

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

**Тема роботи: «РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА 4 млн. т/рік
ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ОСНОВНІСТЮ 0,55
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО
ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОГРУДКУВАННЯ ШИХТИ»**

Виконав:
студент групи ЗМТ-22-1 _____ Віталій БОРИСЕНКО

Керівник випускної роботи _____ Тетяна ЯРОШ

Нормоконтролер _____ Тетяна ЯРОШ

Т.в.о. завідувача кафедри _____ Дмитро БАБОШКО

Кривий Ріг
2026 р.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: гірничо-металургійний

Кафедра металургії чорних металів і ливарного виробництва

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр

Спеціальність: 136 Металургія

Затверджую

Зав. кафедрою _____

« ____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на випускну атестаційну роботу бакалавра

Борисенко Віталій Вікторович

1. Тема роботи: Розробка технології виробництва 4 млн. т/рік залізородних окатишів основністю 0,55 із застосуванням технічних рішень щодо вдосконалення процесу огрудкування шихти

керівник роботи: к.т.н., доцент Ярош Тетяна Петрівна

затверджено наказом по КНУ від « 19 » _____ 02 _____ 2026 р. № 114с

2. Строк подання роботи студентом « 01 » _____ 06 _____ 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: чашовий огрудкувач; огрудкувач барабаний; обладнання EXPERT 4L для проведення експрес-аналізу хімічних складників шихти; фізико-технічні параметри та норми витрат сировинних компонентів; вихід повернення після операції просівання сирих окатишів 5%; оптимальна вологість шихти в процесі змішування і огрудкування ($W_{\text{сир. ок.}} = 9,0-9,5\%$); вихід відсіву (повернення) випалених окатишів – 1%; питома витрата постелі – 200 кг/т; механічні втрати компонентів шихти прийняті на рівні 2,1%.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питання, які потрібно розробити)

1. Теоретичні основи одержання окатишів.
2. Технічні рішення щодо вдосконалення процесу огрудкування шихти.
3. Визначення витрати сировини для отримання окатишів.
4. Технологічні розрахунки основних стадій виготовлення окатишів.
5. Розрахунок необхідної кількості виробничого обладнання.

5. Перелік графічного матеріалу

Порівняльна характеристика обладнання для огрудкування. Технологія примусового зародкоутворення. Зовнішній вигляд шихтових матеріалів і послідовність формування окатишів із зародків. Кінетика росту окатишів за різними технологіями огрудкування. Технологічна схема. Схема ланцюга апаратів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання бакалаврської роботи	Термін виконання етапів
1	Збір і обробка необхідного матеріалу для виконання кваліфікаційної роботи	19.01-27.01.2026
2	Аналіз літературних джерел та постановка завдання дослідження	28.01-08.02.2026
3	Теоретичні основи одержання окатишів	09.02-25.02.2026
4	Технічні рішення щодо вдосконалення процесу огрудування шихти	26.02-10.03.2026
5	Визначення витрати сировини для отримання окатишів	11.03-10.04.2026
6	Технологічні розрахунки основних стадій виготовлення окатишів	11.04-30.04.2026
7	Розрахунок необхідної кількості виробничого обладнання	01.05-20.05.2026
8	Оформлення роботи та креслення	21.05-31.05.2026
9	Перевірка роботи на плагіат	01.06-15.06.2026
10	Захист кваліфікаційної роботи	19.06.2026

Дата видачі завдання «__19__»_____02_____2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Віталій БОРИСЕНКО
(підпис)

Керівник випускної
кваліфікаційної роботи _____ Тетяна ЯРОШ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи на тему: «Розробка технології виробництва 4 млн. т/рік залізородних окатишів основністю 0,55 із застосуванням технічних рішень щодо вдосконалення процесу огрудкування шихти»: 57 стор., 10 табл., 7 рис., 27 літературних джерел.

Об'єкт дослідження: процес огрудкування вологої залізородної шихти в чашових огрудковувачах.

Предмет дослідження: закономірності формування зародків і росту окатишів при застосуванні технології примусового зародкоутворення.

Результати роботи: обґрунтовано ефективність технології примусового зародкоутворення у виробництві залізородних окатишів. Досліджено механізм двостадійного формування гранул: швидке зародкоутворення (понад 3,0 г/с) та тривале доогрудкування (300 с) зі швидкістю 0,11 г/с.

Встановлено, що використання теплосилового напилення вологої шихти та застосування конічного барабана зі струною для профілювання гарнісажу забезпечує вихід цільової фракції 12–16 мм на рівні 72 %. Отримані окатиші мають оптимальну пористу структуру, що дозволяє підвищити продуктивність огрудковувача та знизити енерговитрати на їхню подальшу термообробку.

ЗАЛІЗОРУДНА ШИХТА, ОГРУДКУВАННЯ, ПРИМУСОВЕ
ЗАРОДКОУТВОРЕННЯ, НАПИЛЮВАНИЙ ШАР, МІЦНІСТЬ ОКАТИШІВ.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.Р			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Борисенко				РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош						1	1
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко							

ВІДОМІСТЬ МАТЕРІАЛІВ

Перв. примен.		№ строки	Формат	Обозначение	Наименование	Кол. листов	№ экз.	Примечание	
		1							
		2	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-01.ПЗ	Пояснювальна записка	57			
		3							
		4			Графічна частина				
		5			(Презентація)				
Справ. №		6	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-01.01	Порівняльна характеристика				
		7			обладнання для огрудування	1			
		8	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-01.02	Технологія примусового				
		9			зародкоутворення	1			
		10	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-01.03	Зовнішній вигляд шихтових матеріалів і				
		11			послідовність формування окатишів із зародків	1			
		12	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-01.04	Кінетика росту окатишів за				
		13			різними технологіями	1			
		14	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-01.05	Технологічна схема	1			
		15	A4	КНУ.РБ.136.26.114с-01.06	Схема ланцюга апаратів	1			
Підп. и дата		16							
		17							
		18							
		19							
Інв. № докл.		20							
		21							
		22							
Взам. инв. №		23							
		24							
		25							
Підп. и дата									
Інв. № подл.		КНУ.РБ.136.26.114с-01.В0							
		Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			
		Разраб.	Борисенко						
		Пров.	Ярош						
		Н.контр.	Ярош						
		Утв.	Бабашко						
Відомість об'єму матеріалів кваліфікаційної роботи Чертеж общего вида						Лист р д	Лист 1	Листов 1	
						кафедра МЧМ/В група ЗМТ-22-1			

Копировал
Формат A4

ЗМІСТ

	Стор.
РЕФЕРАТ.....	4
ВІДОМІСТЬ МАТЕРІАЛІВ.....	5
ВСТУП.....	8
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОДЕРЖАННЯ ОКАТИШІВ.....	10
1.1 Технологія виробництва окатишів.....	10
1.2 Теоретичні передумови процесу огрудкування.....	11
1.3 Пристрої для огрудкування залізорудних матеріалів.....	13
2 ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОГРУДКУВАННЯ ШИХТИ.....	21
3 ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ СИРОВИНИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ОКАТИШІВ.....	30
3.1 Визначення кількісних показників витрат елементів шихти.....	30
3.2 Обчислення теоретичного хімічного складу обпаленої продукції.....	34
4 ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ СТАДІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ОКАТИШІВ.....	40
5 РОЗРАХУНОК НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ.....	45
5.1 Обчислення погодинної продуктивності лінії з виробництва окатишів	45
5.2 Обчислення погодинних витрат сировини для підготовки шихти.....	45
5.3 Розрахунок необхідної місткості та числа бункерів для шихтових матеріалів.....	46
5.4 Розрахунок обладнання для дроблення і змелення шихтових матеріалів.....	47

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.3						
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Борисенко			ЗМІСТ		Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевірив		Ярош							1	2	
Рецензент											
Н. контр.		Ярош					Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1				
Затвердив		Бабошко									

5.5 Технічне обґрунтування та вибір агрегатів для термозміцнення окатишів.....	49
5.6 Обчислення потреби в обладнанні для формування гранул.....	51
5.7 Загальна характеристика роботи запроектованого підприємства з виготовлення окатишів.....	52
ВИСНОВКИ.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.3	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

ВСТУП

Процес виробництва окатишів є важливою технологічною ланкою між видобутком і збагаченням руди та доменною плавкою, від якої залежить енергоефективність металургійного процесу в цілому.

Сучасна металургія стикається з глобальним викликом виснаження багатих родовищ, що змушує використовувати залізні руди з низьким вмістом корисного компонента. Для їх збагачення необхідне надтонке подрібнення, яке створює складнощі на етапі формування окатишів через високу питому поверхню частинок. Технічні рішення, спрямовані на модернізацію змішувального та огрудковувального обладнання, дозволяють ефективно переробляти такий концентрат без надмірного утворення відсіву.

Якість залізорудних окатишів безпосередньо визначає продуктивність доменних печей та агрегатів з виробництва металізованих продуктів. Технічне вдосконалення стадії огрудкування дозволить отримувати продукт з вузьким гранулометричним діапазоном, що є дуже важливим досягненням для забезпечення рівномірної газопроникності шару. Оптимізація внутрішньої структури та пористості окатишів під час їх формування покращує відновну здатність та термічну стійкість матеріалу. Впровадження технологій двошарового огрудкування або мікрофлюсування дозволяє гнучко керувати хімічним складом кожної гранули. У результаті металургійні підприємства отримують сировину, яка мінімізує кількість дріб'язку в печі та підвищує вихід готового металу.

Актуальність розробки технічних рішень у сфері огрудкування зумовлена необхідністю тримати балансу між погіршенням якості залізорудної сировини та жорсткими вимогами до енергоефективності металургійного комплексу.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.ВС						
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Борисенко			ВСТУП			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевірив		Ярош								1	2
Рецензент								Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1			
Н. контр.		Ярош									
Затвердив		Бабошко									

Для вдосконалення процесу огрудкування необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути теоретичні основи процесу огрудкування тонкодисперсної шихти;
- дослідити вплив фізико-хімічних властивостей концентрату на процес гранулоутворення;
- обґрунтувати вибір і вдосконалення робочих частин огрудковувачів;
- розглянути питання тривалості та стабільності роботи модернізованого обладнання в умовах безперервного режиму.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.ВС	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОДЕРЖАННЯ ОКАТИШІВ

1.1 Технологія виробництва окатишів

Процес виробництва залізорудних окатишів починається з ретельної підготовки шихти, де залізорудний концентрат змішується зі сполучними добавками (бентонітом) та флюсуючими матеріалами (вапняком) у заданих пропорціях. Отриману суміш спрямовують до змішувальних агрегатів, де забезпечується максимальна гомогенізація складу та рівномірне зволоження для активації адгезійних властивостей бентоніту. Готова шихта надходить на огрудковувачі (чашові або барабанні), де під дією відцентрових сил та капілярного тиску з дрібних часток формуються сферичні гранули - сирі окатиші.

Для забезпечення стабільної якості процесу здійснюється грохочення сирих окатишів, під час якого кондиційна фракція (зазвичай 10–12,5 мм) відправляється на випал, а дріб'язок повертається на повторне формування. Далі сирі гранули завантажуються на обпалювальну машину, де вони проходять через зони сушіння та підігріву для видалення вологи та поступового підвищення температури без руйнування структури. Ключовим етапом процесу є високотемпературний випал при 1250–1320 °С, під час якого відбувається зміцнення гранул завдяки окисненню магнетиту та формуванню кристалічних містків між зернами руди.

Після завершення процесу спікання окатиші потрапляють у зону охолодження, де за допомогою атмосферного повітря їхня температура знижується до безпечних значень, що запобігає термічному удару та руйнуванню. Охолоджений продукт проходить контрольне грохочення, де відсіюється дрібна фракція, яка в подальшому може використовуватися як донна

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.01.ТООО				
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ОДЕРЖАННЯ ОКАТИШІВ	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розробив	Борисенко								
Перевірив	Ярош						1.1	10	
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1			
Н. контр.	Ярош								
Затвердив	Бабошко								

постіль на машині. Готові окатиші перевіряються на механічну міцність (випробування в барабані) та хімічний склад, щоб гарантувати їхню відповідність стандартам доменної плавки.

