

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: Удосконалення технологічних параметрів агломераційного процесу
з метою підвищення якості марганцеворудного агломерату

Виконала студентка групи МТ-22-1

Анастасія КАШИРЕЦЬ

Керівник випускної роботи

Володимир ПЛОТНИКОВ

Нормоконтролер

Володимир ПЛОТНИКОВ

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 КАШИРЕЦЬ АНАСТАСІЇ СЕРГІЇВНИ

1. Тема роботи: Удосконалення технологічних параметрів агломераційного процесу з метою підвищення якості марганцеворудного агломерату

керівник роботи: к.т.н., доцент Плотніков В.В.

затверджено наказом по КНУ від « 19 » 02 _____ 2026 р. № 113с

2. Строк подання роботи студентом « 10 » 06 _____ 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: методичне та апаратурно-технічне забезпечення лабораторних досліджень процесу агломерації.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): дослідження температурно-часових параметрів режиму спікання марганцеворудного агломерату; дослідження та розробка технологічних рішень щодо підвищення міцнісних характеристик марганцевого агломерату; відпрацювання та впровадження технології виробництва зміцненого марганцевого агломерату шляхом ущільнення агломераційного продукту.

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання випускної кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів
1	Аналітична оцінка сучасного стану марганцеворудної сировинної бази, технологій підготовки марганцевих концентратів до металургійного переділу та процесів виплавки марганцевих феросплавів	січень 2026 р.
2	Теоретико-методологічне обґрунтування технологічних способів підвищення якості окускування марганцевої сировини методом агломерації для потреб електromеталургійного виробництва марганцевих феросплавів	лютий 2026 р.
3	Експериментально-аналітичні дослідження впливу фізико-хімічних властивостей рудної складової агломераційної шихти на умови формування структури та експлуатаційних характеристик марганцеворудного агломерату	березень 2026 р.
4	Дослідження та розробка технологічних рішень щодо підвищення міцнісних характеристик марганцевого агломерату	квітень 2026 р.
5	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	квітень 2026 р.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Анастасія КАШИРЕЦЬ

Керівник випускної кваліфікаційної роботи _____ Володимир ПЛОТНИКОВ

РЕФЕРАТ

Тема роботи : «Удосконалення технологічних параметрів агломераційного процесу з метою підвищення якості марганцеворудного агломерату»

Подана робота структурно складається з пояснювальної записки та комплексу демонстраційно-ілюстративних матеріалів. Обсяг пояснювальної записки становить 89 сторінок, у межах яких наведено 18 таблиць, 17 рисунків і проаналізовано 35 бібліографічних джерел.

Об'єктом дослідження є сукупність технологічних процесів виробництва марганцевого агломерату та подальшої виплавки феросилікомарганцю в електропічних агрегатах.

Предметом дослідження виступають технологічні методи структурно-фазового та механічного укріплення марганцеворудного агломерату.

Метою роботи є науково обґрунтована розробка та оптимізація технологічних схем і способів підвищення міцнісних характеристик марганцеворудного агломерату, удосконалення його металургійних властивостей, зниження питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів, а також зростання техніко-економічної ефективності виробництва електропічних марганцевих сплавів.

У роботі систематизовано та теоретично обґрунтовано технологічні підходи до інтенсифікації процесів формування агломерату з низькосортних окисних і карбонатних марганцевих концентратів, з урахуванням закономірностей термодинаміки, кінетики твердофазних перетворень і механізмів рекристалізації.

На основі експериментальних та аналітичних досліджень оптимізовано основні параметри процесу спікання, розроблено високоефективні ресурсозберігаючі технології зміцнення агломераційного продукту шляхом рекристалізуючого термічного відпалювання та структурного ущільнення аглоспеку. Досліджено технологічні особливості виплавки феросилікомарганцю із застосуванням зміцненого агломерату, що забезпечило суттєве поліпшення техніко-економічних показників виробництва, зокрема зниження енергоспоживання та підвищення виходу придатного сплаву.

МАРГАНЦЕВИЙ КОНЦЕНТРАТ, АГЛОМЕРАТ, МЕХАНІЧНА МІЦНІСТЬ, ФЕРОСИЛІКОМАРГАНЕЦЬ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ТЕРМОДИНАМІКА, ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ, УЩІЛЬНЕННЯ, ФЕРОСПЛАВИ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.Р		
Зм	Анк	№	Підпис	Дат			
Розробл	Каширець				Лімен	АнкVII	АнкVIII
Перевір	Плотніков					1	1
Н	Плотніков				РЕФЕРАТ		
Затвер	Бабошко				МТ-22-1		

ЗМІСТ

Вступ

Розділ 1. Аналітична оцінка сучасного стану марганцеворудної сировинної бази, технологій підготовки марганцевих концентратів до металургійного переділу та процесів виплавки марганцевих феросплавів.....

1.1. Сучасні тенденції розвитку світової та вітчизняної марганцеворудної бази і їх вплив на ресурсне забезпечення електрометалургійного виробництва

1.2. Порівняльний аналіз наявних технологічних підходів до підготовки марганцевмісної сировини до електроплавильного переділу

1.3. Технологічні особливості процесу спікання марганцеворудного агломерату в умовах виробництва

Розділ 2. Теоретико-методологічне обґрунтування технологічних способів підвищення якості окискування марганцевої сировини методом агломерації для потреб електрометалургійного виробництва марганцевих феросплавів...

Розділ 3. Експериментально-аналітичні дослідження впливу фізико-хімічних властивостей рудної складової агломераційної шихти на умови формування структури та експлуатаційних характеристик марганцеворудного агломерату.....

3.1. Термодинамічний аналіз перебігу фізико-хімічних перетворень у процесі спікання марганцеворудного агломерату

3.2. Методичне та апаратурно-технічне забезпечення лабораторних досліджень процесу агломерації.....

3.3. Дослідження температурно-часових параметрів режиму спікання марганцеворудного агломерату.....

3.4. Вплив складу та парціальних тисків компонентів газової фази на закономірності формування аглоспеку

Розділ 4. Дослідження та розробка технологічних рішень щодо підвищення міцнісних характеристик марганцевого агломерату

4.1. Розробка та експериментальне обґрунтування технології рекристалізаційного термічного відпалювання аглоспеку

4.2. Схема поліпшення властивостей марганцеворудного агломерату методом структурного ущільнення.....

4.3. Промислові випробування та дослідно-промислове освоєння технології рекристалізаційного відпалювання аглоспеку

4.4. Відпрацювання та впровадження технології виробництва зміцненого марганцевого агломерату шляхом ущільнення агломераційного продукту....

Висновки.....

Список використаних джерел

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.3		
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>			
<i>Розробл</i>	<i>Каширець</i>				<i>Лімен</i>	<i>АнкVII</i>	<i>АнкVIII</i>
<i>Перевір</i>	<i>Плотніков</i>					1	1
<i>Н</i>	<i>Плотніков</i>				ЗМІСТ		
<i>Затвер</i>	<i>Бабошко</i>				МТ-22-1		

ВСТУП

Сучасний етап розвитку світового та національного феросплавного виробництва характеризується зростаючою складністю сировинної бази, інтенсифікацією енергетичних обмежень і посиленням конкурентного тиску на ринку металопродукції, що в сукупності зумовлює об'єктивну необхідність формування нової парадигми технологічного розвитку, орієнтованої на глибоку модернізацію існуючих виробничих схем, системну оптимізацію матеріально-енергетичних потоків та забезпечення стабільного відтворення заданого комплексу фізико-хімічних і експлуатаційних характеристик готових феросплавів відповідно до уніфікованих міжнародних стандартів якості.

У цьому контексті першочергового значення набуває вирішення комплексу науково-прикладних завдань, пов'язаних із ідентифікацією металургійного потенціалу нових типів марганцевмісної мінеральної сировини вітчизняного походження, кількісною оцінкою їх термодинамічної та кінетичної поведінки в умовах високотемпературних перетворень, а також із розробленням та адаптацією принципово нових ресурсоефективних технологічних концепцій, здатних забезпечити не лише мінімізацію питомих витрат енергії й матеріалів, але й відтворюваність структурно-фазового стану продуктів плавки в межах жорстко регламентованих параметрів.

Серед усього спектра технологічних підходів до підготовки марганцеворудної сировини до електрометалургійного переділу особливе місце традиційно займає агломераційний процес, який, з огляду на його відносну універсальність, масштабованість і сумісність з електропічними схемами відновлення, залишається базовим елементом виробничої інфраструктури феросплавних підприємств. Проектна сукупна продуктивність агломераційних потужностей України оцінюється на рівні приблизно 3,2 млн т марганцевого агломерату на рік, тоді як обсяг випуску товарних марганцевих феросплавів перевищує 2 млн т, що свідчить про структурну значущість агломерації у формуванні балансу сировинних потоків галузі. Водночас багаторічна експлуатація зазначеного процесу в умовах змінної якості вихідної сировини зумовила формування стійкої тенденції до ускладнення забезпечення нормативних показників механічної міцності, газопроникності та відновлюваності агломерату, які визначають ефективність перебігу електроплавильних операцій.

Ключовою причиною зазначених ускладнень є деградація якісних характеристик мінеральної складової аглошихти, обумовлена прогресуючим виснаженням родовищ багатих окисних марганцевих руд, що, у свою чергу, призвело до системного зниження середнього вмісту марганцю у промислових концентратах, різкого скорочення частки продукції вищих сортів та зростання питомої ваги концентратів, одержаних із бідних карбонатних і полімінеральних

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.ВС					
<i>Зм</i>	<i>Анк</i>	<i>№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	ВСТУП					
<i>Розробл</i>	<i>Каширець</i>			<i>Ліпен</i>					<i>АнкVII</i>	<i>АнкVIII</i>
<i>Перевір</i>	<i>Плотніков</i>								1	2
<i>Н</i>	<i>Плотніков</i>			МТ-22-1						
<i>Затвер</i>	<i>Бабошко</i>									

формацій. За такими ключовими показниками, як масова частка марганцю, співвідношення SiO_2/Mn та концентрація фосфору, вітчизняна сировина істотно поступається імпортним аналогам, що суттєво обмежує технологічну гнучкість виробництва та негативно впливає на стабільність якісних параметрів кінцевої продукції.

Прискорене нарощування обсягів переробки низькосортних окисних і карбонатних концентратів у сучасних умовах об'єктивно трансформується в потребу розроблення спеціалізованих технологічних стратегій їх підготовки до електрометалургійного переділу, які б ґрунтувалися на врахуванні особливостей фазового складу, мікроструктурної організації та реакційної здатності компонентів рудної речовини в температурному інтервалі агломерації. Недостатній рівень підготовки такої сировини не лише детермінує підвищення енерго- та матеріаломісткості процесів виплавки та погіршення комплексу фізико-хімічних характеристик феросплавів, але й фактично унеможлиблює впровадження низки високоефективних технологічних рішень, які визнані стандартом у провідних металургійних центрах світу.

У цьому зв'язку стратегічно обґрунтованою видається необхідність переорієнтації феросплавного виробництва на домінуюче використання низькосортної окисної й карбонатної марганцевмісної сировини у поєднанні з широкомасштабною інтеграцією техногенних ресурсів — пилів, шлаків та інших вторинних продуктів збагачення і металургійної переробки, що, однак, потребує формування науково виважених технологічних рішень щодо їх структурної стабілізації, хімічної кондиціоналізації та підготовки до подальших високотемпературних перетворень.

Виходячи з наведеного, метою цієї роботи є розроблення та комплексне наукове обґрунтування сукупності технологічних схем і методів зміцнення марганцеворудного агломерату, спрямованих на керовану модифікацію його структурно-фазового стану, підвищення механічної цілісності та відновлюваності, зниження питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів і, як наслідок, істотне покращення інтегральних техніко-економічних показників виробництва електропічних марганцевих феросплавів.

1. АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ МАРГАНЦЕВОРУДНОЇ СИРОВИННОЇ БАЗИ, ТЕХНОЛОГІЙ ПІДГОТОВКИ МАРГАНЦЕВИХ КОНЦЕНТРАТІВ ДО МЕТАЛУРГІЙНОГО ПЕРЕДІЛУ ТА ПРОЦЕСІВ ВИПЛАВКИ МАРГАНЦЕВИХ ФЕРОСПЛАВІВ

1.1. Сучасні тенденції розвитку світової та вітчизняної марганцеворудної бази і їх вплив на ресурсне забезпечення електрометалургійного виробництва

У структурі промислового потенціалу територія України історично акумулювала близько 40 % сукупних виробничих потужностей феросплавної галузі. Станом на 1990 рік частка українських підприємств у загальному обсязі випуску електропічних феросплавів у межах СНД досягала приблизно 45 %, у тому числі 83,4 % марганцевих сплавів, 31,9 % кременистих феросплавів, а також 19,8 % лігатур і модифікуючих добавок, що свідчить про визначальну роль країни у формуванні міжреспубліканського балансу феросплавної продукції.

Період, що настав після 1991 року, для переважної більшості держав СНД характеризувався системною соціально-економічною кризою, яка набула всеосяжного характеру та охопила практично всі сектори промислового виробництва. Феросплавна підгалузь у цьому контексті виявилася однією з найбільш вразливих до дестабілізаційних процесів, з огляду на її надзвичайно високу ресурсо- та енергоємність, що зумовлює критичну залежність функціонування підприємств від безперебійного постачання електричної енергії, коксу, марганцевої руди та інших видів мінеральної й паливної сировини. Одночасно феросплави, будучи типовою продукцією проміжного металургійного переділу, демонструють жорстку кореляцію між обсягами виробництва та загальним рівнем ділової активності у металургійному комплексі в цілому.

У цьому зв'язку покажемо динамічний аналіз стану суміжних галузей, який засвідчує, що найглибший спад промислового виробництва в Україні припав на 1991–1995 роки. Відносно базового рівня 1990 року випуск основних видів металургійної продукції скоротився до таких величин: чавуну — до 48,9 %, сталі — до 53,2 %, прокату — до 52,9 %, коксу — до 52,4 %, залізної руди — до 55,1 %, марганцевої руди — до 46,5 %, що об'єктивно сформувало дефіцитну сировинно-ресурсну базу для стабільного функціонування феросплавних підприємств.

У виробничій структурі металургійного комплексу України функціонують три спеціалізовані феросплавні підприємства — Нікопольський, Запорізький та Стаханівський заводи, на яких зосереджено практично повний обсяг випуску кременистих і понад 80 % марганцевих феросплавів. Їх сумарна проектна потужність перевищує 2 млн т марганцевих сплавів на рік.

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.01.АО			
<i>Зм</i>	<i>Анк</i>	<i>№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ МАРГАНЦЕВОРУДНОЇ СИРОВИННОЇ БАЗИ	<i>Лімен</i>	<i>АнкVII</i>	<i>АнкVIII</i>
<i>Розробл</i>	<i>Каширець</i>						1	21
<i>Перевір</i>	<i>Плотніков</i>					МТ-22-1		
<i>Н</i>	<i>Плотніков</i>							
<i>Затвер</i>	<i>Бабошко</i>							

Проте у 2000 році фактичний обсяг виробництва феросплавів в Україні становив лише 1 133 тис. т, що відповідає приблизно 63 % рівня 1990 року. Подібне скорочення випуску може бути інтерпретоване як черговий етап розвитку кризових явищ, генезис яких значною мірою перебуває поза межами національної економіки та відображає загальносвітові тенденції трансформації ринку чорних металів.

Погіршення кон'юнктури світового ринку металопродукції загалом і марганцевих феросплавів зокрема для українських виробників було зумовлене сукупною дією ряду взаємопов'язаних чинників, серед яких визначальними є:

- стійка тенденція до зниження питомого споживання марганцю в сучасних технологіях виплавки сталі;
- стрімке нарощування металургійних потужностей у Китаї, що супроводжувалося зростанням обсягів виробництва сталі з 65,4 млн т у 1990 році до 107,6 млн т у 2000 році та марганцевих сплавів — з 715 тис. т до 1,7 млн т відповідно;
- запровадження кількісних і тарифно-цінових обмежень експорту на окремих регіональних ринках;
- істотна деградація якісних параметрів сировинної бази України упродовж останнього десятиліття, поєднана з лімітуванням енергоспоживання та високою вартістю електроенергії, яка з урахуванням плати за встановлену потужність досягала 3,47 цента США за 1 кВт·год (для порівняння: у Південно-Африканській Республіці — 2,6–2,7 цента, у Норвегії — 1,4–2,1, у Бразилії — 1,9–2,0 цента).

Останній із зазначених чинників, а саме стан та структурно-якісні характеристики марганцеворудної сировинної бази України, потребує детального та спеціалізованого аналізу.

Репрезентативна оцінка потенціалу національних ресурсів марганцевих руд набуває особливої інформативності у разі зіставлення з показниками провідних зарубіжних виробників аналогічної продукції. Відповідно до даних Міжнародного інституту марганцю, розподіл світових запасів марганцевих руд характеризується такими пропорціями, %: Україна — 21, Південна Африка — 57, Австралія — 4, інші країни світу — 11.

В умовах дефіциту вітчизняної високоякісної оксидної марганцевої сировини, що забезпечує можливість отримання концентратів із високим вмістом марганцю та низькими концентраціями фосфору і кремнезему, особливого практичного значення набуває аналіз характеристик найбільш перспективних закордонних родовищ, потенційно придатних для залучення до сировинного балансу феросплавних заводів України. Узагальнені дані щодо мінералого-хімічного складу та якісних показників марганцевих руд і концентратів провідних світових родовищ наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики деяких закордонних марганцевих руд і концентратів.

Країна	Найменування продукту	Вміст основних компонентів, %					
		Mn	Fe	SiO ₂	CaO+Mg O	Al ₂ O ₃	P
Австралія	концентр.	52,2	3,3	3,2	1,2	4,8	0,09
-“-	руда	46	3,2	6,8	н.св.	н.св.	0,09
ПАР	концентр.	51,6	8,11	3,5	н.св.	0,4	0,04
Бразилія	концентр.	35,1	3,4	8,7	н.св.	н.св.	н.св.
-“-	-“-	49,0	5,5	2,5	0,16	4,5	0,09
Габбон	концентр.	51,4	3,2	2,7	1,75	7,2	н.св.
Гана	концентр.	49,9	2,5	9,1	н.св.	3,2	0,04
Індія	концентр.	48	7,0	8,12	0,55	4,5	0,16
-“-	руда	40	н.св.	4,5	н.св.	н.св.	0,3
Мексика	руда	27,5	5,6	10,8	н.св.	н.св.	0,07
Марокко	концентр.	54,9	2,6	10,4	0,13	2,3	0,05
Болгарія	руда	27,5	1,6	21,1	8,7	3,5	0,13

Найпотужнішим у світовому масштабі родовищем високоякісних оксидних марганцевих руд вважається родовище, локалізоване на острові Грут-Айленд (Австралія), геологічно-промислові запаси якого оцінюються приблизно у 490 млн т, тоді як середньорічний обсяг видобутку стабілізувався на рівні близько 2,4 млн т, що забезпечує йому статус одного з ключових елементів глобального сировинного балансу марганцю.

Порівнянне за значенням родовище високосортних марганцевих руд зосереджене на території Габону (родовище Моанда), де підтверджені запаси становлять орієнтовно 200 млн т, а фактичний обсяг щорічного видобутку, за наявними статистичними оцінками, досягає близько 2,4 млн т, що свідчить про його стабільну інтегрованість у міжнародні ланцюги постачання сировини для феросплавної промисловості.

Менш масштабним, проте технологічно надзвичайно цінним з огляду на високий вміст корисного компонента, є бразильське родовище Каракас, запаси якого оцінюються приблизно у 50 млн т при масовій частці марганцю на рівні 43–47 %, що дозволяє відносити його до категорії висококондиційних джерел оксидної сировини.

Особливе місце у структурі світового видобутку займають родовища Постмасбург і Калахарі (Південно-Африканська Республіка), сумарні розвідані запаси яких становлять близько 311 млн т марганцевих руд із середнім вмістом марганцю близько 44 %. Саме ці геологічні об'єкти формують основу глобального ринку високосортної оксидної марганцевої сировини та значною мірою визначають цінову й ресурсну кон'юнктуру галузі.

Аналіз даних, узагальнених у табл. 1.1, засвідчує, що поряд із високоякісними рудами суттєва частина родовищ Бразилії, Індії, Мексики та ряду інших країн представлена мінеральною сировиною з пониженими якісними характеристиками. За оцінками провідних аналітичних центрів, у світовому масштабі дедалі відчутнішим стає дефіцит багатой крупнокускової марганцевої руди, що зумовило необхідність широкого впровадження операцій попереднього збагачення та залучення до промислового обігу зростаючих обсягів бідних руд. Унаслідок такої переробки масова частка марганцю підвищується з 39–42 % у вихідній мінеральній сировині до 44–49 % у товарному концентраті, що, однак, супроводжується зростанням енерго- та матеріаломісткості виробничого циклу.

У європейському регіоні найбільшим за масштабами є родовище, розташоване на території Болгарії, запаси якого оцінюються приблизно в 1 млрд т марганцевих руд із середнім вмістом марганцю близько 25 %. За мінералого-петрографічними ознаками ці руди представлені переважно карбонатними, гідратно-силікатними та гідратно-карбонатними різновидами. Після механічного збагачення отримують концентрати різної металургійної кондиційності з масовою часткою марганцю 32–34 % та вмістом фосфору на рівні 0,08–0,09 %, що обмежує можливості їх безпосереднього використання у високоефективних технологічних схемах виплавки феросплавів без додаткової підготовки.

Розвідані поклади марганцевих руд наявні також у Греції, Угорщині, Італії та колишній Югославії, проте їх сумарні запаси не перевищують 1 % світових, у зв'язку з чим вони не мають визначального впливу на формування міжнародного ринку марганцевмісної сировини.

Систематизовані відомості щодо технічних і хіміко-металургійних вимог до марганцевих руд, що використовуються у феросплавному виробництві відповідно до нормативно-технічної документації різних країн, наведено в табл. 1.2.

У межах країн СНД розподіл розвіданих ресурсів марганцевих руд характеризується істотною концентрацією в Україні, на частку якої припадає близько 75,8 % загальних запасів, тоді як Казахстан володіє приблизно 12,9 %, Грузія — 7–9 %. При цьому структурний аналіз мінерально-сировинної бази засвідчує домінування карбонатних руд, частка яких досягає 71,6 %, а також наявність змішаних, оксидно-карбонатних різновидів на рівні близько 7,6 %, що істотно ускладнює формування високоякісної агломераційної шихти без застосування спеціалізованих технологій підготовки.

Таблиця 1.2 – Технічні вимоги пропоновані до якості марганцевої сировини по нормативних документах закордонних країн

Найменування компонентів	Вміст у сировину для виплавки сплавів, %					
	Феромарганцю			Ферросилікомарганцю		
	Західна Європа		США	Західна Європа		США
	сорт 1	сорт 11	сорт "А"	сорт 1	сорт 11	сорт "Б"
Марганець, не менш	48	46	46	44	40	40
Залізо, не більш	-	7,5	8,0	9	12	16
Кремнезем, не більш	7	9	12	10	12	15
Фосфор, не більш	0,12	0,15	0,18	0,15	0,15	0,20

Таблиця 1.3 – Балансові запаси марганцевих руд країни

Держава	Найменування родовища	Тип руди	Запаси, млн.т	Вміст Mn, %	% до запасів по СНД
1	2	3	4	5	6
Україна	Нікопольське	окисна	321,9	26,8	11,2
		змішана	126,0	23,9	4,4
		карбон.	385,0	18,0	13,4
	Велике Токмакське	окисна	102,5	31,5	3,6
		змішана	56,0	27,8	2,0
		карбон.	1184,7	23,4	41,2
		Усього	2176,4	23,5	75,8
Грузія	Чиатурське	Усього	221,9	20,4	7,9
Росія	Усинське	Усього	98,5	19,6	3,4
Казахстан	Ушкатин III і Атасуйське	Усього	370,0	20,9	12,9

Як впливає з узагальнених статистико-геологічних даних, наведених у табл. 1.3, Україна посідає домінуюче положення за обсягами розвіданих запасів марганцевих руд у межах Євро-Азійського регіону. Водночас, попри формально високий рівень забезпеченості мінеральними ресурсами, внутрішня структура національної сировинної бази за мінералогічним складом характеризується виразною асиметрією на користь карбонатних і змішаних різновидів, що істотно знижує її технологічну привабливість для безпосереднього використання у феросплавному виробництві. Згідно з прогнозними оцінками, більш багаті оксидні руди діючих родовищ за умови збереження поточних темпів їх видобутку та перероблення будуть практично повністю вичерпані вже у часовому інтервалі 2010–2015 років.

На початку 1990-х років річні обсяги видобутку сировинної марганцевої руди та виробництва товарних концентратів у межах Нікопольського марганцеворудного басейну перевищували 80 % сукупного показника по республіках колишнього СРСР, що визначало його системоутворюючу роль у формуванні сировинного забезпечення феросплавної галузі. На базі цього геологічного комплексу функціонують два найбільші гірничо-збагачувальні комбінати: Орджонікідзевський, який включає сім відкритих кар'єрів і комплекс збагачувальних фабрик, а також Марганецький, до складу якого входять два кар'єри, сім шахт і дві збагачувальні фабрики. Узагальнені показники їх виробничої діяльності наведено у табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Видобуток марганцевої руди й виробництво концентратів горнозбагачувальними комбінатами Нікопольського басейну

Гірничозбагачувальні комбінати	Роки							
	1990	1991	1992	1993	1995	1998	1999	2000
Видобуток руди, тис. тонн								
Орджоникідзевський	9547	9258	8338	6723	5076	4372	н.бу д.	н.бу д.
Марганецький	6687	5945	5164	3467	2612	1333	н.бу д.	н.бу д.
Усього:	16234	15203	13502	10190	7688	5705	5119	6996
Виробництво концентратів, тис. тонн								
Орджоникідзевський: -окисні (1,1Б,11 сортів)	3587	3484	1605	1258	1757	1287	н.бу д.	н.бу д.
- окисно-карбонатні	407	398	1835	1455	207	350	н.бу д.	н.бу д.
Марганецький: -окисні (1,1Б,11 сортів)	1484	1249	246	105	727	529	н.бу д.	н.бу д.
- карбонатні	1622	1503	2133	1462	501	49	412	474
Усього:	7100	6634	5819	4280	3192	2215	2031	2740

Переважна частка вироблених марганцевих концентратів, а саме 65–75 %, споживається вітчизняними феросплавними підприємствами. Проте внаслідок поступового відпрацювання найбільш збагачених ділянок рудних тіл простежується стійка тенденція до зниження середнього вмісту марганцю у видобуваній сировині та відповідного скорочення питомої ваги концентратів вищих сортів у загальній структурі виробництва.

Зокрема, за період з 1975 по 1998 роки масова частка марганцю в рудах Нікопольського родовища зменшилася з 26,90 до 22,45 %, тобто на 4,45 абсолютних відсоткових пункти, що об'єктивно зумовило скорочення вилучення корисного компонента у процесі збагачення та деградацію якісних характеристик товарних концентратів (додаток А). Поглиблений аналіз динаміки сортового складу продукції за вказаний часовий інтервал засвідчив, що відносний вихід концентратів вищих категорій якості скоротився майже у 2,1 раза — з 67,0 до 31,5 %, тоді як частка окисних концентратів II сорту та окисно-карбонатних різновидів продемонструвала чітко виражену тенденцію до зростання.

Погіршення сортового складу марганцевих концентратів має не лише ретроспективний, але й чітко виражений пролонгований характер, що підтверджується прогнозними оцінками на перспективний період розвитку галузі.

