання роботи адгезії. За оцінками, цей додатковий внесок може становити близько 20–50 % від значення адгезії для бентонітової суспензії без полімеру .

У таблиці 1.4 наведено результати розрахунків зміни роботи адгезії для окатишів, модифікованих полімером із різним ступенем гідролізу (іонізації), а також розрахункову частку виходу окатишів придатного класу ( $\eta$ ). Вміст полімерної добавки в залізорудній шихті становить 0,02 % (що відповідає 2 % від маси бентоніту).

Таблиця 1.3 – Вплив витрати зв’язуючого матеріалу на властивості сирих окатишів

Ступінь іонізації, %	$W_{p-c}$ $\times 10^{14}$ , кДж/м <sup>2</sup>	$W_{p-p}$ $\times 10^{14}$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\Delta W$ $\times 10^{14}$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\eta$ , %
10	9,68	7,25	-12,11	Близька до 0
30	12,9	50,15	24,34	51,5
50	16,13	131,02	98,76	24,6
70	19,23	249,72	211,26	15,4
90	22,63	406,09	360,84	11,1

З аналізу наведених даних випливає, що зі збільшенням ступеня іонізації полімеру підвищується міцність окатишів. Водночас це супроводжується зростанням їхньої схильності до агрегування (злипання). Найбільший вихід придатного продукту очікується при ступені іонізації полімеру близько 30 %. Теоретичний вихід окатишів за низьких значень ступеня іонізації є мінімальним,

зростає до максимуму при значенні близько 30 %, після чого поступово зменшується.

Отже, на основі запропонованих модельних уявлень та отриманих розрахункових оцінок можна зробити висновок, що введення полімеру до складу комплексного зв'язувального: по-перше, спричиняє перерозподіл іонів на межах розділу фаз і змінює їх енергетичні характеристики; по-друге, створює передумови для покращення якості сирих окатишів порівняно з матеріалом, у якому використовується лише бентоніт. Реалізація зазначених положень потребує подальшого експериментального підтвердження та проведення комплексних досліджень із використанням нових типів полімерних добавок.

Таким чином проведений аналіз науково-технічної літератури дозволяє зробити такі узагальнення:

– у наукових джерелах відсутня систематизована інформація щодо реологічних властивостей полімерних зв'язуючих та бенто-полімерних композицій, а також щодо механізмів їх взаємодії з частинками залізорудного концентрату та ролі у формуванні структури і властивостей сирих та обпалених окатишів;

– недостатньо розроблені підходи до створення технологій підготовки полімерних і бенто-полімерних зв'язуючих, які б дозволяли поєднати позитивні властивості бентоніту та полімерів, а також визначити оптимальні способи їх введення до складу шихти для окомкування;

– у промисловій практиці практично відсутній позитивний досвід застосування чистих полімерних зв'язуючих у виробництві залізорудних окатишів.

Таким чином, метою даної роботи є дослідження процесу формування якості сирих та обпалених окатишів при використанні бентоніто-полімерних композицій.

## 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Методика визначення в'язкості водних суспензій зв'язуючих добавок, що використовуються при окомкуванні залізорудних концентратів.

Для досліджень зв'язуючих добавок, що надходять у грудкувому вигляді, спочатку усереднену пробу попередньо висушували до залишкової вологості 10 %. Після цього матеріал піддавали подрібненню та просіюванню через сито з розміром отворів 0,071 мм. Вміст частинок розміром менше 0,071 мм у підготовленій пробі повинен становити не менше 90 %.

Відповідно для визначення хімічного складу досліджуваних матеріалів у роботі застосовували рентгенофлуоресцентний аналізатор EXPERT 4L (рис. 2.1). Аналіз проводили в лабораторних умовах шляхом розміщення підготовлених зразків у вимірювальній камері приладу.



Рисунок 2.1 – Рентгенофлуоресцентний аналізатор EXPERT 4L

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.02.МД					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ					
<i>Розробив</i>	Ільченко							<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Перевірив</i>	Бабошко							1	10	
<i>Н. контр.</i>	Бабошко							МТ-22-1		
<i>Затвердив</i>	Бабошко									

Підготовлені проби зберігали в ексікаторі з метою запобігання зміні їх вологості.

Далі готували водну суспензію, яка містила 10 г подрібненого бентоніту із залишковою вологістю 8–10 % та 90 мл дистильованої води, проводили первинне ручне перемішування суспензії до повного зникнення слідів нерівномірності на стінках і дні склянки.

Подальше перемішування суспензії проводили із використанням електромішалки протягом 10 хвилин до отримання однорідної системи. Підготовлену суспензію заливали у вимірювальний контейнер ротаційного віскозиметра до контрольної позначки. Після цього вимірювальний циліндр встановлювали у приладі та перемішували при швидкості обертання ротора 600 об/хв до досягнення сталого значення кута закручування  $J_1$ .

Ефективну в'язкість визначали за відповідним розрахунковим співвідношенням:

$$\eta = \frac{A \cdot J_1}{0.600}, \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

де  $A$  – константа приладу.

Приготування суспензії та вимірювання ефективної в'язкості для кожної проби виконували у трьох паралельних визначеннях. Остаточний результат визначали як середнє арифметичне отриманих значень.

Допустиме відхилення між результатами паралельних вимірювань становить  $\pm 4\%$  від середнього значення.

Результати досліджень, наведені на рис. 2.2, свідчать, що незалежно від типу полімерного матеріалу збільшення його вмісту у складі композиції призводить до зростання показника ефективної в'язкості зв'язуючого. Найбільша ефективність полімерних добавок спостерігається при їх вмісті не більше 4–5 %.

При цьому встановлені залежності мають певні відмінності. Зокрема, при підвищених дозуваннях полімерних добавок (до 18 %) найбільші значення в'язкості досягаються для зв'язуючого з добавкою Peridur (КМЦ) близько 74 мПа·с

порівняно з 70 мПа·с для Floform. Водночас при невеликих концентраціях полімеру (2,0–2,5 %) значення ефективної в'язкості в усіх випадках становить близько 50 мПа·с, що суттєво перевищує аналогічний показник для базового бентоніту (35 мПа·с).