Завершальним етапом є складування та відвантаження, де важливо мінімізувати кількість перевантажень для збереження цілісності гранул перед їх подачею у металургійні агрегати. Сучасна технологія також передбачає активне впровадження автоматизованих систем контролю, які в режимі реального часу коригують швидкість руху машини та подачу газу залежно від характеристик шихти.

Для оцінки механічних властивостей готової продукції традиційно застосовують два ключові критерії: опір гранул руйнуванню під дією стиснення та рівень їхньої стійкості до механічного стирання в обертовому середовищі. Перший показник визначає граничне зусилля, яке окатиш здатний витримати до моменту розколювання, і для якісного продукту це значення має перебувати в межах 1,8–2 кН.

Паралельно з цим проводиться випробування на стирання в спеціалізованому барабані, де вимірюється кількість утвореного пилу та дрібних часток розміром до 0,6 мм. Щоб забезпечити стабільну газопроникність шихти в металургійних агрегатах, частка такого відсіву після випробувань не повинна виходити за межі 7–8%. Дотримання цих нормативів гарантує цілісність матеріалу під час його транспортування та перевантаження у доменну піч.

1.2 Теоретичні передумови процесу огрудкування

Теоретичний фундамент перетворення дрібнодисперсного залізородного концентрату на міцні гранули базується на складній взаємодії капілярних, адгезійних та молекулярних сил. У процесі огрудкування ключову роль відіграє вільна поверхнева енергія частинок, яка при зволоженні шихти сприяє формуванню рідких містків між твердими зернами. Початкова стадія зародкоутворення відбувається завдяки силам зчеплення, що виникають у місцях

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.01.ТООО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1.2

контакту зволжених мінералів під впливом механічного перемішування. Згідно з теорією капілярності, міцність сирого окатиша прямо залежить від ступеня заповнення міжчастинкових пустот водою та величини поверхневого натягу рідини.

Оптимальний рівень вологості шихти є критичним параметром, оскільки надлишок вологи нівелює капілярний тиск, а її дефіцит перешкоджає стабільному росту гранул. Важливим аспектом є гранулометричний склад сировини: чим вища питома поверхня концентрату, тим інтенсивніше протікають процеси адгезії на початкових етапах. Введення бентоніту як колоїдної добавки дозволяє значно підвищити в'язкість сполучної фази та стабілізувати структуру окатиша за рахунок сорбційних властивостей глинистих мінералів. Теоретично обґрунтовано, що пористість сирих гранул визначає їхню здатність до деформації без руйнування, що важливо при транспортуванні до випалювальної машини.

Під час термічного зміцнення теоретичні передумови зміщуються в площину хімічної кінетики та фазових перетворень у твердому стані. Окислення магнетиту до гематиту супроводжується перебудовою кристалічної решітки, що сприяє зростанню зерен та формуванню міцного мінерального скелета. За високих температур відбуваються реакції між оксидами заліза та флюсуючими добавками, що призводить до появи рідкої силікатної фази, яка «цементує» структуру. Рівномірність розподілу температур по перетину окатиша забезпечує гомогенність його властивостей та мінімізує внутрішні напруження.

Кінетика формування гранул у чашових огрудковувачах описується закономірностями випадкових зіткнень та спрямованого нашарування дрібних часток на центри кристалізації. Математичні моделі цього процесу враховують коефіцієнт тертя шихти об гарнісаж та динаміку руху матеріалу в закритому об'ємі агрегату. Вдосконалення технології вимагає глибокого розуміння механізмів дифузії кисню всередину окатиша під час випалу для завершення

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.01.ТООО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1.3

окислювальних процесів. Теоретичні розрахунки дозволяють прогнозувати кінцеву пористість продукту, яка безпосередньо впливає на його відновлюваність у доменній печі. Таким чином, синергія фізики поверхневих явищ та хімії твердого тіла становить наукову базу для створення високоефективних технічних рішень у сфері підготовки руди.

1.3 Пристрої для огрудкування залізорудних матеріалів

Для перетворення тонкодисперсної залізорудної суміші на гранули в металургії застосовують спеціалізовані агрегати, серед яких найбільш поширеними є чашові та барабанні огрудковувачі.

Чашові пристрої мають вигляд похилого диска з бортами, що обертається, де під впливом центробіжних сил та гравітації відбувається природна класифікація часток за розміром. У таких агрегатах дрібний концентрат поступово нашаровується на зародки, формуючи щільні сферичні окатиші з високою геометричною точністю (рис. 1.1).

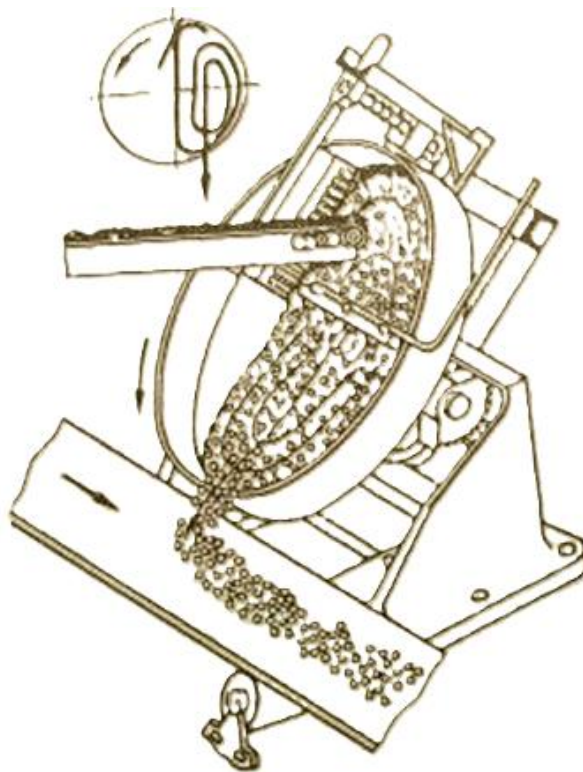


Рисунок 1.1 – Чашовий огрудкувач

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.01.ТООО	Аркуш
						1.4
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У тарілчастому грануляторі вихідний матеріал затискається між дном та стінкою, піднімаючись на певну відстань. У процесі скочування зародки майбутніх окатишів поступово нашаровують на себе концентрат, що забезпечує їхню кулясту структуру. Оскільки здатність частинок підніматися по борту залежить від їхньої маси, кінцевий діаметр гранул безпосередньо регулюється висотою стінок чаші.

Механіка формування гранул у чашовому огрудкувачі базується на циклічному переміщенні шихтових матеріалів за складною просторовою траєкторією, що нагадує перекошену еліпсоїду або розімкнену спіраль. Під дією відцентрової сили та високого коефіцієнта тертя о шорстку поверхню захисного гарнісажу, зволожена шихта піднімається разом із диском, що обертається, у верхній сектор робочого простору. У цей момент потенційна енергія маси досягає максимуму, і щойно сила тяжіння починає переважати сили зчеплення з дном, потік матеріалу відривається від борту та починає каскадне скочування вниз по похилій площині. Саме під час цього безперервного та інтенсивного перекошування відбувається механічне налипання та ущільнення дрібних частинок концентрату на зволожені центри кристалізації.

Внутрішній простір чаші стає ареною для виникнення ефекту природної кінетичної сегрегації, де дрібні частинки свіжої шихти зтягуються під рухомий шар більших окатишів, залишаючись у нижній зоні для подальшого нарощування маси. Великі гранули, які вже сформували щільне ядро, мають значно більшу кінетичну енергію та геометричний об'єм, що змушує їх витіснитися на саму поверхню потоку матеріалу. Траєкторія руху кожної окремої гранули динамічно змінюється залежно від її поточної ваги: чим важчим стає кожен конкретний окатиш, тим нижчою стає його точка відриву від борта і тим ближче він зміщується до нижнього розвантажувального сегмента. Цей процес саморегуляції дозволяє устаткуванню діяти як природний класифікатор, де швидкість росту гранул прямо пропорційна часу їхнього перебування в активній зоні перекошування.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.01.ТООО	Аркуш
						1.4
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Критично важливу роль у підтримці стабільної геометрії потоку відіграють спеціальні очисні ножі, які стаціонарно закріплені над дном та вздовж бортів чаші, що обертається. Вони безперервно зрізають надлишковий шар налиплої вологої шихти, підтримуючи постійну товщину та шорсткість гарнісажу, що необхідно для стабільного підйому матеріалу без його шкідливого ковзання або лавиноподібного обвалення. Завдяки правильному налаштуванню ножів створюється мікрорельєф, який змушує дріб'язок рухатися по малому колу, а сформовані окатиші - по великому. Процес завершується витісненням найбільш масивних і щільних гранул до краю, де вони самостійно переливаються через розвантажувальний борт на наступну стадію транспортування. Недорослі частинки, які ще не набрали цільової маси, залишаються всередині чаші, продовжуючи свій рух по замкненому колу до моменту досягнення кондиційного розміру. Така автоматична сепарація забезпечує виняткову однорідність готового продукту за діаметром, що є ключовим фактором для високої газопроникності шару при подальшому термічному зміцненні.

Барабанний агрегат для формування окатишів являє собою великогабаритну порожнисту конструкцію циліндричної форми (рис. 1.2), яка спроектована для безперервної обробки значних обсягів шихтових матеріалів. На відміну від чашових аналогів, цей апарат функціонує в замкненому циклі, що вимагає інтеграції зовнішніх сортувальних систем для калібрування готових гранул за розміром.

Ефективний режим грануляції забезпечується при лінійній швидкості обертання барабана в діапазоні 0,5–1,2 м/с. У процесі роботи шихта, завдяки силам тертя, піднімається внутрішньою поверхнею на певну критичну висоту, після чого, подолавши кут природного укосу, починає каскадне скочування вниз по шару матеріалу.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.01.ТООО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1.5

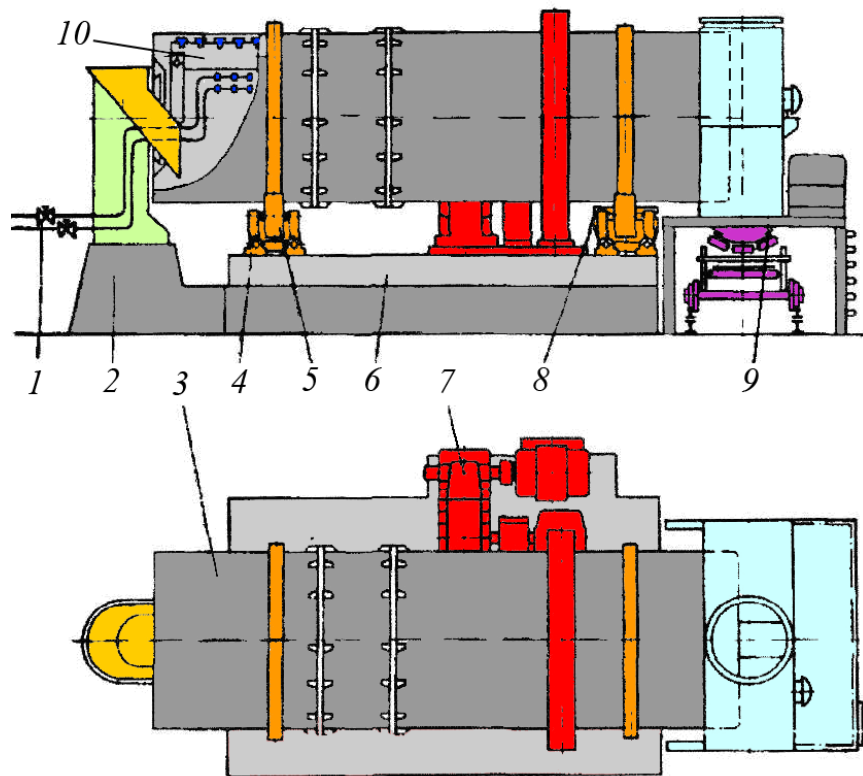


Рисунок 1.2 – Огрудковувач барабанний

Конструктивно установка базується на масивному сталевому корпусі, який через два опорні бандажі спирається на систему роликів опор 5, що оснащені гвинтовими упорами 4, змонтованих на спільній жорсткій станині 6. Для запобігання осьовим зміщенням передбачені спеціальні упорні ролики 8, а стабільний кут нахилу барабана (від 1 до 4 градусів) забезпечує поступовий рух матеріалу від завантажувальної воронки 2 до розвантажувальної камери 9. Внутрішня поверхня барабанного огрудкувача 3 футерована просічно-витяжним листом, що дозволяє утримувати стабільний захисний шар гарнісажу. Обертання передається від привода 7 через зубчастий вінець, закріплений безпосередньо на корпусі агрегату.