На рис. 1.1 узагальнено відображено часову еволюцію якісних параметрів марганцевої сировини протягом останніх двох десятиліть, яка демонструє систематичну деградацію її металургійної цінності. Зокрема, зниження масової частки марганцю у товарних концентратах з 41,9 до 36,11 % є прямим наслідком глибокого структурного дефіциту високосортних оксидних руд, що традиційно слугували базовою сировиною для виробництва концентратів підвищеної якості.

Негативний вплив цього об'єктивно зумовленого природно-ресурсного чинника істотно посилюється сукупністю техногенних та організаційно-технологічних обмежень, серед яких визначальну роль відіграють уповільнені темпи оновлення виробничо-технологічної бази марганцеворудної підгалузі, хронічна невідповідність мінералого-технологічних характеристик руд, що фактично залучаються до переробки, застосовуваним схемам збагачення, а також відсутність промислово апробованих та економічно прийнятних технологій глибокого знефосфорування й знекремнювання марганцевої сировини.

За умов наростаючого дефіциту кондиційних оксидних руд проблематика підвищення якісних показників марганцевих концентратів як стратегічно важливої сировинної основи феросплавного виробництва набуває принципово нового рівня актуальності, оскільки подальше погіршення їх хімічного складу неминуче призводить до зниження ступеня вилучення цільового елемента у металургійних переділах, зростання питомих витрат відновників та енергоносіїв, а також до загального підвищення собівартості готової феросплавної продукції.

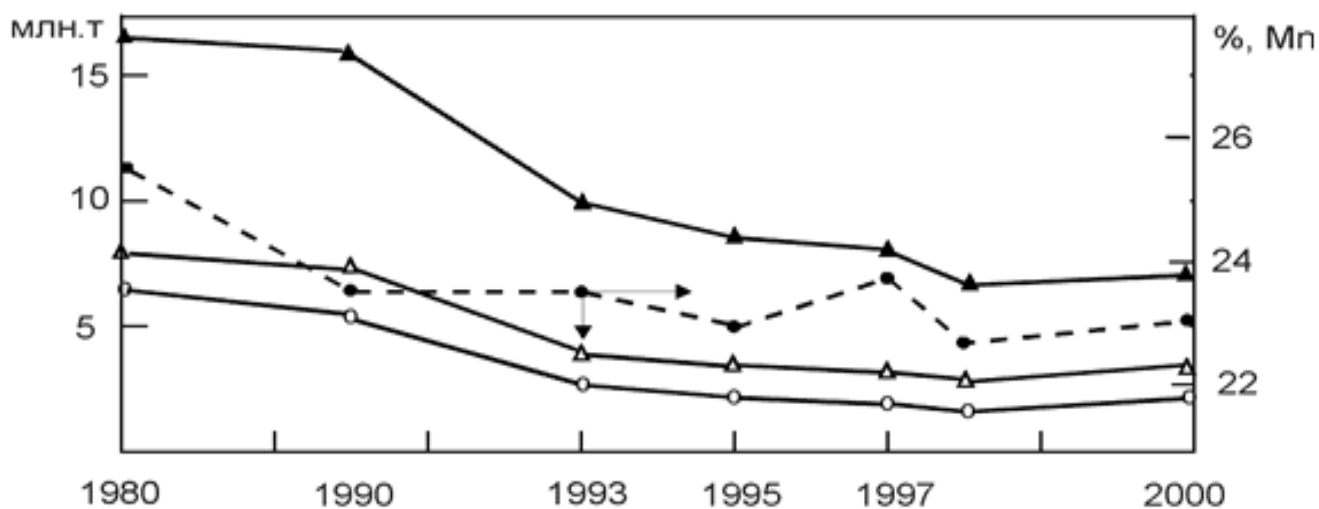


Рис. 1.1. Динаміка видобутку й переробки марганцевої сировини Нікопольського басейну, 1980-2000 рр.

Δ—Δ видобуток руди, млн.т; Δ—Δ отримано концентратів, млн.т; о— о частка концентратів вищих сортів; о --- о зміна вмісту марганцю в руді

Якісні параметри товарних марганцевих концентратів Нікопольського марганцеворудного басейну формалізуються системою нормативних показників, що включає масову частку провідного компонента – марганцю, гранично допустимі

концентрації домішкових компонентів, насамперед діоксиду кремнію та фосфору, а також розрахункові значення вологості з урахуванням втрат маси під час прожарювання (додаток Б). Разом з тим необхідно констатувати, що чинні технічні умови на марганцеві концентрати не забезпечують адекватної відповідності комплексу вимог, які об'єктивно висуваються до сировини електроферосплавним виробництвом у контексті інтенсифікації процесів відновлення та підвищення техніко-економічних показників плавки.

Зазначена невідповідність має системний характер і зумовлюється тим, що під час розроблення нормативно-технічної документації пріоритет надається не експлуатаційним потребам металургійних агрегатів і вимогам до хімічної чистоти сировини, а фактичному стану мінерально-сировинної бази та поточним технологічним можливостям збагачувального виробництва. Унаслідок цього сформувалася ситуація, за якої рівень підготовки марганцевої сировини до електрометалургійного переділу детермінується, з одного боку, науково-технічним рівнем застосовуваних процесів дроблення, збагачення та агломераційної обробки, а з іншого – реальним хімічним складом концентратів, який, як було продемонстровано раніше, характеризується стійкою тенденцією до деградації у часовому аспекті.

1.2. Порівняльний аналіз наявних технологічних підходів до підготовки марганцевмісної сировини до електроплавильного переділу

В умовах структурного дефіциту високосортної марганцеворудної сировини проблематика підвищення її якісних характеристик набуває першочергового значення, оскільки саме з рівнем хімічної кондиційності концентратів безпосередньо корелюють втрати провідного елемента у феросплавному переділі, зростання питомих витрат відновників, електроенергії та допоміжних матеріалів, а також зниження продуктивності електропечей.

Систематичне погіршення сортового складу марганцевих концентратів, зумовлене збільшенням частки тонкодисперсних продуктів флотаційного, пінного та магнітного збагачення, а також залученням до виробничого циклу значних обсягів вторинних техногенних матеріалів – пилів і шлаків, упродовж останніх років істотно ускладнило забезпечення стабільності хімічного складу шихти та відтворюваності параметрів електроплавки. У зв'язку з цим завдання вдосконалення технологічних підходів до підготовки марганцевої сировини до металургійного переділу трансформується з локальної виробничої проблеми у комплексну науково-технічну задачу галузевого масштабу.

Як правило, рівень якості марганцевих концентратів, що постачаються споживачам, регламентується положеннями відповідних технічних умов, які визначають допустимі інтервали коливань основних фізико-хімічних показників та гранулометричного складу продукції.

Таблиця 1.5 – Гранулометричний склад марганцевих концентратів Нікопольського басейну, % (по масі)

Фракція, мм	Оксидний гравітаційний			Карбонатний
	Сорт А	1 сорт	11 сорт	
+25	2,49	10,76	8,66	-
25-8	32,33	17,89	10,02	-
8-5	26,62	35,96	15,33	-
5-3	19,7	5,06	6,90	-
3-0,5	13,81	22,67	41,85	65,92
0,5-0,2	4,88	5,28	13,85	18,46
8-0,2	-	2,38	-	-
0-0,2	-	-	3,40	15,62

Незважаючи на сукупність об'єктивних чинників, окреслених вище, фактичні показники якості марганцевих концентратів у переважній більшості випадків не досягають рівня, детермінованого нормативно-технічними та експлуатаційними вимогами кінцевих споживачів мінеральної сировини. Зокрема, частка продукції так званої технологічно кондиційної гранулометричної фракції з розміром частинок понад 8 мм, яка може бути безпосередньо залучена до процесів виплавки марганцевих сплавів у рудовідновних електропечах без застосування попередніх операцій підготовки, залишається вкрай обмеженою та становить: для концентрату першого ґатунку — не більше 20 %, а для концентрату другого ґатунку — у сукупності близько 18–19 % від загального обсягу продукції, що формується збагачувальними підприємствами.

Використання у металургійних електропечах дрібнодисперсних і водонасичених концентратів, вміст вологи в яких відповідно до чинних технічних умов допускається на рівні 14–23 %, є не лише економічно невиправданим і технологічно нераціональним, але й супроводжується підвищеними ризиками з позицій промислової безпеки, оскільки присутня волога виступає джерелом утворення водню в робочому просторі печі та інтенсифікує небажані побічні реакції.

У зв'язку з цим практично весь обсяг вироблюваних концентратів, а в умовах понижених температур навколишнього середовища — особливо в осінньо-зимовий період, піддається попередній термічній обробці у печах киплячого шару з метою редукції масової частки вологи до рівня 8–9 % порівняно з вихідними значеннями 16–18 %. Концентрати, які після сушіння характеризуються крупністю понад 8 мм, можуть бути безпосередньо використані як шихтовий компонент у рудовідновних електропечах або ж у складі загального матеріального потоку спрямовуватися на стадію агломерації для подальшої підготовки до металургійного переділу.

Таблиця 1.6 – Гранулометричний склад мілкодисперсних концентратів Нікопольського басейну, % (по масі)

Фракція, мм	Процент				
	Пінної сепарації	Флотаційни й 1 сорту	Флотаційний 11 сорту	Зворотної флотації	Хімічного збагачення
1-0,5	17,06	-	-	-	-
0,5-0,6	61,45	-	-	-	-
0,2-0,074	19,58	51,15	50,0	69,76	-
0-0,0074	1,11	48,85	50,0	30,84	100,0

У практиці вітчизняної феросплавної промисловості серед сукупності відомих технологічних підходів до підготовки марганцевих концентратів до металургійного переділу найбільш повно освоєним у промислових масштабах та економічно обґрунтованим залишається процес агломерації. Саме цьому способу піддається переважна частка загального обсягу концентратів, тоді як лише незначна кількість тонкодисперсних компонентів — передусім пилоподібні фракції та шлами з розміром частинок менше 5 мм — залучається до альтернативних схем окускування, зокрема брикетування або грануляції.

Брикетування, поряд із виконанням функції формування кускового продукту, розглядається як ефективний інструмент утилізації вторинних марганцевовмісних ресурсів, що утворюються на різних стадіях технологічного циклу. Комплексні дослідження, виконані фахівцями Національної металургійної академії України спільно з науковими колективами Грузинського політехнічного інституту, засвідчили наявність низки технологічних переваг застосування брикетованих концентратів і так званих моношихтових брикетів, що інтегрують у своєму складі всі необхідні компоненти для відновлення та сплавоутворення, під час виплавки марганцевих феросплавів, зокрема силікомарганцю, вуглецевотермічним способом.

Перші систематизовані результати досліджень із великомасштабного брикетування марганцевих концентратів та подальшого використання отриманих агломератів у феросплавному виробництві були опубліковані у працях Г.Б. Ширера та М.П. Лякішева. Зокрема, у 1957 р. на Криворізькій брикетувальній фабриці було здійснено формування брикетів із джездинського концентрату крупністю 0–5 мм, що характеризувався вмістом марганцю 30,9 % та діоксиду кремнію 26,95 %. Проведені на електропечі потужністю 2,5 МВА Запорізького феросплавного заводу дослідно-промислові плавки переконливо підтвердили доцільність залучення рудних брикетів до складу шихти при виробництві силікомарганцю.

Подальший розвиток напрямку брикетування був пов'язаний з роботами З.А. Сімонгулова, С.М. Мазмішвілі та їхніх співробітників, якими у середині 1970-х років була запропонована технологія отримання марганцевовмісних рудовугільних брикетів із підвищеними показниками механічної міцності (80–120 Н на брикет) та термічної стабільності з використанням сульфід-спиртової барди як зв'язувального матеріалу. Реалізацією цих напрацювань стало спорудження у 1976 р. на Зестафонському заводі феросплавів спеціалізованої брикетувальної фабрики,

оснащеної двома пресами сумарною продуктивністю до 70 т/год, призначеної для переробки концентратів фракції 0–5 мм у поєднанні з вугільним дріб'язком розміром 0–3 мм з формуванням брикетів характерного розміру близько 45 мм.

Ефективність застосування рудовугільних брикетів, виготовлених на основі карбонатних концентратів Чіатурського родовища, була додатково підтверджена експериментальними дослідженнями, результати яких засвідчили підвищення техніко-економічних показників виплавки товарного силікомарганцю порівняно з використанням традиційного агломерату. Водночас необхідність попереднього випалу концентратів за температур 850–900 °С істотно ускладнює технологічну схему та знижує загальну економічну ефективність процесу.

У низці робіт також було продемонстровано можливість спільного брикетування некондиційних металургійних продуктів (дріб'язок силікомарганцю, металоконцентрати фракції до 5 мм) разом із пилом газоочисних установок і шламами, що за оптимізованих пропорцій дозволяє формувати конструкційно стійкі брикети, придатні для повторного введення у металургійний цикл.

Загалом брикетування, на відміну від більшості інших методів підготовки шихтових матеріалів, забезпечує не лише укрупнення дисперсної сировини, а й формування сприятливих умов для перебігу фізико-хімічних процесів у робочому просторі печей, включаючи інтенсифікацію відновлення провідних елементів, зниження вмісту шкідливих домішок та стабілізацію газодинамічного режиму, що в сукупності потенційно сприяє покращенню техніко-економічних параметрів електроплавильних агрегатів і підвищенню якості готових сплавів.

Разом із тим промислове впровадження брикетування як домінуючого способу окускування марганцевовмісної сировини суттєво обмежується низкою технічних та технологічних бар'єрів. До них належать відсутність у вітчизняному машинобудуванні серійного виробництва високопродуктивних брикет-пресів, жорсткі вимоги до гранулометричного складу та вологості шихти (не більше 3–5 мм і 7–8 % відповідно), недостатня стійкість брикетів до багаторазових перевантажень під час транспортування, а також дефіцит і складність логістики зв'язувальних матеріалів.

З огляду на накопичений досвід підготовки залізородної сировини, альтернативним підходом до окускування тонкодисперсних матеріалів є процес окатування, який особливо ефективний при переробці флотаційних концентратів і пилів. Фахівцями інституту «Механобрчермет» були розроблені та апробовані режими низькотемпературного сушіння (120–150 °С) та зміцнювального випалу окатишів із марганцевих карбонатних концентратів, що дозволило отримувати гранули діаметром 6–12 мм з міцністю до 1,5 кН на окатиш.

Суттєвий внесок у дослідження технології окатування марганцевих концентратів зробили грузинські науковці, які на тарілчастих грануляторах досягли стабільної продуктивності до 1,2 т/год із формуванням механічно стійких гранул. Аналогічні результати були отримані при переробці пилів сухих газоочищень із вмістом марганцю понад 33 %.

У 1980-х роках у Дніпропетровському металургійному інституті під керівництвом С.І. Хитрика було реалізовано експериментальну схему виробництва

обпалених окатишів із тонкодисперсного флотаційного концентрату Нікопольського родовища, що дозволило досягти продуктивності грануляції 16–18 т/год без застосування зв'язувальних добавок.

Водночас значні енергетичні витрати, пов'язані з термічним розкладанням карбонатів та вищих оксидів марганцю, зумовили доцільність застосування високотемпературного випалювального режиму (1150–1220 °С), за якого формується рідка фаза, що цементує структуру окатишів.

Незважаючи на перспективність зазначених технологій, упродовж останніх десятиліть систематичні дослідження в галузі окатування марганцевих концентратів практично припинилися. Проте в умовах посилення екологічних вимог до металургійного виробництва проблема утилізації марганцевовмісних пилів і шламів зберігає актуальність, оскільки їхній питомий вихід сягає 16–18 кг на тону сплаву, причому понад 70 % частинок мають розмір менше 0,05 мм.

На території України промислове окомкування таких відходів було реалізоване лише на одному підприємстві — Запорізькому феросплавному заводі, де у 1990-х роках було введено в експлуатацію установку з тарілчастим гранулятором продуктивністю до 3 т/год з використанням технічного лігносульфонату як в'язучого. Однак і тут виникли труднощі, пов'язані з транспортуванням і дозуванням тонкодисперсних матеріалів та забезпеченням стабільних властивостей зв'язувальних компонентів, особливо в зимовий період.

Окремим напрямом підготовки марганцевої сировини є попередній випал кускових карбонатних концентратів з метою зниження питомих витрат електроенергії на дисоціацію карбонатів у печах і запобігання дезінтеграції шматків у зоні колошника. Однак експериментальні випробування, проведені в лабораторних і напівпромислових електропечах за температур до 1000 °С, показали, що інтенсивне термічне розтріскування матеріалу призводить до утворення до 50 % фракції 0–10 мм, непридатної для безпосереднього використання в електропечах і такої, що потребує додаткового окускування.

У підсумку можна констатувати, що в сучасній структурі виробництва марганцевих феросплавів практично відсутні універсальні агрегати, здатні забезпечити реалізацію альтернативних методів підготовки сировини у необхідних масштабах, за винятком агломерації, яка залишається домінуючим і технологічно стабільним способом окускування марганцевородних матеріалів.

Саме агломерація, починаючи з перших науково-технічних розробок, виконаних наприкінці, поступово набула статусу базової технології підготовки концентратів. Упродовж кількох десятиліть виробництво марганцевого агломерату здійснювалося на низці підприємств, зокрема на агломераційних машинах Запорізького абразивного комбінату та Богданівської аглофабрики ОГОКа.

Сумарний річний випуск марганцевого агломерату на підприємствах до початку 1990-х років перевищував 3 млн т, що фактично охоплювало весь обсяг виробництва відповідної продукції на території України та більшості країн СНД.

Наразі марганцевий агломерат промислово виготовляється лише на двох аглофабриках — Богданівського ГЗК та Нікопольського заводу феросплавів, де випускають неофлюсований матеріал природної основності (0,3–0,5) у двох

варіантах, а також офлюсований агломерат, вимоги до якості якого регламентуються чинними нормативними документами та узагальнені у відповідних табличних даних табл.1.7.

Таблиця 1.7 – Вимоги до якості неофлюсованого й офлюсованого марганцевого агломерату виробництва аглофабрики «НЗФ»

Найменування показника якості	Марка агломерату		
	АМНВ-35	АМНВ-40	АМ-46
Масова частка марганцю, % (не менш)	35,0	40,0	46,0
Крупність, мм	5-200	5-200	5-200
Масова частка класу 0-5 мм, % (не більш)	24 (5,8)*	24 (8,0)	20 (5,0)
Міцність, % (по вмісту фракції +5 мм, не менш)	72,0	72,0	76,0

Відомості щодо технологій окускування марганцевих руд і концентратів, що застосовуються у зарубіжній металургійній практиці, у вітчизняних науково-технічних джерелах висвітлені фрагментарно та недостатньо систематизовано. Водночас, за узагальненими даними профільних дослідницьких установ чорної металургії, використання окускованої марганцевої сировини у вигляді агломерату, окатишів і нодулів у поєднанні з фракціонованою кусковою рудою при виплавці марганцевих сплавів за кордоном розглядається як один із найбільш значущих технологічних зсувів у розвитку феросплавного виробництва.

Така оцінка зумовлюється, передусім, тим, що проплавлення нефракціонованих марганцевих руд, які містять значну кількість дрібнодисперсних класів, у великогабаритних закритих електропечах супроводжується суттєвим погіршенням газодинамічного режиму, частими неконтрольованими викидами пічних газів, вибухоподібними явищами та аварійними ситуаціями, наслідком яких стають тривалі простої технологічного обладнання і зниження загальної ефективності виробництва.

З метою мінімізації зазначених негативних проявів австралійською компанією *Broken Hill Proprietary* на виробничому майданчику в місті Ньюкасл було здійснено комплекс експериментальних досліджень зі спікання марганцевого агломерату з концентратів родовища Грут-Айленд. У випробуваннях використовувалися матеріали гранулометричних класів 1–6 та 3–11 мм, які змішувалися у різних співвідношеннях. Отримані результати засвідчили, що зі зростанням частки фракції 3–11 мм у складі шихти питома продуктивність агломераційних установок зменшується приблизно на 35 %. З урахуванням наведених рекомендацій на сучасному етапі на заводі Бел-Бей для агломерації застосовується суміш дрібних фракцій концентратів збагачувальної фабрики Грут-Айленд крупністю 1–9 мм та відсівів класу 0–9 мм, що утворюються при грохоченні крупнокускової руди.

Ще більш тонкодисперсна сировина — фракція 0–6 мм — піддається агломерації на одному з феросплавних підприємств Канади, що свідчить про

орієнтацію закордонних виробників на максимальне вилучення в металургійний обіг дрібних класів концентратів.

Окремий науково-практичний інтерес становить технологія нодулювання карбонатних марганцевих концентратів родовища Моланко (Мексика), за якої руда після промивання та подрібнення до крупності близько 15 мм послідовно проходить стадії сушіння, окомкування та випалу в одному агрегаті — горизонтальній обертовій барабанній печі. Дані щодо продуктивності зазначеної установки у відкритих джерелах не наводяться, однак сам факт інтеграції декількох операцій в єдиний апарат свідчить про прагнення до інтенсифікації підготовчих процесів.

Оскільки більшість зарубіжних виробників марганцевих феросплавів використовує у шихті рудовідновних електропечей високоякісні крупнокускові руди та концентрати фракцій 6–75 або 10–75 мм, окускування у таких технологічних схемах відіграє допоміжну роль і реалізується переважно з метою утилізації відсівів дрібних класів (0–6 мм), пилів, шлаків та високозбагачених марганцем шлаків, що генеруються у процесі виробництва.

Таким чином, порівняльний аналіз сучасних методів підготовки марганцевої сировини до електроплавки переконливо демонструє, що вітчизняні руди та концентрати, з огляду на їхній мінералогічний тип, хімічний склад і несприятливі гранулометричні характеристики, об'єктивно потребують розроблення та впровадження спеціалізованих, технологічно ефективних і економічно доцільних способів окускування.

1.3. Технологічні особливості процесу спікання марганцеворудного агломерату в умовах виробництва

Процес агломерації марганцевих концентратів, що надходять на Нікопольський завод феросплавів, реалізується на спеціалізованій аглофабриці, до складу якої, окрім допоміжної інфраструктури, входять чотири агломераційні машини з середньою продуктивністю близько 100 т/год кожна.

У зоні, що безпосередньо прилягає до горна, над аглострічкою змонтовані теплові екрани довжиною близько 6 м, виконані з вогнетривкої цегли, функціональне призначення яких полягає у зменшенні інтенсивності термічного удару, що діє на розжарений поверхневий шар агломераційного спеку. У хвостовій частині кожної машини встановлено щоккову дробарку, де аглоспек подрібнюється до максимального розміру частинок не більше 200 мм, після чого матеріал транспортується на зливний охолоджувач, піддається охолодженню, грохоченню та спрямовується у плавильні цехи.

Подача сировинних матеріалів у агломераційний корпус здійснюється практично без попередньої операції їх технологічного усереднення. Часткове вирівнювання складу можливе лише за рахунок розподілу концентратів між декількома шихтовими бункерами та одночасного дозування на збірну конвеєрну стрічку з двох або більше дозаторів.

Відсутність повноцінної системи усереднення марганцевої сировини суттєво ускладнює забезпечення стабільності хімічного складу та споживчих характеристик агломерату. Додатково негативний вплив чинить використання

нефракціонованих за крупністю концентратів, що призводить до погіршення як технологічних показників процесу спікання, так і механічних та металургійних властивостей готового продукту.

Вимоги до якості агломерату регламентуються корпоративним стандартом підприємства (табл. 1.7), тоді як фактичні межі варіації хімічного та гранулометричного складу марганцеворудної сировини, що надходить на агломерацію, а також одержаних з неї агломератів, наведені у табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Гранулометричний склад марганцевих концентратів, які постачають на аглофабрику ВАТ «НЗФ»

Тип (сорт) марганцевого концентрату	Масова частка фракції, %			
	5-0 мм	10-5 мм	20-10 мм	+20 мм
Окисні ІБ сорту	28,2-29,6	28,8-30,5	23,2-28,7	16,7-19,3
Окисні ІІ сорту	35,8-63,0	13,0-32,3	8,5-23,0	7,5-32,4
Карбонатні	17,1-31,5	13,0-32,3	15,0-27,3	29,3-71,2

Узагальнення результатів хімічного аналізу та гранулометричного розсіву марганцевих концентратів Нікопольського басейну, наведених у табл. 1.8 та додатках В і Г, переконливо засвідчує відсутність стабільності як у компонентному складі, так і в розподілі за класами крупності, які характеризуються значною варіабельністю у часовому інтервалі спостережень. Зокрема, для концентратів першого та другого сортів частка фракції з розміром частинок понад 10 мм протягом доби коливається у межах 30–40 %, тоді як для карбонатного концентрату амплітуда змін є істотно ширшою і сягає 30–78 %.

Очевидно, що подібна флуктуаційна нестійкість навіть одного лише гранулометричного складу не може не чинити дестабілізуючого впливу на перебіг процесу агломерації та на формування структурно-механічних властивостей кінцевого агломераційного продукту. Ситуація додатково ускладнюється зниженими значеннями насипної густини агломераційної шихти, що для сумішей окисних і карбонатних концентратів при вологості близько 10 % становить лише 1450–1490 кг/м³ (для порівняння, для шихт, сформованих із концентратів сортів І і ІБ, цей показник перебуває на рівні 1570–1600 кг/м³), а також підвищеними втратами маси при прожарюванні, які досягають 15–20 % навіть за частки карбонатного компоненту не більше 40 %. Сукупність зазначених факторів істотно ускладнює підтримання стаціонарного теплотехнологічного режиму та стабільних експлуатаційних параметрів агломераційного процесу.

Особливо жорсткі вимоги в умовах промислової експлуатації висувуються до міцнісних характеристик марганцевого агломерату як одного з ключових показників його придатності до використання у рудовідновних електропечах. Зростання частки карбонатних концентратів у складі аглошихти, поряд із негативним впливом на кінетику та інтенсивність процесу спікання, зумовлює помітну деградацію механічної стійкості готового продукту. На рис. 1.2–1.4 наведено результати експериментально-промислових досліджень, що ілюструють

залежність міцності агломерату та питомої продуктивності агломашин від вмісту крупної фракції (понад 10 мм) і частки карбонатних концентратів у рудній складовій шихти. Отримані закономірності однозначно свідчать про систематичне погіршення обох показників із підвищенням зазначених параметрів.

Збільшення концентрації карбонатних фаз у спікаємій суміші призводить до істотного порушення теплового балансу процесу внаслідок додаткових ендотермічних витрат енергії на термічну дисоціацію карбонатів, гідратів і гідрокарбонатів. За таких умов максимальні температури в зоні спікання знижуються, а тривалість перебування матеріалу у високотемпературному інтервалі скорочується. Подальше інтенсивне охолодження фіксує мікроструктуру аглоспеку на проміжній стадії усадки, що особливо характерно для приповерхневих шарів шару спікання і сприяє формуванню високопористої, слабо консолідованої структури з різко зниженою міцністю. Сформований таким чином агломерат характеризується підвищеною крихкістю, наявністю великих і глибоких, часто наскрізних пор, що істотно обмежує його технологічну цінність.

Додатковою специфічною особливістю спікання шихт із високим вмістом карбонатних концентратів є інтенсивне газоутворення, зумовлене дисоціацією карбонатів марганцю та кальцію, яке супроводжується значним розпушенням шару матеріалу в процесі агломерації та перешкоджає формуванню щільного, структурно стійкого спеку.