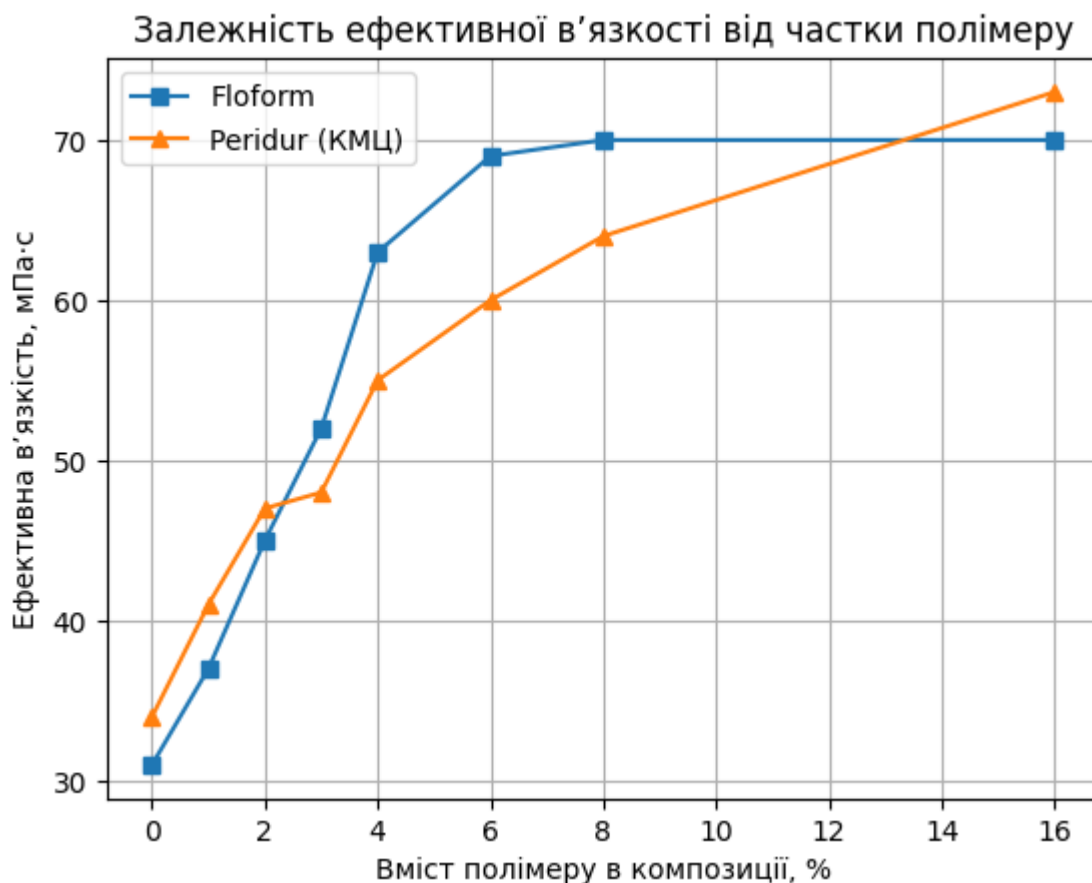


Рисунок 2.2 – Залежність ефективної в'язкості від частки полімеру.

Слід зазначити, що з практичної, зокрема економічної точки зору, найбільш доцільним є використання саме невеликих дозувань полімерних добавок, ефективність яких буде розглянута у подальших розділах роботи.

Таким чином, проведені дослідження показали, що з позицій показника ефективної в'язкості досліджені полімерні матеріали практично не відрізняються за характером їх взаємодії з бентонітовою основою.

Дослідженню впливу полімерних добавок на інший показник реологічних властивостей зв'язуючого – індекс набухання – присвячено наступний розділ роботи.

2.2 Визначення залежності показника індексу набухання від складу бентоніто-полімерного зв'язуючого матеріалу.

Як уже зазначалося, для бентонітів різних родовищ і фізико-хімічних властивостей характерною є наявність кореляційного зв'язку між ефективною в'язкістю та індексом набухання: підвищення ефективної в'язкості супроводжується зростанням індексу набухання.

З метою встановлення подібних закономірностей для бенто-полімерних композицій було проведено експериментальні дослідження з визначення індексу набухання за стандартними методиками із застосуванням різних полімерних компонентів Floform та Peridur (КМЦ) у складі зв'язуючого.

Пробу зв'язуючого масою 2 г із заданою вологістю засипали у дистильовану воду, що знаходилась у циліндричній скляній мензурці, порціями за допомогою шпателя (рисунок 2.3). Додавання наступних порцій здійснювали після осідання попередніх на дно посудини.



Рисунок 2.3 – Вигляд розчину набухлого зав'язуючого після витримки

Після витримки протягом 2 годин визначали об'єм осаду та розраховували індекс набухання за наведеною формулою.

$$I = \frac{V}{100-M} \cdot 100$$

де:

I – індекс набухання мл/2г;

V – об'єм осаду на дні мензурки, мл;

M – вологість бентоніту під час досліджень, %.

У ході експериментальних досліджень випробуванням піддавалися проби зі співвідношенням бентоніту та полімеру, аналогічним до використаного при визначенні показника ефективної в'язкості. Результати досліджень наведено на рис. 2.4. В якості основи для зв'язуючого в усіх випадках використовувався дашуківський бентоніт.