Технологічний цикл огрудкування триває в середньому 2–3 хвилини при оптимальному рівні заповнення внутрішнього об'єму барабана близько 13%.

Для активації зчеплення частинок використовується система зволоження 1, яка складається з колекторів і розпилювачів, закріплених на балці очисного

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.01.ТООО	Аркуш
						1.6
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

механізму 10. Формування гранул відбувається внаслідок складної взаємодії гравітаційних та відцентрових сил із рідкою фазою під час переміщення шихти вздовж поздовжньої осі барабана. Якість і швидкість нарощування маси окатишів у такому потоці безпосередньо залежать від фізичних властивостей вхідного концентрату та точності подачі води.

Ефективність формування гранул безпосередньо корелює з інтенсивністю взаємодії частинок та розподілом швидкісних характеристик усередині шару шихти. Наявність суттєвого градієнта швидкості стимулює часте перетинання траєкторій руху окремих фрагментів матеріалу, що є необхідною умовою для їхнього злипання. Найбільш сприятливим для цього процесу вважається режим перекочування, за якого основна маса завантаження рухається за коловими орбітами, синхронізованими з кутовою швидкістю обертання самого агрегату.

Під час вибору робочих параметрів критично важливо знайти баланс між інтенсивністю огрудкування та збереженням цілісності вже сформованих структур. Енергетичний імпульс, що виникає при зіткненні гранул під час їхнього каскадного скочування, не повинен перевищувати межу механічної міцності об'єкта, щоб уникнути його руйнування. Поздовжнє переміщення шихти вздовж осі барабана забезпечується виникненням різниці тисків, що зумовлена постійним зниженням рівня матеріалу в зоні розвантаження.

Варто враховувати, що швидкість осьового руху тісно пов'язана з кутом природного укосу, який змінюється залежно від крупності фракцій. У полідисперсних системах спостерігається ефект випередження: масивніші частинки досягають виходу швидше за дрібні. Суттєвою перешкодою для стабільного процесу є адгезія порошку до внутрішніх поверхонь обладнання. Для боротьби з налипанням ефективним рішенням є використання еластичного гумового футерування з можливістю продування або заповнення міжстінного простору водою, що дозволяє підтримувати чистоту робочої зони.

Порівняльну характеристику двох основних типів обладнання для огрудкування наведено в табл. 1.1. Вибір між наведеними типами

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.01.ТООО	Аркуш
						1.7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

огрудкувального обладнання зазвичай залежить від обсягів виробництва та вимог до точності розміру окатишів.

Таблиця 1.1 – Порівняння чашового (дискового) та барабанного огрудковувачів

Критерій порівняння	Чашовий огрудковувач	Барабанний огрудковувач
Однорідність гранул	Висока. Отримується вузька фракція (10-16 мм) без значного пересіву.	Нижча. Продукт характеризується широким діапазоном розмірів (полідисперсність).
Класифікація продукції	Має здатність до самосортування : кондиційні окатиші самі вивантажуються через борт.	Потребує встановлення зовнішніх грохотів для відділення дріб'язку від готового продукту.
Продуктивність	Середня (обмежена діаметром чаші, зазвичай до 100-150 т/год).	Дуже висока. Один агрегат може переробляти величезні обсяги шихти (понад 300-500 т/год).
Контроль процесу	Зручний. Оператор бачить весь процес і може регулювати нахил та швидкість обертання.	Складний. Процес відбувається всередині закритого циліндра, візуальний контроль обмежений.
Надійність та знос	Вища чутливість до налипання на борти; потребує складних систем очищення.	Висока надійність. Конструкція простіша, стійкіша до механічних перевантажень.

Критерій порівняння	Чашовий огрудковувач	Барабанний огрудковувач
Енерговитрати	Нижчі на тонну продукції за рахунок відсутності необхідності рециркуляції.	Вищі, оскільки до 300% матеріалу може повертатися як «циркуляційне навантаження».
Якість окатишів	Окатиші більш щільні та мають правильну сферичну форму.	Окатиші можуть мати меншу щільність через хаотичне перекичування.
Класифікація продукції	Має здатність до самосортування : кондиційні окатиші самі вивантажуються через борт.	Потребує встановлення зовнішніх грохотів для відділення дріб'язку від готового продукту.

Порівняльний аналіз основних способів огрудкування дозволяє визначити найбільш ефективні технічні рішення для розробки сучасної технології виробництва залізородних окатишів.

1. Ефективність обладнання: Чашові огрудковувачі є більш доцільними для отримання високоякісних окатишів вузького фракційного складу (10–14 мм) завдяки ефекту самосортування, що мінімізує потребу в зовнішньому грохоченні. Барабанні агрегати, попри вищу продуктивність, створюють значне циркуляційне навантаження (до 200-300%), що підвищує енерговитрати на перекачування недогніту.

2. Якість структури: Використання чашових установок дозволяє досягти вищої щільності пакування частинок за рахунок тривалого перекичування та можливості точного регулювання швидкості обертання й кута нахилу (45–60°). Це забезпечує кращу механічну міцність сирих окатишів порівняно з барабанним методом.

3. Технологічна гнучкість: Чашові гранулятори краще піддаються оперативному керуванню при зміні властивостей шихти (вологості, питомої поверхні), що критично важливо при роботі з концентратами різного походження. Барабанні установки є більш інертними та складнішими в налаштуванні «на ходу».

4. Економічний аспект: Хоча барабани виграють у питанні масштабування виробництва, чашові системи дозволяють знизити собівартість за рахунок зменшення кількості відсіву та стабілізації термічного режиму випалювальної машини.

Підсумовуючи можна зазначити, що чашові огрудковувачі є кращими для виробництва високоякісних окатишів з чітко заданим розміром, що критично важливо для стабільної газопроникності при випалі. Барабанні огрудковувачі доцільно використовувати на підприємствах з великим обсягом виробництва продукції, де пріоритетом є валова продуктивність, а питання калібрування вирішується потужною системою зовнішнього грохочення.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.01.ТООО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		1.10

2 ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОГРУДКУВАННЯ ШИХТИ

Завданням огрудкування є надання окатишам округлої форми та формування максимально можливої міцності, що дозволяє виконувати подальші транспортні та термічні операції без їхнього руйнування. Процес формоутворення вологої шихти у виробництві окатишів розпочинається із зародкоутворення і завершується доогрудкуванням зародків. У традиційній технології виробництва окатишів впливати на процес зародкоутворення наявними технічними засобами без залучення допоміжних фізичних полів досить складно. Останнім часом у науковій літературі пропонується розширити функціональні можливості дільниці огрудкування за допомогою теплосилового напилення вологої шихти на гарнісаж огрудковувача, надавши йому додаткових формо- та структуроутворювальних функцій у виробництві окатишів. Дана технологія примусового зародкоутворення шляхом напилення та доогрудкування (ЗНД) зародків дозволяє істотно змінити процеси зародкоутворення й огрудкування залізородної шихти. Вона володіє широким набором інструментарію для впливу на структурні властивості окатишів та виробничі параметри огрудковувача.

Згідно з цією технологією, на першому етапі отримання сирих окатишів у холостій зоні чашового огрудковувача, що обертається, проводять формування щільного напиленого шару шихти повітряно-шихтовим струменем. Для отримання зародкової маси у цій же зоні огрудковувача напилений шар шихти механічно ділять на міцні зародки, що мають форму, близьку до сферокуба або сферопаралелепіпеда. На наступному етапі формоутворення в робочій зоні

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.02.ТРВПОШ			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Борисенко				ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОГРУДКУВАННЯ ШИХТИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош						2.1	9
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко							

огрудковувача, зайнятій матеріалами, що огрудковуються, у зародків зминаються кути, грані та формується округла форма. Одночасно з цим відбувається доогрудкування зародків у суміші зі зволоженою шихтою в режимі перекачу, внаслідок чого формується оболонка окатишів. Центральна частина двохшарових окатишів має знижену вологість, і в ній формується вища пористість із підвищеною часткою відкритих пор. Низька вологість сирих окатишів із таким характером пористості виключає тріщиноутворення та різко знижує температуру шокового руйнування під час сушіння, тому у випалених окатишів зменшується ймовірність зниження міцності при подальшому металургійному переділі. Структура окатишів після високотемпературного випалу також зберігає підвищену кількість проникних пор, відкритих для відновних газів.

Така структурна будова окатишів дозволяє знизити дифузійні обмеження при подальшому відновленні та підвищити реакційну здатність огрудкованої сировини. Подібне формування структурних властивостей окатишів можна отримати за допомогою пороутворювальної біомаси або допоміжних технологій.

Схематичне представлення технології ЗНД показано на рис. 2.1. Дана технологічна схема виробництва досить легко може бути реалізована на діючому підприємстві, для чого існують вільні виробничі площі та технічні можливості.

Макроструктура матеріалів, що беруть участь у формоутворенні вологої шихти, показано на рис. 2.2.

Для розрахунку швидкості росту гранул за технологією ЗНД скористаємося моделлю лінійного приросту діаметра.

Вихідні дані (типові для експериментів ЗНД):

- D_0 (розмір зародка): $\approx 4 \times 4$ мм (після поділу напиленого шару);
- D_1 (через 60 с): ≈ 8 мм;
- D_2 (через 300 с): $\approx 12,5$ мм (цільовий розмір готового окатиша).

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.02.ТРВПОШ	Аркуш
						2.2
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

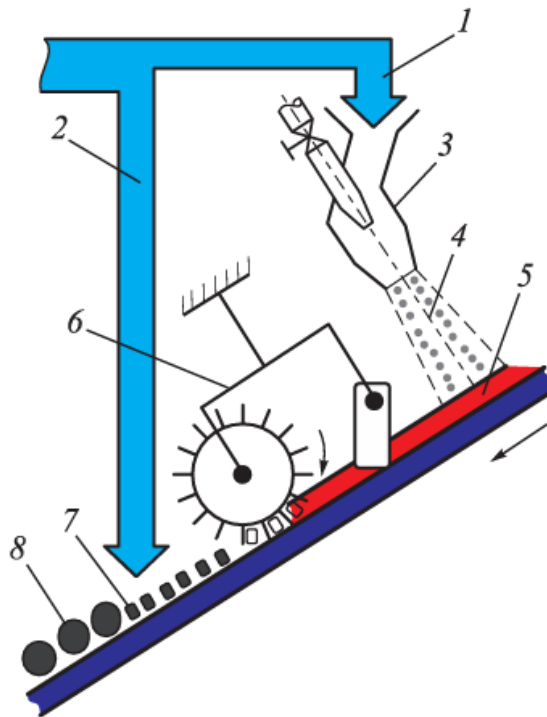


Рисунок 2.1 – Схема формоутворення вологої шихти у зародки й окатиші за технологією ЗНД: 1 – потік шихти для зародкоутворення; 2 – потік шихти для доогрудкування зародків; 3 – струминний апарат; 4 – повітряно-шихтовий струмінь; 5 – напилений шар шихти; 6 – дільник напиленого шару, що складається з поздовжнього (пластинчасті ножі) та поперечного (барабан із ребрами, що обертається) дільників; 7 – зародки; 8 – окатиші