Кількісна оцінка впливу карбонатного компонента свідчить, що зі зростанням його частки у складі аглошихти вихід придатного продукту з аглоспеку зменшується з приблизно 69 % (за вмісту 10 %) до 48 % (за вмісту 80 %), тоді як питома продуктивність агломашин одночасно знижується з 1,10 до 0,95 т/(м²·год), що відображено на рис. 1.2. Паралельно фіксується зростання питомої витрати палива. Практично кожне додаткове підвищення частки карбонатного концентрату на 10 % спричиняє зменшення міцності агломерату на 0,6–0,7 %, збільшення вмісту дрібних класів на 2,0–2,2 % та зниження виходу кондиційної фракції розміром 5–200 мм (рис. 1.3).

Подальше ускладнення умов агломерації спостерігається за рахунок підвищення вмісту концентратів неагломераційного класу, тобто фракцій із розміром частинок понад 10 мм. Як показано на рис. 1.4, зростання частки інтервалів 10–20 мм і понад 20 мм призводить до одночасного зниження як продуктивності агломераційних машин, так і механічної міцності агломерату.

Разом із тим встановлено, що збільшення вмісту фракції понад 20 мм може супроводжуватися певним, відносно незначним підвищенням продуктивності агломашин, однак такий ефект має суто формальний характер і нівелюється різким погіршенням міцнісних властивостей продукту. Частинки зазначеної крупності не зазнають повної асиміляції рудним розплавом у зоні спікання і, виконуючи роль локальних концентраторів механічних напружень, ініціюють руйнування вже сформованих придатних кусків агломерату. З огляду на це наявність фракції понад 20 мм у складі спікаємих концентратів слід розглядати як технологічно небажану та економічно недоцільну.

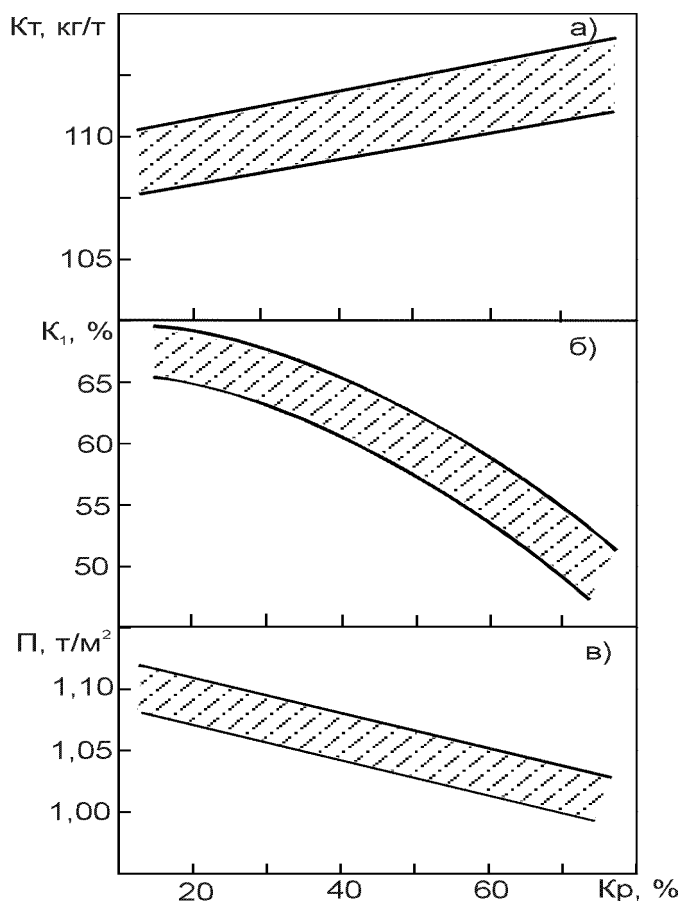


Рис.1.2. Залежність питомої продуктивності агломашини (в), виходу придатного агломерату з аглоспеку(б) і питомої витрати палива (а) від вмісту карбонатного концентрату в аглошихті

Характерною особливістю перебігу процесу агломерації марганцеворудних шихт є хронічна недостатність теплопідведення у верхній зоні шару спіку, внаслідок чого температурний рівень спікання у приповерхневих горизонтах, як правило, не перевищує 1100–1170 °С. За таких термодинамічних умов кількість сформованої рідкої фази виявляється недостатньою для повноцінної асиміляції твердих компонентів, що зумовлює збереження значної частки первинних, практично не залучених до процесу спікання зерен концентрату. Після завершення окиснювального вигорання коксового дріб'язку, об'ємна частка якого в аглошихті сягає близько 15 %, неспечена маса піддається інтенсивному охолодженню внаслідок фільтрації холодного атмосферного повітря через пористе середовище шару.

У результаті цього верхня зона аглоспеку, що становить орієнтовно 12–15 % його загальної висоти, формується у вигляді високопористої структури, складеної з частково оплавлених уламків концентратів, з'єднаних між собою слабкорозвиненими крихкими склоподібними міжзерновими перемичками. Така морфологічна неоднорідність і недосконалість фазового зрощення зумовлюють низькі показники механічної міцності агломерату, які зазвичай не перевищують 64–

66 %, унаслідок чого після операції грохочення основна маса матеріалу переходить у клас зворотних відходів.

Найбільш виражено дефіцит теплової енергії проявляється при агломерації шихт, сформованих на основі суміші окиснених та карбонатних концентратів, за умов, коли частка останніх перевищує 20 %, а вміст фракції неагломераційного класу з крупністю понад 10 мм досягає 70 %. Для таких композиційних систем тепловий дисбаланс набуває системного характеру і, як правило, фіксується практично по всій товщині агломераційного шару, що істотно обмежує можливість формування щільного, структурно однорідного та механічно стійкого агломерату.

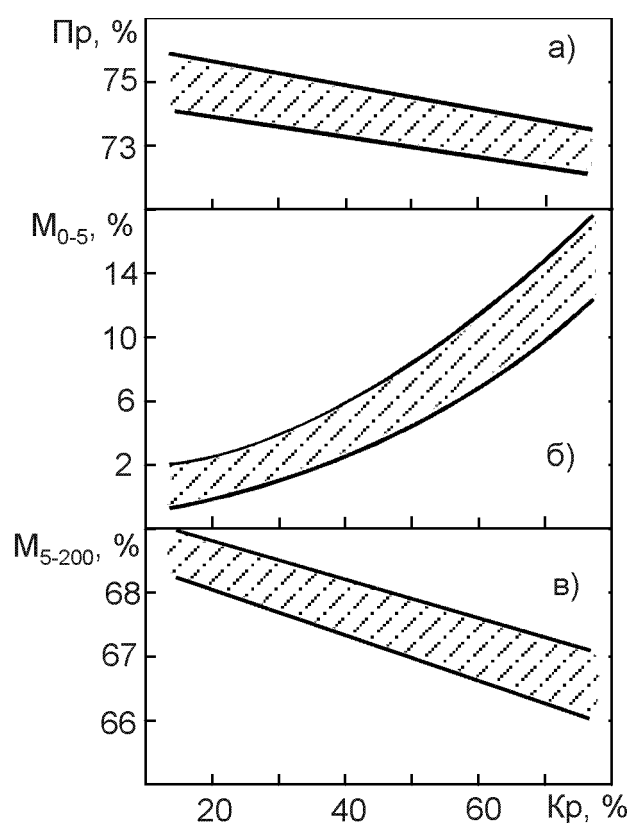


Рис. 1.3 Зміна міцності агломерату (а), масової частки дріб'язку фракції 0-5 мм (б) і кондиційної фракції 5-200 мм (в) у придатному агломераті від вмісту карбонатного концентрату в аглошихті.

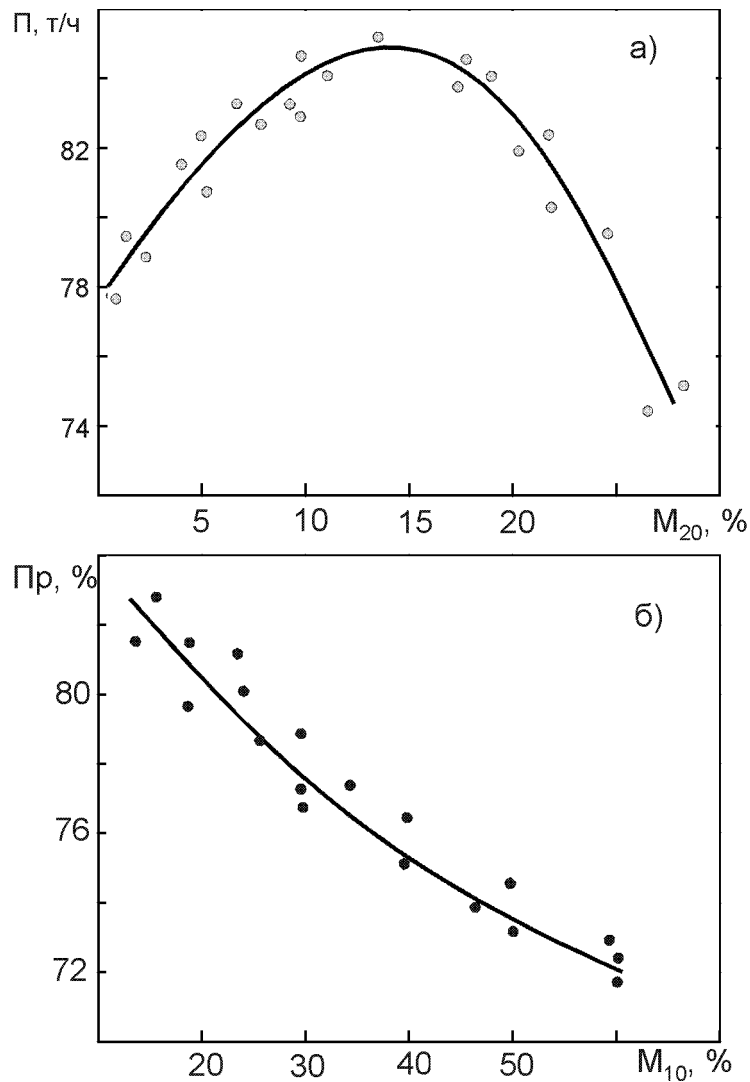


Рис. 1.4. Залежність продуктивності агломашин (а) і міцності агломерату (б) від крупності марганцевих концентратів.
 M_{10} - фракція +10 мм; M_{20} - фракція +20 мм

Певний позитивний технологічний ефект забезпечує використання теплового екрана, змонтованого безпосередньо за горновою зоною агломераційної машини, однак зазначений захід лише частково компенсує інтенсивність термічного удару, якому піддається приповерхнева область аглоспеку внаслідок різкого контакту з холодним газовим потоком.

Результати петрографічних досліджень зразків агломерату, одержаного з окисно-карбонатних концентратів і відібраного з різних горизонтів шару спікання, свідчать про суттєву структурно-фазову неоднорідність матеріалу за висотою шару. Так, верхня зона аглоспеку характеризується переважанням слабкостечених і лише частково термічно оброблених агрегатів, у яких зберігається первинна морфологія зерен вихідної руди. Карбонатні рудні уламки марганцю з крупністю понад 10 мм зазнають лише неповної дисоціації, унаслідок чого в їх об'ємі формується розгалужена система тріщин, а в окремих випадках відбувається їх фрагментація на

дрібніші частинки. Кількість мінерального в'язучого у цій зоні незначна й представлена переважно аморфною склоподібною фазою.

Середній горизонт аглоспеку функціонує в умовах більш сприятливого теплового балансу, що зумовлено регенерацією теплової енергії з верхніх шарів і збільшенням тривалості перебування матеріалу в інтервалі підвищених температур. За таких умов формується достатній об'єм рідкої фази, а тонкодисперсні компоненти шихти встигають вступити у хімічну взаємодію з подальшою кристалізацією продуктів реакцій. Водночас у структурі агломерату цієї зони до 40 % об'єму припадає на склоподібне в'язуче, що виконує роль основного цементуючого компонента. Марганець тут локалізується як у складі зв'язаних, так і у формі вільних оксидів, переважно представлених гаусманітом, тоді як манганозит фіксується лише у вигляді поодиноких мікрочастинок. Механічна міцність агломерату середньої зони дещо перевищує відповідний показник верхнього шару і перебуває на рівні 72–74 %.

Найбільш сформовані та механічно стійкі різновиди агломерату (76–78 %) локалізуються в нижній частині спеку, яка акумулює максимальну кількість тепла внаслідок інтенсивної регенерації з верхніх горизонтів. Це забезпечує досягнення вищих пікових температур і значне прискорення твердофазних та рідкофазних реакцій. За винятком поодиноких уламків крупністю понад 20 мм, головним чином карбонатної природи, більшість компонентів шихти встигає повністю прореагувати з подальшим упорядкованим кристалоутворенням. Фазовий склад цієї зони формується переважно гаусманітом (до 60 %), який утворює компактні скупчення великих і дрібних кристалів, тефроїтом, твердими розчинами оксидів кальцію та марганцю, а також силікатною фазою і склом (до 30 %), розміщеним у вигляді прошарків між кристалічними агрегатами. Вміст манганозиту при цьому майже вдвічі перевищує аналогічний показник для середньої зони. Разом з тим у мікроструктурі агломерату досить часто виявляються локальні скупчення карбонатів кальцію і навіть гідрокарбонатних фаз, які не встигли зазнати повної термічної дисоціації.

У підсумку кондиційний агломерат зберігає у своїй структурі до 40 % вихідних карбонатних мінералів від загальної маси введеної карбонатної сировини. Силікатне в'язуче приблизно на 30 % представлене крихким аморфним склом, двокальцієвим силікатом, вільною оксидною формою кальцію, що не залучилася до реакцій, а також іншими другорядними фазовими складовими. Руйнування агломерату переважно ініціюється у ділянках із підвищеною концентрацією склоподібною фазою та двокальцієвого силікату, які виступають зонами локалізації внутрішніх напружень.

Показники механічної міцності агломерату характеризуються значною варіабельністю: для продукції марки АМНВ-1 вони змінюються в інтервалі 72–80 %, тоді як для марки АМНВ-2 — у межах 68–78 %. Вміст дрібної фракції розміром 0–5 мм у матеріалі, що подається в електропіч, також коливається у широких межах — від 8 до 22 %.

З огляду на викладене, розроблення та впровадження комплексу технологічних заходів, спрямованих на повне або хоча б часткове нівелювання

негативного впливу зазначених факторів на перебіг процесу агломерації та формування структурно-механічних властивостей агломерату, є важливою науково-практичною задачею, вирішення якої здатне істотно полегшити умови виробництва як агломераційної продукції, так і марганцевих феросплавів, одночасно забезпечивши зниження питомих енергетичних витрат на одиницю готової продукції.

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.01.АО	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		21

2. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОКУСКУВАННЯ МАРГАНЦЕВОЇ СИРОВИНИ МЕТОДОМ АГЛОМЕРАЦІЇ ДЛЯ ПОТРЕБ ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА МАРГАНЦЕВИХ ФЕРОСПЛАВІВ

Процес агломераційного перетворення марганцеворудних матеріалів, подібно до аналогічних термохімічних процесів формування окускованих структур з інших видів мінеральної сировини, у фундаментальному сенсі детермінується складною системою теплообмінних взаємодій між твердою багатофазною дисперсною матрицею шихтового шару та газовим середовищем, що фільтрується крізь його поровий простір. Саме просторово-часова еволюція теплових потоків, закономірності їх генерації в зоні горіння твердого палива, подальшого перенесення, часткової акумуляції та дисипації визначають температурне поле в об'ємі шару, що, у свою чергу, обумовлює термодинамічні передумови та кінетичні умови перебігу комплексу фізико-хімічних перетворень, ступінь їх завершеності, морфологію фазових утворень, а також інтегральні показники швидкості формування аглоспеку та експлуатаційної якості кінцевого агломерату.

Тепловий режим агломераційного процесу не є автономною характеристикою, а формується як результат багатовимірної взаємодії між сукупністю фізичних, хімічних і теплофізичних властивостей компонентів шихти, питомою витратою та реакційною здатністю твердого палива, параметрами зовнішнього теплового впливу на шар у зоні запалювання, зокрема початковим температурним рівнем, вологістю матеріалу, його гранулометричною диференційованістю, пористістю та газопроникністю, а також особливостями аеродинамічного режиму роботи агломашини. Установлення кількісно верифікованих залежностей між зазначеними групами факторів і характеристиками температурного поля — швидкістю вертикального переміщення теплового фронту, абсолютними значеннями максимальних температур та тривалістю перебування матеріалу в інтервалі термічної стабільності рідкої фази — створює концептуальну основу як для цілеспрямованої оптимізації та інтенсифікації агломераційного процесу, так і для прогнозованого формування заданих структурно-механічних властивостей агломерату при мінімізації енергетичних витрат.

У технологічному аналізі ефективності роботи агломераційних установок ключовим узагальнювальним показником прийнято вважати питому продуктивність, яка відображає масу кондиційного агломерату, отриманого з одиниці площі колосникової решітки за одиницю часу. Зазначена величина концептуально інтерпретується як результат мультиплікативної взаємодії трьох базових чинників: швидкості вертикального переміщення зони спікання крізь шар,

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.02.ТМО			
<i>Зм</i>	<i>Арк.</i>	<i>№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ	<i>Літер</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розроби</i>	<i>Каширець</i>						1	9
<i>Перевір</i>	<i>Плотніков</i>					МТ-22-1		
<i>Н</i>	<i>Плотніков</i>							
<i>Затвер</i>	<i>Бабошко</i>							

середньої насипної густини аглошихти та частки матеріалу, що трансформується у придатний за гранулометричними та механічними характеристиками агломерат.

Вертикальна швидкість спікання у фізичному трактуванні відповідає швидкості поширення вглиб шару ізотермічної поверхні, температура якої відповідає моменту затвердіння основної маси рудно-шлакового розплаву та формування просторово зв'язаної каркасної структури аглоспеку. В інженерно-технологічній практиці дана характеристика апроксимується відношенням ефективної висоти шару до сумарної тривалості процесу від моменту запалювання до повного завершення реакцій горіння та спікання.

Встановлено, що величина вертикальної швидкості спікання функціонально залежить від інтенсивності газової фільтрації крізь пористе середовище шару, а також від співвідношення теплоємності газового потоку до уявної об'ємної теплоємності твердої шихтової матриці. Остання визначається як добуток питомої теплоємності матеріалу на його насипну густину і відображає здатність шару акумулювати теплову енергію без істотної зміни температури.

Швидкість фільтрації газу, у свою чергу, детермінується комплексом геометричних і гідродинамічних параметрів, серед яких домінуючими є висота шару, еквівалентний діаметр частинок, величина розрідження під колосниковою решіткою, загальна пористість середовища, коефіцієнт гідравлічного опору, густина газу та прискорення сили тяжіння, що опосередковано впливає на розподіл тисків у шарі. Таким чином, аеродинамічні умови функціонування агломашини органічно інтегруються у тепловий баланс процесу та визначають його кінетичні параметри.

Для практичних розрахунків питому продуктивність доцільно коригувати з урахуванням двох коефіцієнтів: першого, що характеризує частку придатного агломерату у загальній масі аглоспеку після дроблення і грохочення, та другого, що відображає частку аглоспеку, отриманого безпосередньо з вихідної аглошихти з урахуванням втрат маси при прожарюванні, дегазації та декарбонізації. Перший коефіцієнт визначається співвідношенням маси готового агломерату до суми мас готового продукту і повернення, тоді як другий обчислюється на основі матеріального балансу шихти з урахуванням кількісного вмісту її компонентів та втрат при високотемпературній обробці.

Сукупний аналіз наведених залежностей свідчить, що параметричний простір процесу агломерації характеризується високим ступенем взаємної кореляції змінних, унаслідок чого локальна оптимізація окремого фактору без урахування системної відповіді всієї термогазодинамічної системи, як правило, не забезпечує стійкого поліпшення ні продуктивності, ні якості агломерату.

Зокрема, між газопроникністю шару та питомою продуктивністю агломашини спостерігається близька до лінійної залежність, що відображає інтенсифікацію тепломасообміну зі зростанням швидкості газової фільтрації. Водночас вплив вологості шихти на ці показники має виражений нелінійний, екстремальний характер із наявністю оптимального інтервалу, перевищення або недосягнення якого призводить до погіршення теплового режиму та структурної якості аглоспеку.

Аналогічні закономірності проявляються і при варіюванні інших технологічних параметрів. Так, надмірне зростання газопроникності, характерне для шихт із підвищеним вмістом крупнокускових фракцій, що не відповідають агломераційному класу, зумовлює непропорційно високе збільшення швидкості спікання внаслідок трансформації теплофізичних властивостей шару. У таких умовах уявна об'ємна теплоємність знижується через зменшення насипної густини матеріалу та скорочення вмісту вологи, а також унаслідок зменшення питомої поверхні контакту твердої фази з газовим потоком. Крупні частинки та матеріали зі зниженою теплопровідністю відбирають теплову енергію з газової фази менш інтенсивно, що порушує локальну теплову рівновагу, призводить до нерівномірного розподілу температур у шарі та, як наслідок, до формування агломерату з підвищеною структурною неоднорідністю та зниженими механічними характеристиками.

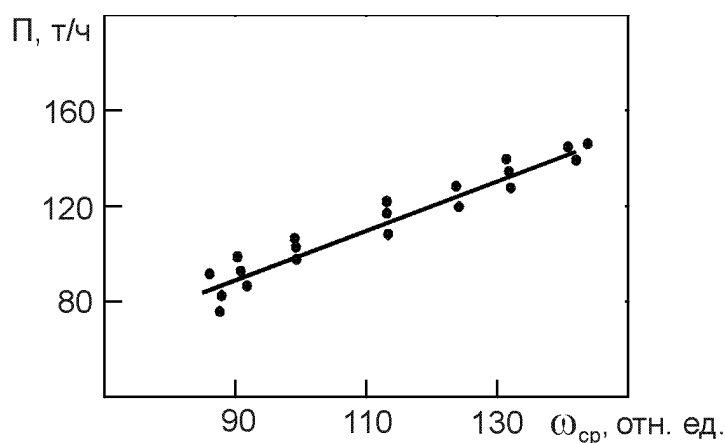


Рис. 2.1. Залежність між продуктивністю аглоустановки й газопроникністю шару спекаємої шихти

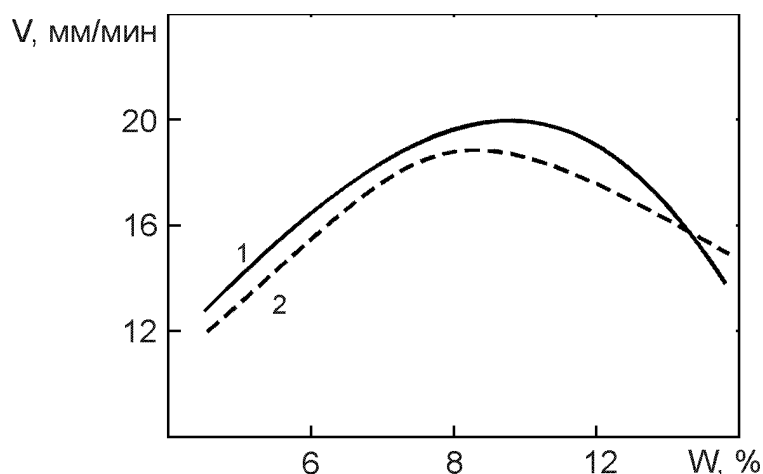


Рис. 2.2 Залежність між вологістю шихти й швидкістю спікання:
 1 – для марганцевого агломерату з окисних концентратів;
 2 – для марганцевого агломерату із суміші (2:1) окисних і карбонатних концентратів.

Підвищення об'ємної частки водяної пари та діоксиду вуглецю у газовій фазі агломераційного процесу зумовлює зростання її ефективної теплоємності, що супроводжується інтенсифікацією перенесення теплової енергії вздовж висоти шару. За таких умов швидкість поширення теплового фронту перевищує швидкість поступального переміщення зони горіння твердого палива, внаслідок чого спостерігається зниження пікових температур у реакційній зоні та істотне скорочення тривалості перебування матеріалу в інтервалі високотемпературної термодинамічної стабільності рідкої фази. Одночасно інтенсифікується процес охолодження сформованого аглоспеку, що сприяє зростанню інтенсивності термічного удару, акумулюванню внутрішніх термічних напружень і, як наслідок, формуванню підвищеної кількості склоподібної фази у структурі агломерату.

В умовах промислової експлуатації можливості регулювання таких параметрів, як мінералого-хімічна якість марганцеворудної сировини та її гранулометричний склад, є або суттєво обмеженими, або практично недосяжними. Величина розрідження під колосниковою решіткою та висота аглошару перебувають у взаємозалежному функціональному зв'язку й у переважній більшості випадків визначаються конструктивними особливостями агломераційних машин та їх аеродинамічними характеристиками. У зв'язку з цим реалістичні резерви підвищення продуктивності аглоустановок зводяться або до підтримання комплексу керованих технологічних параметрів у зоні оптимального компромісу між продуктивністю та якістю агломерату, або до створення умов, за яких зростає вихід кондиційного продукту з одиниці аглоспеку, а в ідеальному випадку — до одночасної реалізації обох підходів.

Механічна міцність агломерату та вихід придатної фракції є тісно корельованими величинами й у вирішальному ступені детермінуються мінералогічним складом продукту спікання та характером фазових взаємодій у процесі кристалізації рідкої фази.

Неофлюсований агломерат, отриманий з оксидних марганцевих концентратів, характеризується присутністю тефроїту, гаусманіту, незначної кількості якобситу, брауніту, родоніту та склоподібної фази; в окремих випадках фіксуються мікрровключення металевих корольків.

У разі використання карбонатних концентратів фазовий склад агломерату ускладнюється за рахунок формування твердих розчинів у системі оксидів кальцію, марганцю та заліза, комплексних сполук типу оксидно-кальцієвих манганітів, феритів кальцію, а також багатокомпонентної оксидно-силікатної фази змінного складу, що виконує функцію структуроутворювального в'язучого.

Вплив мікроструктурної організації та фазового складу на механічну міцність агломерату має принципове значення. Специфіка агломерації марганцевої сировини — насамперед її хімічна та гранулометрична неоднорідність, нерівномірність розподілу палива по висоті шару, а також високі швидкості нагрівання та охолодження — сприяє формуванню продукту з вираженою макрота мікроструктурною гетерогенністю.

Для формування однорідної за властивостями та складом структури необхідною є не лише стабільність характеристик аглошихти, але й генерація

достатнього об'єму рівномірно розподіленої рідкої фази з високою рухливістю та здатністю при кристалізації утворювати зв'язки з підвищеною механічною міцністю.

Дослідження мікротвердості та мікрокрихкості основних фазових складових залізородних і марганцевих агломератів свідчать, що найменш сприятливе поєднання механічних характеристик властиве кальцієвим силікатам та склоподібній фазі, які відзначаються високою крихкістю за мінімальних значень твердості. Олівінові тверді розчини кальцію та заліза також демонструють обмежені міцнісні властивості. Водночас гаусманіт та кальцієво-манганітні тверді розчини характеризуються істотно вищими значеннями мікротвердості та більшою стійкістю до локалізованих навантажень.

Склоподібна фаза, що переважно виконує роль мікроструктурного зв'язувального компоненту, формується внаслідок високих швидкостей охолодження розплаву та дефіциту часу для повноцінної кристалізації. На відміну від макроструктури, яка стабілізується в момент твердіння основної маси розплаву, мікроструктурна організація визначається хімічним складом рідкої фази та кінетикою її охолодження. Інтенсивна декарбонізація та підвищена газопроникність шару сприяють прискореному відводу тепла й масовому утворенню аморфних зв'язків, що суттєво знижує опір агломерату до знакозмінних навантажень під час транспортування та завантаження в електропечі.