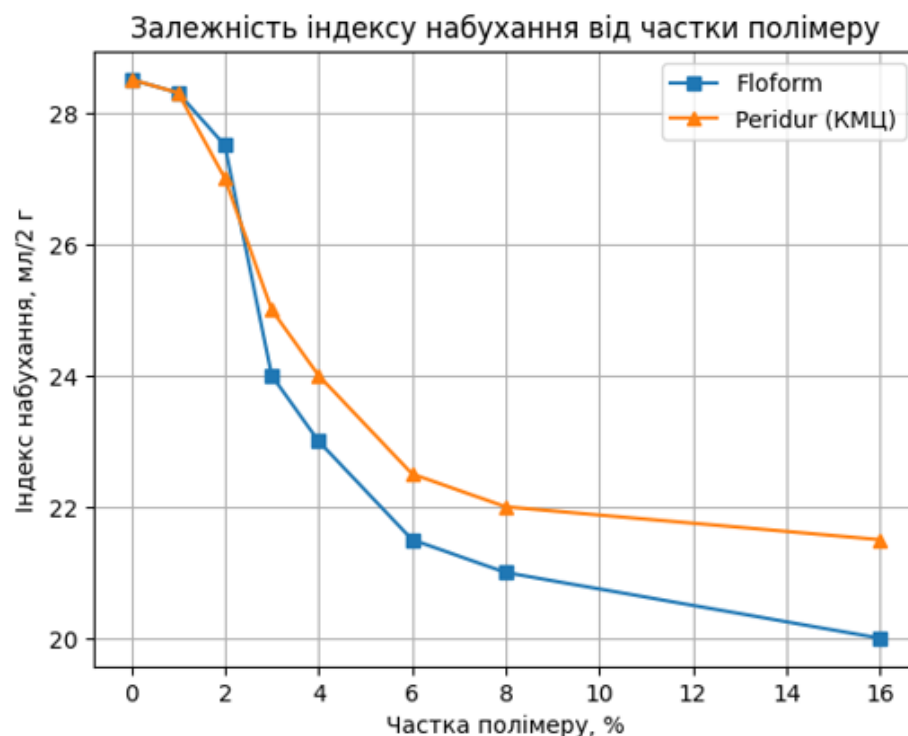


Рисунок 2.4 – Залежність індексу набухання зв'язуючого від частки полімеру у складі бентоніто-полімерного зв'язуючого

Аналіз отриманих даних свідчить, що зі збільшенням вмісту полімерного компонента у складі зв'язуючого спостерігається зниження індексу набухання. При цьому при невеликих добавках полімеру (до 2 %) зменшення індексу є незначним, тоді як подальше підвищення його вмісту призводить до більш істотного зниження даного показника.

Отримані результати певною мірою суперечать ustalеним уявленням, оскільки характер залежності індексу набухання від складу композиції відрізняється від аналогічної залежності для ефективної в'язкості.

Як відомо з ряду фундаментальних досліджень, ці показники покладені в основу систематизації бентонітів і розглядаються як рівнозначні характеристики якості зв'язуючого: зростання одного з них, як правило, супроводжується підвищенням іншого. Проте у випадку бентоніто-полімерних зв'язуючих така закономірність не підтверджується. Зокрема, підвищення ефективної в'язкості супроводжується зниженням індексу набухання. Більше того, порушується ще один принцип існуючих модельних уявлень про властивості зв'язуючих матеріалів, відповідно до якого збільшення значення будь-якого з реологічних показників повинно призводити до підвищення міцнісних характеристик сирих та обпалених окатишів.

У зв'язку з цим постає питання щодо визначення того, який із показників реологічних властивостей полімервмісного зв'язуючого є визначальним з точки зору його технологічної ефективності.

Для вирішення цього питання було проведено дослідження ролі полімервмісних зв'язуючих у формуванні якісних показників залізорудних окатишів.

При проведенні досліджень використовували залізорудний концентрат із вмістом 66,0 % Fe та 7,0 % SiO<sub>2</sub>. Концентрат змішували зі зв'язуючими матеріалами, яв якості зв'язуючих застосовували бентоніт, а також різні полімервмісні добавки – Floform та Peridur (КМЦ).

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.02.МД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		6

Отриману шихту окомковували в лабораторному чашовому окомковувачі з утворенням сирих окатишів. Після визначення властивостей сирих окатишів їх поміщали в тиглі, які завантажували в піч.

Термічну обробку здійснювали за максимальних температур 1250–1270 °С протягом 2,0–3,0 хвилин. Після завершення випалення проби діставали та визначали показники міцності: на стиск, удар ( $B^+$ ) та стирання ( $B^-$ ).

У ході експериментальних досліджень встановили, що вплив частки полімерної добавки та складу зв'язуючого суттєвих відмінностей у міцнісні характеристики сирих окатишів на стиск не чинять. Однак, більший вплив спостерігається для обпалених окатишів (рис. 2.5).

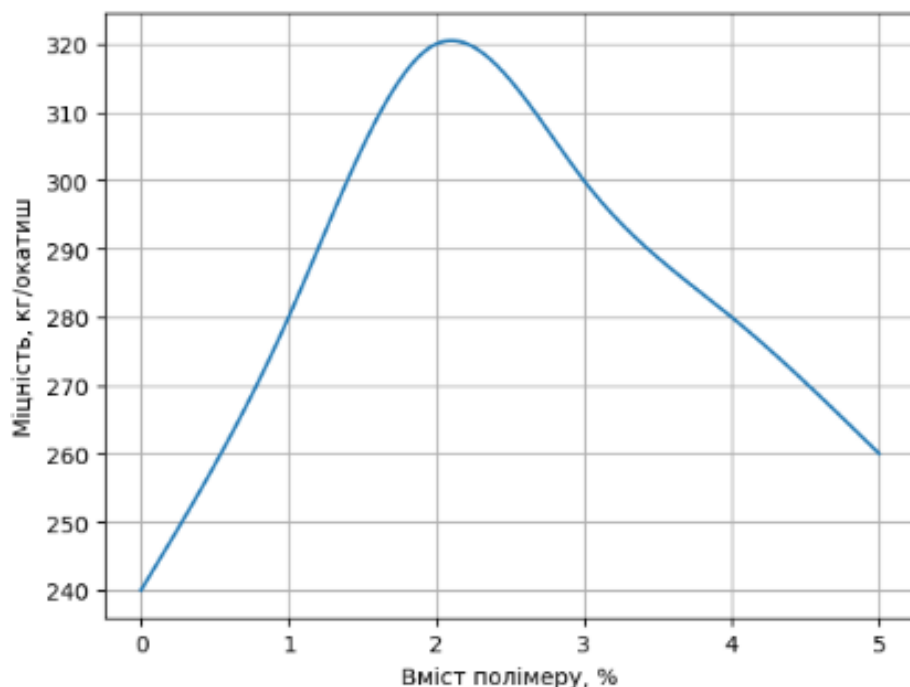


Рисунок 2.5 – Залежність міцності обпалених окатишів від вмісту полімера в зв'язуючому

Встановлено, що показник міцності зростає з 240 до 315 кг/окатиш при додаванні 2 % полімеру Floform. Подальше збільшення його вмісту навпаки призводить до зниження міцності окатишів на стиск.

