Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
( назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри )

# Кваліфікаційна робота бакалавра

рівень вищої освіти__перший (бакалаврський) рівень_____

на тему__Оцінка впливу характеристик агломерату на процес доменної плавки__

Виконав: студент _4_курсу, гр. *6.1363-м-з*
___Рейтер Наталя Сергіївна
(ПІБ) (підпис)
спеціальності
____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)
спеціалізація
_____
(шифр і назва)
освітньо-професійна програма
*Металургія*__
(шифр і назва)

Керівник _Скачков В.О.
(прізвище та ініціали) (підпис)
Рецензент Нестеренко Т.М.
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2026 року

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**
**ім. Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський) рівень*

Спеціальність *136 металургія*
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма *металургія*
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
**Завідувач кафедри *МТЕТБ***
***Ю.О. Бєлоконь***

"____" _____2025 року

# З А В Д А Н Н Я
## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Рейтер Наталі Сергіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта) Оцінка впливу характеристик агломерату на процес доменної плавки
керівник роботи (проєкту) *Скачков В.О., д-р техн.. наук, проф*
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "23" грудня 2025 року № 1831-с
2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *18.05.2026 р.*
3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *науково-технічна література, періодичні видання за фахом, патентний пошук.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)*: .1 Основи доменного процесу. 1.3 Особливості агломераційного процесу. 1.4 Промислове виробництво агломерату. 1.5 Конкурентні методи огрудкування. 2.1 Процеси спікання агломерату. 2.2 Розподіл мінералогічного складу по висоті зразка проби агломерату. 2.3 Вплив температури спікання на мінералогічний склад і металургійні властивості агломерату. 3 Вплив фракційного складу на газопроникність агломераційної шихти. 3.1 Вплив завантаження шихти на газопроникність. Ефективність впливу сортування агломерату на продуктивність домни. 4. Аналіз факторів виробничого і трудового процесу.*

5 *Презентаційний матеріал 11 слайдах (на 11 сторінках)*

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата завдання прийняв |
|---|---|---|
| *1. Аналіз формування доменної шихти та доменного процесу* | *Скачков В.О., професор кафедри* | |
| *2. Вивчення особливостей структурно-хімічного складу агломерату* | *Скачков В.О., професор кафедри* | |
| *3. Практичне застосування сортованого агломерату на металургійних комбінатах* | *Скачков В.О., професор кафедри* | |
| *4 Охорона праці та техногенна безпека* | *Скачков В.О., професор кафедри* | |
| *Нормоконтроль* | *Бєлоконь Ю.О., завідувач кафедри* | |

7. Дата видачі завдання: *01.03.2025 р.*

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| *1* | *Аналіз формування доменної шихти та доменного процесу* | | |
| *2* | *Вивчення особливостей структурно-хімічного складу агломерату* | | |
| *3* | *Практичне застосування сортованого агломерату на металургійних комбінатах* | | |
| *4* | *Охорона праці та техногенна безпека* | | |

**Студент** *Н.С. Рейтер*
( підпис ) (прізвище та ініціали)

**Керівник проекту (роботи)** *В.О. Скачков*
( підпис ) (прізвище та ініціали)

# РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи: 80 с., 4 частини, 9 рисунків, 15 таблиць, 15 посилань.

ТИТАН, ХЛОР, ХЛОРАТОР, ТИТАНОВИЙ ШЛАК, ДІЛЬНИЦЯ ХЛОРУВАННЯ, ПАРОГАЗОВА СУМІШ.

В роботі проведений аналіз формування доменної шихти та доменного процесу. Показано, що для конкретних умов роботи печі (якість і газопроникність шихти, її розподіл по перетину та колу печі, стан профілю, кількість і склад дуття, шлаковий режим та ін.) існує оптимальний розподіл газів по перетину печі.

Вивчені особливості структурно-хімічного складу агломерату, механізми процесу спікання агломерату. Встановлено раціональні температурно-часові режими та газодинамічні механізми проведення спікання. Визначено особливості механізмів спікання та умови рівномірного розподілу хімічного складу за висотою пирога. Встановлено вплив температури на формування властивостей агломерату та режими доменного процесу.

У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» розроблено методи охорони праці, промислової санітарії та протипожежної безпеки. Розроблений комплекс заходів щодо підвищення безпеки праці та використання індивідуальні засоби захисту.

# ЗМІСТ

ВСТУП 6
1. АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ДОМЕННОЇ ШИХТИ ТА ДОМЕННОГО ПРОЦЕСУ 7
1.1 Основи доменного процесу 7
1.2 Історія відкриття процесу агломерації 10
1.3 Особливості агломераційного процесу 11
1.4 Промислове виробництво агломерату 14
1.5 Конкурентні методи огрудкування 17
1.6 Основні процеси доменної плавки 18
2 ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРНО-ХІМІЧНОГО СКЛАДУ АГЛОМЕРАТУ 31
2.1 Процеси спікання агломерату 31
2.2 Розподіл мінералогічного складу по висоті зразка проби агломерату 36
2.3 Вплив температури спікання на мінералогічний склад і металургійні властивості агломерату 45
2.4 Вплив фракційного складу шихти на ефективність роботи домни 51
3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СОРТОВАНОГО АГЛОМЕРАТУ НА МЕТАЛУРГІЙНИХ КОМБІНАТАХ 57
3.1 Досвід застосування сортового агломерату 57
3.2 Якість сортованого агломерату 60
3.3 Вплив основності на якість агломерату 62
3.4 Відпрацювання фракційного складу агломерату 63
3.5 Вплив фракційного складу на газопроникність агломераційної шихти 65
3.6 Вплив завантаження шихти на газопроникність 67
3.7 Ефективність впливу сотрированного агломерату на продуктивність домни 68
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 70
4.1 Небезпечні та шкідливі фактори у виробничому середовищі 70
4.2 Аналіз факторів виробничого і трудового процесу 72
4.3 Організаційно-технічні рішення щодо виробничої санітарії 73
4.4 Опалення і вентиляція 74
4.5 Санітарно – побутові приміщення 75
4.6 Комплекс заходів щодо підвищення безпеки праці 75
4.7 Індивідуальні засоби захисту 77
ВИСНОВКИ 78
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 79

# ВСТУП

Агломераційний процес є важливою процедурою в підготовці рудної сировини до плавки і є невід'ємною частиною металургійного виробництва, яка забезпечує підвищення ефективності роботи доменних печей [1].

Підвищення ефективності виробництва чавуну передбачає значне поліпшення якості доменної сировини – агломерату і залізорудних окатишів. У цьому випадку перед технологами стоїть найважливіше завдання - збільшення якості і продуктивності діючих агрегатів шляхом інтенсифікації процесу огрудкування і вдосконалення промислового обладнання.

Агломерат хорошої якості має високу міцність, містить мінімальну кількість дрібних фракцій, мало руйнується під час відновлення в доменній печі, володіє високою температурою початку розм'якшення і коротким інтервалом температури розм'якшення [2].

Крім того, ретельна підготовка рудної сировини до доменної плавки значно підвищує продуктивність доменної печі, скорочує витрату палива і підвищує якість доменного чавуну.

Агломерат складається з фракцій різної крупності. Забезпечення доброї газопроникності шихти передбачає її високу однорідність за розмірами шматків. Досвід використання шихтових матеріалів показав, що діаметр найбільш великих шматків не повинен перевищувати діаметр найбільш дрібних шматків більш ніж у два рази [1].

Максимальне значення техніко – економічних показників для великих доменних печей в значній мірі залежать від точності виконання встановлених вимог: грудкуватості і міцності шихтових матеріалів, що забезпечують газопроникність доменної шихти. Міцність агломерату повинна забезпечувати стабільність фракційного складу на шляху від аглофабрики до колошника доменної печі та по робочій висоті печі [3].

# 1. АНАЛІЗ ФОРМУВАННЯ ДОМЕННОЇ ШИХТИ ТА ДОМЕННОГО ПРОЦЕСУ

## 1.1 Основи доменного процесу

Доменний процес виробництва чавуну складається з наступних технологічних переделів. Концентрат у вигляді збагаченої руди і флюсові направляється на фабрику для виготовлення агломерату або окатишів. У доменний цех поставляється відсіяний агломерат, кокс та допоміжний флюс. Підготовлена шихта з агломерату, флюсу та обробленого коксу завантажується в доменну піч.