Особливо небезпечними для склоподібної фази є розтягувальні напруження, оскільки її міцність на розтяг у багато разів нижча за міцність на стиск. Експериментальні дослідження показують, що в агломератах з підвищеним вмістом скла значна частина тріщин локалізується саме в цій фазі.

Для марганцевого агломерату характерна аналогічна закономірність: кальцієві силікати та склоподібні компоненти є найбільш уразливими з позицій крихкого руйнування, причому зі зниженням основності агломерату їх крихкість зростає, а твердість зменшується. Кристалічні аналоги тих самих фаз демонструють вищу відновлюваність та механічну стабільність.

Отже, з урахуванням сукупності факторів — речовинного складу, теплового режиму та умов формування мінералогічної структури — визначальним і водночас технологічно керованим без значних капіталовкладень чинником підвищення якості марганцевого агломерату є оптимізація температурного режиму процесу спікання. Саме тому доцільним є розгляд проблеми інтенсифікації агломерації та покращення характеристик продукту крізь призму удосконалення теплових умов у шарі.

Найбільш поширеним інженерним підходом до поліпшення теплового балансу традиційно вважається збільшення витрати або крупності твердого палива. Однак результати численних досліджень свідчать, що навіть істотне підвищення питомої витрати коксу забезпечує переважно лише деяке вирівнювання структури аглоспеку, тоді як приріст міцності агломерату є незначним і супроводжується зниженням продуктивності установки.

З урахуванням високих втрат маси при прожарюванні карбонатвмісних шихт подальше збільшення паливної складової додатково підвищує пористість продукту

та погіршує умови теплообміну. Таким чином, підвищення міцності агломерату за рахунок інтенсифікації теплового підводу часто досягається ціною зниження техніко-економічних показників процесу.

Серед практично прийнятних методів компенсації дефіциту тепла у верхніх шарах аглоспеку найбільш поширеною є оптимізація режиму запалювання шихти під горном. Температурний рівень запалювання має забезпечувати стабільне ініціювання горіння без формування щільної сплавленої кірки, що різко знижує газопроникність шару, або, навпаки, без утворення не спеченого поверхневого шару, який майже повністю переходить у повернення.

Відомими способами інтенсифікації цієї стадії є застосування комбінованих паливних систем та просторово диференційований температурний режим по довжині горна. Такі рішення дозволяють підвищити теплове навантаження на поверхню шару, проте істотного впливу на загальну продуктивність вони, як правило, не мають.

Додаткові технічні заходи, зокрема встановлення теплових екранів, утилізаторів променевої енергії або теплоізоляційних укриттів після горна, дозволяють частково знизити інтенсивність термічного удару та підвищити міцність поверхневих зон аглоспеку, однак супроводжуються конструктивним ускладненням обладнання та зростанням капітальних витрат.

Аналіз наукових джерел свідчить, що перспективним напрямом є регулювання швидкості кристалізації розплаву шляхом зменшення градієнтів температури та подовження інтервалу перебування матеріалу в зоні високих температур, наприклад, за рахунок підігрівання повітря, що подається на спікання, або застосування додаткового термічного відпалу аглоспеку.

Такі заходи сприяють зниженню частки склоподібної фази, підвищенню ступеня кристалізації зв'язування, зменшенню внутрішніх термічних напружень, зростанню відновлюваності та механічної міцності агломерату, а також збільшенню виходу кондиційної фракції.

Найбільш сприятливі умови для релаксації напружень та рекристалізації зв'язувальних фаз, за даними експериментальних досліджень, створюються при додатковому високотемпературному нагріванні аглоспеку у хвостовій частині агломашини. Разом з тим, тривалість такого нагрівання обмежена, а ефект поширюється переважно на поверхневі шари, що обмежує загальний технологічний ефект.

Більш радикальним, але технічно складним підходом є організація рівномірного теплового впливу на поверхню шару по всій довжині агломашини, що забезпечує покращення умов кристалізації по всій товщині аглоспеку ціною істотного зростання енерговитрат та ускладнення апаратурного оформлення процесу табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Металургійні властивості марганцевовмістних спіків

№№ образц ю	Масова частка компонентів, %			Ступінь відновлення Mn при 14000С, %	Питомий електроопір, Ом.м	Межа міцності на стиск, Н/мм ²
	Mn	SiO ₂	CaO			
1	34,7	41,8	13,6	38,6	4,87	12,8
2	37,1	38,6	12,7	39,2	4,13	11,9
3	39,4	36,5	11,9	39,8	3,65	11,1
4	41,5	34,4	11,2	41,0	3,17	10,7
5	43,3	33,8	10,8	44,7	2,60	10,9
6	44,9	31,1	10,3	50,1	2,35	11,8
7	46,4	29,6	9,8	58,9	2,09	12,6
8	47,8	29,3	9,3	67,3	1,61	14,0

Поглиблений багатофакторний аналіз експериментального масиву даних, виконаний із залученням кореляційно-регресійних підходів та елементів структурно-фазової інтерпретації, дозволяє констатувати існування стійкої функціональної залежності між інтегральним показником відновлюваності марганцю та його масовою концентрацією в мінералогічно неоднорідних агломераційних системах, яка має характер квазілінійної прямої пропорційності, тоді як внесок кремнеземвмісної компоненти, локалізованої переважно у формі силікатів марганцю різного ступеня впорядкованості, проявляється у вигляді вираженої інгібувальної дії, що описується обернено пропорційною залежністю та відображає ускладнення масопереносу кисню в конденсованій фазі.

Поряд із цим встановлено, що питомий електричний опір синтерованого матеріалу демонструє монотонну тенденцію до зниження зі зростанням об'ємної частки гаусманіту, що може бути інтерпретовано з позицій еволюції електронної підсистеми твердого тіла, зміни концентрації носіїв заряду та модифікації механізмів електропровідності у багатофазному оксидному каркасі. Водночас у діапазоні зменшення вмісту марганцю нижче критичного рівня, близького до 40 мас.%, фіксується суттєве уповільнення швидкості зниження ступеня його відновлення, що, згідно з результатами детального петрографічного та мікроструктурного аналізу, корелює зі скороченням кількості родонітової фази та квазістабілізацією вмісту вільних оксидів марганцю, термодинамічно більш схильних до участі у відновних реакціях.

Дослідження механічних характеристик агломераційних тіл свідчить про те, що залежність їх міцності від масової частки марганцю має виразно нелінійний, екстремальний характер із локалізацією мінімуму в інтервалі 41–43 мас.%, що може бути обґрунтовано з позицій формування несприятливої морфології міжфазних контактів, індукованої підвищеним вмістом родоніту та значною часткою аморфізованої склоподібної матриці, які, взаємодіючи, створюють структурно ослаблені зони зниженої когезійної міцності та підвищеної схильності до крихкого руйнування під дією зовнішніх навантажень.

Узагальнення результатів ідентифікації марганцевовмісних фаз дозволяє сформулювати положення про те, що поступове зменшення загального вмісту марганцю у складі шихтової суміші є визначальним фактором, який зумовлює не лише збільшення частки склоподібної фази, але й ініціює кристалізацію родоніту як термодинамічно стабільного силікатного утворення за умов дефіциту відновлювального потенціалу. В умовах промислової агломерації поява зазначеної фази є типовою для режимів спікання, що характеризуються підвищеною питомою витратою твердого палива на рівні 8–9 мас.% у поєднанні з відносно низькою концентрацією марганцю, що призводить до порушення оптимального співвідношення між тепловиділенням, газодинамікою та хімічною кінетикою відновних реакцій і, як наслідок, до зниження міцності кінцевого агломераційного продукту.

Критичний аналіз сукупності літературних джерел, присвячених проблематиці формування структурно-механічних і технологічних властивостей агломератів, дає змогу дійти висновку, що підвищення їх металургійної якості, у вузькому розумінні якої виступає зростання міцності за одночасного зниження питомих витрат твердого палива та стабілізації режимів спікання, може бути досягнуте шляхом реалізації комплексу взаємопов'язаних термофізичних і технологічних заходів, зокрема:

- інтенсифікації теплового режиму агломераційного шару шляхом підвищення пікових температур у зоні горіння;
- регулювання кінетики післяспікального охолодження аглоспеку з метою формування більш рівноважної мікроструктури;
- цілеспрямованої оптимізації гранулометричного складу рудних компонентів для підвищення площі міжфазного контакту;
- коригування газопроникності та тепломасообмінних характеристик шару через оптимізацію технологічних параметрів агломераційного процесу;
- механічного ущільнення аглошару як інструменту підвищення щільності контакту між частинками;
- застосування додаткової термічної обробки агломерату безпосередньо в межах агломераційної машини.

З огляду на обмеження промислової реалізації, а також на необхідність мінімізації енергоємності процесу за одночасного забезпечення стабільної якості продукції, найбільш доцільними та технологічно виправданими напрямками вдосконалення виробництва марганцеворудного агломерату з використанням сировини національної ресурсної бази слід вважати:

- організацію режимів контрольованої термічної обробки аглоспеку до повного завершення стадії спікання;
- реалізацію операцій ущільнення агломераційного шару у період активного перебігу фазоутворювальних і масообмінних процесів;
- системну оптимізацію ключових технологічних параметрів агломерації з урахуванням їх взаємного впливу.

Експериментальні дослідження та результати промислових випробувань зазначених підходів, викладені в наступних розділах роботи, формують науково

обґрунтовану основу для кількісної оцінки їх ефективності та вибору раціональної стратегії підвищення якості марганцеворудного агломерату, що забезпечує зростання техніко-економічних показників як власне процесу агломерації, так і подальших стадій металургійної переробки з отриманням марганцевих феросплавів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.02.ТМО	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		9

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РУДНОЇ СКЛАДОВОЇ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ НА УМОВИ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАРГАНЦЕВОРУДНОГО АГЛОМЕРАТУ

3.1. Термодинамічний аналіз перебігу фізико-хімічних перетворень у процесі спікання марганцеворудного агломерату

Процес термічної агломерації насипних мас марганцеворудної сировини реалізується за фільтраційним механізмом шляхом примусового просмоктування окиснювального газового середовища (повітря) крізь попередньо ініційований осередок горіння у верхньому шарі шихти та, в першому наближенні, детермінується інтенсивністю міжфазного теплообміну у системі «твердий дисперсний матеріал – газова фаза». Просторово-часова еволюція температурного поля, кінетика перенесення та акумуляції теплової енергії в об'ємі шару за умов фільтраційного режиму газового потоку, а також сукупність супутніх фізико-хімічних перетворень, індукованих екзотермічним окисненням палива, ендотермічним нагріванням і частковим плавленням рудних компонентів, формують температурно-часові умови прогрівання матеріалу, закономірності охолодження сформованого агломерату, швидкісні параметри просування фронту спікання та, у кінцевому підсумку, інтегральні показники якості готового продукту.

Емпіричний досвід промислової експлуатації агломераційних установок переконливо свідчить, що залучення до переробки марганцевої сировини без попередньої класифікації за гранулометричними фракціями, а також зростання частки низькосортних окисних і, особливо, карбонатних концентратів у складі шихти, зумовлює істотну деградацію структурно-механічних характеристик агломерату, зростання собівартості його виробництва та підвищення питомих енергетичних витрат на подальший переділ у рудновідновних електропечах. Найбільш відчутні втрати енергії пов'язані з необхідністю компенсації значних ендотермічних ефектів, обумовлених термічною дисоціацією карбонатомісних мінеральних фаз і видаленням як кристалізаційної, так і фізично адсорбованої гідратної вологи.

У зв'язку з цим, при розв'язанні задачі підвищення металургійної цінності марганцеворудного агломерату принципового значення набуває розгляд процесу агломерації не лише як суто технологічної операції укрупнення частинок, але як складної термохімічної системи, поведінка якої визначається особливостями хіміко-мінералогічного складу та гранулометричної структури вихідних концентратів упродовж усього циклу їх високотемпературної обробки.

Загальновідомо, що навіть для формально ідентичних хімічних сполук варіації елементного складу, концентрації домішкових компонентів, дисперсності

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.03.ЕАД			
Зм	Анк	№	Підпис	Дат				
Розробл	Каширець				ВСТУП	Лімен	АнкVIII	АнкVIII
Перевір	Плотніков						1	25
Н	Плотніков				МТ-22-1			
Затвер	Бабошко							

частинок, умов мінералоутворення та подальшої геологічної трансформації можуть зумовлювати істотні флуктуації температур початку й завершення фізико-хімічних перетворень, а також зміну ступеня їх повноти за фіксованих термодинамічних параметрів зовнішнього середовища.

Агломераційний процес, який поєднує у собі функції високотемпературної термічної обробки та механічного окускування дисперсних матеріалів, характеризується вкрай малою тривалістю впливу пікових температур, що, з одного боку, створює передумови для інтенсифікації перебігу дифузійно контрольованих реакцій, а з іншого – істотно обмежує можливість досягнення термодинамічної рівноваги в багатокомпонентній рудно-паливній системі. За таких умов цілком обґрунтованим є припущення щодо неповноти або частковості фазових перетворень, особливо під час спікання крупнокускових карбонатних марганцевих концентратів, для яких характерні значні внутрішні температурні градієнти.

Більш того, не виключається продовження процесів дегідратації та декарбонізації вже на стадії після затвердіння силікатно-оксидного розплаву, що формує несівний каркас агломераційного тіла. Відомо, що зазначені фізико-хімічні перетворення супроводжуються не лише зміною елементного та фазового складу речовини, але й суттєвими об'ємними ефектами, пов'язаними з перебудовою кристалічних ґраток та виділенням газоподібних продуктів. Саме ці об'ємні деформації найчастіше слугують джерелом виникнення залишкових напружень різної природи у мікроструктурі агломерату, що згодом проявляється у вигляді схильності до спонтанного мікротріщиноутворення та руйнування окускованого матеріалу навіть за відносно малих механічних або термічних навантажень.

З метою кількісного встановлення взаємозв'язку між ступенем завершеності процесів дегідратації та декарбонізації марганцеворудних матеріалів і температурно-часовими параметрами агломераційного процесу було проведено комплекс термогравіметричних, диференційно-термічних та мінералогічних досліджень оксидних концентратів Нікопольського родовища, а також карбонатних концентратів нікопольського, чиатурського та більшетокмакського генезису в умовах контрольованої термічної обробки. Для експериментальних досліджень було відібрано максимально збагачені різновиди руд переважно мономінерального складу, усереднені хімічні та фазово-мінералогічні характеристики яких наведено у табл. 3.1–3.2.

Таблиця 3.1 – Вміст марганцю, зв'язаного в карбонатні й гідратні фази, різних типів марганцевих руд, %

Найменування типів руд	Вміст загального Mn у руді	Вміст з'єднань			Вміст Mn в гідратах	Вміст Mn в карбонатах
		Mn(OH) ₂	MnO·OH	Mn(HCO ₃)		
Нікопольська оксидна руда:						
- псиломеланового типу;	51	26,2	25,9	-	32,5	н.буд.
- піролюзитового типу	52,9	33,0	-	-	20,3	н.буд.
- манганітового типу	41,1	-	62,1	-	38,8	н.буд.
Нікопольська карбонатна	25,3	-	-	16	6,0	75,2

Таблиця 3.2 – Хімічний склад марганцевих концентратів

Найменування концентрату	Масова частка компонентів, %							
	Mn	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	ППП	P
Нікопольський								
- псиломелановий	51,1	8,20	2,30	1,0	3,5	1,4	15,9	0,28
- піролюзитовий	52,0	5,6	1,7	2,0	1,3	1,1	12,1	0,13
- манганітовий	57,6	4,1	0,65	0,7	0,67	1,0	11,8	0,17
- карбонатний	26,6	11,4	16,7	3,4	1,7	0,6	31,7	0,18
Чиатурський карбонатний	26,0	21,4	10,0	2,0	2,7	1,9	23,0	0,15
Більшетокмакський карбонатний	28,9	4,4	11,3	1,7	1,3	3,8	32,5	0,45

Експериментальні дослідження, спрямовані на встановлення закономірностей термічної дисоціації марганцевмісних мінеральних фаз, здійснювалися в інертному газовому середовищі гелію з метою повного усунення впливу побічних окиснювально-відновних реакцій газової фази на кінетику та механізм перебігу досліджуваних процесів. Аналітичні навіски масою 200 г розміщували в алундових тиглях, механічно ізольованих від стінок печі та підвішених до високочутливої масовимірювальної системи, що забезпечувало безперервну реєстрацію змін маси зразка в режимі реального часу.

Термічну обробку проводили за фіксованих температур у діапазоні 600–1000 °С, оскільки температура 1000 °С вважається достатньою для реалізації високих швидкостей перебігу та практично повної завершеності процесів термодинамічно зумовленої дисоціації карбонатних сполук. Комплекс «піч – тигель

– масовимірjувальний модуль» піддавали герметизації з метою стабілізації складу газового середовища та виключення паразитного масообміну з навколишнім повітрям. Після досягнення заданої температури в реакційній зоні тигель переміщували у зону із стабілізованим температурним полем, де здійснювалася ізотермічна витримка тривалістю 30 хв, достатня для досягнення асимптотичного стану маси навіски. Після завершення витримки тигель переводили в охолоджувальну зону печі з пониженим температурним градієнтом.

Додатково термічний аналіз зразків у процесі рівномірного нагрівання здійснювали з використанням дериватографа MOM OD-105 (Угорщина), що забезпечує синхронну реєстрацію температури зразка, диференціальної температури між дослідним зразком та еталоном, а також зміни маси речовини за постійної швидкості нагрівання $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{хв}^{-1}$. Перед проведенням експериментів досліджуваний матеріал попередньо дегідрували при температурі $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до досягнення сталої маси, що дозволяло елімінувати вплив гігроскопічної вологи на результати аналізу.

Дослідження процесів дегідратації марганцеворудних матеріалів при нагріванні виконували також методом високотемпературної мас-спектрометрії з використанням приладів МІ-1305 та МІ-1201, модифікованих для аналізу твердих тіл у вакуумному середовищі. Експериментальна методика передбачала реєстрацію мас-спектрів парогазової фази в інтервалі масових чисел 12–30 а.о.м. при програмованому нагріванні зразків у температурному діапазоні $100\text{--}1700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Мінералогічний аналіз свідчить, що переважна більшість марганцевих мінералів родовищ вітчизняної сировинної бази містить у своїй кристалічній структурі як молекулярно зв'язану воду, так і гідроксидні групи, або їх комбінацію, що характерно, зокрема, для манганіту $\text{MnO}(\text{OH})$ ($\text{Mn}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$), псиломелану $\text{MnO}\cdot\text{MnO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$, вернадиту $\text{MnO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ та ряду інших фаз.

Середній вміст гідроксидних груп у перерахунку на еквівалентну масову частку H_2O становить приблизно 10 % для руд псиломеланового типу, 6,5 % – для піролюзитового та 12 % – для манганітового різновидів. За даними різних авторів, кількісне співвідношення гідроксидних форм марганцю, представлених фазами $\text{Mn}(\text{OH})_2$ та $\text{MnO}(\text{OH})$, є близьким до еквімолярного.

У літературних джерелах процес термічної дисоціації гідроксидів марганцю зазвичай описується як багатостадійна послідовність перетворень $\gamma\text{-MnOOH}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ з поступовим виділенням структурно зв'язаної води та формуванням проміжних фаз, зокрема $\text{MnO}(\text{OH})$, з подальшою стабілізацією у формі гаусманіту Mn_3O_4 . Аналогічно, трансформація псиломелану розглядається як поетапний процес дегідратації з переходом через оксигідроксидні стани до термодинамічно стійкої шпінелеподібної структури.

Згідно з узагальненими літературними даними, дегідратація марганцеворудних матеріалів охоплює кілька температурно розділених стадій: при приблизно $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ елімінується гігроскопічна волога, у діапазоні $130\text{--}140\text{ }^{\circ}\text{C}$ – міжшарова молекулярна вода, утримувана водневими зв'язками в шаруватих структурах, а при подальшому нагріванні відбувається деструкція гідроксидних

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.03.ЕАД	арк.
Арк.	№ доквм.	підпис	дата			4

груп, температура якої істотно залежить від хімічного складу та типу гідратної фази.

Традиційно вважається, що дегідратація марганцевих концентратів практично завершується в інтервалі 150–250 °С, що асоціюється передусім із розкладом манганіту. Однак результати проведених досліджень свідчать, що процеси видалення структурно зв'язаної вологи зберігають помітну інтенсивність навіть при температурах, близьких до 1000 °С.

Графічна інтерпретація результатів термічного аналізу процесів розкладання оксидних і карбонатних марганцевих концентратів наведена на рис. 3.1. На відповідних термограмах чітко ідентифікуються ендотермічні піки, що відповідають дегідратації гідратних фаз і дисоціації мінеральних компонентів, однак розмежування температурних інтервалів завершення окремих стадій дегідратації та карбонатної дисоціації практично неможливе через накладання теплових ефектів.

Водночас зіставлення термограм різних типів руд виявляє задовільну збіжність результатів лише для ендотермічної області 100–140 °С, що відповідає видаленню адсорбованої вологи. Разом із тим мас-спектрометричний аналіз температурних залежностей інтенсивності іонних струмів, асоційованих з компонентами водяної пари (H_2O^+ , OH^+), показав, що для всіх досліджених зразків характерне інтенсивне виділення гідратної вологи аж до температур близько 1000 °С. При цьому максимуми швидкості дегідратації для більшості типів руд локалізуються в інтервалі 400–600 °С, тоді як для піролюзитового концентрату екстремальні значення зміщені в область 850–1050 °С, що свідчить про суттєві відмінності у термостійкості гідратних структур різних мінералогічних різновидів марганцевої сировини.

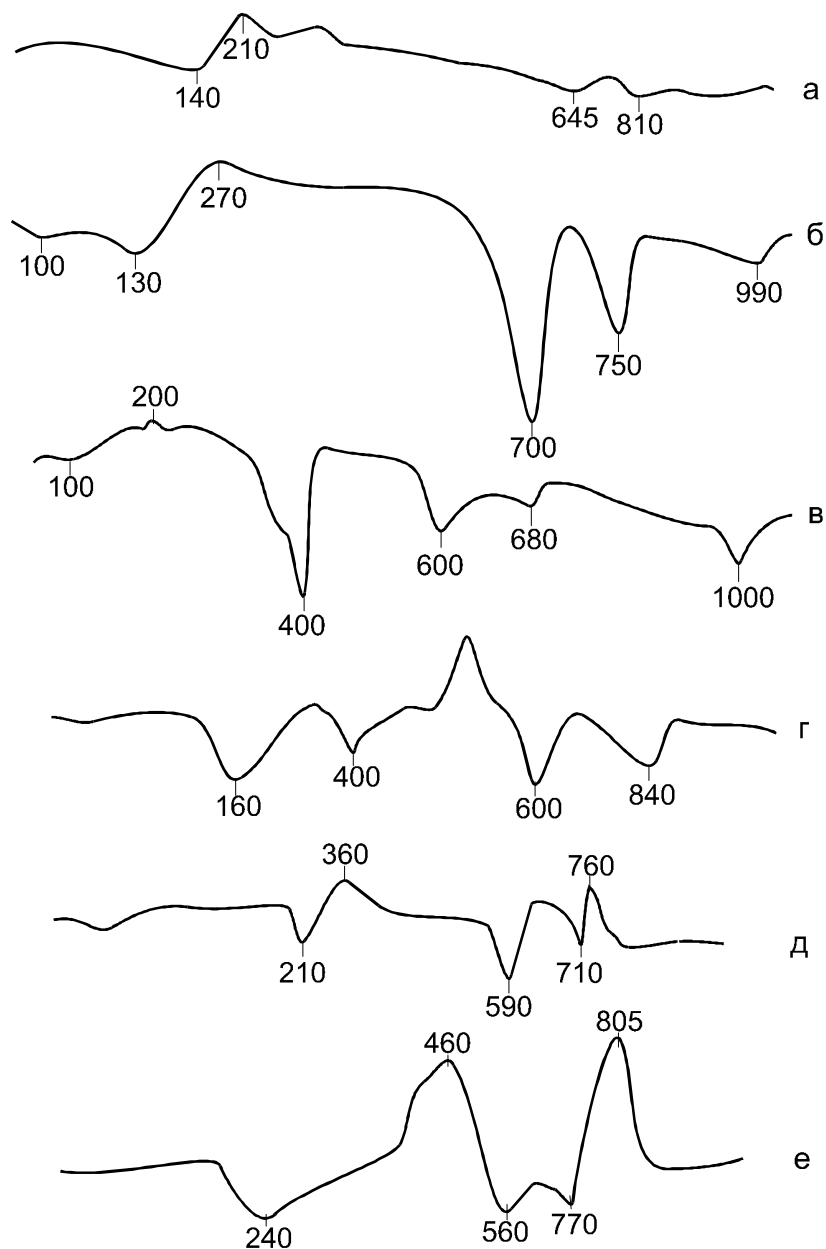


Рис. 3.1 Термограма зразків нікопольських оксидних і карбонатних марганцевих руд:

а – у псиломеланового, піролюзитового й манганітового типів;
 б – відповідно карбонатна чиатурська, нікопольська й токмакська.

Отримані експериментальні результати не дають підстав виключати можливість збереження певної кількості структурно або фізично зв'язаної гідратної води навіть у зразках марганцевих руд, які вже зазнали попередньої термічної обробки, особливо за умов несталих, просторово та часово неоднорідних температурних режимів, характерних для агломераційного процесу. Саме з цієї причини у ряді досліджень обґрунтовано вказується, що практично повне видалення води з оксидних і карбонатних марганцевих концентратів досягається

лише за температурного інтервалу 600–800 °С, коли активізуються повільні дифузійно-контрольовані стадії дегідратації внутрішніх об'ємів зерен.

Для оксидних різновидів марганцевих руд ендотермічна хвиля, яка відображає сукупність теплових ефектів, пов'язаних із деструкцією мінеральних компонентів, реєструється починаючи приблизно з температури 400 °С і відповідає термічному розкладанню манганіту $MnO(OH)$ з дисоціацією його моногідратної форми та формуванням оксиду Mn_2O_3 (рис. 3.1, в). Характерний «піролюзитовий» ендоефект, локалізований поблизу 700 °С (рис. 3.1, б), виявляється у чітко вираженій формі виключно для відповідного типу руди, тоді як у зразках іншого мінералогічного складу аналогічні теплові аномалії присутні, проте зміщені в область нижчих температур — приблизно 645 °С (рис. 3.1, а) та 680 °С (рис. 3.1, б). Наявність слабо вираженого ендотермічного перегину поблизу 750 °С у піролюзитовому концентраті інтерпретується як наслідок незначної домішки псиломелану. Подальше підвищення температури до 990–1000 °С супроводжується появою додаткового ендотермічного ефекту, який асоціюється з термічною дестабілізацією курнакіту (рис. 3.1, б, в).

Таким чином, узагальнення результатів порівняльного термічного аналізу трьох різновидів нікопольських оксидних марганцевих руд підтверджує положення про те, що марганцеві мінерали формують широкий спектр нестехіометричних твердих розчинів складної будови, для яких фазові перетворення можуть реалізовуватися в надзвичайно широких температурних інтервалах, у тому числі за температур, що перевищують 1000 °С. Такі трансформації супроводжуються суттєвими об'ємними та кристалохімічними перебудовами, індукованими зміною координаційного стану іонів та дефектністю кристалічних ґраток, що спричиняє накопичення внутрішніх напружень і, як наслідок, зниження структурної цілісності та руйнування кускового матеріалу.