Таким чином, введення полімеру до складу зв'язуючого на основі бентоніту сприяє підвищенню ефективної в'язкості водної суспензії. При цьому встановлено можливість зменшення витрати бентоніту при використанні полімерної зв'язки без

погіршення міцності показників обпалених окатишів. За незмінного дозування бентоніту незначні добавки полімеру (до 2 %) зумовлюють підвищення міцності окатишів. Бентоніто-полімерне зв'язуюче модифікує порову структуру окатишів, що сприяє збільшенню ступеня їх окисності під час випалу та дозволяє очікувати підвищення відновлюваності на наступних стадіях переробки.

### 2.3 Методика експериментального дослідження якості сирих і сухих та обпалених окатишів

Аналізуючи дані лабораторних досліджень щодо введення бентоніто-полімерних композицій до складу залізородних окатишів, нами була запропонована методика для отримання сирих окатишів та оцінювання їх якісних характеристик.

В якості основних компонентів шихти використовують залізородний концентрат, бентонітовий порошок, а також вапняк (у разі отримання офлюсованих окатишів) та полімерна добавка в різних співвідношеннях. Шихту для кожного дослідження готують за однакових умов. Для цього зразки перед окомкуванням спочатку висушують у лабораторній сушильній шафі при температурі 105 °С до досягнення сталої вологості та маси.

Потім підготовлені компоненти шихти дозують та ретельно перемішують, зволожують і просівають через сито. Процес окомкування здійснюється на лабораторному тарілчастому грануляторі діаметром 1,0 м із кутом нахилу 45° до горизонту.

Спочатку на першому етапі формують зародки окатишів, які відсіюють із виділенням фракції. Із цієї фракції відбирають 0,5 кг, після чого здійснюють докатування разом із рештою шихти. Час накочування та маса зародків залишаються незмінними для всіх експериментів. Після завершення процесу визначають вологість отриманих окатишів.

Надалі окатиші класифікують за розмірами +10, +12, +14, +16 шляхом просіювання на ситах. Для дослідження механічних і пластичних властивостей відбирають окатиші фракції 12–14 мм.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.02.МД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		8

Міцність сирих окатишів визначають методом роздавлювання на лабораторних вагах, тоді як пластичність оцінюють шляхом багаторазового скидання з висоти 0,4 м на сталеву поверхню до появи тріщин. Для визначення міцності сухих окатишів частину зразків попередньо висушують у сушильній шафі при температурі 105 °С.

Далі висушені окатиші піддавали дослідженню металургійних властивостей, що здійснювали на лабораторній установці (рис. 2.6), призначеній для вивчення масообмінних процесів при їх обробці в окиснювальних і відновлювальних газових середовищах. У даній роботі відновлення окатишів проводили при температурах від 750 °С і 950 °С у водневому середовищі з подальшим визначенням ступеня відновлення та «гарячої» міцності. Метою досліджень було встановлення впливу складу та дозування компонентів на параметри відновлення й властивості окатишів у процесі відновлення.

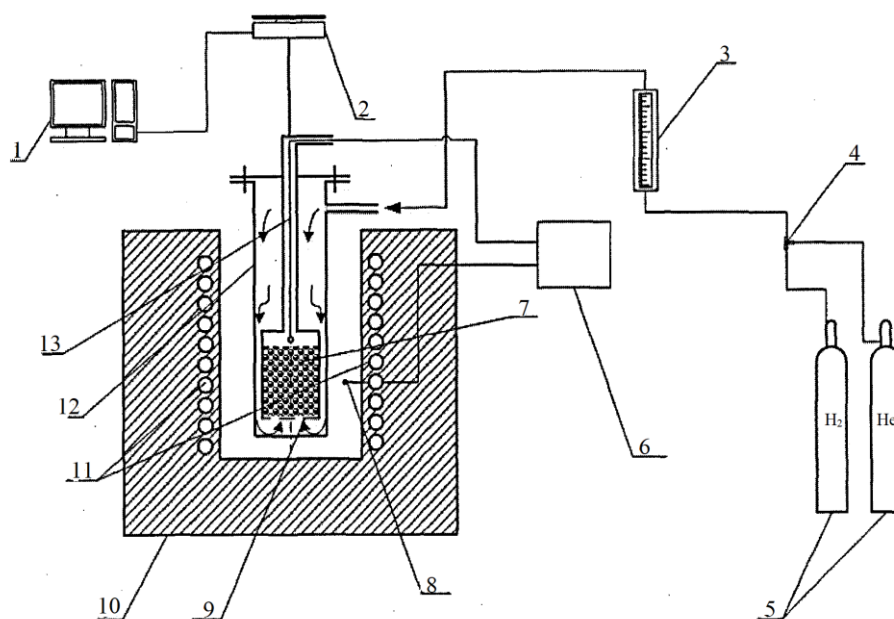


Рисунок 2.6 – Лабораторна установка для дослідження процесу відновлення залізорудних окатишів.

1 – персональний комп'ютер; 2 – електронні ваги; 3 – витратомір; 4 – триходовий кран; 5 – балони з гелієм і воднем; 6 – термоконтролер печі; 7 – навіска окатишів; 8 – термопара в робочому просторі печі; 9 – реакційна корзинка; 10 – електронагрівальна піч; 11 – ніхромові нагрівачі; 12 – реакційний стакан; 13 – термопара.

Перед початком експерименту навіску окатишів масою 100 г завантажували у реакційну сітку, яку встановлювали у реакційний стакан. До системи підводили інертний газ (аргон) із витратою 6–7 л/хв через витратомір за допомогою триходового крана, після чого вузол розміщували у нагрівальній печі. Нагрівання навіски до температури 800 °С здійснювали за допомогою термоконтролера, при цьому температура контролювалася термопарою, розміщеною в реакційній зоні.