Нагріте до температури 1100-1350 °С повітря подається для продування в піч. Для підвищення ефективності продування одночасно з повітрям можлива подача технологічного кисню, який витягується з повітря в спеціальних установках. З метою економії коксу в домну вводитиметься додаткове паливо та відновники у вигляді природного газу та мазуту.

Основним флюсом доменної плавки є вапняк ($CaCO_3$), який у результаті хімічних реакцій утворює оксид кальцію. Застосування флюсу обумовлено тім, що після відновлення оксидів заліза печі залишається тугоплавка порожня порода. Додавання флюсові значно знижує температуру плавлення порожньої породи та інтенсифікує процес шлакоутворення.

У процесі доменної плавки виходить рідкий чавун, шлак та колошниковий газ. У доменних печах виплавляють чавун, що йде на виробництво сталі, ливарний чавун, що використовується для виробництва литих виробів і феросплави, які використовуються в процесах виробництва сталі.

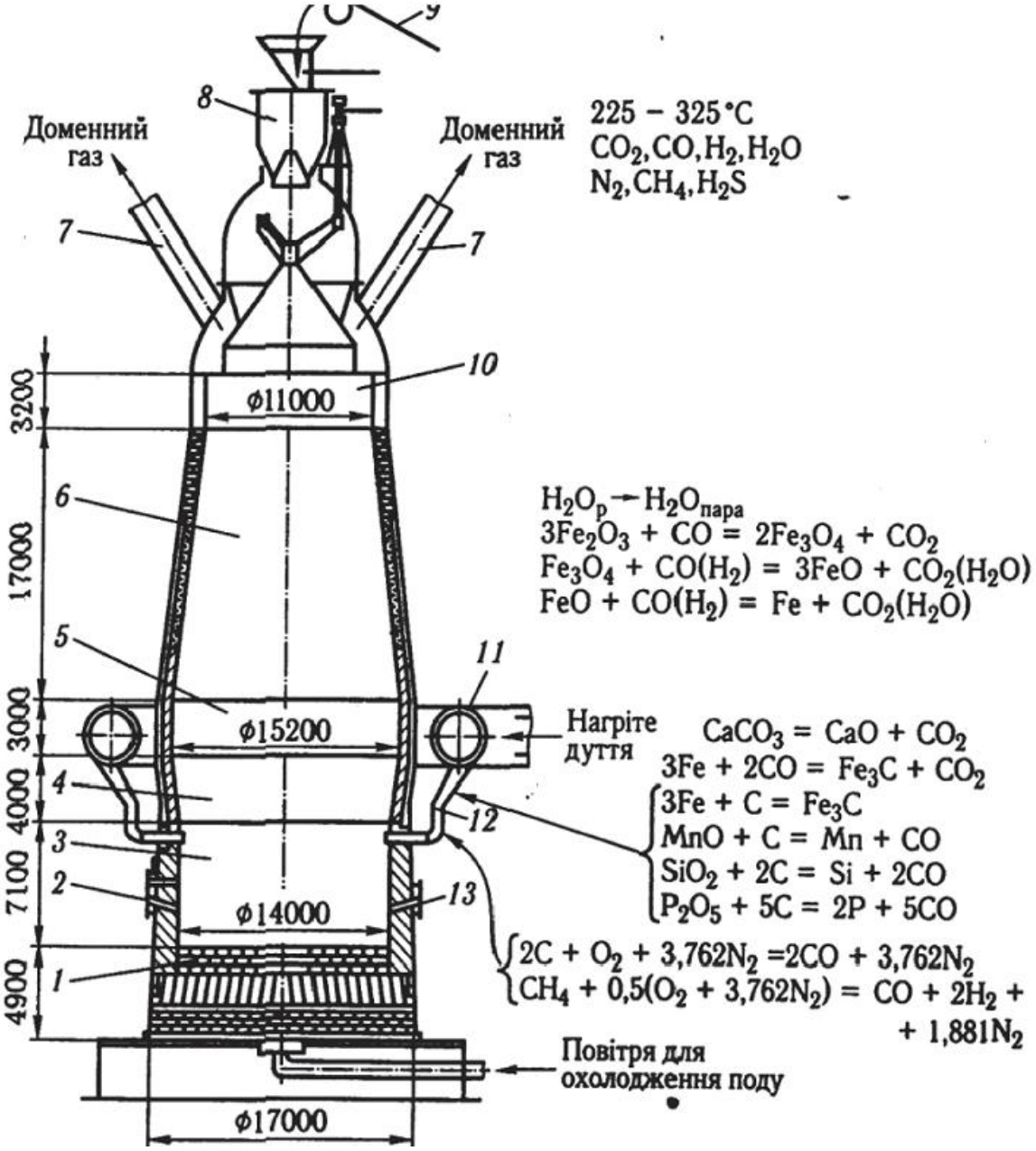
Доменний колошниковий газ містить до 20% оксиду вуглецю (CO), 5-6 % водню, близько 0,5 % метану та має теплотворну здатність до 900 ккал/м$^3$. Цей газ використовується в основному для підігріву повітря, що подається

через фурмі в піч. Газ, що використовується для продування, обов'язково очищається від пилу.

Склад доменних шлаків складається головним чином $CaO$, $SiO_2$, $Al_2O_3$, $MgO$. Ці шлаки часто використовують для виробництва шлакового цементу, бетону та штучного каміння. Іноді в шлаках містяться цінні домішки, які потрапляють з них із рудної сировини. Повітря з підвищеною концентрацією кисню можна подавати в піч без обігріву. У зв'язку з цим рекуператори для підігріву повітря не використовуються.

Використання кисневого продування значно підвищує продуктивність домни та підвищує якість побічних продуктів – газів та шлаку. Доменний газ, що має високу калорійність за рахунок газифікації коксу, стає придатним для подальшого каталітичного синтезу. Таким чином, домна виконує роль комплексного агрегату, який одночасно виробляє напівпродукти для металургійної, хімічної та будівельної промисловості.

Загальна схема доменної печі та основні фізико-хімічні процеси представлені на рисунку 1.1.




1 – под печі; 2 – льотка для чавуну; 3 – горн; 4 – заплічники; 5 – розпар; 6 – шахта; 7 – газоходи; 8 – пристрій для завантаження шихти у піч; 9 – конвеєр; 10 - колошник; 11 – повітропровід; 12 - фурмовий пристрій; 13 – льотка для виведення шлаку

Рисунок 1.1 - Перетин доменної печі об'ємом 3000 м$^3$ і процеси, що відбуваються в ній

## 1.2 Історія відкриття процесу агломерації

Агломерація як процес огрудкування був відкритий випадково в 1887 році англійськими дослідниками Ф. Геберлейном і Т. Хатингтоном при проведенні дослідів з десульфуруючого випалу руд кольорових металів. В процесі дослідів на колосникові ґрати насипали шар палаючих шматків коксу на який потім укладали сульфідну руду. Знизу через колосники подавали повітря. Повітря, проходячи через шар палива, забезпечував його інтенсивне горіння. Продукти горіння нагрівали розташований вище шар руди. При нагріванні до температури 400-500 °С відбувалося займання сульфідів. В результаті горіння сульфідів виділялося значна кількість тепла, яке переносилося в шар руди, розташований вище. В цьому випадку зона горіння сульфідів переміщувалася у напрямку всього шару руди, розташованого на решітці. Випал руди здійснювався за рахунок тепла, виокремлювався при горінні сульфідів. Шматки розпеченого коксу, розташовані спочатку на колосникових гратах, служили тільки для займання нижнього шару сульфідів руди. Після закінчення процесу шар руди перетворювався в тверду пористу масу - спек. Шматки роздробленого спека (агломерату) за своїми фізико-хімічними властивостями виявилися цілком придатними для шахтної плавки.