Карбонатні марганцеві концентрати у своїй переважній частині представлені кальцієвмісним родохрозитом $MnCO_3$, що містить 80–86 % власне марганцевого карбонату та 14–20 % CaO при загальному вмісті марганцю 39,8–42 %, а також манганокальцитом $(Mn,Ca)CO_3$, у якому частка $CaCO_3$ становить 42–56 %, $MnCO_3$ — 28–70 %, а масова концентрація марганцю коливається в межах 13–30 %.

На термограмах карбонатних концентратів (рис. 3.1, г–е) чітко фіксується двостадійний характер ендотермічної реакції розкладання. Перша стадія, що реалізується в температурному інтервалі 400–600 °С, відповідає початковій дисоціації родохрозиту; при цьому втрати маси становлять 13–19 %, що свідчить про неповне розкладання карбонатної складової в об'ємі зерен на даному етапі, що узгоджується з результатами хімічного аналізу залишкових фаз. Друга стадія, локалізована в інтервалі 700–840 °С, супроводжується додатковими втратами маси в межах 7,6–13 % і відповідає завершенню деструкції карбонатної матриці.

Подібний ступінчастий характер термічного розкладання карбонатів відзначено також у низці попередніх досліджень, де перший ендотермічний максимум пов'язується з дисоціацією карбонату марганцю в приповерхневих шарах зерен, тоді як друга стадія відповідає поширенню реакції вглиб частинок і завершенню процесу в усьому об'ємі матеріалу.

Термічна дисоціація карбонатів належить до класу топохімічних реакцій, у яких основні перетворення локалізуються на межах поділу фаз у межах кристалічних агрегатів. Узагальнений механізм цього процесу може бути представлений як послідовність стадій: первинний розпад карбонатних аніонів з утворенням молекул CO_2 , адсорбованих на поверхні твердої фази, їх подальша десорбція та формування пар іонів O^{2-} і Mn^{2+} , які створюють у кристалічній ґратці метастабільний твердий розчин типу MeO в MeCO_3 . У міру розвитку реакції в поверхневому шарі накопичуються аніонні вакансії, що призводить до формування пересиченого стану, виникнення межі поділу $\text{MeO}-\text{MeCO}_3$ та зародження нової оксидної фази MeO . Саме на цій стадії завершується кристалохімічна перебудова, що супроводжується радикальною реконфігурацією ґратки вихідного мінералу.

За температур, достатніх для ініціювання дисоціації, зазначені перетворення, за винятком індукційного періоду, можуть протікати з високими швидкостями. Після утворення зародків нової фази швидкість процесу, як правило, визначається інтенсивністю масопереносу газоподібних продуктів реакції, внутрішньою дифузією і теплопередачею, що потребує значних теплових витрат унаслідок ендотермічного характеру реакції.

У температурному інтервалі 400–600 °С глибина перетворення залишається обмеженою через низьку рухливість іонів та утруднену перебудову кристалічних ґраток, тоді як підвищення температури до 900–1000 °С забезпечує різке зростання сумарної швидкості процесу та досягнення високого ступеня кристалохімічної трансформації карбонатних марганцевих концентратів.

Таким чином, результати проведених досліджень однозначно свідчать про домінуючу роль температурного фактора в механізмі та кінетиці дисоціації карбонатів марганцю. З огляду на обмежену тривалість перебування рудних матеріалів у зоні високих температур за умов агломерації, особливого науково-практичного інтересу набуває аналіз кінетичних характеристик цього процесу залежно від гранулометричного складу сировини.

Результати дослідження температурно-часових умов дисоціації наведено в табл. 3.3 та на рис. 3.2. Представлені залежності ступеня розкладання від температури та часу мають типовий для процесів термічного розпаду сигмоїдальний характер. Додаткові труднощі інтерпретації кінетики пов'язані з мінералогічною двофазністю концентратів, які складаються з родохрозиту та манганокальциту, що характеризуються різними температурами ініціювання та швидкостями дисоціації.

Таблиця 3.3 – Ступінь розкладання карбонатних концентратів при постійній температурі

Фракція, мм	Температура випалу, К	Час випалу, хв.	Ступінь розкладання, ед.	Швидкість розкладання, %/хв.
1	2	3	4	5
5-10	873	5	0,21	4,2
		10	0,39	3,6
		15	0,60	4,2
		20	0,68	1,6
		25	0,75	1,4
		30	0,81	1,2
	973	5	0,2	5,4
		10	0,51	4,8
		15	0,65	2,8
		20	0,82	3,4
		25	0,83	0,2
	1073	5	0,28	5,6
		10	0,69	8,2
		15	0,85	3,2
		20	0,91	1,2
		25	0,93	0,4
	1173	5	0,94	18,8
		10	1,0	1,2
	1273	5	0,96	19,2
		10	1,0	0,1
	10-20	873	5	0,19
10			0,34	3,0
15			0,5	3,2
20			0,6	2,0
25			0,72	2,4
30			0,73	0,2
973		5	0,27	5,4

1	2	3	4	5
10-20	973	10	0,46	3,8
		15	0,63	3,4
		20	0,77	2,8
		25	0,86	1,8
		30	0,87	0,2
	1073	5	0,38	7,6
		10	0,65	5,4
		15	0,83	3,6
		20	0,92	1,8
		25	0,92	-
	1173	5	0,66	13,2
		10	0,96	6,0
		15	1,0	0,8
	1273	5	0,93	18,6
10		1,0	1,4	
20-30	873	5	0,14	2,8
		10	0,21	1,4
		15	0,33	2,4
		20	0,44	2,2
		25	0,51	1,4
		30	0,58	1,4
	973	5	0,27	5,4
		10	0,41	2,8
		15	0,56	3,0
		20	0,69	2,6
		25	0,89	2,2
	1073	5	0,32	6,4
		10	0,61	5,8
		15	0,78	3,4
		20	0,84	1,2
	1173	5	0,60	12
		10	0,92	6,4
		15	1,0	1,6

Аналіз експериментальних даних, узагальнених у табл. 3.3 та відображених на рис. 3.2, однозначно засвідчує визначальну, фактично домінуючу, роль температурного чинника у формуванні як кінетичних параметрів, так і ступеня завершеності процесу термічної дисоціації карбонатної складової марганцеворудних матеріалів. Зокрема встановлено, що в ізотермічних умовах при температурі близько 600 °С процес перебігає переважно за рахунок часткової

дисоціації родохрозиту, причому характерною особливістю цієї стадії є порівняно низька швидкість перетворень, зумовлена обмеженою інтенсивністю дифузійного перенесення реагуючих компонентів у твердому стані та недостатньою рушійною силою кристалохімічної перебудови.

Подальше підвищення температури супроводжується не лише монотонним зростанням миттєвої швидкості розкладання мінеральних фаз, але й істотною трансформацією кінетичного режиму процесу в цілому, що проявляється у зміні співвідношення між дифузійно-контрольованими та реакційно-контрольованими стадіями. Граничні значення швидкості дисоціації досягаються в області температур порядку 1000 °С, причому за цих умов вплив гранулометричного складу вихідного матеріалу практично нівелюється, що свідчить про перехід процесу в область, де лімітуючими стають теплообмін та відвід газоподібних продуктів реакції, а не внутрішня дифузія у твердих фазах.

Водночас у зоні помірних і відносно низьких температур чітко простежується зворотна залежність між швидкістю термічної дисоціації та характерним розміром часток концентрату: зі зростанням крупності матеріалу інтенсивність розкладання істотно зменшується, що пов'язано зі збільшенням довжини дифузійних шляхів, зниженням питомої поверхні контакту реакційних фаз і, відповідно, з посиленням внутрішньодифузійних обмежень. Причому ступінь прояву зазначеного ефекту різко зростає зі зниженням температури процесу, набуваючи особливої виразності в інтервалі 600–700 °С, де структурно-кінетичні фактори стають визначальними у формуванні загальної швидкості дисоціації карбонатів марганцю.

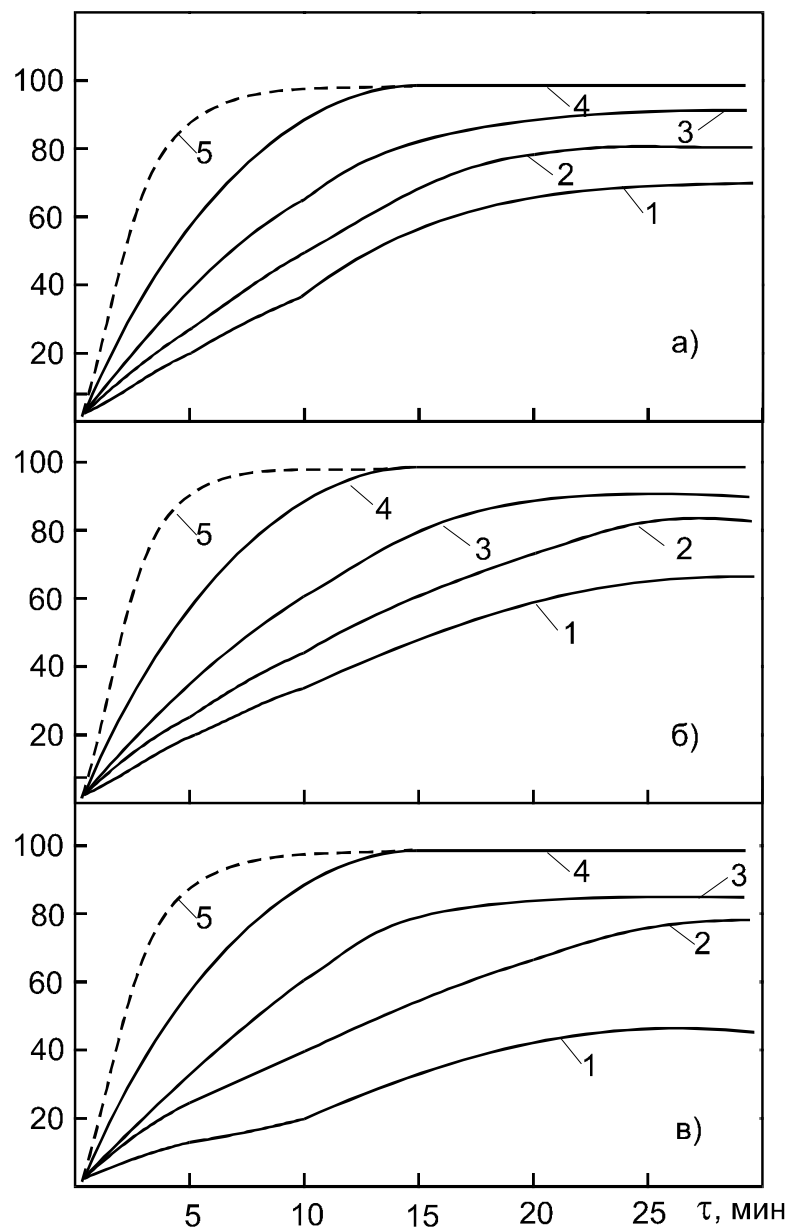


Рис. 3.2. Кінетичні криві розкладання нікопольських карбонатних концентратів.
 Температура, °К: 1 - 873; 2 - 973; 3 - 1073; 4 - 1173; 5 - 1273.
 Фракція, мм: 5-10 (а); 10-20 (б); 20-30 (в).

Таким чином, узагальнення результатів комплексного термічного аналізу нікопольських окисних і карбонатних марганцевих концентратів переконливо засвідчує визначальну, а в ряді випадків і лімітуючу, роль температурного рівня та тривалості його дії у формуванні інтенсивності перебігу й ступеня завершеності процесів дегідратації та декарбонізації марганцевої мінеральної сировини. Встановлено, що термодинамічно та кінетично найсприятливіші умови, за яких забезпечується максимальна повнота структурно-фазових і кристалохімічних перетворень, реалізуються в області високих температур, не нижчих за 900–1000 °С. Зокрема показано, що масові втрати зразків після п'ятихвилинної витримки за температури 1000 °С перевищують 90 % сумарних втрат при прожарюванні, тоді як досягнення повної величини втрати маси, незалежно від генетичного типу та

родовищної приналежності рудної сировини, потребує тривалості термообробки не менш як 10 хв.

Отриманий експериментальний матеріал не лише поглиблює уявлення щодо послідовності та механізму термічно індукованого руйнування гідратних і карбонатних складових марганцеворудних мінералів, але й створює науково обґрунтовану основу для розроблення та оптимізації технологічних підходів, спрямованих на підвищення фізико-хімічної та металургійної якості агломерату, у шихтовому складі якого застосовуються карбонатні марганцеві концентрати.

3.2. Методичне та апаратурно-технічне забезпечення лабораторних досліджень процесу агломерації

Лабораторні експериментальні дослідження, спрямовані на відпрацювання та параметричну оптимізацію режимів спікання, здійснювалися з використанням дослідної агломераційної установки з площею активної зони спікання 0,1 м², принципова схема якої наведена на рис. 3.3. Конструктивні особливості зазначеного стенду забезпечували можливість синхронного контролю температурного поля в локальній зоні відбору газової фази, безперервної реєстрації параметрів теплового стану шару, а також селективного відбору газових проб у герметичні контейнери з подальшим проведенням їх хроматографічного аналізу як безпосередньо в процесі спікання, так і після завершення відповідної стадії експерименту (рис. 3.4).

Для кількісної та якісної оцінки складу газової фази була розроблена спеціалізована методика пробовідбору, реалізована за допомогою установки, що складається з батареї з п'ятнадцяти скляних бюреток, оснащених корковими запірними кранами та об'єднаних спільними вхідним і вихідним колекторами. Перед початком серії дослідів система піддавалася багаторазовій продувці та заповненню інертним газом (гелієм) з метою усунення домішок атмосферного повітря та мінімізації паразитних хімічних взаємодій.

Відбір проб у ході процесу агломерації здійснювався шляхом примусового відсмоктування газової суміші компресором із заданої зони шару, що спікається, через систему алундових трубок, вхідні торці яких були розміщені в центральній частині аглочаші по її висоті, після чого газ послідовно надходив у блок контейнерів, де відбувалося почергове наповнення бюреток.

Для забезпечення достовірного контролю температурних умов у зоні пробовідбору використовувалися термопари типу ВР 5/20, робочі спаї яких розташовувалися безпосередньо на вході газового потоку в алундову трубку, що дозволяло фіксувати реальні температури газотвердофазної взаємодії з високою просторовою та часовою роздільною здатністю.

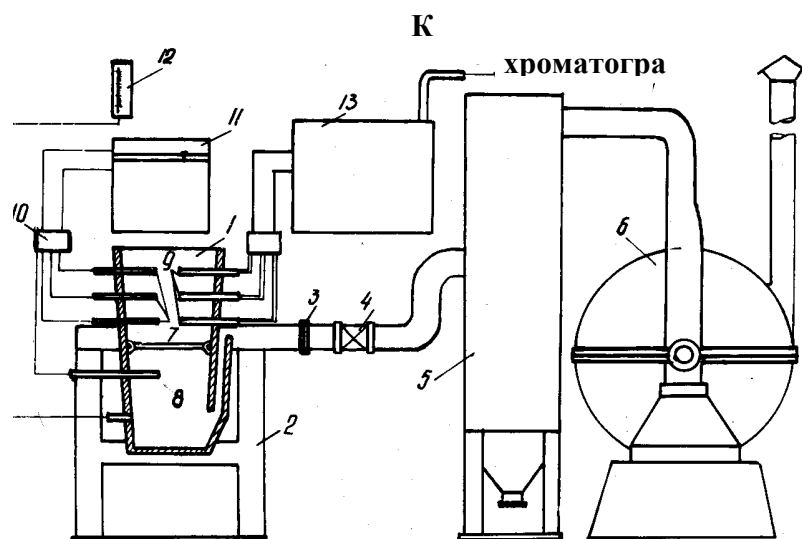


Рис. 3.3 Схема аглоустановки з обладнанням для контролю температури й відбору аглогазів

1 – чаша із площею спікання $0,1 \text{ м}^2$; 2 – опора чаші; 3 – поворотний шарнір; 4 – засувка “Лудло” $\text{Ø} 4$ ”; 5 – мультициклон з 4-х стандартних елементів; 6 – ексгаустер, $Q = 600 \text{ м}^3/\text{год}$, $H = 18000 \text{ Па}$; 7-8 – термопара ХА; 9 – алундові трубки для відбору газів; 10 – перемикач; 11 – потенціометр КСП-5; 12 – тягомір ТМП 0-15000 Па; 13 – контейнер для приймання відібраних газів

Кількісно-якісний аналіз складу газової фази здійснювався відповідно до методологічного підходу, запропонованого С. М. Грищенком зі співавторами для дослідження кінетичних закономірностей перебігу окисно-відновних перетворень у процесах виплавки феросплавів, з тією принциповою відмінністю, що в даній роботі замість печі Таммана як реакційного вузла використовувалася лабораторна агломераційна установка. Така адаптація методики забезпечила можливість екстраполяції відпрацьованих схем газоаналітичного контролю на умови високотемпературного спікання багатокомпонентних рудних систем, що характеризуються інтенсивною газотвердофазною взаємодією та суттєвими градієнтами температури й складу.

Хроматографічний модуль аналітичного комплексу був реалізований на базі газового хроматографа типу ЛХМ-80, який зазнав цілеспрямованої конструктивно-функціональної модифікації з метою забезпечення режиму експрес-аналізу складних багатокомпонентних газових сумішей. Сутність реконструкції полягала у впровадженні схеми послідовного з’єднання хроматографічних колон, що дало змогу здійснювати повний поділ компонентів досліджуваної газової фази в межах одного аналітичного циклу з використанням єдиного детектора за теплопровідністю. При цьому детектор був оснащений двома конструктивно ідентичними комірками, які поперемінно виконували функції еталонної (порівняльної) та робочої, що суттєво підвищувало стабільність нульової лінії та відтворюваність результатів вимірювань.

Використання спеціально підібраної сорбційної системи, сформованої на основі полісорбу-1 з гранулометричним складом $0,5\text{--}0,8 \text{ мм}$ та молекулярних сит –

цеолітів типу СаА з розміром частинок 0,3–0,6 мм, забезпечувало реалізацію оптимального режиму хроматографічного розділення за умов підвищеної аналітичної чутливості. За об'єму проби, що вводилася, близько 1 мл та витрати газу-носія (гелію) протягом 5 хв досягалося повне та надійне розділення основних компонентів технологічної газової фази, зокрема CO₂, CO, O₂, N₂, H₂ та CH₄, що дозволяло здійснювати коректну інтерпретацію кінетичних параметрів процесів дегазації, окиснення й відновлення в зоні агломерації.

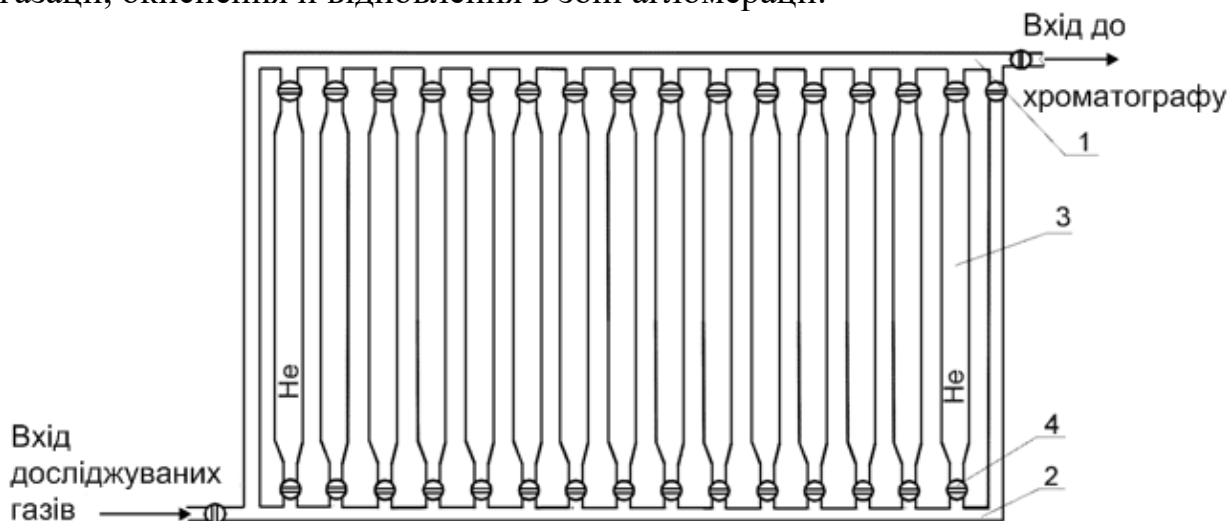


Рис.3.4. Схема обладнання контейнера для відбору проб газу
1 – вхідний колектор; 2 – вихідний колектор; 3 – корковий кран;
4 – бюретка.

Методологічна схема встановлення залежності ступеня термічної дисоціації карбонатної складової марганцевої сировини від характерного розміру частинок ґрунтувалася на диференційованому фракційному аналізі з наступною ізотермічною та квазіізотермічною термообробкою відібраних проб. Вихідний марганцевий карбонатний концентрат піддавали гранулометричному розділенню з виділенням інтервалів крупності 1–3, 3–5, 5–8, 8–10 та 10–15 мм, кожен з яких розглядався як самостійний об'єкт дослідження з позицій тепломасообміну та кінетики твердофазних перетворень.

Аналітична навіска матеріалу кожної фракції завантажувалася в алуновий тигель з подальшим проведенням термічної обробки в печі Таммана за регламентованим температурно-часовим режимом. Маса навіски підбиралася з таким розрахунком, щоб шар матеріалу не перевищував двократної товщини характерного зерна, тобто формував у тиглі умовно двошарове укладання, що мінімізувало вплив внутрішніх температурних градієнтів і, відповідно, усувало можливу неоднорідність ступеня прогріву та глибини перебігу реакцій декарбонізації в об'ємі проби.

Температурний рівень термообробки та тривалість витримки при заданій температурі варіювалися відповідно до реальних термокінетичних умов, притаманних елементарному об'єму аглошихти, який характеризується максимальним часом перебування в зоні пікових температур під час промислового

процесу спікання. Вказані умови відтворювалися на основі експериментально встановленої кривої зміни температури в часі при агломерації, наведеної на рис. 3.5.

При цьому відрізок $e-c$ на температурно-часовій траєкторії $e-c-a$ інтерпретувався як стадія інтенсивного нагрівання зразка зі зростаючою температурою, що відповідає зоні активної фільтрації гарячих газів і розвитку ендотермічних процесів дисоціації карбонатів, тоді як відрізок $c-a$ відображав фазу охолодження матеріалу після виходу з області максимального теплового навантаження.

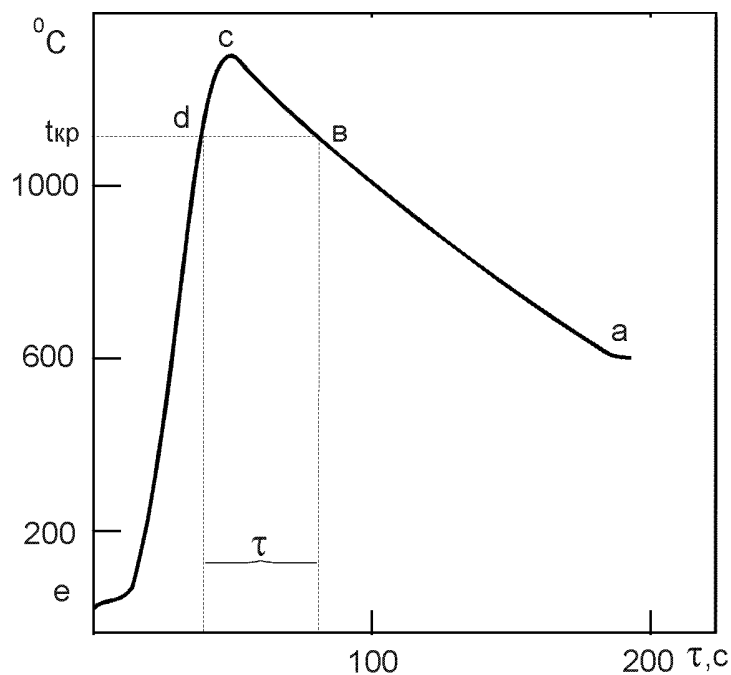


Рис. 3.5 Крива зміни температури в шарі спекаючої марганцеворудної аглошихти. Умовні позначки: $c-a$ – зона охолодження агломерату; $b-c-d$ – зона максимальних температур; $e-d$ – зона підігріву й сушіння шихти; $t_{кр}$ – температура початку запалення палива; $t_{кр}$ – температура початку кристалізації розплаву; τ – час перебування матеріалу в розплавленому стані.

З метою отримання кількісно репрезентативної оцінки ступеня термічно індукованої дисоціації карбонатної складової в умовах інтенсивного агломераційного тепломасообміну було застосовано методологію перерваного експерименту, концептуальна парадигма якої ґрунтується на штучному припиненні теплового навантаження на дослідний об'єкт за досягнення температурного рівня близько 1100 °C, що відповідає інтервалу початку пластичної деформації та розм'якшення найбільш термодинамічно нестійких і низькоплавких фазових компонентів багатокомпонентної оксидно-карбонатної системи. Подальше форсоване охолодження зразка реалізовувалося з метою кінетичної «консервації» поточного структурно-фазового стану матеріалу та елімінації можливості продовження гетерогенної декарбонізаційної реакції в позапічний часовий інтервал.

Для формування базової порівняльної шкали завершеності реакцій термічного розкладу карбонатів додатково здійснювали ізотермічну термообробку навісок карбонатного концентрату, попередньо класифікованих за гранулометричними фракціями. Експерименти проводили за температур, що перевищували 1000 °С, при тривалості витримки 10 хв, що, відповідно до відомих кінетичних моделей твердотільних реакцій та експериментально верифікованих закономірностей декарбонізації, є часовим інтервалом, достатнім для практично повного вичерпання реакційного потенціалу карбонатної фази та стабілізації оксидного продукту.

Визначення питомого електричного опору марганцевмісних матеріалів здійснювали на компактованих циліндричних зразках (діаметр 8 мм, висота 6 та 10 мм), сформованих шляхом пресування порошків із максимальним розміром частинок не більше 0,1 мм, що забезпечувало мінімізацію впливу макропористості та контактного опору між окремими зернами. Вимірювання проводили в атмосфері повітря в інтервалі температур 20–1200 °С за лінійного режиму нагрівання зі швидкістю 10 °С·хв⁻¹.

Оцінювання відновлювальної здатності агломерату здійснювали за результатами ізотермічного витримування подрібненого зразка масою 10 г у відновлювальному газовому середовищі при температурі 1400 °С у графітовому тиглі протягом 30 хвилин, після чого за величиною масових втрат, обумовлених редуцією кисневмісних фаз, розраховували інтегральний ступінь відновлення як узагальнений показник термохімічної активності матеріалу.

Як домінуючий інтегральний критерій експлуатаційної придатності агломерату розглядали його ударну механічну міцність, нормовану відповідно до положень ДСТУ 3200, яка для лабораторних зразків кількісно характеризувалася часткою фракції з еквівалентним діаметром частинок менше 5 мм, утвореної внаслідок п'ятикратного вільного падіння кондиційного матеріалу на масивну сталеву плиту з висоти 2 м.