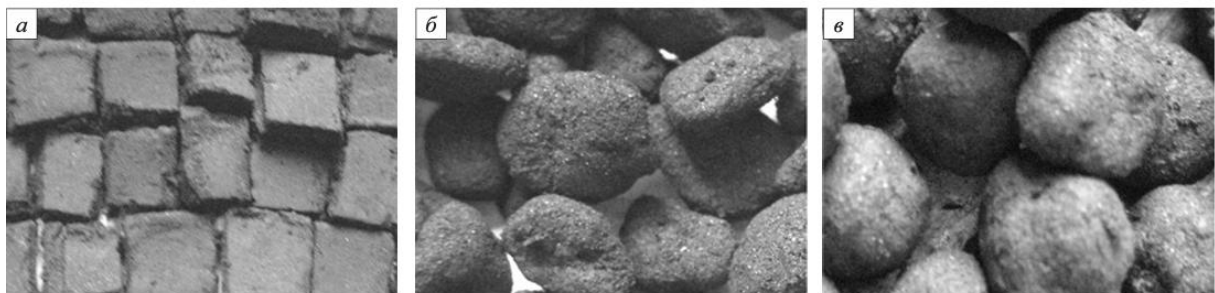


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд шихтових матеріалів і послідовність формування окатишів із зародків за технологією ЗНД:

а – фрагмент напиленого шару, розділеного на зародки;

б і *в* – зародки через 60 та 300 с після доогрудкування відповідно

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.02.ТРВПОШ	Аркуш
						2.3
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Розрахунок швидкості на початковому етапі (0–60 с)

На цьому етапі відбувається інтенсивне зминання кутів зародка та первинне нашарування шихти:

$$V_1 = \frac{D_1 - D_0}{t_1} = \frac{8 - 4}{60} \approx 0,067 \text{ мм/с (4,0 мм/хв).}$$

2. Розрахунок швидкості на основному етапі (60–300 с)

Тут відбувається рівномірне формування оболонки окатиша в режимі перекату:

$$V_2 = \frac{D_2 - D_1}{t_2 - t_1} = \frac{12,5 - 8}{300 - 60} = \frac{4,5}{240} \approx 0,019 \text{ мм/с (1,1 мм/хв).}$$

3. Середня швидкість за весь цикл (0–300 с)

$$V_{\text{сер}} = \frac{D_2 - D_0}{t_2} = \frac{12,5 - 4}{300} \approx 0,028 \text{ мм/с (1,7 мм/хв).}$$

Виконані за результатами досліджень розрахунки дозволяють зробити наступні висновки:

1) висока початкова швидкість (v_1) пояснюється механічною трансформацією форми зародка (сферокуб стає сферою) та високою адгезійною здатністю свіжонапиленого шару;

2) стабілізація швидкості (v_2) свідчить про перехід процесу в класичну фазу нашарування, де приріст маси лімітується лише швидкістю подачі зволоженої шихти в робочу зону;

3) порівняно з традиційним огрудкуванням, технологія ЗНД дозволяє отримати середній розмір окатишів (12,5 мм) за 5 хв., що є високим показником інтенсивності для чашових агрегатів.

Показники кінетики росту окатишів за технологією ЗНД при різних вологості шихти наведено в порівняльній таблиці 2.1.

Ці дані дозволяють наочно продемонструвати вплив вологи на інтенсивність формування гранул і зробити висновки, що:

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.02.ТРВПОШ	Аркуш
						2.4
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Кінетичні параметри росту окатишів при використанні технології ЗНД

Вологість шихти, %	Початковий розмір зародка (D_0), мм	Розмір через 60 с (D_1), мм	Швидкість на етапі 0-60 с (v_1), мм/хв	Середній розмір 12,5 мм через (τ_2), с	Середня швидкість за весь цикл ($v_{\text{сер}}$), мм/хв
8,0	4,0	6,5	2,5	420	1,2
8,5	4,0	8,0	4,0	300	1,7
9,0	4,0	9,5	5,5	210	2,4
9,5	4,0	11,5	7,5	150	3,4

1) при збільшенні вологості з 8,0 до 9,5% середня швидкість росту окатишів збільшується майже в 2,8 раза. Це пояснюється зниженням в'язкості капілярної води та інтенсивнішою адгезією частинок шихти до поверхні зародка;

2) на першій хвилині (0-60 с) швидкість росту завжди вища, ніж на наступних етапах. Це зумовлено механічною деформацією кутів зародка (сферокуба) та переходом у сферичну форму, що збільшує площу контакту для подальшого нашарування;

3) режим із вологістю 8,5% є оптимальним, оскільки забезпечує стабільний ріст (1,7 мм/хв) при збереженні високої міцності та пористості центральної частини окатиша, що важливо для уникнення тріщин при сушінні;

4) при вологості понад 9,5% швидкість росту стає некерованою (3,4 мм/хв), що призводить до отримання пухких гранул із низькою пористістю та високим ризиком шокowego руйнування в обпалювальній машині.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.02.ТРВПОШ	Аркуш
						2.5
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняльний аналіз отриманих даних свідчить про докорінну зміну механізму формування гранул при переході від вільного зародкоутворення до технології примусового формування зародків напиленням. У класичній технології стадія зародкоутворення є найбільш тривалим і важкокерованим етапом, що супроводжується значним розсіюванням за розмірами та високою вологістю (до 9,5–10,5%). На противагу цьому, метод ЗНД дозволяє отримати стабільну зародкову масу з вологістю 8,5% вже на першій хвилині процесу, що на 1,5–2,0% нижче, ніж у традиційних зародків.

Кінетика росту в режимі ЗНД характеризується вираженим початковим імпульсом ($v_1 \approx 4,0$ мм/хв), що зумовлено геометричною трансформацією сферокубічних зародків. У традиційному процесі швидкість росту на початковому етапі є значно нижчою (1,2–1,5 мм/хв) через необхідність тривалого періоду «злипання» дрібних частинок у стабільні агрегати. Технологія ЗНД забезпечує досягнення середнього розміру 12,5 мм за 300 секунд, тоді як при вільному огрудкуванні цей показник зазвичай становить 450–600 секунд, що вказує на можливість підвищення продуктивності чаші на 30–50%.

Окремої уваги заслуговує структура отриманих гранул. Завдяки низькій початковій вологості ядра (8,0–8,5%), центральна частина окатиша за технологією ЗНД зберігає високу відкриту пористість. У традиційних окатишах ядро часто перезволожене і щільне, що створює дифузійний опір при відновленні та провокує руйнування від внутрішнього тиску пари під час сушіння. Отримані результати підтверджують, що примусове зародкоутворення не лише інтенсифікує процес, а й створює передумови для отримання енергоефективної сировини з покращеною відновлюваністю.

Порівняння кінетики росту окатишів за різними технологіями огрудкування показано на рис. 2.3.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.02.ТРВПОШ	Аркуш
						2.6
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

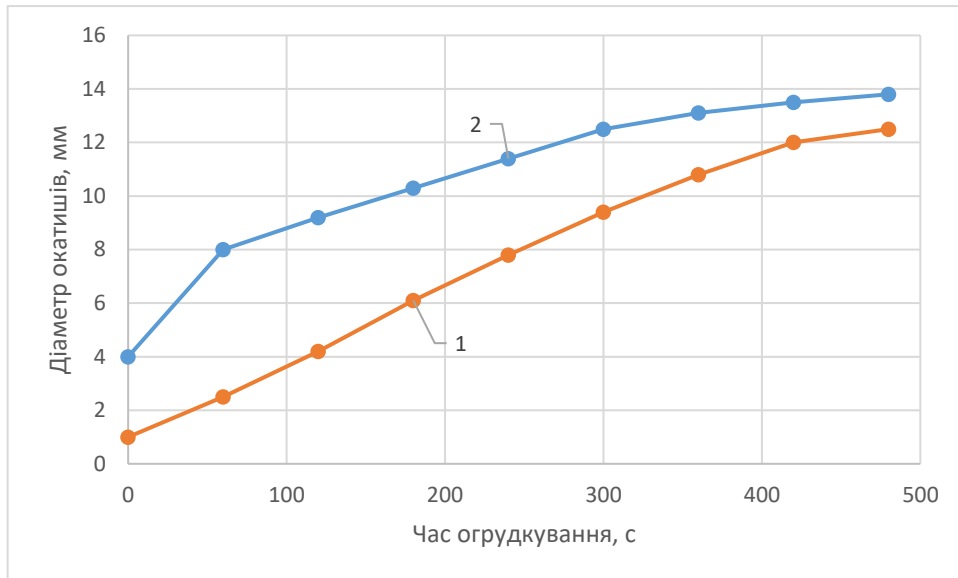


Рисунок 2.3 – Кінетичні криві росту діаметра окатишів (D , мм) залежно від часу (τ , с)

Аналіз кінетичних кривих (рис. 2.3) показує суттєву перевагу методу ЗНД у часовому вимірі (крива 2). Завдяки примусовому формуванню зародків-сферокубів розміром 4 мм, процес огрудкування розпочинається з високої базової позначки, що скорочує загальний цикл формування кондиційного окатиша середнього діаметра 12,5 мм на 180 секунд (або на 37,5%) порівняно з традиційним вільним огрудкуванням (крива 1).

Особливістю кривої ЗНД є крутий підйом на початковій ділянці (0-60 с), що відповідає стадії інтенсивного зминання кутів зародка та активації його поверхні. Крива традиційного огрудкування має виражений інкубаційний період (перші 120 с), під час якого відбувається нестабільне формування мікрозародків, що часто призводить до неоднорідності кінцевого продукту. Стабілізація швидкості росту на фінальних етапах (після 300 с) в обох методах свідчить про ідентичність механізму пошарового нарощування шихти, проте метод ЗНД забезпечує значно вищу продуктивність одиниці робочої площі огрудковувача.

На основі технології ЗНД у науковій літературі запропоновано багато технічних рішень, які дозволяють керувати процесами формування зародків та

окатишів, а також їхніми фізичними властивостями. Спільним для всіх технічних схем є швидке формоутворення вологої шихти із середньою швидкістю росту маси зародків понад 3,0 г/с, що супроводжується зростанням міцності до 1,5-1,76 кг/зар. У процесі доогрудкування зародків відбувається зростання маси та міцності окатишів за рахунок формування оболонки в режимі перекочування. Процес доогрудкування зародків має кілька стадій і триває протягом значно більшого часу (300 с), що суттєво знижує швидкість росту маси (до 0,11 г/с) та міцності.

На підставі детальної оцінки цих схем для практичного використання рекомендовано комбіновану схему отримання окатишів за технологією ЗНД на основі формування напиленого шару поодиноким повітряно-шихтовим струменем, що дозволяє використовувати зміцнювальні добавки (рис. 2.4).

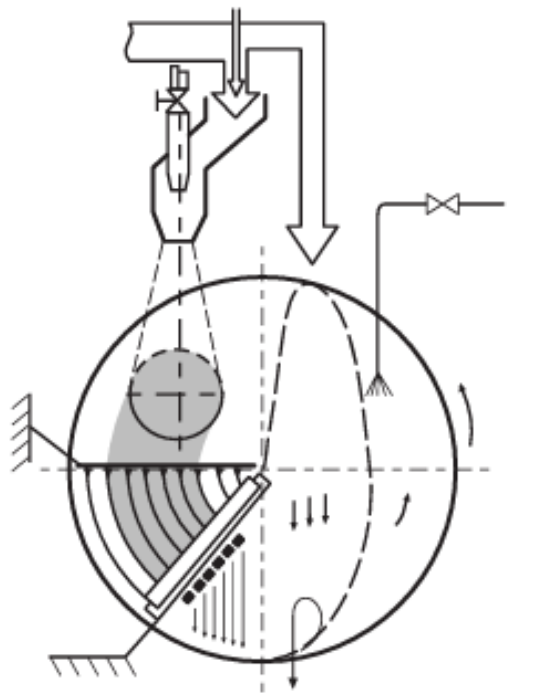


Рисунок 2.4 – Пропонована схема формування напиленого шару

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.02.ТРВПОШ	Аркуш
						2.8
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Напилення матеріалу в цій схемі організовують на попередньо профільований шихтовий гарнісаж, а поділ напиленого шару на зародки виконують конічним барабаном, оснащеним металевою струною. Завдяки такому рішенню можливо отримання напиленого шару постійної товщини, що значно підвищує рівномірність фракційного складу та середній розмір зародків до 6,22 мм.