Першою промисловою установкою виробництва агломерату став котел Геберлейна у вигляді конічної сталевий чаші, в якій на деякій відстані від днища була закріплена колосникові грати, а в днище був патрубок для підведення дуття від повітродувки. Процес відрізнявся тим, що джерелом тепла служили гарячі частинки вугілля або коксу, які забезпечували розм'якшення і часткове плавлення рудних зерен. Знаходиться на колосникових гратах шар з шматків розпеченого твердого палива засипали тонким шаром агломераційної шихти у вигляді суміші вологої дрібної руди з частинками коксу. Після цього включали дуття, і підігрітий в шарі палаючого палива на колосникових гратах газ піднімався вгору, запалюючи і спалюючи міститься в шихті паливо в нижньому шарі спікається матеріалу. Коли зона

горіння доходила до поверхні, завантажувався наступний шар шихти. Таким чином процес продовжувався до тих пір, поки вся чаша не заповнювалася готовим агломератом. Після завершення процесу вимикали вентилятор, перекидали котел і вручну розбивали отриману брилу агломерату на більш дрібні шматки.

Протягом 1990-х років значно збільшилися розміри агломераційних машин. Робоча площа спікання збільшилася вище 600 м$^2$, добова продуктивність зросла до 15000 - 18000 т агломерату. Збільшилися функціональні властивості сталей, з яких виготовляються різні деталі агломераційних машин, при цьому принципове пристрій машин залишилося без зміни.

### 1.3 Особливості агломераційного процесу

Агломерація залізорудного концентрату є останньою операцією по підготовці залізних руд до доменній плавці. Основне завдання цієї операції полягає в перетворенні дрібних шматків рудного концентрату в більш великі шматки (агломерат), використання якого під час доменної плавки забезпечує формування шару шихти з хорошою газопроникність. Цей факт є невід'ємною умовою високопродуктивної роботи доменної печі. Високо інтенсивна доменна плавка можлива тільки при великій кількості згорає в горні доменної печі коксу. При цьому виділяється велика кількість тепла і веде до утворення в нижній частині печі вільного простору, яке опускається стовп доменної шихти. Хороша газопроникність шихти потрібна для вільного видалення великого об'єму що утворюються при горінні коксу газів, які проходять через між шматкові канали шару шихти при відносно невеликих перепадах тиску газу між гірському і колошником [8].

Типова шихта для виробництва залізорудного агломерату, складається з наступних компонентів:

- дрібний залізорудний матеріал - концентрат;

- подрібнене паливо кокс (0-3 мм) у кількості 4-6 %;

- подрібнений вапняк(0-3 мм), вміст до 8-10 %;

- некондиційний агломерат від попереднього спікання ( 0-8 мм), вміст 25-30 %;

- залізовмісні добавки — колошниковий пил доменних печей, окалина прокатних цехів, піритні недогарки сірчанокислотного виробництва та ін. (0-3 мм), вміст до 5 %.

Вивішені в заданому співвідношенні компоненти шихти перемішують, зволожують і після огрудкування без ущільнення завантажують на колосникові ґрати шаром 300-400 мм. Після завантаження включають нагнітальний вентилятор, що працює на відсмоктування. Під колосникових гратами створюється розрідження, завдяки якому в шар засмоктується потік гарячих горнових газів, що забезпечують підпалив шихти і відбувається нагрівання поверхневого шару до 1200 °С. Вступник під час процесу атмосферне повітря забезпечує інтенсивне горіння частинок коксу шихти. В зоні максимальних температур (1400-1450 °С) відбувається часткове плавлення рудних зерен, їх злипання, а потім у ході подальшої кристалізації утворюється пориста структура — агломераційний спек.

Загальний час агломерації розкладається на три періоди:

- початковий, коли формуються основні зони спікається шару (в цей період здійснюється запалювання аглошихти і відбувається перезволоження всього шару шихти;

- основний період, протягом якого стабілізуються теплової та газодинамічний режими, відбувається переміщення по шару зон формування агломерату, інтенсивного нагрівання, сушіння;

- заключний, протягом якого послідовно виклініваются всі зони спікається шару, на стрічці залишається тільки охолоджується агломераційний спек.

Процес вважається закінченим, коли зона формування агломерату дійде до колосників спікальних візків. При вертикальної швидкості спікання 20 мм/хв шар шихти товщиною 300 мм перетворюється в агломерат за 15 хв.

Однією з характерних особливостей агломерації залізорудних матеріалів є інтенсивний тепло- та масообмін в шарі шихти завдяки її високої питомої поверхні (30-50 $см^2/см^3$). Цим пояснюється відносно невелика висота (по 15-40 мм) зон плавлення, інтенсивного нагрівання, сушіння, конденсації. Наслідком цієї особливості процесу є невеликий час перебування кожного елементарного об'єму спікається матеріалу при високих температурах в межах 1,5 - 2,0 хв. В зв'язку з цим технологія повинна забезпечити такі умови (крупність часток компонентів шихти, швидкість руху газу в шарі та ін.), щоб за цей час встигли пройти основні хіміко-мінералогічні і фізичні процеси, що забезпечують отримання агломерату необхідної якості. За цей час відбувається вигоряння вуглецю і сірки, дисоціація карбонатів, нагрів рудних частинок до температур плавлення та їх злипання.

Другою особливістю процесу агломерації є виникнення неоднорідного температурного поля в об'ємі спікається матеріалу. З-за точкового розподілу частинок палива в шихті вогнища горіння-плавлення чергуються з ділянками матеріалу, що знаходяться в твердому стані. В результаті локальної усадки розплавленого матеріалу у вогнищі горіння утворюються пори розміром 3-10 мм. Завдяки цій особливості зберігається пориста газопроникна структура. Додаткові пори виникають при виділенні газів від горіння вуглецю, сірки, дисоціації карбонатів, відновлення оксидів заліза та ін.

Третя особливість агломерації характеризується подвійний регенерацією тепла: повітря, що надходить в зону горіння, попередньо підігрівається до 1000-1100 °С в шарі охолоджується спека, а паливо перед спалюванням нагрівається до 700-800 °С потоком гарячих газів, що виходять із зони горіння. Протягом 80 % часу спікання виходить з шару газ має температуру 50-60 °С. Це означає, що основна кількість тепла від запалювання і горіння вуглецю твердого палива шихти залишається всередині шару і бере участь в теплообмінних процесах [13].

## 1.4 Промислове виробництво агломерату

Агломерацію слід розглядати ширше, ніж огрудкування, так як при цьому видаляються деякі шкідливі домішки, карбонати розкладаються і виходить грудковий пористий, до того ж офлюсований матеріал.

Основні складові агломераційної шихти – залізовмісні матеріали (руда, рудний концентрат), повернення, паливо, волога, що вводиться для огрудкування шихти, вапняк, що вводиться для отримання офлюсованого агломерату.

Крім того, в шихту часто вводять вапно, що покращує комкуємість шихти, підвищуючи її газопроникність і міцність агломерату; марганцеву руду для підвищення вмісту марганцю в чавуні і відходи.

Підготовку шихти, як і спікання, ведуть на агломераційних фабриках. Підготовка шихти повинна забезпечити усереднення, необхідну крупність, дозування компонентів шихти, змішування та її огрудкування.

Для забезпечення рівномірного розподілу компонентів по всьому об'єму шихти необхідно здійснювати хороше змішування шихти, що зазвичай проводять в обертових барабанах, спочатку в змішувальному, а потім в окомковуючому. На деяких аглофабриках ці операції поєднують в одному барабані.

Щоб процес почався, спеціальним запальним пристроєм нагрівають верхній шар шихти до 1200-1300 $^0$C, і паливо запалюється. Горіння підтримується в результаті просмоктування атмосферного повітря. Зона горіння висотою близько 20 мм поступово просувається зверху до низу.

В зоні горіння температура досягає 1400-1500 $^o$C. При таких температурах вапняк $CaCO_3$ розкладається на CaO і $C_2$, а частина оксидів заліза шихти відновлюється до FeO.