Після досягнення заданої температури подачу інертного газу замінювали на відновлювальний газ – водень із витратою близько 6 л/хв. Контроль витрати газу здійснювали за допомогою витратоміра. Процес відновлення тривав до досягнення необхідної маси зразка, що фіксувалося електронними вагами з одночасною реєстрацією зміни маси у часі на персональному комп'ютері.

Після завершення відновлення подачу водню припиняли та знову подавали аргон, після чого реакційний стакан виймали з печі та охолоджували приблизно до 150 °С. Далі реакційну сітку вилучали, а відновлені окатиші використовували для подальших досліджень.

Фазовий склад і мікроструктуру обпалених окатишів досліджували за допомогою мікроскопів відбитого та прохідного світла.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ СИРИХ ТА ОБПАЛЕНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ БЕНТОНІТО–ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ

3.1 Визначення фізико-механічних показників окатишів.

Вплив полімервмісних зв'язуючих матеріалів на властивості сирих, сухих та обпалених окатишів оцінювали шляхом проведення серії експериментальних досліджень. Відомості про склад компонентів, їх дозування, а також отримані характеристики окатишів наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристика залізородних окатишів

№	Концентрат	Склад шихти, %			Волога, %	Міцність	
		Бентоніт + полімер				сірі	сухі
		Бентоніт	Floform	Peridur			
1	99,7	100	0		9,8	1,6	2,6
		99,5	0,5			1,65	3,0
		99,0	1			1,75	2,9
		98	2			1,55	2,6
		97	3			1,5	2,4
2	99,7	100		0	9,8	1,6	2,6
		99,5		0,5		1,7	3,1
		99,0		1		1,65	3,2
		98		2		1,8	3,1
		97		3		1,6	2,75
3	99,5	100	0		9,7	1,8	2,8
		99,5	0,5			1,9	2,85
		99,0	1			1,95	2,95
		98	2			1,8	2,8
		97	3			1,55	2,6
4	99,5	100		0	9,7	1,8	2,8
		99,5		0,5		1,75	2,7
		99,0		1		1,6	2,5
		98		2		1,5	2,3
		97		3		1,4	2,4

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ДО			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ СИРИХ ТА ОБПАЛЕНИХ ОКАТИШІВ	<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Розробив</i>	Ільченко						1	9
<i>Перевірив</i>	Бабошко							
<i>Н. контр.</i>	Бабошко							
<i>Затвердив</i>	Бабошко							
						МТ-22-1		

5	99,2	100	0	10,0	1,5	2,4
		99,5	0,5		1,45	2,6
		99,0	1		1,5	2,3
		98,0	2		1,6	2,2
		99,0	3		1,3	2,1
6	99,2	100		10,0	1,5	2,4
		99,5	0,5		1,4	2,7
		99,0	1		1,45	2,5
		98,0	2		1,3	2,4
		97	3		1,1	2,0

Проведення трьох експериментальних серій із використанням двох полімерних добавок дозволило встановити загальну тенденцію до покращення властивостей окатишів при підвищенні частки бентоніту у складі композиції.

Аналіз експериментальних даних свідчить, що оптимальним вмістом полімерної добавки в композиції, за якого досягаються найкращі середні значення фізичних характеристик, є діапазон від 1,0 до 3,0 %. Подальше підвищення його частки понад 3,0 % призводить до погіршення більшості показників, за винятком пористості сухих окатишів, яка продовжує зростати.

Встановлено, що повна заміна бентоніту полімерною добавкою викликає зниження якісних характеристик як сирих, так і сухих окатишів. За результатами проведених досліджень оптимальний вміст бенто-полімерної композиції (Б+ПК: Floform або Peridur) у шихті становить 0,25–0,50 %.

Слід відзначити, що на нашу думку зростання міцності сирих окатишів у більшій мірі залежить саме від кількості бентоніту у шихті, ніж від вмісту полімерних добавок (Floform або Peridur). Зокрема, при збільшенні дозування бентоніту до 0,5 % спостерігається суттєве підвищення міцності порівняно з меншими концентраціями. Це підтверджує, що основним носієм міцності сирих і сухих окатишів є бентоніт.

Особливої уваги заслуговує встановлена стійка тенденція до зростання пористості сухих окатишів (визначеної методом гідростатичного зважування) у

всьому діапазоні збільшення вмісту полімеру. Це підтверджує уявлення про формування більш розвиненої та дрібнодисперсної порової структури, що в подальшому має сприяти покращенню металургійних властивостей окатишів.

Однак, враховуючи наведені вище переваги та недоліки бентоніту і полімерних зв'язуючих матеріалів при їх окремому введенні до складу шихти для виробництва залізорудних окатишів, а також відмінності у механізмах їх взаємодії з частинками концентрату, актуальним постає завдання оптимізації технології їх спільного застосування.

Найбільш близьким за технічною сутністю до вирішення зазначеної задачі є спосіб підготовки шихти до окомкування, в якому використовується комбіноване зв'язуюче, що містить бентоніт і полімер, який виконує функцію активатора. Співвідношення компонентів у такій композиції визначається питомою поверхнею залізорудного концентрату (патент РФ № 2245930, С1, опубл. 26.09.2005). Застосування подібного підходу дозволяє реалізувати переваги обох типів зв'язуючих та покращити якісні характеристики як сирих, так і обпалених окатишів. Але зазначене технічне рішення характеризується підвищеною витратою зв'язуючих матеріалів, а можливість її зниження потребує спеціальних умов підготовки шихти.

Необхідність оптимізації способу введення бентоніту та полімеру в шихту обумовлена, зокрема, впливом тривалості витримки перед окомкуванням. Згідно з результатами досліджень, попередня витримка шихти, що містить бентоніт, протягом 60–90 хв сприяє підвищенню міцності сирих і обпалених окатишів або дозволяє дещо знизити витрати зв'язуючого. Однак такий підхід не забезпечує суттєвого покращення металургійних властивостей окатишів і не дає можливості значно скоротити витрату зв'язуючих матеріалів.

Це пояснюється особливостями взаємодії бентоніту та полімерів із частинками залізорудного концентрату, розглянутими у підрозділі 1.2-1.3. Зокрема, для бентоніту важливим є забезпечення рівномірного розподілу у масі концентрату,

що досягається поетапним введенням, що підвищує ефективність його дії як зміцнюючої добавки.