Дослідження динаміки просторово-часового переміщення фронту горіння твердого палива, а також фронту вторинної теплової хвилі, ініційованої додатковим поверхневим термічним впливом на агломераційний шар, здійснювали з використанням багатоканальної системи температурного моніторингу. Для цього перед початком процесу спікання в стінці аглочаші формували технологічні отвори, через які по всій висоті шару встановлювали термопари типу ВР 5/20 з виведенням їхніх холодних спаїв на самописні потенціометри типу КСП-4. Швидкості переміщення відповідних фронтів визначали шляхом аналізу часових зсувів положення температурного максимуму на експериментально зареєстрованих термокінетичних кривих.

Швидкість фільтрації газового потоку крізь пористу структуру аглошихти встановлювали за допомогою цифрового крильчатого анемометра типу АП-1, змонтованого у каліброваній трубі фіксованого діаметра, по якій здійснювалася подача дуття в реакційну зону. Паралельно у колекторі відхідних аглогазів монтували дросельний вимірювальний елемент у вигляді стандартної діафрагми,

що дозволяло визначати об'ємну витрату газової фази та здійснювати незалежну верифікацію величини швидкості фільтрації.

Фазово-мінералогічний та елементний склад вихідних шихтових матеріалів і синтезованого агломерату досліджували із залученням комплексу петрографічних методів та стандартизованих процедур хімічного аналізу відповідно до вимог нормативних документів.

3.3. Дослідження температурно-часових параметрів режиму спікання марганцеворудного агломерату

Формування кінцевої морфології, фазового складу та механічної цілісності марганцевого агломерату в детермінуючому ступені обумовлюється температурно-часовими характеристиками процесу спікання, насамперед максимально досяжним температурним рівнем у межах агломераційного шару та тривалістю перебування матеріалу в зоні високотемпературного впливу, де інтенсифікуються процеси дифузійного масоперенесення, утворення рідкої фази, рекристалізації та формування міжзернових контактів.

Кількісну інтерпретацію впливу температурного режиму на механізми структуроутворення здійснювали на основі аналізу сукупності температурних залежностей, отриманих у процесі безперервної реєстрації температур у зонах сушіння, попереднього підігріву, досягнення пікових значень температури та подальшого охолодження аглоспеку на різних рівнях по висоті шару. Просторове розташування вимірювальних вузлів та схема температурного контролю на лабораторній аглоустановці наведені на рис. 3.3.

Як вихідні компоненти шихти використовували окисні та карбонатні концентрати Нікопольського родовища, детальний хімічний та гранулометричний склад яких подано у табл. 3.4 і 3.5 відповідно.

Таблиця 3.4 – Хімічний склад марганцевих концентратів

Найменування концентратів	Масова частка компонентів, %						
	Mn	SiO ₂	CaO	MgO	Fe	ппп	P
Окисний П сорт	36,1	20,6	5,3	1,5	1,8	14,9	0,21
Карбонатний	29,0	16,7	11,7	2,2	1,3	29,8	0,22

У якості палива коксовий дріб'язок коксу фракції 0-3 мм.

Таблиця 3.5 – Гранулометричний склад марганцевих концентратів

Найменування концентратів	Масова частка фракцій, %		
	6-10 мм	3-6 мм	0-3 мм
Окисний П сорт	23,8	24,5	51,2
Карбонатний	59,8	23,5	25,7

Термокінетичний аналіз, виконаний на підставі термограм, отриманих у процесі спікання окисних та карбонатних марганцевих концентратів, засвідчив наявність принципових відмінностей у характері формування температурного поля в межах шару агломераційної шихти, які проявляються, зокрема, у систематичному перевищенні значень максимальної температури для карбонатвмісних систем на 40–50 °С порівняно з відповідними параметрами, характерними для окисних концентратів.

Одночасно встановлено, що використання карбонатного концентрату супроводжується істотним розширенням просторово-часової області попереднього підігріву матеріалу за рахунок зниження ефективної швидкості зростання температури. Варіювання масової частки твердого палива в шихті, незалежно від її мінералогічного типу, зумовлює лише пропорційне розширення або звуження високотемпературної зони, не змінюючи при цьому загального характеру встановлених закономірностей.

Збільшення протяжності зони підігріву (зона II), тобто зменшення середньої швидкості нагрівання аглошихти в інтервалі температур від приблизно 300 °С до температурного максимуму майже вдвічі при використанні карбонатних концентратів, обумовлюється значними питомими витратами теплової енергії на перебіг ендотермічних реакцій термічної дисоціації карбонатів, інтенсивність яких різко зростає, починаючи з температур близько 600 °С, що узгоджується з відомими літературними даними щодо термодинаміки та кінетики декарбонізаційних процесів.

Фіксоване зростання температурного максимуму в карбонатвмісних системах корелює з підвищенням температури плавлення суміші шихтових компонентів: для марганцевих карбонатних концентратів вона перебуває в інтервалі 1260–1360 °С, тоді як для окисних аналогів обмежується діапазоном 1260–1290 °С. Водночас однією з найбільш показових відмінностей є характер спадної ділянки температурних кривих (зона III), що відповідає стадії охолодження аглоспеку: при спіканні окисних концентратів ця ділянка характеризується значно меншою крутістю, тобто зниженою швидкістю тепловіддачі.

Встановлено, що крутість спадних сегментів термограм, які відображають інтенсивність теплообмінних процесів між твердою фазою та газовим середовищем, у вирішальному ступені визначається макроструктурною організацією агломерату. Зокрема, унаслідок вигорання вуглецю в процесі спікання з об'єму шихти елімінується до 12–15 % твердого матеріалу, а додаткове видалення гігроскопічної та гідратної вологи з оксидних марганцевих руд манганітового й псиломеланового типів, а також дегідратація гідрокарбонатних фаз, у яких вміст марганцю в гідроксидній формі сягає 38,8 %, супроводжується інтенсивним виділенням CO₂ та формуванням розвиненої системи макро- і мезопор. Наявність такої пористої структури істотно підвищує ефективну поверхню теплообміну та, відповідно, сприяє прискореному охолодженню аглоспеку.

Менша інтенсивність охолодження агломерату, отриманого з окисних концентратів, додатково пояснюється тим, що в даному випадку основним охолоджувальним агентом є атмосферне повітря, питома теплоємність якого

істотно нижча, ніж у газової суміші відхідних аглогазів, збагаченої діоксидом вуглецю, характерної для карбонатвмісних систем.

Підвищена швидкість охолодження аглоспеку з карбонатних концентратів, у свою чергу, зумовлюється сукупною дією двох факторів: по-перше, значно більшою макропористістю матеріалу, сформованою внаслідок підвищених втрат маси при прожарюванні, а по-друге, частковою незавершеністю процесів термічної дисоціації карбонатів, які продовжуються на стадії охолодження та супроводжуються додатковим ендотермічним теплопоглинанням.

Достовірність встановлених закономірностей щодо варіації температурного максимуму, тривалості перебування матеріалів у високотемпературній області та швидкості охолодження аглоспеку підтверджується результатами серії експериментів зі спікання агломерату при різному вмісті карбонатного концентрату в складі аглошихти. Представлені на рис. 3.6 залежності карбонатного концентрату в рудній складовій які демонструють, що зі зростанням його вмісту до приблизно 40 % температурний максимум монотонно підвищується, після чого спостерігається його поступове зниження, яке, однак, не призводить до досягнення рівнів, характерних для спікання виключно окисних концентратів.

Нелінійний характер зазначеної залежності зумовлений конкуренцією двох протилежно спрямованих факторів: з одного боку, підвищенням температури плавлення багатокомпонентної шихтової системи, що сприяє зростанню температури в зоні горіння, а з іншого – зростаючим охолоджувальним впливом ендотермічних реакцій дисоціації карбонатів. Аналогічна тенденція простежується і для тривалості перебування матеріалу у високотемпературній зоні, яка зі збільшенням частки карбонатного концентрату в шихті різко скорочується, що суттєво впливає на механізми фазоутворення та формування мікроструктури агломерату.

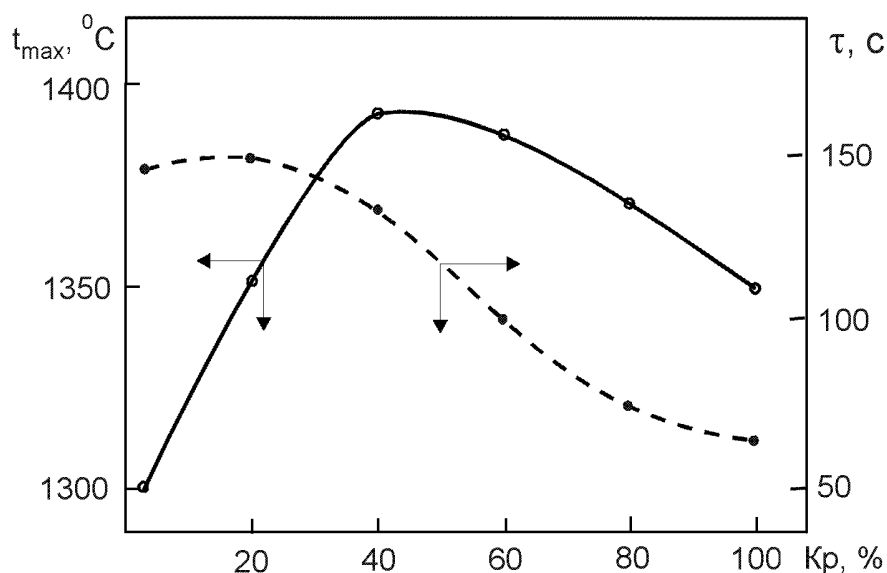


Рис. 3.6. Залежність величини температурного максимуму й часу перебування матеріалу при високих (більш 1000°C) температурах від масової частки карбонатного концентрату в шихті.

Таким чином, сукупність експериментальних даних, отриманих у ході дослідження температурного рівня процесу агломераційного спікання, переконливо свідчить про те, що використання карбонатних концентратів супроводжується істотно інтенсифікованим охолодженням аглоспеку, швидкість якого приблизно вдвічі перевищує відповідний показник для агломератів, сформованих з окисних концентратів. Зазначена особливість температурної кінетики, як відомо з положень фізики твердого тіла та теорії термопружності, зумовлює виникнення явищ термічного удару, формування значних внутрішніх термонапружень та, як наслідок, деградацію механічної цілісності й зниження міцнісних характеристик готового агломераційного продукту.

Додатково встановлено, що скорочення тривалості перебування шихтових матеріалів у зоні високих температур, яке монотонно посилюється зі зростанням частки карбонатних концентратів у складі аглошихти, також чинить виражений негативний вплив на формування структурно-фазового стану агломерату та його експлуатаційні властивості.

Зменшення як просторової протяжності, так і часової тривалості високотемпературного інтервалу призводить до зниження ступеня термічної дисоціації карбонатних мінералів, причому зазначений ефект набуває особливої виразності для фрагментів матеріалу з характерним розміром часток понад 8 мм, для яких дифузійні обмеження та низька питома поверхня істотно гальмують перебіг декарбонізаційних реакцій. Водночас, з огляду на те, що температура аглоспеку після завершення рідкофазного спікання залишається достатньо високою, процеси дисоціації великих фракцій агломераційної шихти не припиняються миттєво, а продовжуються й на стадії післякристалізаційного охолодження, що буде підтверджено результатами подальшого аналізу складу газової фази.

Більше того, петрографічні дослідження мікроструктури агломератів засвідчили, що кристалізація рідкої фази відбувається переважно на поверхні найбільших і, як правило, недостатньо прокалених частинок карбонатвмісного матеріалу, що має принципове значення для подальшої еволюції структури. По-перше, така локалізація кристалізаційних процесів додатково ускладнює дифузійний доступ газової фази до внутрішніх об'ємів частинок і, відповідно, сповільнює перебіг реакцій дисоціації; по-друге, вона формує різко неоднорідний напружено-деформований стан у межах окремих шматків, що зумовлює ініціацію мікротріщин, їх подальший розвиток та руйнування міжчастинкових контактів і агрегатних зрощень.

3.4. Вплив складу та парціальних тисків компонентів газової фази на закономірності формування аглоспеку

Поряд із температурним режимом спікання, визначальним фактором, який суттєво детермінує механізми формування мікро- та макроструктури агломерату за умов варіювання хімічного й мінералогічного складу марганцеворудної сировини, є склад газової фази в межах шару спікаємої аглошихти. Саме параметри газового середовища на різних горизонтах шару дозволяють кількісно оцінити інтенсивність

і ступінь завершеності процесів горіння твердого палива, окисно-відновних перетворень, дисоціації мінеральних компонентів та супутніх гетерогенних реакцій.

У зв'язку з цим при аналізі можливих шляхів підвищення міцнісних характеристик агломерату принципового значення набуває встановлення функціонального взаємозв'язку між температурно-часовими параметрами процесу спікання, складом газової фази та компонентним складом вихідної агломераційної шихти.

З метою експериментальної ідентифікації зазначеного взаємозв'язку, паралельно з багатоточковим контролем температурного поля по висоті шару, здійснювався відбір проб аглогазів із характерних зон процесу, а саме: зони сушіння та підігріву шихти, області максимальних температур та зони охолодження агломерату. Відібрані газові проби піддавали кількісному та якісному аналізу за допомогою серійного газового хроматографа.

Процедура відбору газової фази реалізовувалася таким чином, що термопари та газозабірні трубки розташовувалися коаксіально й симетрично одна відносно одної, забезпечуючи можливість відбору газу з центральної частини аглочасі при фіксованому температурному рівні (див. рис. 3.3). Початкова висота шару аглошихти у всіх експериментальних серіях підтримувалася сталою та дорівнювала 0,45 м, а вміст палива становив 8 % від маси рудної складової, що відповідає типовим промисловим умовам агломерації.

Результати досліджень складу газової фази на різних горизонтах шару спікаємої шихти засвідчили, що в зоні охолодження агломерату, у міру наближення до фронту горіння, відбувається поступове зменшення концентрації молекулярного кисню при одночасному зростанні частки діоксиду вуглецю. Однак для карбонатних концентратів інтенсивність зростання концентрації CO_2 є істотно вищою, ніж для окисних систем, за практично однакових темпів зниження вмісту O_2 .

Аналіз еволюції відношення сумарного вмісту кисню в газовій фазі до концентрації азоту показав, що при спіканні карбонатних концентратів у зоні охолодження в газову фазу виділяється додаткова кількість кисню, причому величина параметра перевищує значення, характерне для атмосферного повітря (0,265). Таке зростання сумарного вмісту кисню разом із підвищеною концентрацією CO_2 однозначно свідчить про продовження перебігу процесів термічної дисоціації карбонатних мінералів у період охолодження та тверднення аглоспеку.

Для окисних концентратів у цій же зоні спостерігається протилежна тенденція – що вказує на витрату частини кисню на окиснення нижчих оксидів марганцю (MnO , Mn_2O_4), що узгоджується з результатами, наведеними в роботах інших дослідників. Нетривале локальне підвищення сумарного вмісту кисню на початку зони охолодження для окисних концентратів свідчить про наявність у їх складі залишкових кількостей карбонатних мінералів.

У зоні максимальних температур фіксується різке зростання концентрації оксиду вуглецю при майже повному зникненні вільного кисню. У цій області,

поряд з інтенсивним окисненням вуглецю, відбуваються складні окисно-відновні перетворення компонентів шихти, причому при спіканні карбонатних концентратів роль окисника частково виконує також CO_2 , концентрація якого в цей період помітно зменшується.

У зоні підігріву та сушіння в обох типах систем спостерігається зниження концентрації O_2 та CO при одночасному зростанні частки CO_2 у газовій фазі для карбонатних концентратів, що корелює з початком термічної дисоціації карбонатів.

З метою остаточного підтвердження припущення щодо пролонгованого перебігу процесів дисоціації карбонатів у зоні охолодження агломерату було проведено додаткову серію експериментів з випалу карбонатних концентратів різної крупності. Термообробку здійснювали в температурно-часових режимах, максимально наближених до реальних умов агломераційного процесу, з урахуванням швидкості нагрівання та охолодження, а також часу перебування матеріалу при високих температурах відповідно до термкінетичної кривої, наведеної на рис. 3.5 (див. методику досліджень).

Результати, подані графічно на рис. 4.7, однозначно свідчать про те, що зі збільшенням середнього діаметра часток карбонатного матеріалу ступінь їх термічної дисоціації за однакових температурно-часових умов істотно зменшується, що підтверджує визначальну роль гранулометричного фактора у формуванні газового режиму та структурних характеристик агломерату.

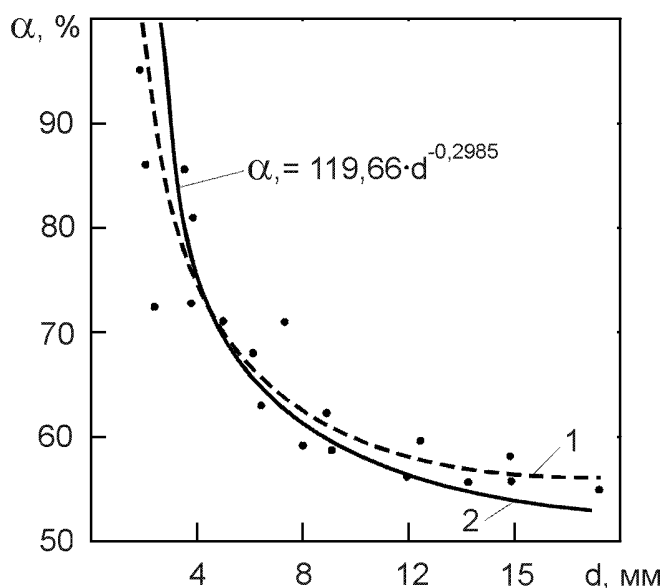


Рис. 3.7 Ступінь дисоціації карбонатних концентратів різної фракції в умовах агломерації

- 1 – крива отримана експериментально;
2 – розрахункова крива.

Встановлено, що функціональна залежність ступеня термічного розкладання (дисоціації) карбонатної фази від характерного лінійного розміру частинок, зокрема їх еквівалентного діаметра, з високою точністю описується степеневою закономірністю, відповідно до якої зі зменшенням розміру зерен спостерігається

монотонне й різко виражене зростання величини ступеня декарбонізації. Графічна інтерпретація цієї залежності відповідає кривій гіперболічного типу, що асимптотично наближається до координатних осей, відображаючи принципову обмеженість як максимального, так і мінімального значень досліджуваного параметра.

Параметри зазначеної степеневі функції були визначені емпіричним шляхом на основі регресійної обробки масиву експериментальних даних, у результаті чого встановлено, що ступінь дисоціації зростає пропорційно деякому сталому коефіцієнту та обернено пропорційно діаметру частинок, піднесеному до показника степеня, близького до однієї третини. Отримана кореляційна залежність характеризується надзвичайно високим значенням коефіцієнта множинної кореляції, що наближається до одиниці, що, у свою чергу, свідчить про статистично значущу, фізично обґрунтовану та відтворювану детермінованість ступеня дисоціації гранулометричним фактором.

Аналіз встановленої закономірності показує, що в умовах реального агломераційного процесу карбонатні мінерали марганцю з розміром частинок у межах декількох міліметрів практично повністю зазнають термічної декарбонізації. Водночас, з урахуванням того, що у промислово використовуваних концентратах частка такої дрібнодисперсної фракції становить лише близько чверті або третини загальної маси карбонатного компоненту, можна констатувати, що після завершення рідкофазного спікання та наступної кристалізації розплаву сумарна кількість карбонатної складової, яка не зазнала повної дисоціації, досягає приблизно двох п'ятих або навіть майже половини від загальної маси карбонатів, введених до складу аглошихти.

Наведений кількісний результат слугує прямим експериментальним підтвердженням раніше висловленого положення щодо пролонгованого перебігу процесів термічної дисоціації карбонатних мінералів у зоні охолодження аглоспеку, тобто вже після завершення основної стадії формування мінералогічної структури та тверднення рідкої фази.

Таким чином, на підставі комплексного аналізу температурно-часових характеристик процесу спікання та еволюції складу газової фази залежно від типу вихідної сировини встановлено, що при агломерації карбонатних концентратів декарбонізація карбонатних мінералів не обмежується високотемпературною зоною горіння, а продовжується й на стадії охолодження аглоспеку. Зазначене явище зумовлює формування в тверднучій структурі матеріалу значних внутрішніх термічних напружень, пов'язаних із локальними об'ємними змінами, перерозподілом порового простору та неоднорідністю фазового складу, що в сукупності призводить до деградації міжзернових контактів і, як наслідок, до зниження механічної міцності агломерату.

З огляду на викладене, для забезпечення більш повного завершення процесів дисоціації карбонатної складової до моменту кристалізації розплаву та мінімізації негативного впливу посткристалізаційної декарбонізації на структурну цілісність агломерату доцільним є або збільшення ефективної тривалості перебування матеріалу в зоні максимальних температур, або цілеспрямоване зменшення

верхньої межі крупності карбонатвмісних часток у складі аглошихти, що інтенсифікує тепло- і масообмінні процеси та підвищує ступінь завершеності гетерогенних реакцій.

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.03.ЕАД	арк.
	Арк.	№ докум.	підпис	дата		25

4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАРГАНЦЕВОГО АГЛОМЕРАТУ

4.1. Розробка та експериментальне обґрунтування технології рекристалізаційного термічного відпалювання аглоспеку

Проведений у попередніх розділах системний аналіз технологічних підходів і методичних рішень, спрямованих на поліпшення металургійних характеристик агломерату та інтенсифікацію процесів його промислового виробництва, засвідчив, що часткове усунення наявних технологічних обмежень може бути досягнуте шляхом раціоналізації режимних параметрів процесу спікання та оптимізації його основних керованих показників. Водночас встановлено, що радикальне зниження прояву таких структурно зумовлених негативних властивостей аглоспеку, як підвищена макропористість і надмірна частка склоподібних фаз у твердій матриці матеріалу, є принципово можливим лише за умови застосування додаткових стадій термічної обробки у поєднанні з примусовим механічним ущільненням сформованого спеку.

З огляду на викладене, у межах даного розділу здійснено експериментальну верифікацію зазначених технологічних рішень щодо підвищення якісних показників агломерату та зростання продуктивності агломераційних установок у лабораторному масштабі, а також продемонстровано принципову здійсненність їх практичної реалізації в умовах промислового виробництва.

Лабораторні дослідження впливу сукупності факторів процесу спікання на інтегральні показники агломерації та експлуатаційні властивості марганцеворудного агломерату виконувалися з використанням експериментальної аглоустановки з площею спікання сто квадратних сантиметрів, конструктивна схема якої наведена на рисунку 43. Кількісна оцінка ефективності процесу спікання здійснювалася на підставі аналізу змін питомої продуктивності установки та виходу кондиційного агломерату з аглоспеку, тоді як рівень якості готового продукту характеризувався значеннями його механічної міцності.

Питома продуктивність процесу спікання визначалася як узагальнений показник, пропорційний насипній густині аглошихти, лінійній швидкості переміщення фронту горіння через шар матеріалу та двом безрозмірним коригувальним коефіцієнтам, що враховують, відповідно, вихід придатного агломерату та конструктивно-експлуатаційні особливості аглоустановки. Такий підхід дозволяв адекватно відобразити вплив як фізико-хімічних характеристик сировини, так і технологічних параметрів процесу на інтегральну продуктивність спікання.

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.04.ДРТР					
					ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ			Пімен	АнкVIII	АнкVIIIІІ
Зм	Анк	№	Підпис	Дат						1
					ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ			MT-22-1		
Розробл	Каширець									
Перевір	Плотніков									
Н	Плотніков									
Затвер	Бабошко									

Вихід придатного агломерату з аглоспеку оцінювали за масовою часткою фракції з розміром частинок понад десять міліметрів після дворазового механічного руйнування спеченого пирога шляхом його скидання з висоти двох метрів на сталеву плиту, що моделювало умови навантажень, характерні для промислових транспортно-перевантажувальних операцій.

Як було показано в попередніх розділах, підвищення механічної міцності агломерату може бути досягнуте, з одного боку, шляхом зменшення об'ємної частки склоподібної фази у структурі матеріалу, а з іншого — за рахунок релаксації внутрішніх термічних напружень, що формуються в процесі швидкого охолодження аглоспеку, шляхом його додаткової термічної обробки.

З метою розробки науково обґрунтованої технології рекристалізаційного відпалу аглоспеку в лабораторних умовах було встановлено сукупність закономірностей, які пов'язують температуру термообробки, умови теплопередачі, тривалість ізотермічної витримки та момент початку відпалу відносно завершення процесу спікання з основними технологічними показниками агломерації.

Для дослідження впливу зазначених параметрів термічної обробки на ефективність процесу спікання та якість отриманого агломерату в лабораторних експериментах використовувалася аглошихта, рудна складова якої формувалася сумішшю окисного концентрату другого сорту в кількості шістдесят відсотків та карбонатного концентрату в кількості сорок відсотків за масою. Хімічний склад зазначених матеріалів наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Хімічний склад марганцеворудних концентратів

Найменування концентрату	Масова частка компонентів, %					
	Mn	SiO ₂	CaO	MgO	Fe	п.п.п.
Окисний 2 сорту	36,1	19,6	5,3	1,5	1,8	14,9
Карбонатний	29,0	16,7	11,7	2,2	1,3	29,8

Експериментальні дослідження здійснювалися в агломераційній чаші, оснащених системою термопар, які було заздалегідь інстальовано в товщі шару аглошихти на різних висотних рівнях, а також комплексом реєструвальної апаратури, призначеної для безперервної фіксації температурно-часових параметрів процесу. З метою реалізації режимів додаткового теплового впливу на сформований аглоспек застосовувався газоповітряний пальниковий пристрій, змонтований безпосередньо над робочою зоною аглошаши, що забезпечувало можливість керованого нагрівання поверхневого шару спеченого матеріалу до температурного рівня порядку тисячі двохсот градусів за Цельсієм.

Початкова висота шару агломераційної шихти у всіх серіях експериментів стабілізувалася на рівні чотирьох десятків метра, що дозволяло забезпечити відтворюваність гідродинамічних і теплофізичних умов процесу спікання. У ході дослідження закономірностей теплоперенесення в пористому середовищі аглошихти кількісно визначалися як лінійна швидкість переміщення фронту

горіння твердого палива, так і швидкість поширення вторинної теплової хвилі, індукованої зовнішнім підведенням теплової енергії, за фіксованих значень швидкості фільтрації повітряного потоку крізь шар матеріалу.

Оцінювання зазначених швидкісних характеристик здійснювалося непрямим методом — за просторово-часовим зсувом положення локальних температурних максимумів, зареєстрованих системою термопар у процесі розвитку термічного поля в товщі шару. Узагальнені результати проведених вимірювань і їх графічна інтерпретація наведені на рисунку 4.1.

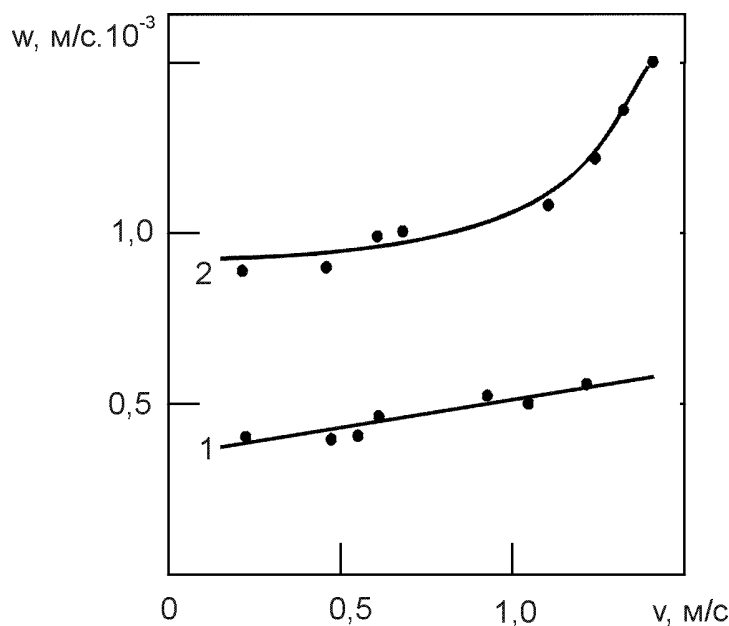


Рис.4.1. Вплив швидкості фільтрації повітря (v) на швидкість переміщення фронту горіння й фронту теплової хвилі
 1 – швидкість переміщення фронту горіння;
 2 – швидкість переміщення фронту вторинної теплової хвилі.