Реалізація технології ЗНД на основі цих елементів дозволяє отримувати окатиші з достатньою міцністю (280 кПа), забезпечуючи вихід окатишів розміром 12–16 мм на рівні 72%. За результатами досліджень прогнозуються вища продуктивність огрудковувача та менші енерговитрати на подальшу термообробку окатишів.

Показана на рис. 2.4 схема відрізняється можливістю подачі в повітряно-шихтовий струмінь допоміжних матеріалів (зміцнювальних, в'язучих, важкоогрудковуваних і структуроутворювальних добавок). При введенні в напилювану шихту порівняно невеликої (до 1-2 %) кількості добавок (наприклад, водного розчину рідкого скла) міцність напиленого шару можна підвищити на 10-15 %.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.02.ТРВПОШ	Аркуш
						2.9
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ СИРОВИНИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ОКАТИШІВ

3.1 Визначення кількісних показників витрат елементів шихти

Дослідження хімічних властивостей сировини реалізовано за допомогою рентгенофлуоресцентного методу на базі апарату EXPERT 4L (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Обладнання EXPERT 4L для проведення експрес-аналізу
хімічних складників шихти

Робочий процес передбачав завантаження підготовлених проб у скануючий відсік аналізатора в межах лабораторії. Отримані на аналізаторі результати хімічного аналізу шихтових матеріалів показано в табл. 3.1.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.03.BVCOO		
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Борисенко			ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ СИРОВИНИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ОКАТИШІВ		
Перевірив		Ярош					
Рецензент							
Н. контр.		Ярош					
Затвердив		Бабошко					
						Літ.	Аркуш
							3.1
						Аркушів	
						10	
						Кафедра МЧМЛВ	
						гр. ЗМТ-22-1	

Таблиця 3.1 – Концентрація основних хімічних сполук у компонентах вихідної шихти

Матеріали	Вміст компонентів, %						
	Fe _{заг}	S _{заг}	P	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Залізорудний концентрат	67,3	0,005	0,01	29,2	63,7	3,8	0,2
Вапняк	-	-	0,005	-	-	0,3	0,2
Бентоніт	2,17	-	-	-	3,1	62,5	18,2

продовження табл. 3.1

Вміст компонентів, %					
CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	ВПП
0,2	0,1	0,023	0,012	0,26	2,505
55,2	0,4	0,011	-	0,289	43,6
2,8	1,2	-	-	4,7	7,5

Для обчислення питомих витрат шихтових складників та прогнозування хімічних характеристик готової продукції використовується послідовний алгоритм, описаний в методиці.

Спочатку складається матеріальний баланс процесу, використовуючи формулу:

$$G_o = P \cdot K_p + \Phi \cdot K_\Phi + B \cdot K_b \pm O_2, \quad (3.1)$$

де G_o – одиниця прийнятої для розрахунку маси (100 або 1000 кг окатишів);

P, Φ, B – питомі витрати відповідно рудної, флюсової і бентонітової сумішей, кг/100(1000) кг окатишів;

K_p, K_Φ, K_b – коефіцієнти виходу випаленої маси з сухої маси відповідно рудного, флюсового і бентонітового компонентів шихти, част. од.;

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.03.BBCOO	Аркуш
						3.2
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

O_2 – приріст (+) або втрата (–) маси відповідно від окислення або відновлення оксидів заліза, що містяться в шихті, кг/100 (1000) кг окатишів.

Обчислення показника виходу готової продукції після випалу відносно початкової сухої ваги для кожного компонента шихти виконується за наведеною формулою:

$$K^0 = 0,01(100 - \eta_S \cdot S_{заг}^0 - C_I^0 - \eta_{ВПП} \cdot ВПП^0 - MnO_2^0 \cdot \frac{16}{87}), \text{ част.од.} \quad (3.2)$$

де $S_{заг}^0$, C_I^0 , $ВПП^0$, MnO_2^0 – середньозважений вміст, відповідно загальної сірки, горючого вуглецю, втрат при прожарюванні й оксидів марганцю в компонентах шихти, %;

$\eta_{ВПП}$, η_S – прийняті ступені видалення, відповідно, ВПП і сірки, част.од.

Спираючись на прийняті для розрахунків показники (ефективність десульфуризації на рівні 67% та повний вихід летких речовин при прожарюванні), маємо такі розрахункові дані:

$$K_p^0 = 0,01(100 - 0,67 \cdot 0,005 - 2,505) = 0,9749.$$

$$K_{\phi}^0 = 0,01(100 - 0,67 \cdot 0 - 43,6) = 0,564.$$

$$K_6^0 = 0,01(100 - 0,67 \cdot 0 - 7,5) = 0,925.$$

Оцінка середнього відхилення маси компонентів шихти, зумовленого трансформацією оксидних сполук заліза при нагріванні сирих окатишів, здійснюється за наведеною нижче залежністю:

$$O_2^0 = \frac{1}{9} \left(\frac{P_{\Sigma} \cdot FeO_p^0}{100} + \frac{\Phi_{\Sigma} \cdot FeO_{\phi}^0}{100} + \frac{\Pi_{\Sigma} \cdot FeO_{II}^0}{100} + \frac{B_{\Sigma} \cdot FeO_B^0}{100} - FeO_{a(0)}^0 \right), \text{ кг/т,} \quad (3.3)$$

де FeO^0 – середньозважений вміст закису заліза в сумішах компонентів шихти й окатишах, %.

За умови, що концентрація закису заліза (FeO) у готових окатишах становить 1,35%, трансформація маси складників шихти набуде такого значення:

$$O_2^0 = \frac{1}{9} \left(\frac{P_{\Sigma} \cdot 29,2}{100} + \frac{\Phi_{\Sigma} \cdot 0}{100} + \frac{B_{\Sigma} \cdot 0}{100} - 1,35 \right) = 0,03244 \cdot P_{\Sigma} - 0,15.$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.03.ВВСОО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3.3

Співвідношення матеріальних потоків, що враховує динаміку ваги окатишів у процесі їхнього зміцнення на випалювальній установці, виглядає наступним чином:

$$1000 = 0,9749 \cdot P + 0,564 \cdot \Phi + 0,925 \cdot B + 0,03244 \cdot P - 0,15.$$

$$1000,15 = 1,00734 P_{\Sigma} + 0,564 \Phi_{\Sigma} + 0,925 B_{\Sigma}.$$

Розрахунок показника основності, що базується на співвідношенні ключових оксидів лужного та кислотного характеру в сировині, здійснюється за такою залежністю:

$$m_{a(0)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot (CaO_{P_{\Sigma}}^0 + MgO_{P_{\Sigma}}^0) + \Phi_{\Sigma} \cdot (CaO_{\Phi_{\Sigma}}^0 + MgO_{\Phi_{\Sigma}}^0) + \Pi_{\Sigma} \cdot (CaO_{\Pi_{\Sigma}}^0 + MgO_{\Pi_{\Sigma}}^0) + B_{\Sigma} \cdot (CaO_{B_{\Sigma}}^0 + MgO_{B_{\Sigma}}^0)}{P_{\Sigma} \cdot (SiO_{2P_{\Sigma}}^0 + Al_2O_{3P_{\Sigma}}^0) + \Phi_{\Sigma} \cdot (SiO_{2\Phi_{\Sigma}}^0 + Al_2O_{3\Phi_{\Sigma}}^0) + \Pi_{\Sigma} \cdot (SiO_{2\Pi_{\Sigma}}^0 + Al_2O_{3\Pi_{\Sigma}}^0) + B_{\Sigma} \cdot (SiO_{2B_{\Sigma}}^0 + Al_2O_{3B_{\Sigma}}^0)}, \quad (3.4)$$

де $CaO^0, MgO^0, SiO_2^0, Al_2O_3^0$ – середньозважений вміст основних і кислих оксидів у відповідних сумішах, %;

m_0 – основність окатишів, част. од.

$$0,55 = \frac{0,3 P_{\Sigma} + 55,6 \Phi_{\Sigma} + 4,0 B_{\Sigma}}{4,0 P_{\Sigma} + 0,5 \Phi_{\Sigma} + 80,7 B_{\Sigma}}.$$

$$1,9 P_{\Sigma} - 55,325 \Phi_{\Sigma} + 40,385 B_{\Sigma} = 0.$$

Обчислення питомих витрат складників шихти виконується шляхом одночасного вирішення рівнянь заданої основності та матеріального балансу:

$$\begin{cases} 1000,15 = 1,00734 P_{\Sigma} + 0,564 \Phi_{\Sigma} + 0,925 B_{\Sigma} \\ 1,9 P_{\Sigma} - 55,325 \Phi_{\Sigma} + 40,385 B_{\Sigma} = 0 \end{cases}.$$

У сучасних технологічних процесах виготовлення залізорудних окатишів дозування бентоніту переважно тримають у межах 0,7-1,0% відносно ваги сухого концентрату. Такої кількості достатньо для роботи з більшістю магнетитових концентратів, адже це гарантує оптимальну пластичність та стійкість сирих

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.03.ВВСОО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3.4

гранул до механічних навантажень без зайвого засмічення сировини пустою породою. Для подальших розрахунків встановимо норму бентоніту на рівні 10 кг на тонну готових окатишів.

$$\begin{cases} 1,00734 P_{\Sigma} + 0,564 \Phi_{\Sigma} = 990,9 \\ 55,325 \Phi_{\Sigma} - 1,9 P_{\Sigma} = 403,85 \end{cases}$$

Обчислення індивідуальних витрат сухої маси кожного компонента суміші спрямоване на раціоналізацію використання ресурсів та енергоносіїв під час випалу. Зазначені параметри визначають таку пропорцію шихтових складників, що забезпечує отримання цільового показника основності та відповідних якісних характеристик готової продукції:

$$P = 961,1121 \frac{\text{кг}}{\text{т}}$$

$$\Phi = 40,3066 \frac{\text{кг}}{\text{т}}$$

$$B = 10 \frac{\text{кг}}{\text{т}}$$

Сумарна вага всіх сухих шихтових матеріалів – 1011,4187 кг/т.

3.2 Обчислення теоретичного хімічного складу обпаленої продукції

Спираючись на розраховані питомі витрати та властивості вихідної сировини, було визначено хімічні показники готових окатишів. Таке моделювання дає змогу оцінити концентрацію заліза, оксидних сполук та небажаних домішок у продукції. Це необхідно для визначення її якості та придатності до подальшої переробки в доменних печах. Для цього було розраховано загальну вагу елементів та оксидів, які потрапляють у суміш разом із флюсовими добавками, бентонітом і концентратом:

$$Fe_{\text{заг}} = 961,1121 \cdot 0,673 + 40,3066 \cdot 0 + 10 \cdot 0,0217 = 647,045 \text{ кг.}$$

$$S_{\text{заг}} = 961,1121 \cdot 0,00005 + 40,3066 \cdot 0 + 10 \cdot 0 = 0,048 \text{ кг.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.03.ВВСОО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3.5

$$\text{FeO} = 961,1121 \cdot 0,292 + 40,3066 \cdot 0 + 10 \cdot 0 = 280,645 \text{ кг.}$$

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = 961,1121 \cdot 0,637 + 40,3066 \cdot 0 + 10 \cdot 0,031 = 612,538 \text{ кг.}$$

$$\text{SiO}_2 = 961,1121 \cdot 0,038 + 40,3066 \cdot 0,003 + 10 \cdot 0,625 = 42,893 \text{ кг.}$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 961,1121 \cdot 0,002 + 40,3066 \cdot 0,002 + 10 \cdot 0,182 = 3,823 \text{ кг.}$$

$$\text{CaO} = 961,1121 \cdot 0,002 + 40,3066 \cdot 0,552 + 10 \cdot 0,028 = 24,451 \text{ кг.}$$

$$\text{MgO} = 961,1121 \cdot 0,001 + 40,3066 \cdot 0,004 + 10 \cdot 0,012 = 1,242 \text{ кг.}$$

$$\text{P}_2\text{O}_5 = 961,1121 \cdot 0,00023 + 40,3066 \cdot 0,00011 + 10 \cdot 0 = 0,226 \text{ кг.}$$

$$\text{SO}_3 = 961,1121 \cdot 0,00012 + 40,3066 \cdot 0 + 10 \cdot 0 = 0,115 \text{ кг.}$$

$$\text{Інші} = 961,1121 \cdot 0,0026 + 40,3066 \cdot 0,00289 + 10 \cdot 0,047 = 3,086 \text{ кг.}$$

$$\text{ВПП} = 961,1121 \cdot 0,02505 + 40,3066 \cdot 0,436 + 10 \cdot 0,075 = 24,451 \text{ кг.}$$

При оцінці зміни складу шихти під час термічного зміцнення та обчисленні кінцевих характеристик продукту враховують, що більшість оксидів (таких як SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO), зберігають свою початкову масу при переході в готові окатиші без змін. Проте частка інших речовин коригується відповідно до протікання реакцій декарбонізації, дегідратації та окисно-відновних процесів.