На відміну від цього, полімерні компоненти характеризуються значно швидшим процесом взаємодії з водою (до 1хв), а також коротким часом взаємодії водного розчину з частинками концентрату (до 2 хв). При цьому утворений розчин, що проявляє поверхнево-активні властивості, рівномірно обволікає частинки рудного матеріалу.

В результаті проведення лабораторних досліджень, було помічено, що поетапне введення компонентів зв'язуючого гарно себе зарекомендовує. Спочатку відбувається введення наступних компонентів: бентоніту до 60% від загальної маси (витримка шихти), а потім бентоніт полімерної композиції.

Отже, запропоноване технічне рішення дозволить зменшити витрати зв'язуючих матеріалів і покращити якісні показники окатишів.

### 3.2 Дослідження металургійних показників обпалених залізорудних окатишів.

Спочатку отримані зразки обпалених залізорудних окатишів із застосуванням різних зв'язуючих добавок, зокрема бентоніту, полімерних зв'язуючих Peridur, Floform були направлені на аналіз їхньої макро- і мікроструктуру і встановленню мінерального та хімічного складу. Отримані результати досліджень наведені в таблиці 3.2. У якості сировини використовувався базовий залізорудний концентрат.

Таблиця 3.2 – Властивості обпалених окатишів

Зв'язка		Пористість, %	Міцність, кг/ок	Хімічний склад, %			
Бентоніт	Полімер			Fe <sub>заг</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>
0,5	-	21,5	350	62,8	2,15	1,15	7,5
0,4	Floform 0,03	25,5	370	62,9	0,45	1,35	7,8
0,4	Peridur 0,03	24,1	380	62,7	0,5	1,4	7,45

Мікроструктурні дослідження проводилися за допомогою оптичного мікроскопу МІМ у відбитому та прохідному світлі із застосуванням імерсійних рідин для визначення показників заломлення силікатних фаз. Аналіз відібраних проб із таблиці 3.2 наступний:

1. Базовий концентрат із додаванням лише бентоніту в кількості 0,5 %.

Відібрані окатиші мали діаметр 14 мм, характеризуються нерівною поверхнею та відсутністю видимих тріщин неозброєним оком. Для всіх зразків характерна чітко виражена зональна структура, що включає магнетитове ядро та гематитову оболонку. Діаметр магнетитового ядра становить приблизно 4–6 мм. Концентричні тріщини навколо ядра не спостерігаються, а перехід від окисненої зони до неокисненого ядра відбувається поступово, шляхом зміни фазового складу.

Перехід від магнетитового ядра до гематитової оболонки здійснюється поступово за рахунок збільшення вмісту пластинчастого гематиту в уламках магнетиту. Окатиші характеризуються високою ударною міцністю; при механічному руйнуванні ядро не відокремлюється від зони окиснення.

Поверхневий шар окатишів має крупнопористу структуру, тоді як зона окиснення представлена ущільненим гематитом. Магнетитове ядро характеризується переважно дрібнопористою будовою. Зона окиснення сформована поєднанням крупних і дрібних глобулярних зерен гематиту.

У всіх структурних зонах окатишів виявлені уламки первинного кварцу. Силікатна зв'язка розвинена достатньо добре і становить близько 10 % об'єму. Під час випалу уламки первинних силікатів концентрату утворюють розплав, у якому формуються поодинокі зерна феритів.

Також спостерігаються поодинокі включення зміненого бентоніту та краплеподібні включення сульфідів заліза.

2. Базовий концентрат із додаванням полімера Floform – 0,03 %, бентоніт – 0,4 %.

Окатиші мають розмір 14 мм, характеризуються нерівною поверхнею без тріщин. У поперечному перерізі тріщини також відсутні. Мікроструктура є

однорідною, зернистою, зональність не спостерігається; фазовий склад переважно гематитовий. У центральній частині окремих окатишів зберігаються незначні залишки магнетиту.

Пористість розподілена рівномірно по всьому об'єму, при цьому окремі великі пори локалізуються переважно в центральній частині. Гематит представлений уламками зерен і псевдоморфозами по магнетиту, тобто утворюється шляхом заміщення без зміни первинної форми зерен.

З тонкодисперсної фракції концентрату формується дрібний гематит, причому в центральних зонах окатишів розмір зерен зростає.

Зв'язка окатишів має гематитовий характер і формується в процесі спікання. Силікатна фаза добре розвинена і представлена склоподібними утвореннями безбарвного та жовтого кольору, а також уламками кварцу та інших силікатів. У центральних частинах окатишів спостерігається кристалізація скла з утворенням дрібних видовжених зерен.

3. Базовий концентрат із додаванням полімера Peridur – 0,03 %, бентоніт – 0,4 %.

Окатиші мають розмір становить 14 мм, поверхня нерівна, тріщини як на поверхні, так і в поперечному перерізі відсутні. Структура окатишів щільна, пористість розподілена рівномірно, при цьому спостерігаються поодинокі великі пори, розташовані хаотично.

Подекуди великі пори місцями зливаються, що сприяє формуванню тріщин у зоні навколо магнетитового ядра. Для всіх зразків характерна зональна будова з наявністю магнетитового ядра та гематитової оболонки.. Перехід між зонами відбувається поступово за рахунок зменшення вмісту гематиту.

Центральна частина окатишів представлена глобулярними зернами магнетиту, на поверхні яких формується пластинчастий гематит. Силікатна зв'язка в ядрі добре розвинена Під час охолодження інколи спостерігається кристалізація магнетиту у вигляді дендритних утворень.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.03.ДО	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		6

Підсумовуючи мінералогічний аналіз можна із впевненістю сказати, що проведені дослідження підтвердили суттєву роль полімерних компонентів у формуванні структури обпалених окатишів. По-перше, введення полімерів сприяє формуванню дрібнодисперсної пористості, яка виникає внаслідок їх вигорання на початкових стадіях термічної обробки.