Коли зона горіння опуститься нижче місць утворення рідкої фази, повітря, що просмоктує охолоджуємо масу зверху просочену рідкою фазою, ця маса твердне, в результаті чого утворюється твердий пористий продукт –

агломерат. Пори виникають у результаті випару вологи іта просмоктування повітря. Просування через шар шихти зверху до низу зони, в якій відбувається горіння палива і формування агломерату триває від 8 до 12 хв і закінчується при досягненні поду.

Основні хімічні реакції, що протікають при агломерації. Горіння палива відбувається по реакцій:

$$C + 0{,}5O_2 = CO;$$

$$C + O_2 = CO_2.$$

В продуктах горіння які відводяться відношення $CO_2$:CO складає від 4÷6, але поблизу палаючих шматків коксу відновна атмосфера, що викликає відновлення оксидів заліза. Частина оксидів $Fe_3O_4$ відновлюється до FeO:

$$3Fe_3O_4 + C = 3FeO + CO_2.$$

Вапняк розкладається по реакції: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ та йде з поглинанням тепла.

При агломерації видаляється сірка і частково миш'як. Протікає багато реакцій взаємодії між оксидами шихти, в результаті чого утворюються десятки різних хімічних сполук.

Виробництво агломерату ведуть на агломераційних фабриках, до складу яких входять комплекс обладнання для підготовки шихти, стрічкові агломераційні машини та комплекс обладнання для дроблення і охолодження отриманого агломерату та відсіву його дрібниці.

Агломераційна машина представлена на рисунку 1.2 має в якості основного елемента замкнутої стрічки має окремі спікальні візки - палети 2. Візок – це колосникова решітка з поздовжніми бортами яка спирається на чотири ролика; візки рухаються по напрямних рейках під дією пари приводних зірочок 1.

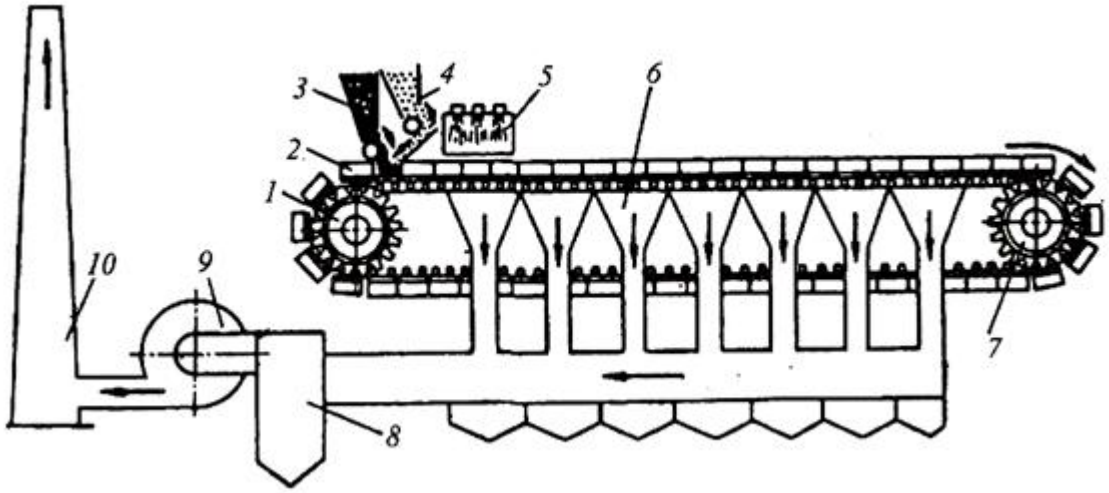



Рисунок 1.2 - Схема агломераційної машини

Під візками робочої гілки стрічки розташовані від 13 до 26 вакуум-камер 6, в яких за допомогою ексгаустера 9 створюють розрідження на рівні 10-13 кПа. На рухому стрічку живильником 3 укладають шари з повернення агломерату з крупністю 10-25 мм. Потім живильником 4 завантажують шар шихти висотою 250-350 мм. Далі шихта на рухомій стрічці потрапляє під запальний горн 5, який нагріває поверхню шихти по всій ширині до 1200-1300 °С, в результаті чого спалахує паливо. При подальшому русі стрічки за рахунок повітря, що просмоктуэться ексгаустером 9 зверху, шар горіння коксу і спікання агломерату переміщується вниз, а продукти згоряння через вакуумні камери 6 надходять в пиловловлювач 8 і далі викидаються в атмосферу через трубу 10.

Формування агломерату закінчується на горизонтальній ділянці руху стрічки; цей момент легко визначають за рахунок різкого падіння температури відхідних газів, що свідчать про закінчення горіння коксу. Готовий агломерат зсипається до низу. Він потрапляє в валкову дробарку гарячого дроблення і потім на грохоти, де від дробленого продукту відсівають гарячі повернення. Далі агломерат надходить на охолоджувач, де він протягом 40-60 хв охолоджується. Потім агломерат спрямовується на грохоти холодного

агломерату. Після цього готовий агломерат конвеєром транспортують в доменний цех.

### 1.5 Конкурентні методи огрудкування

З 1955 р. у світовій металургії в промислових масштабах почали використовувати конкурентний метод огрудкування тонких залізорудних концентратів, спрямований на отримання окатишів. При використанні окатишів в доменних печах спостерігалося зниження питомої витрати коксу, при цьому продуктивність печей збільшилася практично вдвічі. Завдяки активній рекламі, проводиться розробниками технології та виробниками обладнання фабрик з виробництва окатишів, в металургійній галузі склалося враження значної переваги окатишів перед агломератом. Будь-які спроби вчених і спеціалістів дати об'єктивну оцінку новому способу огрудкування постійно переривалися. Результати такої технічної політики призвели до негативного результату. Після активного використання в доменній плавці окатишів довелося аварійно зупиняти доменні печі з причини інтенсивного зносу засипних апаратів та вогнетривкої кладки. Цей факт обумовлений значним підвищенням вмісту пилу в доменному газі в результаті руйнування окатишів в ході доменного процесу.

В результаті об'єктивного аналізу встановлено, що окатиші не є кращим видом огрудкованої рудної сировини. Вони володіють рядом серйозних недоліків у порівнянні з агломератом. Був встановлений цілий ряд недоліків використання окатишів, в тому числі:

- окатиші можливо отримувати тільки з додатково подрібненої рудного концентрату, що значно здорожує концентрат;
- окатиші сильно руйнувалися в ході відновних процесів;
- окатиші надзвичайно важко отримувати підвищеної (до 1,4-1,5) основності;

- при роботі доменних печей на основі окатишів виникають значні труднощі за рахунок погіршення газопроникності шару і розвитку процесів шлакоутворення.

Основною перевагою агломерації є універсальність процесу спікання з використанням рудних матеріалів в широкому діапазоні по крупності (від 0 до 10 мм) і припустимі деякі відхилення від оптимальних параметрів за вологості шихти, вмісту в ній твердого палива та ін.

Безперечною перевагою окатишів перед агломератом є їх хороша транспортабельність: вони мало руйнуються в ході залізничних або морських перевезень. Таким чином, доцільно огрудкування тонкого рудного концентрату проводити шляхом виробництва окатишів в тому випадку, коли гірничо-рудний комбінат знаходиться на значному видаленні від металургійного заводу.

Серед фахівців існує твердження, що агломерація і виробництво окатишів не конкурують, а доповнюють один одного методи огрудкування [14].

## 1.6 Основні процеси доменної плавки

### 1.6.1 Рух шихти по шахті доменної печі

Ефективність доменного процесу обумовлюється раціональною організацією протитоку матеріалів і газів у процесі доменної плавки. Завантажені на колошник холодні компоненти шихти безперервно омиваються рухаються вгору гарячими відновлювальними газами, які утворюються в горні при спалюванні коксу під час продування киснем. Рівномірний розподіл шихти по перерізу домни забезпечує високу ефективність доменного процесу [4].