До складників, кількісні показники яких змінюються під впливом температури, відносяться:

- вуглець і сірка — виділяються у вигляді газів внаслідок горіння;

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.03.ВВСОО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3.6

- ППП (втрати при прожарюванні) — виникають через випаровування вологи та дисоціацію карбонатних сполук;
- залізовмісні оксиди (FeO) та (Fe_2O_3) — їхній вміст змінюється через перетворення магнетиту на гематит (окиснення).

Визначення концентрації кожного елемента в обпалених окатишах базується на таких виразах:

$$Fe_{зага(o)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot Fe_{P_{\Sigma}}^0 + \Phi_{\Sigma} \cdot Fe_{\Phi_{\Sigma}}^0 + \Pi_{\Sigma} \cdot Fe_{\Pi_{\Sigma}}^0 + B_{\Sigma} \cdot Fe_{B_{\Sigma}}^0}{G_{a(o)}}, \quad (3.5)$$

$$SiO_{2a(o)} = \frac{P_{\Sigma} \cdot SiO_{2P_{\Sigma}}^0 + \Phi_{\Sigma} \cdot SiO_{2\Phi_{\Sigma}}^0 + \Pi_{\Sigma} \cdot SiO_{2\Pi_{\Sigma}}^0 + B_{\Sigma} \cdot SiO_{2B_{\Sigma}}^0}{G_{a(o)}}, \quad (3.6)$$

де Fe^0, SiO_2^0 — середньозважений вміст елементів і оксидів у відповідній суміші, %.

Під час термообробки окатишів маса оксидів заліза змінюється внаслідок перебігу окислювально-відновних реакцій. Цей показник розраховують як різницю між початковим вмістом оксиду заліза (II) у шихті та його кінцевою концентрацією в готовій продукції. Слід враховувати, що перетворення магнетиту на гематит призводить до приросту маси через поглинання кисню (що позначається знаком «мінус» у розрахунках втрат), тоді як відновлювальні процеси зумовлюють її зниження (позначається знаком «плюс»):

$$G_{FeO} = G_{FeO_{ш}} - G_{FeO_{a(o)}}, \text{ кг/т аглом. (окат.)}, \quad (3.7)$$

де $G_{FeO}, G_{FeO_{ш}}, G_{FeO_{a(o)}}$ — маса FeO , відповідно, що окислюється (відновлюється), в шихті і в агломераті (окатишах), кг/т.

$$G_{FeO} = 1000 \cdot 0,0135 - 280,645 = -267,145 \text{ кг.}$$

За допомогою цього параметра обчислюється маса оксиду заліза (III), що утворюється при завершенні реакцій окиснення закису заліза або магнетиту (фіксується знаком «+»). Якщо ж відбуваються відновні процеси, які призводять до дефіциту вищого оксиду, показник вказується зі знаком «-». Такий підхід

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.03.BBCOO	Аркуш
						3.7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечує точне встановлення підсумкової ваги залізорудної складової в обпалених окатишах.:

$$G_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{G_{\text{FeO}} \cdot 160}{144}. \quad (3.8)$$

$$G_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{267,145 \cdot 160}{144} = 296,828 \text{ кг.}$$

Усі розраховані дані для кожного інгредієнта шихти згруповані та представлені у зведеній таблиці 3.2.

Результати проведених розрахунків заносяться в балансову таблицю 3.2.

Дані щодо хімічного складу обпаленого продукту узагальнено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Оцінка теоретичних фізико-хімічних параметрів готових окатишів

Компоненти	Fe _{заг}	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Вміст, %	64,80	0,002	1,35	91,06	4,30	0,38

продовження табл. 3.3

Компоненти	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	ВПП
Вміст, %	2,45	0,12	0,023	0,004	0,31	-

$$O_{\text{CH}} = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = \frac{2,45 + 0,12}{4,30 + 0,38} = 0,55 \text{ част. од.}$$

Таблиця 3.2 – Теоретичний розрахунок хімічного складу випалених окатишів

Матеріали	Вміст компонентів, %											
	Fe _{заг}		S _{заг}		FeO		Fe ₂ O ₃		SiO ₂		Al ₂ O ₃	
	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
Залізорудний концентрат	67,3	646,828	0,005	0,048	29,2	280,645	63,7	612,228	3,8	36,522	0,2	1,922
Вапняк	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,121	0,2	0,081
Бентоніт	2,17	0,217	0	0	0	0	3,1	0,31	62,5	6,25	18,2	1,82
Всього шихти	63,97	647,045	0,005	0,048	27,75	280,645	60,56	612,538	4,24	42,893	0,38	3,823
Приріст (+) втрати (-) маси				-0,032		-267,145		+296,828				
Окатиші	64,80	647,045	0,002	0,016	1,35	13,5	91,06	909,366	4,30	42,893	0,38	3,823

продовження табл. 3.2

Вміст компонентів, %												Витрата сухих шихтових матеріалів, кг/т
CaO		MgO		P ₂ O ₅		SO ₃		Інші		ВПП		
%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг	
0,2	1,922	0,1	0,961	0,023	0,221	0,012	0,115	0,26	2,499	2,505	24,076	961,112
55,2	22,249	0,4	0,161	0,011	0,005	0	0	0,289	0,117	43,6	17,574	40,307
2,8	0,28	1,2	0,12	0	0	0	0	4,7	0,47	7,5	0,75	10
2,42	24,451	0,12	1,242	0,022	0,226	0,011	0,115	0,305	3,086	4,192	42,400	1011,419
							-0,077				-42,400	
2,45	24,451	0,12	1,242	0,023	0,226	0,004	0,038	0,31	3,086	0	0	998,625

4 ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ СТАДІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ОКАТИШІВ

Прийняття технологічної схеми для виробництва окускованої сировини та її обґрунтування спирається на властивості вихідних складників: їхній мінеральний склад, вологість та дисперсність (розподіл часток за розмірами). Зазначені характеристики є ключовими під час розробки етапів дозування та змішування шихти. Наступні стадії (огрудкування та випал) розраховуються з огляду на стандартизовані проєктні підходи, що ефективно працюють на діючих підприємствах.

Вихідні дані для розрахунку технологічного процесу представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Фізико-технічні параметри та норми витрат сировинних компонентів

Компоненти шихти	Питомі витрати, кг/т окатишів	Вміст води, %	Крупність, мм
Залізорудний концентрат	961,112	10,1	-0,074
Бентонітова глина	40,307	4,2	-80
Вапняк	10	24,6	-80

Під час виконання розрахунків ураховуються також такі вихідні дані:

- вихід повернення після операції просівання сирих окатишів 5%;
- оптимальна вологість шихти в процесі змішування і огрудкування ($W_{\text{сир. ок.}} = 9,0-9,5\%$);
- вихід відсіву (повернення) випалених окатишів – 1%;

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.04.ТРОСВО				
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Борисенко			ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ОСНОВНИХ СТАДІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ОКАТИШІВ		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Ярош						4.1	5
Рецензент							Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.		Ярош							
Затвердив		Бабошко							

- питома витрата постелі – 200 кг/т;
- механічні втрати компонентів шихти в процесі виробництва окускованого матеріалу прийняті на рівні 2,1%.

З метою точного налагодження вагодозуючих пристроїв та забезпечення правильного дозування, обчислюється реальна маса зволжених складників шихти. Базою для розрахунку є отримані показники питомої витрати сухих матеріалів, дані про їхню вологість, а також поправка на механічні втрати, що виникають у процесі переміщення та пересипання сировини:

$$M_{\text{вол.}} = \frac{M_{\text{сух.}} \cdot 10^4}{(100-W)(100-V_{\text{мр.}})}, \quad (4.1)$$

де W – вміст води в матеріалі, %.

$V_{\text{мр.}}$ – механічні втрати компонентів шихти, %.

Реальна маса зволоженого залізородного концентрату: обчислюється як ключовий елемент суміші, що становить основу ваги майбутніх окатишів:

$$M_{\text{з.к.}} = \frac{961,112 \cdot 10^4}{(100-10,1)(100-1,8)} = 1088,7 \text{ кг.}$$

Кількість вологого бентоніту: визначається з огляду на його здатність поглинати вологу та функцію головного зв'язуючого компонента:

$$M_{\text{б.}} = \frac{10 \cdot 10^4}{(100-24,6)(100-1,8)} = 13,5 \text{ кг.}$$

Маса вологого вапняку (флюсу): розраховується для досягнення необхідного показника основності з урахуванням поточного вмісту води:

$$M_{\text{в.}} = \frac{40,307 \cdot 10^4}{(100-4,2)(100-1,8)} = 42,9 \text{ кг.}$$

Вага бентонітової добавки після стадії часткової термічної підготовки до досягнення 12% залишкової вологості. Дана величина відображає стан сировини після завершення першого циклу дегідратації, що є обов'язковою умовою для нормалізації характеристик глини перед її переміщенням та завантаженням у змішувальні агрегати:

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.04.ТРОСВО	Аркуш
						4.2
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\text{б.підс.}} = M_{\text{б.}} - M_{\text{б.}} \cdot (W_{\text{б.}} - W_{\text{б.підс.}})/100. \quad (4.2)$$

$$M_{\text{б.підс.}} = 13,5 - 13,5 \cdot \frac{24,6-12}{100} = 11,8 \text{ кг.}$$

Маса кондиційного бентоніту необхідного помелу з кінцевою вологістю на рівні 4%. Цей параметр вказує на масу сполучного матеріалу, що безпосередньо подається в дозатори. Зниження вологості до 4% у комплексі з диспергуванням гарантує гомогенне поширення добавки в залізорудній масі, а також підвищує її адсорбційну активність у процесі перемішування:

$$M_{\text{б.подр.}} = 11,8 - 11,8 \cdot \frac{12-4}{100} = 10,9 \text{ кг.}$$

Сумарна вага вапняку після технологічних процесів подрібнення та термічної підготовки до показника вологості 2,5%. Визначення маси флюсу з мінімальним вмістом води є обов'язковим для точного регулювання вмісту (СаО) у шихті. Такий підхід запобігає злипанню тонкодисперсних частинок флюсуючого компонента та забезпечує стабільність необхідну основність окатишів:

$$M_{\text{в.подр.}} = M_{\text{в.}} - M_{\text{в.}} \cdot (W_{\text{в.}} - W_{\text{в.подр.}})/100. \quad (4.3)$$

$$M_{\text{в.подр.}} = 42,9 - 42,9 \cdot \frac{4,2-2,5}{100} = 42,2 \text{ кг.}$$