Отриманий масив експериментальних даних переконливо засвідчує, що в досліджуваному інтервалі технологічних параметрів лінійна швидкість поступального переміщення фронту горіння твердого палива перебуває у стані практично лінійної функціональної залежності від швидкості фільтрації повітряного потоку крізь шар агломераційної шихти, причому інтенсифікація фільтрації супроводжується монотонним зростанням швидкості просування зони горіння, що зумовлюється відповідним збільшенням масового припливу молекулярного кисню в реакційно активну область.

Водночас встановлено, що швидкість міграції фронту вторинної теплової хвилі в діапазоні швидкостей фільтрації повітря приблизно від трьох десятих до семи десятих метра за секунду, який відповідає характерним умовам агломерації марганцевмісних матеріалів у промислових агрегатах, зазнає лише незначних змін. Однак за подальшого підвищення інтенсивності газового потоку спостерігається

різко виражене прискорення перенесення теплового збурення в глибину шару, що інтерпретується як наслідок переходу до режиму, в якому домінуючим механізмом теплоперенесення стає конвективна складова, реалізована через транспорт ентальпії газовою фазою.

З урахуванням реальних технологічних меж варіювання швидкості фільтрації повітря в промислових агломераційних шихтах встановлено, що швидкість поширення фронту вторинної теплової хвилі перевищує швидкість поступального руху фронту горіння палива в середньому у дві з лишком рази. Така обставина дозволяє, виходячи з вимог забезпечення суцільного рекристалізаційного відпалу аглоспеку по всій висоті шару, сформулювати положення про доцільність ініціювання додаткової термічної обробки поверхні спеченого матеріалу після завершення приблизно п'ятидесяти п'яти – шістдесяти п'яти відсотків загальної тривалості процесу спікання, що забезпечує наближення фронту вторинної теплової хвилі до колосникової решітки практично синхронно з моментом закінчення агломерації та, відповідно, створює передумови для термічного впливу на майже весь об'єм аглоспеку.

Експериментальна перевірка сформульованого припущення щодо можливості реалізації об'ємного відпалу спеченого матеріалу була здійснена в серії дослідів із використанням марганцеворудної аглошихти незмінного складу, за сталої масової частки палива, що дорівнювала восьми з половиною відсоткам, та фіксованої висоти шару чотири десятих метра.

Беручи до уваги описаний у спеціальній літературі досвід термічної обробки залізородних агломератів за одно- та двостадійними схемами, у даній роботі було реалізовано двоступеневий режим теплового впливу, при якому температура на другій стадії підтримувалася на дещо нижчому рівні порівняно з першою. Необхідність такої багатостадійної обробки зумовлена тим, що на початковому етапі, за температур порядку восьмисот – тисячі градусів Цельсія, досягається зниження об'ємної частки склоподібних фаз у структурі аглоспеку, тоді як на наступній стадії, при температурі близько шістсот п'ятдесяти градусів, здійснюється релаксація внутрішніх термічних напружень, індукованих процесами девітрифікації та рекристалізації, що перебігають у ході першої стадії.

З метою обґрунтування оптимального температурно-часового режиму термічної обробки додатково були проведені порівняльні експерименти з одностадійним відпалом за температури порядку тисячі градусів Цельсія протягом двох хвилин, а також із двостадійним нагріванням за тієї ж максимальної температури з подальшим витриманням при близько восьмистах градусах упродовж двох хвилин на кожному етапі.

Петрографічне дослідження отриманих зразків засвідчило, що об'ємна частка склоподібних фаз як у разі одностадійної, так і двостадійної обробки залишається практично незмінною. Разом із тим механічні випробування продемонстрували статистично значуще підвищення міцності агломерату, підданого двоступеневому відпалу, на величину порядку одного – півтора відсотка, а також зростання виходу придатної фракції приблизно на півтора – два відсотки порівняно з матеріалом, обробленим за спрощеною схемою.

У зв'язку з цим у подальших дослідженнях режимів термічної модифікації аглоспеку відпал здійснювали за двостадійною схемою з сумарною тривалістю три – чотири хвилини з наступним відбором проб для детального петрографічного аналізу.

Для встановлення оптимального моменту ініціювання додаткової теплової обробки першу стадію відпалу проводили за температури порядку тисячі – тисячі п'ятдесяти градусів Цельсія, тоді як на другій стадії температура варіювалася в межах семисот – дев'ятисот градусів. Узагальнені результати відповідних експериментів систематизовано та наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Зміна кількості скла в агломераті по висоті шару залежно від часу початку теплової обробки

Час початку теплової обробки, % від загального часу спікання	Відстань від колосників, м	Об'ємна частка скла, %	Середня об'ємна частка скла, %
1	2	3	4
Без отжигу	0,1	27,6	
	0,2	28,9	30,9
	0,3	31,1	
	0,4	34,8	
40	0,1	26,9	
	0,2	23,7	18,3
	0,3	14,2	
	0,4	6,3	
50	0,1	20,3	
	0,2	14,2	13,6
	0,3	12,9	
	0,4	6,9	
60	0,1	14,1	
	0,2	13,6	11,1
	0,3	11,0	
	0,4	5,8	
70	0,1	25,9	
	0,2	18,3	15,3
	0,3	10,9	
	0,4	6,2	

Отримані експериментальні матеріали свідчать, що в агломераті, сформованому без реалізації стадії рекристалізаційного відпалу аглоспеку, об'ємна частка аморфізованих (склоподібних) фаз стабілізується на рівні близько 31 %. Вертикальний розподіл цієї структурної складової характеризується слабо

вираженою градієнтністю та демонструє тенденцію до незначного зменшення у напрямку колосникових ґрат. Зазначена закономірність зумовлена редукцією інтенсивності тепловідведення в нижніх горизонтах шару, що спричинена підігріванням фільтраційного повітря теплом, акумульованим у вище розташованих зонах спіку.

Ініціювання теплової обробки аглоспеку на часовому інтервалі, який відповідає 40–50 % від загальної тривалості процесу спікання, приводить до зменшення інтегрального вмісту склоподібної фази практично у 1,7 раза. За таких умов максимальний ступінь рекристалізаційного перетворення фіксується у верхній половині спіку, тоді як у його нижніх шарах редукція частки скла має обмежений характер. Подібна просторова неоднорідність пояснюється тим, що вторинна теплова хвиля, характеризуючись підвищеною швидкістю поширення, досягає фронту окиснювального горіння вуглецю шихти ще до завершення стадії спікання і надалі практично не бере участі у формуванні термічних умов, необхідних для ефективного перебігу рекристалізаційного відпалу.

Зсув моменту початку теплової обробки до 70 % від повної тривалості спікального циклу забезпечує майже дворазове зниження вмісту аморфної фази. Водночас найменш структурно трансформованою залишається нижня зона аглоспеку, оскільки вторинна теплова хвиля виявляється часово запізнілою і не встигає досягти області колосникових ґрат до моменту завершення процесу формування агломерату.

Найбільш сприятливе співвідношення між ступенем кристалізації силікатної матриці та однорідністю мікроструктурних перетворень за висотою шару було досягнуто при організації відпалу з моменту, що відповідає приблизно 60 % загального часу спікання. Петрографічні дослідження зразків, відібраних з різних горизонтів аглоспеку, засвідчили, що рекристалізаційний відпал охоплює практично весь об'єм матеріалу, хоча інтенсивність фазових перетворень є просторово неоднорідною: максимальні значення характерні для верхніх зон з поступовим спадом у напрямку до колосникових ґрат.

З метою деталізації оптимального температурно-часового режиму рекристалізаційного відпалу було проведено додаткову серію лабораторно-промислових експериментів зі спікання агломерату з реалізацією теплової обробки аглоспеку, ініційованої після досягнення 60 % тривалості спікального циклу. Узагальнені результати цих досліджень систематизовано та наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Показники процесу спікання агломерату з отжигом аглоспеку

Температурний режим отжигу, °С		Продуктивність, т/м ² .ч	Вихід придатного з аглоспеку, %	Об'ємна частка склоподібних фаз у структурі агломерату, %	Показник міцності по кл.+5 мм, %
перша стадія	друга стадія				
Без отжигу		1,78	60,9	33,5	75,1
900	700	1,78	61,8	22,6	77,0
900	800	1,80	62,8	18,4	77,3
900	900	1,80	62,5	15,6	77,2
1050	800	1,81	62,4	15,1	77,6
1050	900	1,85	64,5	11,2	78,1
1150	700	1,73	61,0	25,0	76,5
1150	800	1,74	61,2	24,4	76,6
1150	900	1,75	61,6	23,8	76,8

Отримані експериментальні результати переконливо засвідчили доцільність і технологічну ефективність застосування рекристалізаційного відпалу аглоспеку за запропонованою часовою схемою, тобто з ініціюванням теплової обробки після досягнення приблизно 60 % сумарної тривалості процесу спікання. Максимально сприятливі показники якості агломерату були зафіксовані у випадку двостадійного термічного впливу на поверхню спеку, за якого температура нагрівання на першій стадії підтримувалася в інтервалі 1000–1050 °С, а на другій – у межах 800–900 °С.

Зниження температури відпалу до рівня нижче 1000 °С виявилось недостатнім для акумуляції необхідної кількості теплової енергії, що, у свою чергу, не забезпечує повноцінного перебігу процесів девітрифікації (рекристалізації) склоподібної фази та релаксації внутрішніх термічних напружень у структурі агломерату.

Натомість підвищення температури теплової обробки понад 1150 °С призводить до розвитку небажаних вторинних явищ, зокрема повторного оплавлення поверхневих шарів аглоспеку з подальшим їх інтенсивним охолодженням, що супроводжується повторним формуванням аморфної фази. В обох крайніх температурних режимах спостерігається погіршення інтегральних технологічних показників процесу спікання та експлуатаційних характеристик готового агломерату.

Зростання механічної міцності агломерату, встановлене за результатами мінералогічного аналізу зразків, підданих відпалу, зумовлене завершенням повсюдного розпаду метастабільних твердих розчинів, а також інтенсифікацією рекристалізації склоподібної матриці з утворенням тонкодисперсної полікристалічної структури.

Мікроструктурні трансформації, індуковані термічною обробкою, наведено на рис. 4.2. Твердофазна взаємодія між твердими розчинами оксидів кальцію та марганцю і залишковою склоподібною фазою забезпечує синтез додаткових кількостей складнокомпонентних силікатних сполук. Унаслідок цього масова

частка аморфної складової в агломераті знижується з початкових 30–34 % до 11–15 %. Перебіг зазначених процесів супроводжується частковою релаксацією термічних напружень у кристалічній ґратці та міжфазних границях.

Таким чином, комплекс лабораторних досліджень підтвердив, що двостадійна термічна обробка поверхні аглоспеку з температурними інтервалами 1000–1050 °С на першій стадії та 800–900 °С на другій, реалізована після завершення приблизно 60 % загального часу спікання, забезпечує практично суцільний рекристалізаційний відпал агломерату по всій висоті шару. Зазначений режим сприяє зменшенню вмісту склоподібних фаз у 2,5–3 рази та забезпечує підвищення показників міцності матеріалу на 2–3 %.

4.2. Схема поліпшення властивостей марганцеворудного агломерату методом структурного ущільнення

У процесі агломераційного спікання в зоні інтенсивного горіння палива формується рідка фаза, що складається переважно з найбільш легкоплавких компонентів рудної частини шихти. У міру просування фронту спікання в напрямку колосникових ґрат і реалізації процесів теплової регенерації об'ємна частка розплаву закономірно зростає. Паралельно з цим відбувається часткова усадка шару матеріалу, гравітаційне перетікання рідкої фази з верхніх горизонтів та самоущільнення нижчерозташованих зон аглоспеку.

Інтенсивність процесів самоущільнення визначається комплексом факторів, зокрема рівнем досягнутих максимальних температур, тривалістю перебування матеріалу в інтервалі високотемпературних станів, реологічними характеристиками розплаву (передусім його в'язкістю), а також величиною втрат маси при прожарюванні. Швидке охолодження аглоспеку, притаманне агломераційному процесу, фіксує сформовану структуру на проміжній стадії усадки, що особливо характерно для верхніх шарів, оскільки для повного злиття диспергованих крапель рідкої фази в монолітну матрицю необхідний значно триваліший час перебування матеріалу за температур, що перевищують 1000 °С.

При спіканні марганцевмісної сировини, зокрема за наявності в шихті карбонатних концентратів із високими втратами маси при прожарюванні, макропористість поверхневих шарів аглоспеку істотно перевищує аналогічний показник у нижніх зонах. За таких умов область температур, достатніх для інтенсивного перетікання розплаву та самоущільнення, є відносно обмеженою, тоді як висота зони, у межах якої матеріал перебуває в пластично-деформівному стані, може досягати 25–40 % загальної висоти шару шихти. Цього, однак, достатньо для реалізації додаткового ущільнення аглоспеку шляхом зовнішнього механічного впливу з метою підвищення його об'ємної густини та, відповідно, міцнісних характеристик.

Експериментальна перевірка зазначеного положення, проведена в лабораторних умовах на агломераційній установці з площею спікання 0,1 м², оснащений відповідним контрольно-вимірювальним та реєструвальним обладнанням, підтвердила принципову можливість суттєвого поліпшення механічних властивостей агломерату шляхом примусового ущільнення аглоспеку.

Для дослідження впливу основних технологічних параметрів ущільнення на показники процесу спікання використовувалася шихта, рудна складова якої включала 60 % окисного концентрату 11-го сорту, 30 % карбонатного концентрату та 10 % шламів, що відповідає реальному складу промислової аглошихти, застосовуваної для виробництва агломерату марки АМНВ-2 на Нікопольському заводі феросплавів. Початкова висота шару становила 0,40 м, а масова частка коксового дріб'язку дорівнювала 9 %. Ущільнення аглоспеку здійснювалося за допомогою спеціального трамбувального пристрою. Критерієм оцінювання якості готового агломерату слугувала його ударна механічна міцність, визначена відповідно до вимог ДСТ 15317-77.

Результати проведених лабораторних експериментів узагальнено на рис. 4.3 та 4.4. З аналізу даних, наведених на рис. 4.3, випливає, що зі зростанням ступеня ущільнення аглоспеку спостерігається систематичне підвищення міцності та виходу придатного агломерату

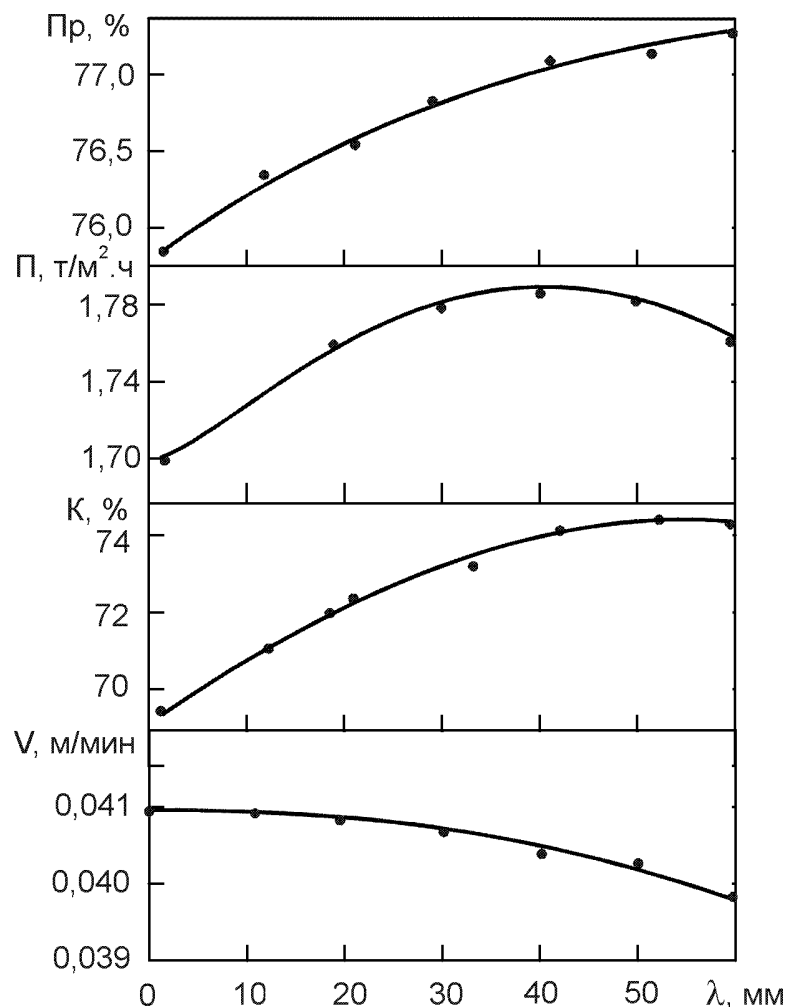


Рис. 4.3 Вплив ступеня ущільнення аглоспеку на показники процесу при початку ущільнення 0,5 загального часу спікання

Водночас встановлено, що за умов збільшення величини примусового ущільнення аглоспеку понад 40 мм (що відповідає приблизно 8 % від початкової висоти шару) спостерігається тенденція до зниження продуктивності агломераційного процесу, зумовлена уповільненням вертикальної швидкості просування фронту спікання. Зазначений негативний ефект обумовлений розвитком явищ надмірної компактизації не лише зони термопластичного стану матеріалу, а й підстильних горизонтів ще не спеченої шихти, що істотно погіршує газопроникність шару та інтенсифікує аеродинамічний опір.

Доцільно також зауважити, що при реалізації експериментів на лабораторній агломераційній установці, унаслідок підвищених питомих теплових втрат у навколишнє середовище, вертикальна протяжність зони розм'якшеного матеріалу виявляється у 1,3–1,5 раза меншою порівняно з аналогічним показником, характерним для промислових агломераційних машин типу АКМ-3-100.

З огляду на викладене, у разі впровадження технології механічного ущільнення аглоспеку в умовах промислової агломерації оптимальну величину деформаційного впливу доцільно обмежувати інтервалом 40–50 мм, що забезпечує компроміс між підвищенням міцнісних характеристик готового агломерату та збереженням прийняттого рівня продуктивності процесу спікання.

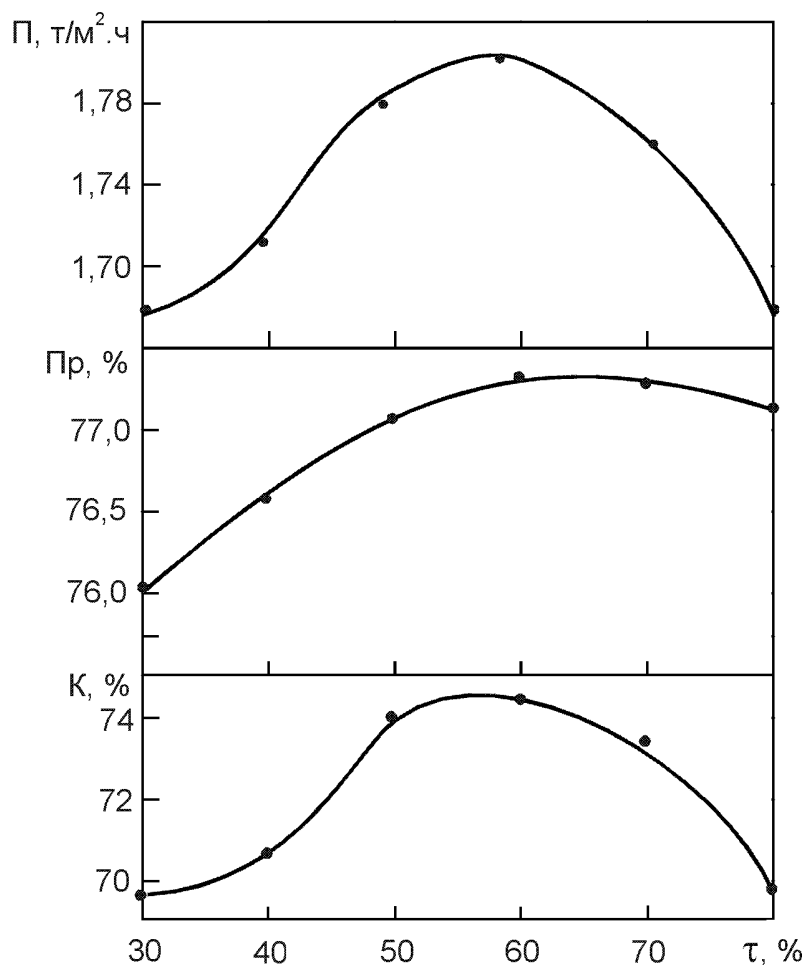


Рис. 4.4 Залежність показників процесу спікання від часу початку впливу при ущільненні на 40 мм

Аналіз експериментальних даних, представлених на рис. 4.4, засвідчує, що максимальний технологічний ефект від застосування примусового ущільнення аглоспеку досягається за умови реалізації механічного впливу в часовому інтервалі, що відповідає 50–65 % загальної тривалості спікального циклу. Зазначена закономірність зумовлена особливостями формування термопластичної зони: на початкових етапах процесу спікання шар розм'якшеного матеріалу ще є недостатньо розвиненим за висотою та об'ємом, унаслідок чого зовнішнє ущільнення не лише не забезпечує позитивного ефекту, а в окремих випадках призводить до погіршення технологічних показників через надмірну компактизацію ще не оплавленої частини шихти та погіршення її газопроникності.

Після перевищення межі 65 % від загального часу спікання істотно зростає частка регенованого тепла, що надходить у зону горіння палива, а також інтенсифікується перетікання рудного розплаву в нижчі горизонти шару, що забезпечує високий рівень природного самоущільнення підстильних зон аглоспеку. Застосування в цей період додаткового механічного навантаження спричиняє руйнування вже сформованої структури верхніх шарів спеку, зменшує вихід

придатного агломерату та, в цілому, негативно впливає на продуктивність агломераційного процесу.

Таким чином, результати лабораторних досліджень дозволяють зробити висновок, що одночасне підвищення механічної міцності агломерату та зростання продуктивності спікання можуть бути досягнуті за умови ущільнення аглоспеку після завершення 50–65 % спікального циклу на величину 35–40 мм. Для умов діючого промислового виробництва на агломераційних машинах Нікопольського заводу феросплавів зазначені параметри відповідають встановленню ущільнювальних пристроїв у зоні 14-ї вакуум-камери, що забезпечує деформацію шару на рівні 50–60 мм.

4.3. Промислові випробування та дослідно-промислове освоєння технології рекристалізаційного відпалювання аглоспеку

Дослідження закономірностей формування мікроструктури та результати петрографічного аналізу фазового складу марганцевих агломератів, отриманих з окисних і карбонатних концентратів, показали, що домінуючими чинниками зниження їх механічної міцності є наявність у структурі до 40 % низькоміцної аморфної (склоподібної) фази та до 45 % недисоційованих карбонатних мінералів, термічний розклад яких продовжується вже після завершення кристалізації рудного розплаву.

Разом з тим дослідження температурно-часових параметрів процесу спікання та подальшої теплової обробки марганцевих агломератів дозволили встановити, що істотне зростання міцнісних характеристик матеріалу може бути забезпечене шляхом реалізації додаткового рекристалізаційного відпалу аглоспеку в температурному інтервалі 800–1050 °С. За таких умов вміст склоподібної фази зменшується у 2–3 рази, тоді як міцність агломерату демонструє стабільну тенденцію до зростання. Окрім того, у фазовому складі матеріалу збільшується частка вільних оксидів марганцю, що створює більш сприятливі термодинамічні та кінетичні умови для їх подальшого відновлення під час виплавки марганцевих феросплавів.

На підставі узагальнення результатів лабораторних досліджень у виробничих умовах була здійснена апробація та подальше впровадження технології рекристалізаційного відпалу аглоспеку при виготовленні марганцевого агломерату на агломераційній машині № 4. Для реалізації зазначеної теплової обробки в районі 15-ї вакуум-камери було змонтовано додатковий газовий горн довжиною 4 м, оснащений двома парами тангенціально орієнтованих пальників бокового розташування. Як паливо використовувався природний газ.

У процесі випробувань та подальшого промислового освоєння технології здійснювалося коригування теплового режиму роботи горна, систематичний контроль основних технологічних параметрів агломерації, а також відбір зразків для визначення гранулометричного та мінералогічного складу і механічної міцності агломерату. Проби відбиралися безпосередньо після грохочення охолодженого агломерату.

Петрографічні дослідження показали, що внаслідок реалізації рекристалізаційного відпалу об'ємна частка аморфної фази зменшується з 30–35 % до 8–15 %, причому перебіг фазових перетворень супроводжується частковою релаксацією внутрішніх термічних напружень. Характерні зміни мікроструктури агломерату, індуковані тепловою обробкою, наведено на рис. 4.5.

Усереднені показники, отримані в ході промислових випробувань та впровадження технології рекристалізаційного відпалу аглоспеку, систематизовано в додатку Д.

Аналіз сукупності експериментальних і виробничих даних свідчить, що найбільш виражений позитивний ефект, який проявляється у підвищенні механічної міцності агломерату на 1,6–2,5 %, досягається за температури в газовому горні 950–1020 °С та витрати природного газу на рівні 390–400 Н·м³/год.

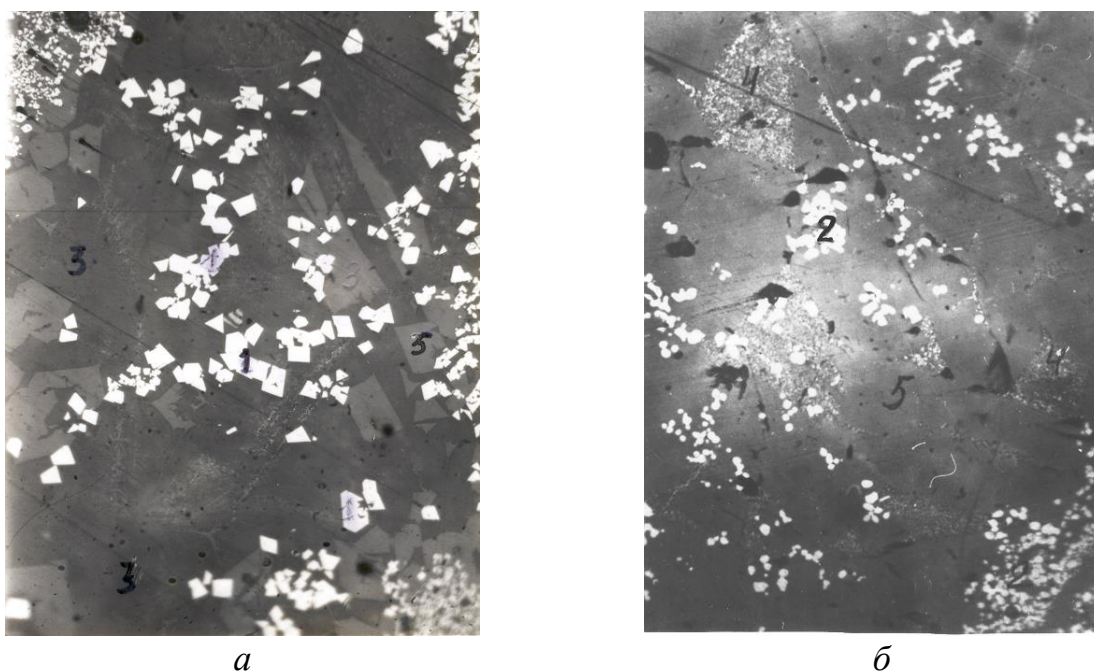


Рис.4.5 Зміна мікроструктури агломерату при отжигу аглоспеку
а) без отжига; б) з отжигом аглоспеку.