У процесі доменної плавки шихтові матеріали безперервно опускаються по всьому перерізу шахти, звільняючи обсяг на колошнику для завантаження нових порцій. Процес опускання матеріалів обумовлений наступними явищами:

- горіння коксу перед фурмами і утворення в результаті цього вільного простору, яке поступає кокс, розташований вище вогнищ горіння. Обсяг коксу становить майже половину загального обсягу завантажуваних матеріалів. Близько 80 – 85 % коксу досягає рівня фурм і згоряє з утворенням оксидів вуглецю і звільняє місце для опускання нових порцій коксу;
- зменшення обсягу шихтових матеріалів внаслідок їх ущільнення, який зумовлений розміщенням дрібниці в порожнинах між шматками, подрібненням і стиранням великих шматків;
- перетворення в нижній частині шахти, в розпарі та заплечиках твердих матеріалів у рідкий і частково в газоподібний стан, що супроводжується зменшенням їх обсягу;
- періодичний випуск з домни чавуну і шлаку, при цьому в горні звільняється місце для опускання матеріалів.

Час перебування шихтових матеріалів у печі, складає 6 – 8 год.

Середня швидкість руху шихтових матеріалів в шахті становить від 3 до 4 м/год. Швидкість опускання матеріалів по поперечному перерізу шахти різна. Найбільша швидкість опускання спостерігається зазвичай над вогнищами горіння коксу - безпосередньо біля стін колошника або на деякій відстані від них. При наближенні до центру шахти швидкість помітно знижується. У печах, що працюють на недостатньо підготовленою шихті, різниця в швидкостях опускання матеріалів по перетину печі висока. В даний час внаслідок значного поліпшення підготовки шихти і вдосконалення технології плавки відмінність у швидкостях опускання шихтових матеріалів по перетину печі зменшилася.

Відмінність у швидкостях руху матеріалів по перетину печі обумовлено їх гранулометричним складом, характером розподілу на колошнику, станом профілю печі, процесами в горні та іншими факторами, що визначають величину сил, що викликають рух матеріалів і перешкоджають йому. При поліпшенні підготовки шихти та інших сприятливих факторах різниця у величині цих сил по перетину печі зменшується і швидкості опускання

матеріалів по перерізу стають більш рівномірними. Рух шихти приходить під дією сили тяжіння шихти, частково вирівняною протилежно спрямованими силами тертя, підйомною силою газового потоку та ін. [4].

У нормально працюючій печі наведена сума векторів сил спрямована в до низу, тобто підйомна сила менше за силу тяжіння. Різниця цих сил, що викликає опускання шихти, зазвичай називається «активною» вагою шихти.

Активна вага рухомої шихти представляється наступним співвідношенням:

$$P_a = P – (F_1 + F_2 + F_3), \quad (1.1)$$

де P – вага шихти;

$F_1$ – сила тертя шихти про стінки печі і сили внутрішнього тертя матеріалів;

$F_2$ – підйомна сила потоків газів;

$F_3$ – підйомна сила, що виникає при підвищенні рівня рідких продуктів плавки у горні.

Рівняння (1.1) дозволяє провести аналіз значень окремих факторів, що впливають на його величину. Так як опускання матеріалів можливе лише при позитивному значенні активного ваги, нормальний рух шихти відбувається лише до досягнення певного перепаду тиску. Перевищення деякого критичного значення перепаду тиску буде супроводжуватися наближенням активного ваги до нуля, при цьому плавний сход шихти порушиться, виникнуть підстоїв та підвисання шихти.

Для усунення підстоїв і підвисань необхідно зменшити підйомну силу газів. З цією метою необхідно зменшити опір проходу газів шляхом зміни режиму завантаження або зниженням витрати дуття з зменшенням утворення газу в одиницю часу, це випливає зі співвідношення (1.1).

Для визначення опору каналу руху газу або втрати напору газу можна використовувати рівняння втрати напору в трубах:

$$\Delta P = f\frac{\omega^2\rho}{2g}\cdot\frac{4H}{d_{\text{екв}}} \quad (1.2)$$

де $\Delta P$ – втрата напору газу, кг/м$^2$ ;

f – коефіцієнт опору;

$\rho$ – дійсна густина газу, кг/м$^3$;

g – 9,81 м /с$^2$;

H – висота шару, м;

$\omega^2$ – дійсна швидкість газу в шарі, м/с;

$d_{екв}$ – еквівалентний діаметр каналів між частинками сипучого матеріалу, м.

Застосування сортованої шихти, що не містить дрібниці, збільшує переріз вільних для проходу газів каналів, зменшує швидкість газів та знижує перепад тисків. Цей факт дозволяє підвищити витрата дуття не порушуючи співвідношення (1.1). При цьому необхідно, щоб залізорудні матеріали зберігали міцність і не утворювали дрібниці при нагріванні в шахті.

Різні за крупністю і щільності матеріали рухаються вниз з різними швидкостями. Більш важкі і дрібні компоненти шихти, прокидаючись між великими шматками, що рухаються з великими швидкостями, більш легкі і великі – з меншими, а дрібні і легкі частинки навіть виносяться газами з шахти. При переході матеріалів у рідкий стан швидкість їх опускання збільшується і стає тим вище, чим вище температура і рухомість рідини [4].

### 1.6.2 Потік газів у шахті домни

Рух газів вгору через стовп шихтових матеріалів відбувається в наслідок тиску, який створюється в горні в результаті подачі дуття. Рух газів можна розглядати як рух по ряду паралельних каналів, які утворюються частками матеріалів і мають правильну форму. При русі газу в шарі шихтових матеріалів тиск його безперервно знижується в основному за рахунок тертя газу о стінки каналів.

Насамперед, втрата напору газу не повинна перевищувати певних значень. Збільшення втрат напору газу вище заданих меж, різних для змінних умов роботи печі, викликає порушення і навіть припинення сходу шихти.

Так як стовп шихтових матеріалів у доменній печі вельми неоднорідний і структура його в окремих перетинах не піддається навіть приблизної кількісній власній оцінки, за рівнянням (1.2) можна скільки-небудь точно визначити втрату напору газового потоку при його проході через стовп шихти. Однак, знаючи опор окремих однорідних матеріалів шихти, можна отримувати необхідні для управління процесом дані.

Опір матеріалів руху газів експериментально можна визначати різними методами. Але при всіх методах через шар матеріалу, що міститься в ємність певної форми, продувається повітря, витрата якого послідовно збільшується, і заміряється його тиск під шаром матеріалу.

При однакових витратах повітря втрати напору газу для різних матеріалів різні. Опір коксу в кілька разів нижче опору дрібної руди або агломерату, який вміщує дрібні фракції. Видалення з шихтових матеріалів дрібних фракцій знижує опір проходу газу. Це дозволяє при інших незмінних умовах збільшувати кількість гарів шляхом посилення дуття і підвищення продуктивності печі, без порушення плавного сходу матеріалів і рівномірному розподіленню газів по поперечному перерізу шахти печі.

Дослідженнями встановлено, що розподіл газу в шарі шихтових матеріалів, що має різну газопроникність в окремих перетинах, відбувається згідно із закономірністю, подібною за законом Кірхгофа для розподілу електричного струму в паралельних потоках. Аналогічно течії електричного струму, кількість газу, що проходить крізь одиницю перерізу шару матеріалу, обернено пропорційна його опору або прямо пропорційна його газопроникності.

У зв'язку з цим, з точки зору нерівномірного розподілу матеріалів і газів по перетину печі, доменну піч можна розділити на ряд концентричних циліндричних зон, кожна з яких характеризується певними відношеннями

залізорудних матеріалів до коксу, визначеної газопроникність, а з цього витратою, складом і температурою газу.

З урахуванням нерівномірного розподілення матеріалів і газів по колу доменну піч можна розділити на ряд секторів, в яких газопроникність шару шихти по вертикалі, кількість, склад і температура газу, що визначають протікання процесів, будуть різні.

У зонах високої газопроникності кількість газів на одиницю шихти значно більше, ніж необхідно для відновлювальної та теплової роботи. Газ покидає цю зону з великим запасом невикористаної енергії. Для отримання цієї енергії в горні було спалено визначену кількість вуглецю коксу, котрий не був використаний. В зонах же з низькою газопроникністю кількість газа виявляється недостатньою для нагрівання та відновлення залізорудних матеріалів, які приходять в нижню частину печі малопідготовленними та потребують для завершення процесів підвищення витрати коксу.