Обсяг сухих рециркуляційних матеріалів (відсіву), визначений на основі розрахункового алгоритму. Дана величина враховує об'єм зруйнованих гранул та дрібних класів, які вилучаються з основного циклу для повторного огрудкування. Цей параметр є ключовим під час оцінки реального циркуляційного навантаження у виробничому ланцюгу:

$$M_{\text{відс.}} = \frac{M_{\text{ок}} \cdot \text{Відсів}}{100}, \quad (4.4)$$

де $M_{\text{ок}}$ – маса випалених окатишів, кг;

Відсів – вихід відсівання, %.

$$M_{\text{відс.}} = \frac{1000 \cdot 1}{100} = 10 \text{ кг.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.04.ТРОСВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		4.3

Сумарна маса шихти з урахуванням сухого відсіву. Дана величина встановлює реальну продуктивність змішувальних агрегатів, оскільки об'єднання первинної сировини із сухим відсівом суттєво коригує загальний матеріальний баланс системи:

$$M_{\text{вих.}} = 1088,7 + 42,2 + 10,9 + 10 = 1151,8 \text{ кг.}$$

Теоретична вологість комплексної суміші. Параметр обчислюється виходячи з пропорцій та вологості кожного шихтового компонента (флюсу, зв'язуючого, концентрату). Це значення є відправною точкою для визначення об'ємів зволоження, необхідних для стабільного гранулювання; розраховується за формулою:

$$W_{\text{сер.}} = W_1 \cdot \frac{M_1}{\sum M_i} + W_2 \cdot \frac{M_2}{\sum M_i} + W_3 \cdot \frac{M_3}{\sum M_i} + \dots + W_i \cdot \frac{M_i}{\sum M_i}, \quad (4.5)$$

де $M_1, M_2, M_3, \dots, M_i$ – маса першого, другого, третього, ..., i - го компонентів суміші, кг;

$\sum M_i$ – сумарна маса всіх компонентів суміші, кг.

$$W_{\text{сер.}} = 10,1 \frac{1088,7}{1151,8} + 2,5 \frac{42,2}{1151,8} + 4 \frac{10,9}{1151,8} + 0 \frac{10}{1151,8} = 9,68 \text{ \%}.$$

Загальне завантаження вузла огрудкування складається з ваги підготовленої шихти та вологого рециклінгу некондиційних гранул. У розрахунку береться до уваги обсяг сирих окатишів, які були вибракувані під час класифікації за розміром або пошкоджені перед надходженням на випалювальний агрегат. Такий підхід забезпечує точність при встановленні потужності огрудковувачів. Підсумковий обсяг матеріалу обчислюється за виразом:

$$M_{\text{ш.огр.}} = M_{\text{вих.}} \left(1 + \frac{B_{\text{с.ок.}}}{100} \right), \quad (4.6)$$

де $B_{\text{с.ок.}}$ – відсоток вологого відсіву, що повертається в процес під час сортування та завантаження сирих окатишів на термообробку.

$$M_{\text{ш.огр.}} = 1151,8 \left(1 + \frac{5}{100} \right) = 1209,4 \text{ кг.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.04.ТРОСВО	Аркуш
						4.4
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сумарний вихід обпаленого матеріалу з випалювальної машини з урахуванням ваги захисного шару (постелі) та продуктів руйнування. Показник обчислюється як сукупна маса товарних окатишів, оборотної постелі, що запобігає перегріву колосників, та дріб'язку, який з'являється через температурні деформації в процесі зміцнення:

$$C_{\text{п}} = 1000 + M_{\text{відс.}} + \text{Пост}, \quad (4.7)$$

де Пост – питома витрата постелі на виробництво окатишів, кг/т.

$$C_{\text{п}} = 1000 + 10 + 200 = 1210 \text{ кг.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.04.ТРОСВО	Аркуш
						4.5
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 РОЗРАХУНОК НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ

5.1 Обчислення погодинної продуктивності лінії з виробництва окатишів

Даний розрахунок необхідний для встановлення реальної пропускної здатності комплексу (т/год). Отримане значення слугує ключовим параметром для розрахунку параметрів змішувальних установок, транспортних ліній та обладнання для термічного зміцнення окатишів:

$$P_o = \frac{G}{\eta \cdot 365 \cdot 24}, \quad (5.1)$$

де G – річне виробництво окатишів, т/рік;

P_o – годинне виробництво окатишів цехом, т/год.;

η – коефіцієнт використання обладнання – відношення робочого часу до календарного, част.од. (приймаємо 0,85);

365 – календарна кількість днів в рік;

24 – кількість годин в добі.

$$P_o = \frac{4000000}{0,85 \cdot 365 \cdot 24} = 537,20 \text{ т/год.}$$

5.2 Обчислення погодинних витрат сировини для підготовки шихти

В основу розрахунків покладено питомі норми використання вологих шихтових матеріалів (на 1 т готового продукту), визначених в попередньому розділі. Це дає змогу визначити параметри масового навантаження за вологим концентратом, флюсом та бентонітом, що необхідні для стабільного функціонування виробничого циклу.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.05.РНКВО			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Борисенко				РОЗРАХУНОК НЕОБХІДНОЇ КІЛЬКОСТІ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Ярош						5.1	9
Рецензент						Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко							

$$P_{з.к.} = P_o \cdot X_{з.к.}, \quad (5.2)$$

де $P_{з.к.}$ — годинна потреба в компоненті шихти (наприклад, залізорудний концентрат), т/год.;

$X_{з.к.}$ — питома витрата компонента шихти, т/т агл. (окат.).

$$P_{з.к.} = 537,20 \cdot 1,0887 = 584,85 \text{ т/год.}$$

$$P_{в.} = 537,20 \cdot 0,0429 = 23,05 \text{ т/год.}$$

$$P_{б.} = 537,20 \cdot 0,0135 = 7,25 \text{ т/год.}$$

5.3 Розрахунок необхідної місткості та числа бункерів для шихтових матеріалів

Число накопичувальних місткостей розраховується з огляду на максимально можливу витрату певної сировини за годину та обов'язкового резерву. Наявність такого запасу дозволяє нівелювати ризики, пов'язані з нестабільним надходженням матеріалів на підприємство:

$$n_{з.к.} = \frac{P_{з.к.} \cdot \tau}{\gamma \cdot V_б \cdot 0,85}, \quad (5.3)$$

де $P_{з.к.}$ — погодинна потреба в компоненті шихти, т/год;

τ — прийнятий нормативний запас компонента шихти в бункерах (4-10 год), год;

$V_б$ — об'єм стандартних бункерів (100, 130, 200), м³;

0,85 — ступінь заповнення бункерів, част.од.;

γ — насипна маса компонента шихти, т/м³.

Методологія обчислень:

Розрахований показник кількості ємностей підлягає округленню до більшого цілого значення. Враховуючи вимоги щодо автономного функціонування двох паралельних ліній, підсумкове число бункерів має бути кратним двом (парним).

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.05.РНКВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5.2

$$n_{з.к.} = \frac{584,85 \cdot 8}{2,23 \cdot 200 \cdot 0,85} = 12,3.$$

$$n_{в.} = \frac{23,05 \cdot 8}{0,98 \cdot 200 \cdot 0,85} = 1,1.$$

$$n_{б.} = \frac{7,25 \cdot 8}{0,93 \cdot 200 \cdot 0,85} = 0,4.$$

Прийнята кількість бункерів для шихтових матеріалів:

- залізорудний концентрат – 14 бункерів;
- вапняк – 2 бункери;
- бентонітова глина – 2 бункери.

5.4 Розрахунок обладнання для дроблення і змелення шихтових матеріалів

Доведення шихти до необхідної дисперсності реалізується через використання дробильних установок та кульових млинів вентильованого типу. Обов'язковим елементом схеми є сушильний агрегат барабанного типу, що забезпечує сушку бентоніту з початкових 25-30 % до технологічно необхідної вологості на рівні 12-15 %.

Комплектація дільниці шихтопідготовки залежить від фізико-технічних властивостей матеріалів:

- великофракційні добавки (флюс, паливо): для подрібнення частинок понад 10 мм залучають молоткові дробарки ДМРИЭ-1450×1300 (продуктивність – 250 т/год);
- вологий бентоніт: підлягає обробці в самоочисних агрегатах СМД-102. Їхня пропускна здатність сягає 150-500 т/год при отриманні продукту крупністю 0-30 мм;
- змелення: здійснюється в кульових млинах ШБМ-370/850, що забезпечують вихід 40-50 т підготовленого матеріалу за годину.

Кількість дробарок і млинів розраховується за формулою:

$$n = \frac{P_{в.}}{q}, \quad (5.4)$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.05.РНКВО	Аркуш
						5.3
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n = \frac{P_{б.}}{q}, \quad (5.5)$$

де $P_{в.}$, $P_{б.}$ – годинна потреба у, відповідно, вапняку та бентоніту, т/год;

q – продуктивність дробарки або млина, т/год.

Результати математичних обчислень щодо необхідної кількості дробильного та розмелювального устаткування підлягають округленню до найближчого більшого цілого числа. Для забезпечення стабільності технологічного процесу та зниження ризиків зупинки лінії, до отриманого значення додається одиниця резервного обладнання. Такий підхід дозволяє проводити планово-попереджувальні ремонти, технічне обслуговування або оперативну заміну зношених футерувальних елементів і молотків без зниження загальної потужності дільниці підготовки шихти. Наявність резерву гарантує безперервність циклу огрудкування навіть у разі аварійного виходу з ладу одного з агрегатів.

$$n_{др.в.} = \frac{23,05}{250} = 0,09.$$

$$n_{др.б.} = \frac{7,25}{150} = 0,05.$$

$$n_{мл.ф.} = \frac{23,05}{50} = 0,46.$$

$$n_{мл.б.} = \frac{7,25}{50} = 0,15.$$

Згідно з обраною методикою розрахунку та необхідністю створення експлуатаційного резерву, до встановлення на дільниці підготовки шихти прийнято таку кількість агрегатів:

- дробильне устаткування для вапняку: 2 молоткові дробарки;
- дробильне устаткування для бентоніту: 2 молоткові дробарки;
- розмельне обладнання для вапняку: 2 кульові млини;
- розмельне обладнання для бентоніту: 2 кульові млини.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.05.РНКВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5.4

5.5 Технічне обґрунтування та вибір агрегатів для термозміцнення окатишів

Ключовим технологічним вузлом для надання міцності сирим окатишам є випалювальна машина конвеєрного типу. Вибір моделі та чисельності цих агрегатів у межах цеху з виробництва окатишів базується на планових обсягах річного випуску та питомій годинній продуктивності технологічного обладнання. Згідно з проєктними нормами, рекомендована кількість машин в одному виробничому корпусі варіюється в межах 2-10 штук.

Існує пряма залежність між продуктивністю випалювального обладнання та кількістю використовуваних шихтових компонентів, особливо щодо частки палива та флюсуючих добавок. Розрахунки свідчать, що збільшення витрати флюсу на кожні 10 кг/т спричиняє падіння потужності агрегату на 0,83% (або на 0,0079 т/м²·год).

Використовуючи скориговане значення питомої продуктивності, обчислюють сумарну площу, необхідну для процесу обпалювання, за такою формулою:

$$S_{\Sigma} = \frac{P_o}{q}, \text{ м}^2, \quad (5.6)$$

де P_o – годинне виробництво окатишів цехом, т/год;

q – питома продуктивність випалювальної машини, т/м²·год.

Ефективність роботи випалювального агрегату зумовлена фізико-хімічною природою шихтових складників, насамперед рівнем їхнього офлюсування. Відповідно до проведених обчислень, при дозуванні вапняку в кількості 42,9 кг/т готового продукту, питома продуктивність агрегату для термічної обробки окатишів становитиме $q = 0,9171$ т/м²·год.

Така продуктивність пояснюється специфікою впливу карбонатних добавок на термічні процеси та швидкість формування міцної структури окатишів. Встановлена величина питомої потужності слугує фундаментом для

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.05.РНКВО	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5.5

вибору моделі випалювального обладнання (зокрема агрегатів типу ОК) та розрахунку необхідної площі випалу.