1.гаусманіт; 2. тверді розчини оксидів кальцію й марганцю; 3. скло; 4. дрібнокристалічна маса; 5. силікати складного складу. Світло відбите, збільшення 210.

Зниження температури у робочому об'ємі газового горна до значень, нижчих за 800 °С, з позицій фізико-хімічної кінетики фазових перетворень не створює передумов для реалізації необхідного ступеня девітрифікації аморфізованої силікатної матриці аглоспеку та релаксації накопичених термопружних напружень, унаслідок чого інтегральний ефект рекристалізаційної термообробки виявляється статистично незначущим.

Разом із тим підвищення температури теплового впливу понад 1050–1100 °С є технологічно неприйнятним, оскільки за таких умов активізуються процеси локального поверхневого плавлення агломераційного шару з наступною швидкою

квазіізотермічною кристалізацією та повторним формуванням значної частки метастабільної склоподібної фази, що, у сукупності з утворенням щільної оплавленої кірки, призводить не лише до деградації міцнісних характеристик готового агломерату, але й до істотного зниження проникності шару для фільтраційного газового потоку, інтенсифікації гідродинамічного опору та, як наслідок, редукції ефективної продуктивності агломераційної машини.

Необхідно також відзначити, що в ході промислових випробувань технології рекристалізаційного відпалу аглоспеку було зафіксовано помірне зменшення лінійної швидкості переміщення аглострічки, яке з високою ймовірністю корелює зі зниженням парціального тиску кисню у повітряному потоці, що подається у зону горіння твердого палива на ділянці функціонування додаткового теплогенерувального агрегату. Водночас зростання виходу кондиційного агломерату, зумовлене суттєвим підвищенням структурної цілісності та ударної міцності аглоспеку після термообробки, практично повністю компенсує вказане зниження швидкості транспортування шару, унаслідок чого узагальнена продуктивність агломераційного агрегату залишається на рівні, статистично не відмінному від базового.

Результати контактних і дистанційних термометричних вимірювань температури аглоспеку на виході з агломераційної машини засвідчили, що її абсолютні значення перевищують аналогічний параметр для матеріалу, отриманого без стадії рекристалізаційного відпалу, лише на 10–20 °С, що з погляду теплового балансу процесу не чинить суттєвого впливу на умови та кінетику подальшого охолодження готового агломерату.

Порівняльний аналіз показників виходу придатного для різних марок продукції продемонстрував, що істотно більший ефект для агломерату типу АМНШ (приріст 5,1 %) порівняно з матеріалом марки АМНВ-2 (2,3 %) детермінований мінералого-хімічними особливостями вихідної шихти, а саме застосуванням окисних марганцевих концентратів з підвищеним умістом SiO₂ (до 20 %), що сприяє інтенсивному формуванню силікатів марганцю, термодинамічно схильних до аморфізації та утворення значної кількості склоподібної фази. За таких умов рекристалізаційний відпал проявляє максимальну ефективність, забезпечуючи суттєву перебудову фазового складу та мікроструктури матеріалу.

Для агломерату марки АМНВ-2, у складі аглошихти якого частка карбонатних концентратів сягає 45 % (за характерних концентрацій 15–17 % SiO₂ та 9–11 % CaO), що зумовлює знижену схильність системи до склоутворення, ефективність застосування термічної рекристалізаційної обробки закономірно виявляється менш вираженою.

Узагальнюючи результати промислових випробувань, слід констатувати, що вони повністю підтвердили достовірність висновків, сформульованих на підставі лабораторних експериментів, та продемонстрували високу технологічну доцільність застосування теплової обробки поверхні аглоспеку, ініційованої після проходження 55–70 % загальної тривалості спікального циклу. Реалізація зазначеного режиму забезпечує підвищення механічної міцності агломерату на 1,6–2,5 % при одночасному зменшенні питомої витрати твердого палива на 6–7 кг·т⁻¹

готової продукції завдяки залученню додаткового зовнішнього джерела теплової енергії, без статистично значущого зниження продуктивності агломераційної машини.

4.4. Відпрацювання та впровадження технології виробництва зміцненого марганцевого агломерату шляхом ущільнення агломераційного продукту

Комплекс лабораторних досліджень, спрямованих на аналіз реологічних характеристик термопластичної зони аглоспеку та закономірностей формування його порово-структурного каркаса, дозволив встановити принципову можливість істотної інтенсифікації агломераційного процесу та підвищення якості кінцевого продукту шляхом цілеспрямованого механічного впливу на шар матеріалу в строго визначеному часово-температурному інтервалі.

Подальша експериментально-промислова верифікація оптимізованих режимів ущільнення була здійснена в умовах діючих агломераційних агрегатів ВАТ «НЗФ», що дозволило перейти від лабораторного моделювання до повномасштабної апробації технологічних рішень.

Для реалізації примусового ущільнення аглоспеку було сконструйовано та рекомендовано до експлуатації спеціалізований механічний вузол, виконаний у вигляді обертового циліндричного барабана діаметром 0,8 м і довжиною 2,4 м, вал якого змонтовано в підшипникових опорах з можливістю регульованого вертикального переміщення вздовж жорстко фіксованих напрямних. Регулювання ступеня деформаційного впливу на аглоспек здійснюється за допомогою гвинтових механізмів, установлених у нижній частині опорної рами, що дозволяє забезпечувати відтворюваність параметрів ущільнення в широкому діапазоні робочих режимів.

Схематичне зображення компоновки ущільнювального вузла в технологічному тракті агломашини наведено на рис. 4.6.

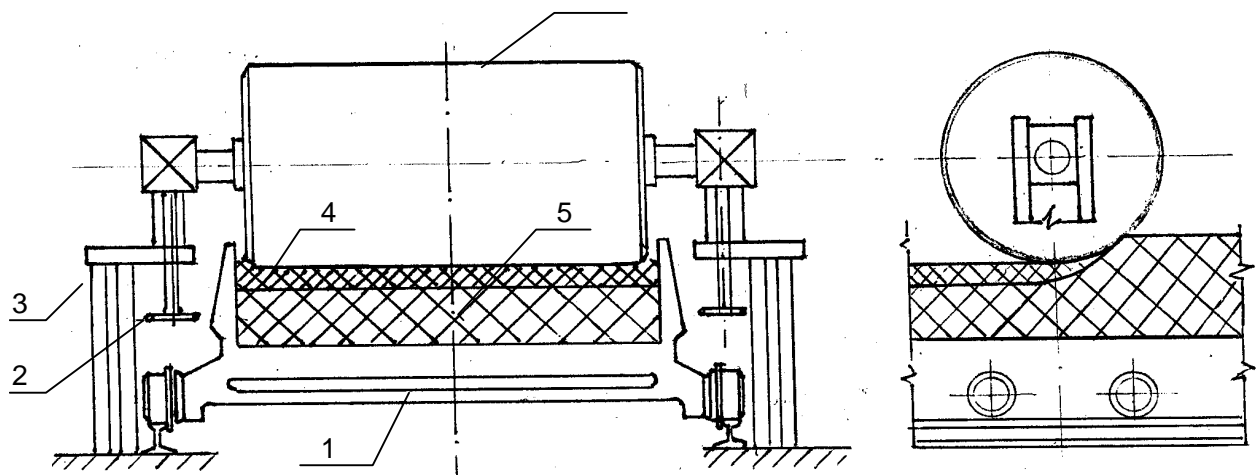


Рис. 4.6 Схема обладнання для ущільнення аглоспеку на агломашині АКМ-3-100 ВАТ “НЗФ”

1 - спікальний візок;
2 - регулювальний гвинт;
3 - опора барабана;

4 - ущільнення аглоспеку ;
5 - аглошихта;
6 - ущільнюючий барабан

Попередній етап промислової апробації розробленого ущільнювального пристрою засвідчив наявність сукупності конструктивно-експлуатаційних обмежень, які в існуючій конфігурації обладнання істотно звужують можливості повноцінної реалізації потенційних технологічних переваг процесу агломераційного спікання з регламентованим ущільненням аглоспеку.

Зокрема, було встановлено, що застосування барабана з гладкою робочою поверхнею за умов переробки аглошихт, збагачених тонкодисперсними шламовими фракціями, супроводжується тенденцією до зниження інтегральної продуктивності процесу, що детермінується погіршенням фільтраційних характеристик газового потоку в шарі матеріалу та, відповідно, зростанням його аеродинамічного опору.

Крім того, у низці виробничих циклів фіксувалися випадки небажаного накопчування ущільнювального барабана на бортові елементи спікальних візків із подальшим порушенням стійкості його положення в опорних вузлах, що було обумовлено надмірними відхиленнями геометрії візків від вертикальної осі (понад 100 мм) за конструктивної довжини барабана 2,4 м.

Суттєвим експлуатаційним недоліком виявилася і прийнята схема регулювання ступеня ущільнення, реалізація якої вимагала повної зупинки агломашини та залучення мостового кранового обладнання, оскільки розміщення регулювальних гвинтів у нижній частині опорних конструкцій зумовлювало значні витрати часу й трудових ресурсів на переналагодження системи.

З метою компенсації можливого зниження продуктивності при роботі з високошламовими шихтами було запропоновано модифікувати геометрію робочої поверхні барабана шляхом приварювання у шаховому порядку шипів довжиною 80–100 мм. Проте результати дослідної експлуатації такої конструкції показали, що

надмірна довжина шипів інтенсифікує руйнування верхньої кірки аглоспеку, що, у свою чергу, негативно впливає на умови тепломасообміну в зоні спікання та порушує стабільність формування структури агломерату.

У зв'язку з цим довжину шипів було знижено до 40–60 мм, що забезпечило усунення ефекту деструкції поверхневої кірки при одночасному поліпшенні газопроникності шару та стабілізації термодинамічних умов перебігу процесу.

Проблему накочування барабана на борти візків було усунуто шляхом оптимізації його габаритних параметрів, а саме зменшенням довжини до 2,3 м, що забезпечило підвищення кінематичної стійкості системи в умовах неминучих геометричних відхилень транспортних елементів агломашини.

Додатково, перенесення регульовальних гвинтів у верхню зону над рухомими опорними вузлами дозволило здійснювати оперативне встановлення заданого ступеня ущільнення аглоспеку безпосередньо в процесі спікання, без припинення роботи агрегату, що істотно підвищило технологічну гнучкість та експлуатаційну придатність обладнання.

Зазначені конструктивні модифікації в сукупності забезпечили усунення раніше виявлених недоліків і створили передумови для стабільного та відтворюваного функціонування ущільнювального пристрою в умовах промислової експлуатації.

Для проведення повномасштабних промислових випробувань модернізоване ущільнювальне обладнання було змонтовано на агломашині № 3 у зоні розташування десятої вакуум-камери. У ході експериментальної кампанії величину ущільнення варіювали в інтервалі від 10 до 80 мм із паралельною реєстрацією основних технологічних параметрів роботи агрегату, характеристик гранулометричного складу готового агломерату та його механічної міцності.

Отримані результати піддавали порівняльному аналізу з відповідними показниками процесу спікання без застосування операції ущільнення аглоспеку, а також з усередненими параметрами роботи інших агломашин підприємства. Узагальнені дані експериментальних досліджень ефективності технології виробництва агломерату з регламентованим ущільненням аглоспеку наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Показники виробництва агломерату з ущільненням аглоспеку

Величина ущільнення, мм	АМНВ-2			АМНШ		
	швидкість агломації, м/хв	продуктивність, т/м ² .ч	показатель по кл. +5 мм, %	швидкість агломації, м/хв	питома продуктивність, т/м ² .ч	показатель міцності по кл. +5 мм, %
0	1,79	0,877	77,1	1,85	0,862	77,6
10	1,79	0,880	77,2	1,85	0,868	77,6
20	1,79	0,890	77,6	1,86	0,997	77,9
30	1,79	0,894	77,6	1,86	0,896	78,0
40	1,78	0,902	77,9	1,87	0,907	78,2
50	1,77	0,906	78,0	1,87	0,910	78,2
60	1,75	0,905	78,1	1,86	0,910	78,4
70	1,75	0,904	78,4	1,84	0,905	78,4
80	1,72	0,898	78,4	1,81	0,894	78,4

Систематизація та аналітична інтерпретація експериментальних даних, поданих у таблиці, свідчать про їх принципову узгодженість з результатами, отриманими на етапі лабораторних досліджень, що дозволяє розглядати виявлені закономірності як відтворювані та репрезентативні для промислових умов перебігу процесу агломераційного спікання.

Встановлено, що найбільш сприятлива сукупність технологічних показників формується за умов регламентованого ущільнення аглоспеку в інтервалі 50–60 мм, при якому інтегральна продуктивність агломераційних машин зростає відповідно на 3,0 та 5,5 %, а механічна міцність готового агломерату підвищується на 1,3 та 0,8 % для матеріалів марок АМНВ-2 і АМНШ.

Хоча впровадження операції ущільнення супроводжується певним зменшенням лінійної швидкості переміщення аглострічки, встановлене зростання продуктивності агрегатів має, передусім, структурно-технологічну природу й обумовлюється збільшенням виходу придатного продукту, що є прямим наслідком формування більш щільного та механічно стабільного аглоспеку з пониженим рівнем внутрішньої дефектності.

Окремо зафіксовано, що під час спікання агломерату марки АМНШ ущільнення аглоспеку до величини близько 40 мм не лише не інгібує розвиток процесу, але й сприяє помірному зростанню вертикальної швидкості фронту спікання, що пояснюється локальним підвищенням газопроникності шару внаслідок руйнування шипами ущільнювального барабана надмірно щільної поверхневої кірки аглоспеку та формування додаткових каналів фільтрації газового потоку.

Паралельний аналіз гранулометричного складу готового продукту показав, що застосування операції ущільнення, поряд із зростанням міцнісних характеристик агломерату, зумовлює статистично значуще зниження частки

дрібнодисперсної фракції 0–5 мм у складі придатного агломерату на 1,2–2,3 %, що має істотне значення для підвищення ефективності подальших металургійних переділів.

Розроблена технологічна схема зміцнення агломерату шляхом комбінованого використання рекристалізаційного відпалу та регламентованого ущільнення аглоспеку пройшла стадію промислової валідації та була впроваджена в експлуатацію на всіх чотирьох агломашинах Нікопольського заводу феросплавів.

Таким чином, сукупність отриманих експериментально-виробничих результатів не лише підтверджує достовірність і прогностичну цінність висновків, сформульованих на основі лабораторних досліджень, але й переконливо демонструє технологічну доцільність застосування рекристалізаційного відпалу в поєднанні з операцією ущільнення аглоспеку як ефективного інструменту цілеспрямованого підвищення механічної міцності агломерату, інтенсифікації роботи агломераційних агрегатів та зниження питомих витрат твердого палива.

ВИСНОВКИ

1. У межах виконаного дослідження здійснено комплексний аналіз якісних характеристик марганцевої мінеральної сировини та проведено розгорнуте порівняльне зіставлення існуючих технологічних схем окускування різнорідних типів рудної сировини, зокрема із застосуванням агломераційного способу. Систематизовано й узагальнено результати лабораторних і промислових експериментів, спрямованих на вивчення закономірностей спікання агломерату з карбонатних і низькосортних окисних марганцевих концентратів Нікопольського басейну на стрічкових агломераційних машинах типу АКМ-3-100. На основі порівняльного аналізу переваг і обмежень процесу агломерації ідентифіковано сукупність домінуючих факторів, що визначальним чином впливають на металургійні властивості агломерату, інтегральну продуктивність агломашин та техніко-економічні показники виплавки марганцевих феросплавів.

2. У лабораторному масштабі досліджено тепловий режим процесу спікання марганцевої сировини за варіювання масової частки карбонатних концентратів у складі аглошихти в інтервалі від 0 до 100 %. Встановлено, що зі зростанням вмісту карбонатної складової суттєво інтенсифікуються теплові витрати на ендотермічну дисоціацію карбонатів, унаслідок чого швидкість охолодження аглоспеку зростає приблизно з 3,6...3,5 до 6,0...6,5 °C/с, тоді як тривалість перебування матеріалу в температурному інтервалі початку розм'якшення та вище скорочується у 2,5...3 рази, що істотно погіршує умови формування структурно повноцінного спеку та зумовлює зниження якості агломерату. Обґрунтовано, що гранично допустимий вміст карбонатних концентратів в аглошихті, за якого ще зберігаються задовільні умови агломераційного процесу, не повинен перевищувати 40 %.

3. Досліджено вплив гранулометричного складу марганцевих карбонатних концентратів та температури їх попереднього випалу на ступінь термічного розкладання карбонатів. Установлено кількісну залежність ступеня дисоціації від середнього розміру частинок у температурному полі агломераційного процесу..

4. Проаналізовано склад газової фази у різних зонах спікання аглошихти. Показано, що при агломерації карбонатомістких матеріалів з крупністю частинок понад 3 мм процес дисоціації карбонатів пролонгується до стадії охолодження аглоспеку, що спричиняє розвиток внутрішніх термічних напружень, мікротріщиноутворення та часткове руйнування структури агломерату з відповідним зниженням його механічної міцності. Доведено, що повна дисоціація відбувається лише для фракцій з розміром частинок до 3 мм, тоді як частка недисоційованих карбонатів сягає 40...45 % від їх загальної маси.

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.В							
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат</i>	ВИСНОВКИ			<i>Лімен</i>	<i>АркVIII</i>	<i>АркVIIIІ</i>		
<i>Розробл</i>	<i>Каширець</i>									1	3	
<i>Перевір</i>	<i>Плотніков</i>											
<i>Н</i>	<i>Плотніков</i>									МТ-22-1		
<i>Затвер</i>	<i>Бабошко</i>											

5. Визначено фазовий склад агломерату та його кількісні співвідношення. Показано, що мікроструктура матеріалу формується переважно гаусманітом (Mn_3O_4) та тефроїтом (Mn_2SiO_4), у меншій мірі — глаукохроїтом ($CaMnSiO_4$), родонітом ($MnSiO_3$), твердими розчинами системи $CaO-MnO_x$ та склоподібною фазою. Встановлено, що зі збільшенням масової частки марганцю в агломераті вміст аморфної склоподібної складової закономірно зменшується і за концентрації Mn 47–48 % не перевищує 10–15 %, тоді як частка вільних оксидів марганцю зростає. Для агломератів з умістом марганцю нижче 43 % характерне зростання частки скла до 30–40 % за одночасного зниження вмісту вільних оксидів до рівня не більше 65 %. Підвищення частки карбонатних концентратів у шихті зумовлює накопичення в структурі агломерату твердих розчинів оксидів кальцію та марганцю.

6. Досліджено металургійні характеристики агломерату, зокрема ступінь відновлення, питомий електричний опір і міцність при стисканні. Встановлено, що відновлюваність марганцю прямо пропорційно корелює зі зростанням концентрації вільних оксидів марганцю, насамперед гаусманіту, при одночасному зниженні питомого електроопору. Збільшення частки кристалічних фаз у структурі агломерату приводить до зростання його механічної міцності, тоді як мінімум цього показника спостерігається у вузькому інтервалі вмісту марганцю 41...43 %.

7. Вивчено вплив технологічних параметрів процесу спікання та концентрації карбонатних концентратів у складі аглошихти на виробничі показники й металургійні властивості агломерату. Показано, що введення карбонатної складової супроводжується зниженням виходу придатного агломерату, питомої продуктивності аглоустановки та його міцнісних характеристик, причому найбільш різке погіршення спостерігається при перевищенні порогу 40 %. Водночас зафіксовано зростання ступеня відновлення марганцю, що підвищує придатність агломерату до подальшої електропічної переробки. На основі експериментальних даних отримано регресійні залежності, які описують вплив речовинного складу шихти та основних технологічних параметрів спікання на показники виробництва й якість агломерату, а також визначено оптимальні інтервали їх промислової реалізації.

8. Досліджено вплив додаткової теплової обробки аглоспеку на перебіг процесу спікання та експлуатаційні властивості агломерату. Встановлено, що двостадійна термообробка поверхні аглоспеку тривалістю 3...4 хв після завершення близько 60 % загального часу спікання, при температурах 1000...1050 °C на першій стадії та 800...900 °C на другій, забезпечує практично об'ємний відпал матеріалу, зменшення частки склоподібної фази з 30...35 до 11...13 % та зростання міцності на 2,5...3 %.

9. Розроблено та експериментально опробовано технологію рекристалізаційного відпалу аглоспеку з використанням додаткового чотириметрового газового горна, змонтованого в зоні 14–15-ї вакуумкамер агломашини. Встановлено, що максимальний ефект досягається за температури 900...1020 °C і витрати природного газу 390...400 $nm^3/год$. Реалізація відпалу забезпечила зниження об'ємної частки скла з 29...35 до 8...15 %, підвищення

міцності агломерату на 1,6–2,5 %, зростання ступеня дисоціації карбонатів до 88...92 % та скорочення питомої витрати твердого палива на 6...7 кг/т без зниження продуктивності агломашин.

10. У промислових умовах розроблено та впроваджено технологію зміцнення агломерату шляхом регламентованого ущільнення аглоспеку в пластичному стані після завершення 50–60 % загального часу спікання. Показано, що така операція зменшує макропористість верхньої частини шару на 10...12 %, збільшуючи при цьому міцність матеріалу та вихід придатного продукту. Ущільнення здійснювалося обертовим барабаном діаметром 0,8 м і довжиною 2,4 м, встановленим у зоні 10-ї вакуумкамери, при глибині дії 50...60 мм, що забезпечило зростання продуктивності агломашин на 3...5,5 % та підвищення міцності агломерату на 0,8...1,3 % залежно від складу аглошихти.

					КНУ.РБ.136.26.113с-09.В	анк
Анк	№ докум	підпис	дат			2

11. Богомолів В. М., Богомоліва Н. П., Гречко Є. Г. Зниження витрати палива при агломерації залізорудної шихти шляхом подачі газоповітряної суміші. – 2013.
12. Трушко В. Л., Утков В. А. Розробка технологій підвищення продуктивності агломераційних машин і міцності агломерату. – 2016.
13. Хрустальов М. М., Ковальчук В. В. Техногенні відходи гірничо-металургійного комплексу України та напрями їх утилізації. – Київ, 2019.
14. Півняк Г. Г., Бондаренко В. І., Пілов П. І. Ресурсозберігаючі технології переробки мінеральної сировини. – Дніпро, 2015.
15. Василенко А. П., Ісаков Л. В. Мінеральні ресурси України та перспективи комплексного використання залізорудної сировини. – 2018.
16. Мальцев Д. В., Владико О. М. Обґрунтування вилучення корисних компонентів із техногенних родовищ. – 2018.
17. Семенов Ю. С. та ін. Використання техногенної сировини у металургійному виробництві. – 2023.
18. Горупаха В. В. та ін. Особливості переробки тонкодисперсних залізовмісних відходів металургійного виробництва. – 2025.
19. Ожогін В. В., Ковалевський І. А., Тарасюк Л. І. Спосіб і установка для переробки залізовмісних відходів металургійного виробництва. – 2019.
20. Самченко Д. М., Кочетов Г. М. Енергоощадні технології переробки промислових відходів металургії. – 2022.
21. Шуваєв С. П., Бондарець В. І., Куцевол Л. Л., Гасик М. І. Технологія виробництва марганцевого агломерату із застосуванням концентратів магнітної сепарації шламів // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – № 2. – С. 59–67.
22. Шуваєв С. П., Бондарець В. І., Куцевол Л. Л., Гасик М. І. Дослідно-промислове великотоннажне виробництво марганцевого агломерату АМ-2 із залученням до шихти концентрату магнітного збагачення шламів відпрацьованих

шламосховищ // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – № 3. – С. 42–47.

23. Шуваєв С. П., Бондарець В. І., Куцевол Л. Л., Гасик М. І. Рентгеноспектральний мікроаналіз мінеральної структури та хімічного складу марганцевого агломерату з використанням в аглошихті концентрату високоінтенсивної магнітної сепарації шламів збагачення марганцевої руди // *Modern Problems of Metallurgy*. – 2017. – Вип. 20. – С. 102–110.
24. Семакова В. Б., Пілюгін Є. І. Дослідження показників продуктивності агломераційного процесу // *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. – 2015. – Вип. 30. – С. 154–160.
25. Utkov V. A., Zyryanova O. V., Bazhin V. Yu. Manganese Sinter Production Specialties // *Obogashchenie Rud (Mineral Processing Journal)*. – 2015. – № 4. DOI: 10.17580/or.2015.04.04.
26. Zhang Y., Liu B., You Z., Su Z., Luo W., Li G., Jiang T. Consolidation Behavior of High-Fe Manganese Ore Sinters with Natural Basicity // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2016. – Vol. 37, No. 5. – P. 333–341. DOI: 10.1080/08827508.2016.1218870.
27. Miškovičová Z., Legemza J. Study of Properties of Mn Ore Fines and Possibilities Their Utilization in the Production of FeSiMn // *Acta Metallurgica Slovaca*. – 2015. – Vol. 21, No. 1. – P. 68–77. DOI: 10.12776/ams.v21i1.554.
28. Sane R. Beneficiation and Agglomeration of Manganese Ore Fines (An Area So Important and Yet So Ignored) // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 285. – Article 012033. DOI: 10.1088/1757-899X/285/1/012033.
29. Liu W., Zhu D., Pan J., Wei Z., Guo Z., Yang C., Li S. Application of Pellet Sintering in Manganese Ore Fines and Its Consolidation Behavior // *ISIJ International*. – 2024. – Vol. 64, No. 14. – P. 1988–1998. DOI: 10.2355/ISIJINT-2024-187.

30. Lu L., Ishiyama O. Recent Advances in Iron Ore Sintering // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2016. – Vol. 125, No. 3. DOI: 10.1080/03719553.2016.1165500.
31. Lu L. Important Iron Ore Characteristics and Their Impacts on Sinter Quality – A Review // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2015. – Vol. 32, No. 2. – P. 88–96. DOI: 10.1007/BF03402425.
32. Singh V., Biswas A., Tripathy S. K., Chatterjee S., Chakraborty T. K. Smart Ore Blending Methodology for Ferromanganese Production Process // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. – 2016. – Vol. 43, No. 7. DOI: 10.1080/03019233.2015.1108623.
33. Faria G. L., Tenório J. A. S., Jannotti N., Araujo F. G. S. A Geometallurgical Comparison Between Lump Ore and Pellets of Manganese Ore // International Journal of Mineral Processing. – 2015. – Vol. 137. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.03.003.
34. Santos O. S. H., Carvalho C. F., Silva G. A., Dos Santos C. G. Manganese Ore Tailing: Optimization of Acid Leaching Conditions and Recovery of Soluble Manganese // Journal of Environmental Management. – 2015. – Vol. 147. – P. 314–320. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.09.020.
35. Гасик М. І. Марганець. – Київ: Техніка, перевидання та сучасне використання в навчальному процесі металургійних спеціальностей.