На характер руху і розподілу газів доменої печі визначальний вплив мають якість шихтових матеріалів і розподіл їх при завантаженні на колошнік печі. Ідеальною з точки зору газопроникності була б шихта, яка складається зі шматків, що мають форму кулі однакового розміру. При роботі на такій шихті допускалася б висока витрата дуття, було б рівномірне розподілення і високе використання газу по всьому перерізу печі, тобто були б висока продуктивність печі і низька питома витрата коксу [4].

Слід враховувати, що особливості конструкції доменної печі і самого процесу сприяють руху газів уздовж стін: більш гладкі стінки чинять менший опір, ніж шорсткі канали в шихті; периферійне підведення дуття і відведення газу, зменшують довжину шляху газу вздовж стін, також знижують спротив руху газу по периферії.

В сучасних умовах шихта вельми далека від ідеальної: поряд із шматками різних розмірів вона містить більшу або меншу кількість дрібних фракцій. Тому для швидкого огрудкування для кращого використання газу шихта повинна бути відповідним чином розподілена на колошнику печі. Біля

стін і в центрі печі необхідно у відносно більшій кількості розташовувати кусковий матеріал (кокс і шматки агломерату), а у проміжній зоні між стінками і центром розміщувати більш дрібну залізорудну частину шихти. Такий розподіл матеріалів посилить рух газу біля стін і в центрі, полегшить схід матеріалів і обробку залізорудних матеріалів проміжної зони яка оброблюється газом.

При зниженні газопроникності шихти біля стін можливо виникнення тугого ходу і підвисання. Значне підвищення газопроникності на периферії викличе переважний рух газу у стін, у результаті чого гази будуть залишати піч з великим запасом невикористаної енергії. Слабке ж використання газів на периферії викличе значне зниження використання їх в цілому у печі.

Газовий потік також надає значний вплив на розподіл і опускання матеріалів. Так, підтримуюча дія газового потоку змінює характер розподілу матеріалів на колошнику, структуру стовпа при опусканні, характер руху матеріалів вниз.

При ідеально рівномірному розподілі матеріалів і газів по колу печі криві вмісту в газі вуглекислоти (і температур) повинні бути абсолютно однаковими за всіма радіусах. Для реальних виробничих умов криві по окремих радіусах відрізняються один від одного і тим більше, чим не рівномірнише розподіляються матеріали і гази по колу печі [4].

Зміна температур газу і вмісту у ньому вуглекислоти по радіусу для різних умов плавки неоднаково.

При надмірно високій газопроникності матеріалів у стін і низькою в осьовій зоні доменної печі гази будуть рухатися переважно по периферії, внаслідок чого їхня температура в цій зоні буде високою, а вміст вуглекислоти – низьким. В осьовій зоні газу буде мало, температура його буде низькою, а вміст вуглекислоти – високим. Як показано раніше, такий розподіл матеріалів і газів викличе низьке використання газів в печі і підвищену витрату коксу. Крім того, надмірний периферійний потік газів викликає посилений знос вогнетривкої кладки печі.

Аналогічний вплив на використання газів і витрати коксу має надмірний розвиток осьового руху газів. Вплив його на загальні використання газу в печі і витрата коксу нижче, ніж периферійного, внаслідок того, що осьова зона займає у багато разів меншу відносну частку перерізу печі. Однак надмірне розвиток осьового та обмеження периферійного потоків газу викличе труднощі у сходженні і навіть підвисання шихти, що призведе до необхідності зниження інтенсивності ходу печі. Тому надмірно розвинений периферійний або осьовий потік газів не припустимо. Тим не менш, при погано підготовленій шихті по грудкуватості певний розвиток периферійного або осьового руху газів для забезпечення плавного сходу шихти неминучий.

Для поліпшення використання газу і показників плавки треба прагнути досягнення розподілу матеріалів і газів, ступінь наближення до кьтрого буде визначатися умовами роботи печі, в особливості якістю шихти.

Цей випадок характеризує раціональний розподіл матеріалів і газів по перетину печі. На периферії зосереджуються легко відновлювальні шматки залізорудних матеріалів, в результаті чого використання посиленого потоку газів буде високим. Центральна частина печі достатньо газопроникна, температура тут вище, а вміст вуглекислоти на 3-4% нижче, ніж на периферії. Більш дрібна рудна складова, зосереджена в проміжному між периферією і центром кільці, яка також досить добре обробляється газом.

Розподіл і використання газів в печі визначається характером розподілення шихтових матеріалів на колошнику, який встановлюється технологом з урахуванням усіх умов роботи печі, в особливості якості шихти яку огрудкували [4].

Якість шихти яку огрудкували найбільш повно характеризується середнім розміром шматків і середнім квадратичним відхиленням розмірів шматків від їх середньої величини, що розраховується за даними розсівів досліджувальних проб матеріалів перед подачею в скіп:

$$d_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{n} d_i m_i \quad \text{та} \quad \sigma = \sqrt{\sum (d_i - d_{\text{ср}})^2 \cdot m_i}\,, \tag{1.3}$$

де $d_{ср}$ – середній розмір шматка, мм;

$d_i$ – середній розмір шматка в даній фракції, рівний середньому арифметичному з розмірів верхнього і нижнього сита, мм;

$m_i$ – вміст даної фракції в частках одиниці;

σ – середнє квадратичне відхилення розмірів шматків від їх середньої величини, мм.

Середній розмір шматків визначає, при інших незмінних умовах, газопроникність стовпа шихти, яка при збільшенні середнього розміру шматків зростає. Однак при однаковому середньому розмірі шматків різні матеріали (агломерати) можуть мати неоднакове співвідношення окремих фракцій. В двох крайніх випадках один агломерат може містити багато як великої, так і дрібної фракції, а інший агломерат – майже весь складатися з шматків, близьких за розміром до середнього. У першому випадку агломерат буде характеризуватися великим значенням, а в другому – малим.

При розподілі перший агломерат внаслідок сегрегації буде розташовуватися на колошнику нерівномірно з концентрацією шматків в одних концентричних перерізах і дрібних частинок в інших, що супроводжуватиметься високою газопроникністю стовпа шихти загалом за рахунок надмірно високої газопроникності зон із шматковим агломератом при низькій газопроникності зон з агломератом дрібної фракції. Розподіл газів буде нерівномірним, а використання – низьким.

Зміною режиму завантаження можна досягти більш рівномірного розподілення такого агломерату, а значить, і газів по перетину печі, однак це знизить газопроникність стовпа шихти (за рахунок закриття каналів великого перерізу крупного агломерату дріб'язком) настільки, що викличе необхідність повернення до нерівномірного розподілу матеріалів для забезпечення прийнятної інтенсивності плавки [4].

Другий агломерат, який характеризується тією ж величиною $d_{ср}$, але малим значенням σ (однорідний за грудкуватості), може бути рівномірно розподілений по перерізу колошника, і при високій загальній газопроникності стовпа шихти матеріали по всьому перетину печі будуть мати майже однакову і високу газопроникність. В цьому випадку показники інтенсивності плавки, використання ентальпії і відновної здатності газів по всьому перетину печі виявляться вище.

Таким чином, з точки зору можливих газодинамічних умов в печі і розподілу газового потоку за її перерізом обидва показника якості шихтових матеріалів ($d_{ср}$ і σ) слід розглядати спільно. Це дозволяє правильно оцінювати нтенсивність плавки і розподіл газу при роботі на даних шихтових матеріалах, виявляти резерви підвищення використання газів шляхом поліпшення їх розподілу, вибирати оптимальне співвідношення інтенсивності плавки і розподілу газів по перетину печі, об'єктивно порівнювати газорозподіл у печах різних заводів.

Вплив якості шихти на розподіл і використання газів в печі видно з порівняння даних табл. 1.1. Залізорудна частина шихти на печах майже повністю представлена агломератом [4].