Необхідна площа для термічної обробки сирих окатишів:

$$S_{\Sigma} = \frac{537,20}{0,9171} = 585,8 \text{ м}^2.$$

Для реалізації процесу термічного зміцнення вологих гранул прийнято до встановлення випалювальні установки конвеєрного типу з корисною площею випалу 306 м².

Розрахунок необхідної чисельності цих агрегатів виконується з використанням формули:

$$N_o = \frac{S_{\Sigma}}{S_m}, \quad (5.7)$$

де N_o – кількість машин;

S_m – корисна площа обраної машини, м².

Отримане числове значення потреби у випалювальних установках коригується до більшого цілого. Слід зауважити, що на цій ділянці проектування резервних одиниць обладнання не планується.

$$N_o = \frac{585,8}{306} = 1,9.$$

Згідно з обчисленнями, для виконання плану випуску проектом передбачено 2 випалювальні агрегати.

Далі робиться розрахунок годинної продуктивності агрегату для термозміцнення окатишів:

$$P_m = S_m \cdot q, \text{ т/год.}, \quad (5.8)$$

$$P_m = 306 \cdot 0,9171 = 280,6 \text{ т/год.}$$

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.05.РНКВО	Аркуш
						5.6
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.6 Обчислення потреби в обладнанні для формування гранул

З метою отримання сирих окатишів у проєкті передбачено використання тарілчастих грануляторів із діаметром чаші 7,5 м. Експлуатаційна потужність такого агрегату за кондиційною фракцією (розміром 8-18 мм) варіюється в межах 100-120 т/год.

Чисельність одиниць устаткування на цій ділянці розраховується наступним чином:

$$n_{\text{огр.}} = \frac{P_{\text{м}}}{K \cdot P_{\text{огр}}}, \text{ шт.} \quad (5.9)$$

де $P_{\text{м}}$ – годинна продуктивність машини для термообробки окатишів, т/год;

K – коефіцієнт виходу 1 т окатишів з вологої шихти (визначається з балансової таблиці), ч.од.;

$P_{\text{огр}}$ – годинна продуктивність огрудкувача, т/год.

Стабільне функціонування кожної випалювальної установки гарантується завдяки врахуванню таких аспектів:

1. Баланс матеріалів. Для виготовлення 998,625 кг обпалених окатишів необхідно переробити 1151,8 кг зволоженої шихти. Показник питомого виходу на одиницю продукції встановлюється як частка від ділення маси виготовлених окатишів на вагу вихідної суміші:

$$K = \frac{998,625}{1151,8} = 0,87.$$

$$n_{\text{огр.}} = \frac{280,6}{0,87 \cdot 120} = 2,7.$$

2. Забезпечення резерву. Математично визначена кількість огрудкувачів округлюється до більшого цілого. Додатково проєктом закладено один запасний агрегат на кожну лінію для проведення профілактичних робіт без зупинки виробництва.

Відповідно до обчислень, кожна технологічна гілка укомплектовується 4 огрудкувачами.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.05.РНКВО	Аркуш
						5.7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Загальна кількість огрудкувачів:

$$n_{\Sigma \text{огр.}} = N_o \cdot n_{\text{огр.}}, \quad (5.10)$$

де $n_{\Sigma \text{огр.}}$ – кількість огрудкувачів цеху, шт.;

N_o – кількість комбінованих установок, шт.;

$n_{\text{огр.}}$ – кількість огрудкувачів на одній машині, шт.

$$n_{\Sigma \text{огр.}} = 2 \cdot 4 = 8 \text{ шт.}$$

5.7 Загальна характеристика роботи запроєктованого підприємства з виготовлення окатишів

Таблиця 5.1 – Результуюча специфікація витрат основної сировини та компонентів суміші

Компоненти шихти	Питома витрата кг/т окатишів	Годинна витрата, т/год.	Добова витрата т/добу	Річна витрата, т/рік
Залізорудний концентрат	1088,7	584,85	14036,4	4354793,1
Бентоніт	42,9	23,05	553,2	171630,3
Вапняк	13,5	7,25	174,0	53983,5
Разом	1145,1	615,15	14763,6	4580406,9

Таблиця 5.2 – Виробництво готової продукції

Продукція	Годинне виробництво, т/год.	Добове виробництво, т/добу	Річне виробництво, т/рік
Окатиші	537,20	12892,8	4000000

Таблиця 5.3 – Основне технологічне обладнання

Найменування обладнання	Кількість, шт.	Тип	Продуктивність, т/год.
Витратні бункери концентрату	14	200 м ³	-
Витратні бункери бентоніту	2	200 м ³	-
Витратні бункери вапняку	2	200 м ³	-
Молоткові дробарки для флюсів	2	ДМРИЭ-1450×1300	250
Молоткові дробарки для бентоніту	2	СМД-102	150
Кульові вентильовані млини	4	ШБМ-3700/850	50
Огрудкувачі	128	Чашові Ø 7,5 м	120
Випалювальні машини	2	306 м ²	-

Таблиця 5.4 – Якісні фізико-хімічні характеристики обпалених окатишів

Компоненти	Fe _{заг}	S _{заг}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Вміст, %	64,80	0,002	1,35	91,06	4,30	0,38

продовження табл. 5.4

Компоненти	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	Інші	ВПП
Вміст, %	2,45	0,12	0,023	0,004	0,31	0

ВИСНОВКИ

1. Доведено, що застосування технології зародкоутворення з наступним дооградкуванням дозволяє ефективно керувати фізико-механічними характеристиками окатишів шляхом розділення процесу на стадії швидкого формоутворення зародків та поступового формування оболонки в режимі перекочування.

2. Встановлено, що перехід від високих швидкостей росту маси зародків (понад 3,0 г/с) до стабілізованого дооградкування (зі швидкістю 0,11 г/с) забезпечує раціональний розподіл вологи та пористості за перерізом окатиша.

3. Рекомендовано комбіновану схему отримання окатишів за технологією ЗНД на основі формування напиленого шару поодиноким повітряно-шихтовим струменем, що дозволяє використовувати зміцнювальні добавки. Напилення матеріалу в цій схемі організовують на попередньо профільований шихтовий гарнісаж, а поділ напиленого шару на зародки виконують конічним барабаном, оснащеним металевою струною.

4. Реалізація комбінованої схеми з використанням теплосилового напилення дозволяє отримати зародки достатньої міцності при виході цільової фракції 12–16 мм на рівні 72%.

5. Завдяки формуванню зародкової частини з високою часткою відкритих пор та зниженню загальної вологості отримані окатиші потребують менших енерговитрат на наступну термічну обробку, що підвищує загальну економічну ефективність виробництва.

6. Запропонована конструкція є надійною й універсальною, що дозволяє рекомендувати її до впровадження на діючих чашових оградкувачах. Технічні показники нової технології виробництва окатишів та фізичні параметри вологих окатишів дозволяють підвищити металургійні властивості окускованої сировини.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.В						
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата							
Розробив		Борисенко			ВИСНОВКИ			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевірив		Ярош								1	1
Рецензент								Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1			
Н. контр.		Ярош									
Затвердив		Бабошко									

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 136 «Металургія» усіх форм навчання / С.Г. Савельєв, Л.Н. Саїтгарєєв, В.А. Чубенко, Т.П. Ярош, І.Е. Скідін, А.А. Хіноцька. – Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2022. – 32 с.

2. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Теорія і технологія процесів окускування» / уклад. С.Г. Савельєв, О.В. Бабаєвська. Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2023. 52 с.

3. <http://www.nbuv.gov.ua> (Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського).

4. Смирнов В.О., Білецький В.С. Фізичні та хімічні основи виробництва: навчальний посібник. Донецьк: Східний видавничий дім, 2005. 148 с.

5. Збожна О.М. Основи технології: навчальний посібник. Тернопіль: Картбланш. 2002. 486 с.

6. Бережний М.М., Мовчан В.П. Збагачення та окускування сировини: монографія. Кривий Ріг: ЦГЗК, 2000. 368 с.

7. Сировинні матеріали та їх підготовка до металургійних процесів: навчальний посібник / за ред. доктора технічних наук, професора І.Ф. Червоного. Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2013. 408 с.

8. Лютий Р.В., Гурія І.М. Формувальні матеріали: підручник для студ. спеціальності 136 «Металургія». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 258 с.

9. Лялюк В.П., Ляхова І.А., Касімов О.М. Теорія і технологія підготовки металургійної шихти до плавки: навчальний посібник. Кривий Ріг: КНУ, 2015. 340 с.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.Л			
Вим.	Аркуш	№ докум.	Підпис	Дата	ЛІТЕРАТУРА	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розробив	Борисенко						1	3
Перевірив	Ярош							
Рецензент								
Н. контр.	Ярош							
Затвердив	Бабошко					Кафедра МЧМЛВ гр. ЗМТ-22-1		

10. Охотський В.В., Костюлов О.Л., Симонов В.К. Теорія металургійних процесів: підручник. Київ: ІЗМН, 1997. 512 с.

11. Воденніков С.А., Тарасов В.К., Воденнікова О.С. Конструкція агрегатів чорної металургії: навчально-методичний посібник. Запоріжжя: Видавництво Запорізької державної інженерної академії, 2012. 192 с.

12. Шихта для виробництва залізорудних окатишів: пат. 104523 Україна: МПК C22B 1/14, C22B 1/244. № u201507612; заявл. 30.07.2015; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 3. 5 с.

13. Pavlovets V.M. Study of thermal power modes of wet charge spraying intended for induced nucleation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009;52(6):9–13.

14. Iwase K., Higuchi T., Yamamoto T., Murakami T. Design for carbon core pellet toward co-production with sinter. *Tetsu-to-Hagane*. 2021;107(6):483–493.

15. Kieush L., Boyko M., Koveria A., Yaholnyk M., Poliakova N. Production of iron ore pellets by utilization of sunflower husks. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2021;27(4):167–171.

16. Okeke S.I., Onukwuli O.D. Effect of basicity on metallurgical properties of pellets produced from Itakpe iron ore concentrates. *Discovery and Innovation*. 1999;11(3):170–176.

17. Frantes K. North American iron mines running flat out to meet domestic and worldwide demand. *Skilling's Mining Review*. 2005;94(7):6–21.

18. Basics in Mineral Processing. Metso: Outotec, 2015:752.

19. Goejen J.G., Miller R.A., Brindley W.J., Leissler G.W. A simulation technique for predicting defects of thermal sprayed coatings: NASA Technical Memorandum TM-106939, 1995.

20. Hansbo A., Nylén P. Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects. *Surface and Coatings Technology*. 1999;122(3-4):191–201.

21. Walker W.J., Reed J.S., Verma S.K. Influence of slurry parameters on the characteristics of spray-dried granules. *Journal of the American Ceramic Society*. 1999;82(7):1711–1719.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.Л	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

22. Ensz M.T., Griffith M.L., Reckaway D.E. Critical issues for functionally graded material deposition by laser engineered net shaping.

23. De Los Santos Valladares L., Domínguez A.B., Félix L.L., Kargin J.B., Mukhambetov D.G., Kozlovskiy A.L., Moreno N.O., Santibañez J.F., Cabrera R.C., Barnes C.H.W. Characterization and magnetic properties of hollow α -Fe₂O₃ microspheres obtained by sol gel and spray roasting methods. Journal of Science: Advanced Materials and Devices. 2019;4(3):483–491.

24. Chen C., Planche M.-P., Deng S., Huang R., Ren Z., Liao H. Strengthened peening effect on metallurgical bonding formation in cold spray additive manufacturing. Journal of Thermal Spray Technology. 2019;28:769–779.

25. Assadi H., Gartner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold gas spraying. Acta Materialia. 2003;51(15):4379–4394.

26. Dorfman M. Thermal spray materials. AM&P Technical Articles. 2002;160:49–51.

27. Kasparova M., Houdkova S., Cubrova J. Thermally sprayed coatings for high temperature application. In: Proceedings of the 21st Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 23–25.05.2012. 2012:144–146.

					КНУ.РБ.136.26.114с-01.Л	Аркуш
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3