По-друге, полімерні добавки змінюють поверхневі властивості зв'язуючої суспензії та енергію її міжфазної взаємодії з частинками концентрату. Це забезпечує більш рівномірне змочування та розтікання суспензії, що, з одного боку, інтенсифікує процеси спікання, а з іншого — може призводити до зниження міцності сирих окатишів.

Найбільш сприятлива структура формується при використанні бенто-полімерних композицій. У цьому випадку розвинена дрібнопориста структура забезпечує практично повне протікання процесів окиснення, відсутність вираженої зональності та, як наслідок, підвищення міцності обпалених окатишів і покращення їх відновлюваності.

Отримані результати узгоджуються з модельними уявленнями, викладеними у розділі 1.

Слід відзначити, що у процесі досліджень здійснювали також аналіз ефективної константи швидкості реакції відновлення окатишів за різних температурних режимів, а також оцінювали «гарячу» міцність частково відновлених окатишів (ступінь відновлення до **30 %**).

Міцність окатишів у процесі відновлення може розглядатися як альтернативний показник ефективної константи швидкості реакції, оскільки остання значною мірою визначається величиною реакційної поверхні, тобто площею контакту оксидної фази з відновлювальним газом. Така поверхня формується як за рахунок відкритої пористості, так і внаслідок утворення тріщин. У зв'язку з цим рудні матеріали, що характеризуються низькою відновлюваністю, як правило, мають підвищену міцність під час відновлення, тоді як руйнування структури супроводжується збільшенням ефективної швидкості реакції.

У практиці металургії важливим є встановлення оптимального співвідношення між швидкістю відновлення та міцністю окатишів. При цьому бажано, щоб інтенсифікація процесу відновлення забезпечувалася переважно за рахунок розвитку пористої структури, а не утворення тріщин, які призводять до руйнування матеріалу.

Основною причиною зниження міцності окатишів у процесі відновлення є виникнення внутрішніх напружень, пов'язаних із фазовими перетвореннями типу  $Fe_2 O_3 \rightarrow Fe_3 O_4$ . Дані напруження обумовлені нерівномірними деформаціями кристалічної ґратки гематиту під час переходу в магнетит.

Релаксація цих напружень може відбуватися двома шляхами: за рахунок пластичної деформації структурних елементів окатиша (що характерно для температур відновлення понад 800–900 °С) або внаслідок крихкого руйнування матриці. Останнє супроводжується розпушенням структури та збільшенням об'єму окатиша. У випадку нерівномірного (зонального) протікання процесу відновлення в об'ємі окатиша виникають локальні деформації, що призводять до його руйнування. Таким чином, більш рівномірний розподіл процесу відновлення по об'єму сприяє підвищенню міцності окатишів.

Стійкість окатиша до руйнування визначається співвідношенням між діючими напруженнями та граничною міцністю його мікроструктурних елементів. При цьому мікроміцність окремих ділянок матеріалу не завжди корелює з показниками міцності обпалених окатишів при стиску, оскільки умови навантаження, фазовий склад і структура матеріалу на стадії відновлення суттєво відрізняються від вихідного стану.

На першому етапі експериментів відновлення здійснювали за температури 600–900 °С із використанням полімеру типу Floform, тоді як на другому етапі дослідження проводили при температурі 700 °С із застосуванням різних полімерних добавок.

Аналіз залежностей ефективної константи швидкості реакції відновлення та «гарячої» міцності частково відновлених (до 30 %) окатишів від температури

відновлення за різного вмісту полімеру Floform у шихті при сталому дозуванні бенто-полімерної композиції на рівні 0,3 % (перший етап досліджень) підтверджує наявність оберненої залежності між цими показниками. Зокрема, зі зростанням одного з них спостерігається відповідне зниження іншого.

Оцінка впливу полімерного компонента на відновлювальні властивості окатишів показала, що найгірші показники характерні для матеріалу без використання полімерного зв'язуючого. Зі збільшенням вмісту полімеру у шихті спостерігається зростання ефективної константи швидкості відновлення, а також підвищення «гарячої» міцності окатишів. Найкращі результати досягаються при вмісті полімеру в межах 0,015 %.

Разом з тим, подальше збільшення дозування полімеру понад 0,015 % призводить до погіршення металургійних показників, особливо при температурі відновлення 900 °С. Це, ймовірно, пов'язано з інтенсивним утворенням мікротріщин у структурі окатишів, що підтверджено результатами мікроструктурного аналізу.

Враховуючи, що бентоніт забезпечує покращення фізико-механічних характеристик сирих і сухих окатишів, а полімерні добавки позитивно впливають на металургійні властивості обпалених, можна стверджувати про існування оптимального складу композиційного зв'язуючого, який забезпечує збалансоване поєднання властивостей на всіх стадіях.

За результатами проведених досліджень доцільним є застосування композиційного зв'язуючого, що містить 0,30–0,4 % високоякісного бентоніту та близько 0,02 % полімеру Floform.

## ВИСНОВКИ

1. Суттєвий науковий інтерес викликає ефективність застосування різних типів зв'язуючих матеріалів. У ході проведених досліджень було здійснено систематизацію властивостей бентонітів за показником ефективної в'язкості. Встановлено, що з урахуванням сучасних вимог до якості окатишів для доменного виробництва та процесів металізації доцільним є використання бентонітів з ефективною в'язкістю не нижче 45 мПа·с. Застосування таких матеріалів дозволяє зменшити витрати зв'язуючого у 1,5–2,0 рази, оптимізувати гранулометричний склад шихти та підвищити міцність обпалених окатишів на 20–30 %. Однак, використання високоякісних активованих бентонітів, попри покращення міцності характеристик окатишів, супроводжується певними недоліками. Зокрема, підвищені витрати бентоніту призводять до зниження вмісту заліза в готових окатишах. Крім того, вплив таких зв'язуючих на металургійні властивості окатишів на сьогодні залишається недостатньо дослідженим.

2. Використання бенто-полімерних композицій (БПК) забезпечує можливість зниження витрат зв'язуючих матеріалів при виробництві залізородних окатишів приблизно на 25–30 %.

3. Аналіз комплексу фізичних характеристик сирих і сухих окатишів показав, що найбільш високі показники забезпечуються при введенні бенто-полімерної композиції, що містить полімер типу Floform.