Таблиця 1.1. Якість агломератів перед подачею в скіп

| Завод | Вміст фракцій (мм), % | | | | $d_{ср}$, мм | σ, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | +40 | 10-5 | 5-0 | 3-0 | | |
| А | 20,0* | 27,7 | 25,9 | 15,0 | 25,3 | 28,4 |
| Б | 10,2 | 37,3 | 11,9 | 9,5** | 18,2 | 20,6 |
| В | 9,1 | 15,7 | 7,8 | 4,5 | 20,8 | 14,2 |
| | * Фракція +50 мм | | | | | |
| | ** Фракція 3,5 — 0 мм | | | | | |

Найменш однорідний агломерат печі заводу А, він мав найвищі значення $d_{ср}$ = 25,3 мм і σ = 28,4 мм. Такий гранулометричний склад агломерату при прийнятій інтенсивності плавки не дозволяв не тільки усунути, але навіть обмежити периферійне рух газів, хоча це і призводило до підвищеного, для існували в цеху умов, витрати коксу. Середній вміст вуглекислоти в газ біля стін становило ~4,0, у осі ~13%.

Найбільш рівномірний розподіл і високе використання газів по перетину печі заводу В обумовлювалося утриманням в шихті самого однорідного за грудками агломерату: $d_{ср}$ = 20,8 мм, σ = 14,2 мм. При порівняно високій завантаженні рудної складової периферії і осьової частини піч заводу В працювала рівно, високопродуктивно, з низькою витратою коксу.

Газорозподіл у печі заводу Б краще, ніж у печі заводу А, але гірше, ніж у печі заводу, що знаходиться в повній відповідності з якістю агломерату за грудкуватості.

Наведені в табл. 1.1 дані роботи доменних печей на погано підготовленій за грудкуватості шихті свідчать про розміри впливу якості шихти на роботу печей. В даний час також не вичерпані всі резерви поліпшення якості шихти, в тому числі за грудкуватості; приведення їх до досконалості - одне з головних напрямків удосконалення доменного виробництва.

При сприятливих умовах роботи печі, зокрема при сортованої багатої залізом шихті, зміст вуглекислоти в газі на периферії перевищує 15-16, в центрі – 11-13, а на гребені - 20%. При такому розподілі газів піч працює економічно і з високою продуктивністю.

Підвищення однорідності шихтових матеріалів по грудкуватості (як і однорідності всіх параметрів їх хімічного складу, фізичних і механічних властивостей) останнім часом набуває особливо важливе значення в зв'язку з введенням в дію все більш великих високопродуктивних і автоматизованих домених печей, для безперебійної і ефективної роботи яких потрібні шихтові матеріали з невеликим діапазоном коливань властивостей. Тому так зростає

роль стандартизації фізико-хімічних і механічних показників якості сирих матеріалів і палива [4].

Розвиток підготовки шихтових матеріалів за грудкуванням забезпечує раціональний розподіл і підвищення використання газів по всьому перетину печі. На багатьох вітчизняних і зарубіжних заводах доменні печі переводяться на більш однорідну за розміром кусків шихту, в якій знижена верхня межа шматків руди та агломерату і перед завантаженням у піч виключаються дрібні фракції.

Протягом останніх років проводяться роботи по звуженню меж крупності шихтових матеріалів (зниження верхньої і підвищення нижньої межі), а при застосуванні в шихті окатишів - наближенню крупності інших наближенню шихти до крупності окатишів. Підвищення однорідності по грудкуватості всіх шихтових матеріалів буде одним з основних напрямків розвитку доменного виробництва. Так, максимальний розмір шматків агломерату, який завантажують в доменну піч, повинен бути зменшений до 20 мм, а мінімальний підвищено до 10 мм, причому вміст шматків меншого розміру не повинно перевищувати 2 %. Має бути підвищена міцність окатишів, а їх розмір становитиме 10-15 мм. Необхідно значно звузити діапазон розмірів шматків коксу так, щоб у домені печі завантажувалася тільки фракція 50-25 мм. При такій шихті розподіл матеріалів і газів по перетину печі буде найбільш рівномірним, використання газів - високим, робота печі - економічною.

При оптимальному для конкретних умов розподіл газового потоку в доменній печі найкращим чином виконуються всі три основні його функції - відновлення окислів, нагрів матеріалів і забезпечення рівного та інтенсивного сходу шихти [4].

## ВИСНОВКИ

В розділі проведений аналіз впливу розмірів шихти для оптимальної роботи доменної печі. Показано, що для конкретних умов роботи печі (якість і газопроникність шихти, її розподіл по перетину та колу печі, стан профілю, кількість і склад дуття, шлаковий режим та ін.) існує оптимальний розподіл газів по перетину печі. Останнє досягається при певній кількості газів, що проходять через канали в шихті в одиницю часу, при котрім забезпечується максимальне використання відновної здатності і ентальпії газів при рівному сході шихти, без значного виносу дрібних фракцій та утворення каналів або ущільнень. При такому режимі роботи печі досягаються мінімальний або близький до мінімального витрата коксу на одиницю чавуну і максимальна або близька до максимальної продуктивність печі.

# 2 ВИВЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ СТРУКТУРНО-ХІМІЧНОГО СКЛАДУ АГЛОМЕРАТУ

## 2.1 Процеси спікання агломерату

Вивчення процесу мінералоутворення і мікроструктури агломерату має допомогти встановити залежність міцності агломерату від режиму спікання руди, який можна регулювати в досить широких межах [9]. Верх досліджувального зразка з машини був пухким (погано спеченим), середина – добре спеченої, низ оплавленим. У верхній і середній частинах зразка спостерігалися шматки вихідної руди і білі включення незасвоєного вапна. У сильно оплавленій нижній частині агломерат був щільним і мав малу пористість. При розбиранні зразка в його середині виявили оплавлену лінзоподібну порожнину, яка поділяла зразок агломерату по висоті приблизно на дві рівні частини (верх і низ). Агломерат в цілому мав наступний хімічний склад, % (табл.2.1.)

Таблиця 2.1. Компонентний склад агломерату, %

| Fe | FeO | $Fe_2O_3$ | $SiO_2$ | CaO | $Al_2O_3$ | MgO | MnO | S | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 46,4 | 12,2 | 52,9 | 14,7 | 16,6 | 1,70 | 0,51 | 2,00 | 0,058 | 0,040 |

До моменту виготовлення шліфів проби з шарів 1 – 8 являли собою дрібні тендітні шматки агломерату та вихідної руди. Тільки в самому низу зразка (шари 9 і 10) зустрічалися окремі великі шматки спеченого агломерату без слідів вапна.

Прозорі і поліровані шліфи для мінералогічного дослідження брали тільки з шматочків агломерату. Щоб уникнути розчинення вапна і кальцієвих силікатів всі шліфи готували на гасі. Частина агломерату, що обсипалась вивчили в імерсійних рідинах [10].