4. Дослідження мінералогічного складу, а також макро- і мікроструктури окатишів, отриманих із використанням різних полімерних зв'язуючих, підтвердило формування в їх структурі дрібнодисперсної пористості, яка виникає внаслідок вигорання полімерного компонента на початкових стадіях термічної обробки. Крім того, введення полімеру, ймовірно, спричиняє зміну поверхневих властивостей

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.В		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розробив</i>	Ільченко					1	2
<i>Перевірив</i>	Бабошко				ВИСНОВКИ		
<i>Н. контр.</i>	Бабошко						
<i>Затвердив</i>	Бабошко						
					МТ-22-1		

зв'язуючої суспензії та енергії її міжфазної взаємодії з частинками залізородного концентрату. Це забезпечує більш рівномірне змочування і розтікання суспензії по поверхні частинок, що, з одного боку, сприяє інтенсифікації процесів спікання, а з іншого – може призводити до зниження міцності сирих окатишів.

Найбільш оптимальна структура формується при використанні бенто-полімерних композицій. У цьому випадку розвинена дрібнопориста структура забезпечує практично повне протікання процесів окиснення, відсутність вираженої зональності та, як наслідок, підвищення міцності обпалених окатишів і покращення їх відновлюваності.

5. За результатами проведених досліджень доцільним є застосування композиційного зв'язуючого, що містить 0,30–0,4 % високоякісного бентоніту та близько 0,02 % полімеру Floform.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.В	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		2

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза/ Г.В.Губін, В.О.Півень. -Кривий Ріг,: 2009. -328с.
2. КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ з дисципліни «Технологія процесів (за фахом)» Частина I «Аглодоменне виробництво» для здобувачів вищої освіти першого (бакалавр) рівня за спеціальністю 136 Металургія за освітньо-професійною програмою «Металургія чорних металів». / Укл.: Полетаєв В.П., Похвалітій А.А. – Кам`янське: ДДТУ, 2019. – 40 с.
3. Feng, J.-x., Xie, Z.-y., & Chen, Y.-m. (2012). Temperature Distribution of Iron Ore Pellet Bed in Grate. Journal of Iron and Steel Research International, 19(2), 7– 11. [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(12\)60052-1](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(12)60052-1)
4. Смірнов О. М., Семенко А. Ю., Скоробагатько Ю. П., Горюк М. С. Основи металургії: виробництво чавуну : підручник. Одеса : Олді+, 2023. 192 с.
5. Suopajarvi H., Pongrácz E., Fabritius T. The Potential of Using Hydrogen in the Reduction of Iron Ore Pellets // International Journal of Hydrogen Energy. 2021.
6. Sridhar S., Cramb A.W. Clustering Behavior of Direct Reduction Pellets under Hydrogen-Based Reduction Conditions // Metallurgical and Materials Transactions B. 2021. Vol. 52. P. 2847–2861.
7. Application of Bentopolymer Composition as a Binder to Iron Ore Pellets Vetyugov D.A., Matveeva T.N., 2025.
8. Vetyugov D.A., Matveeva T.N. Application of Bentopolymer Composition as a Binder to Iron Ore Pellets. CIS Iron and Steel Review. 2025. Vol. 29. P. 28–32.
9. Forsmo S.P.E., Apelqvist A.J., Björkman B.M.T., Samskog P.O. Binding Mechanisms in Wet Iron Ore Green Pellets with Organic Binders. Powder Technology. 2020. Vol. 366. P. 168–177.

					КНУ.РБ.136.26.113с-08.СВД					
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ					
<i>Розробив</i>	Ільченко							<i>Літера</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
<i>Перевірів</i>	Бабошко							1	3	
<i>Н. контр.</i>	Бабошко							МТ-22-1		
<i>Затвердив</i>	Бабошко									

10. Lu L. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. 3rd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2023. 892 p.
11. International Organization for Standardization. ISO 11256: Iron Ores for Blast Furnace and Direct Reduction Feedstocks — Determination of Physical and Metallurgical Properties. Geneva: ISO, 2023.
12. Mourão M.B., Takano C., Babich A. Iron Ore Pellets for Blast Furnace and Direct Reduction Processes. Metallurgical and Materials Transactions B. 2022. Vol. 53. P. 3154–3168.
13. Heidari A., Niknahad N., Iljana M., Fabritius T. A Review on the Kinetics of Iron Ore Reduction by Hydrogen // Materials. 2021. Vol. 14. No. 23. Article 7540.
14. Li K., Zhao H., Zhou Y. Effects of Carboxymethyl Cellulose Binder on Green Pellet Strength and Indurated Pellet Quality. Materials. 2023. Vol. 16(15). P. 5348.
15. Kawatra S.K., Ripke S.J. Pelletizing of Iron Ore with Organic Binders. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2020. Vol. 41(3). P. 157–170.
16. 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.
17. Xiang Y., Peng Zh., Chen D. A new polymer/clay nano-composite hydrogel with improved response rate and tensile mechanical properties. European Polymer Journal. 2006. vol. 42. no. 9. pp. 2125-2132.
18. Обладнання і експлуатація фабрик окускування [Текст] : навч. посіб. / С. М. Петрушов, І. Ф. Русанов ; Донбаський держ. технічний ун-т. - Алчевськ : ДонДТУ, 2009. - 346 с
19. Андреева О. О. Геолого-економічний аналіз мінерально-сировинної бази бентонітових глин України: автореф. дис. канд. геолог. наук: 04.00.19 / О. О. Андреева; Київський національний університет ім. Тараса Шевченка. – К., 2011. – 20 с.

20. Hasanbeigi A., Arens M., Price L. Emerging Technologies for Iron Ore Pelletization and Their Environmental Impact. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 315. P. 128107.
21. SNF Floerger. FLOFORM™ Iron Ore Pelletization Technology. Technical Bulletin. Andrézieux-Bouthéon, France, 2022. 24 p.
22. Chen Y., Li A., Jiang S. Wettability and Mechanical Properties of Red Mud- $\text{Al}_2\text{O}_3$  Composites. Materials. 2024. Vol. 17. № 5. P. 1095.
- 0 с.