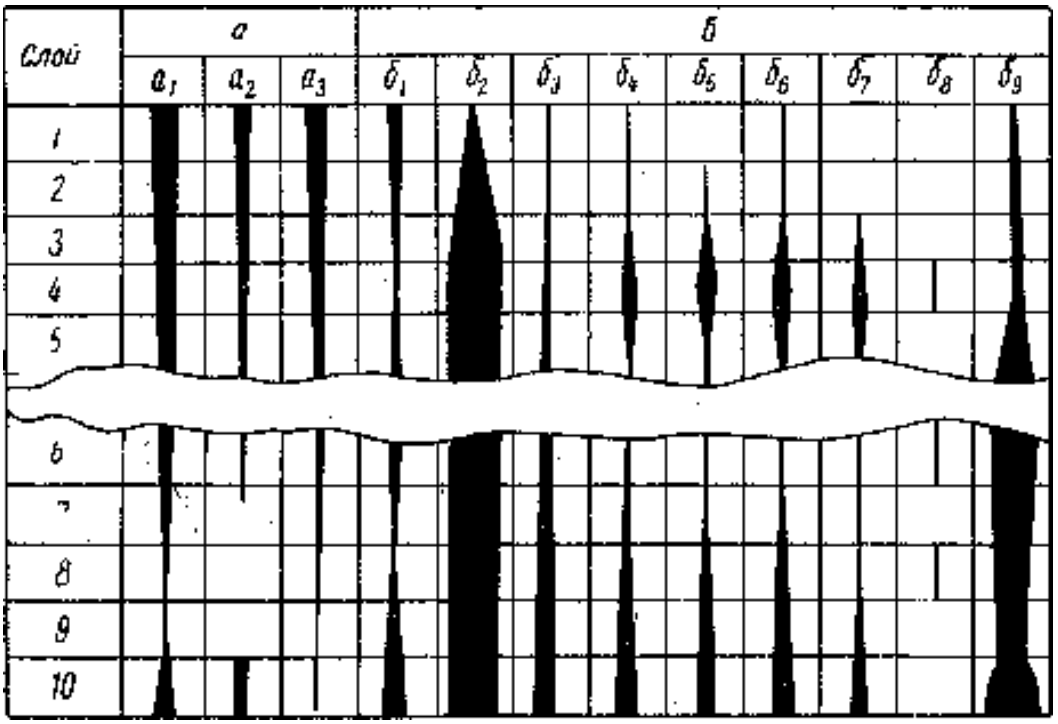



Рисунок 2.1 - Структурний склад агломерату

При вивченні речовинного складу виявили (рис.2.1.) і вихідні складові шихти (включення гематитової руди $\alpha_1$ і кварцу $\alpha_2$, залишки незгорілого коксу і незасвоєне вапно $\alpha_3$) і нові утворення (гематит $\delta_1$, магнетит $\delta_2$, ферити кальцію $\delta_3$), серед силікатних складових спостерігалися геденбергит $\delta_5$, феромонтичелит $\delta_6$, геленит $\delta_8$, ранкинит $\delta_7$, двухкальціевий $\beta$ – силікат $\delta_4$ і скло $\delta_9$. Вивчений агломерат характеризується надзвичайно різноманітною структурою по висоті зразка і всередині кожного шару; в ньому часто чергуються різні форми кристалізації одного й того ж мінералу.

При вивченні речовинного складу рудної частини агломерату в цілому було виявлено по три генетичних різновиди гематиту і магнетиту.

У нижній сильно оплавленій частини зразка спостерігалась велика кількість дендритів магнетиту як результат кристалізації надлишку оксидів заліза з рідкої фази [10].

Ферити кальцію ($CaFe_2O_4$, $Ca_2Fe_2O_5$) у агломераті мали підлегле значення. Найбільша кількість їх виникло в місцях скупчення вапна; ці ферити представляли собою зональні утворення у вигляді суміші кристалічної окису

кальцію і двухкальцієвого фериту в центрі і однокальцієвого фериту по периферії. Однокальціевий ферит у вигляді дрібних пластинчастих і голчастих кристалів зустрічався в основному в склі.

Найбільше поширення мали утворення феромонтичеліту CaO(Fe, Mg)$SiO_4$. У верхній частині та у верху нижньої частини зразка вони мали вигляд найтонших плівок на кордоні між рудними складовими і склом. Максимальні поля кристалізації феромонтичеліту розташовувалися в середині «верху» (шар 3 і 4) і в самому низу зразка (шари 9 і 10). Зміна показника феромонтичеліту (від 1,66 – 1,68 в «верху» зразка до 1,72 в нижній частині) свідчать про зміну його складу в бік збільшення частки закису заліза.

Геденбергит CaO(Fe, Mg)$Si_2O_5$ за кількістю і закономірностям поширення по висоті пирога був аналогічний феромонтичеліту.

Ранкинит $Ca_3Si_2O_7$ зустрічався в найбільшій кількості в формі різноманітних виділень від найтонших дендритних утворень у склі до великих пластинчастих кристалів з добре оформленими двійниками – оптично двоосних позитивних з показником заломлення 1,64 – 1,65.

Геленит $Ca_2Al_2SiO_7$ зустрічається тільки в трьох пробах агломерату у вигляді найтонших голчастих кристалів у склі. Його утворення пов'язане з локальним збагаченням окремих ділянок шихти глиноземом золи коксу.

Двухкальцієвий силікат $Ca_2SiO_4$ спостерігається по всій висоті проби; β – модифікація в найбільшій кількості була розвинена внизу обох частин зразка і зустрічалася у вигляді кристалів різноманітної форми, найчастіше різної величини з характерними двійниками, іноді ці кристали мали ромбоподібні поперечні перерізи, які чітко виділяються на тлі скла. Такі кристали розташовувалися в основному в областях сумісної кристалізації двухкальцієвого силікату і феритів кальцію на ділянках скупчення вихідної вапна.

У загартованих ділянках агломерату з великою кількістю скла двухкальцієвий силікат утворювався у вигляді витягнутих довгих голок, які нерідко перетинають все поле зору шліфа.

За характером скла, присутнього в агломераті в більшій кількості також можна судити про неоднорідність процесу спікання по висоті зразка. Максимум вмісту скла спостерігаються внизу верхньої частини зразка і внизу у політ. У всіх випадках скло є сильно залозистим (воно має буро – червоний колір і малопрозоро) [10].

Кількість і склад мінералогічних складових змінюються по висоті пирога, як зазвичай для залізорудних агломератів. Так, наприклад, зміст вихідного гематиту $\alpha_1$ закономірно зменшується донизу в міру наростання температури спікання. Деяке збільшення його близько колосників (шар 10) обумовлено сильно вираженою сегрегацією шихти і охолоджуючим дією колосників.

Максимальна кількість вапна $\alpha_3$ у верхніх шарах пирога теж пояснюється сегрегацією, оскільки дрібні частинки вапняку концентруються вгорі; повне ж зникнення вихідної вапна внизу (шар 10) пояснюється також збільшенням інтенсивності і ступеня перетворення маси матеріалів шихти і окремих частинок до низу шару.

Невелика кількість новоутворень магнетиту $\delta_2$ в верхніх пробах 1 – 3 пояснюється відсутністю глибоких перетворень в шихті на початку спікання. У верхніх зонах переважають реакції в твердих фазах і в пластичному стані: це реакції часткового відновлення гематиту до магнетиту і перекристалізації пилуватих частинок вихідного магнетиту. Реакції з участю рідкої фази мають обмежений розвиток, як правило, це контактні реакції утворення скла, рідше феритів кальцію і силікатів.

Наявність у шлаковій частини агломерату закису заліза і закису марганцю знижує температуру утворення скла, що різко збільшує його кількість.

Утворення великих кількостей рідинних шлаку в агломераті негативно позначається на його металургійних властивості. Розрив пирога в середині з наступним загартуванням обох поверхонь порожнини призводить до виникнення додаткових зон скла, погіршують міцність готового агломерату.

Крім того, міцність агломерату знижується ще і в зв'язку з переважанням у скловатою зв'язці дендритних форм кристалів залізо кальцієвих силікатів, що є наслідком освіти низькотемпературної зв'язки. Оксид заліза розчиняється в склі і кількість легко відновлювальних оксидів заліза зменшується.

На вивченому виробничому агломераті чітко видно нерівномірність процесу агломерації, обумовлена значною неоднорідністю речовинного та гранулометричного складу шихти. Так, присутність тонкоподрібненого магнетитового концентрату, легко вступає у взаємодію з шлакоутворюючими оксидами, сприяє швидкому протіканню реакцій; наявність поряд з магнетитовим концентратом великих шматків гематитової руди, навпаки, гальмує процес спікання. Нерівномірність речовинного складу і структури агломерату є також наслідком нерівномірного розподілу великих шматків вапна, які важко засвоюються залізо силікатним розплавом [10].

Нерівномірність процесу поглиблюється також локальним збагаченням окремих ділянок шихти коксіком, особливо у верхніх частинах зразка агломерату. У місці скупчення коксу швидко зростає температура спікання; сильно відновні умови сприяють утворенню в цьому мікрообсязі легкоплавкого залізо силікатного розплаву, збагаченого закисом заліза. Швидке охолодження верхніх частин пирога холодним повітрям зупиняє цей процес; в результаті спостерігаються цілі області агломерату, де в одному мікрообсязі поряд з вихідною гематитової руди і кварцом є ділянки «замороженого» жалізосилікатного розплаву з дрібними кристалами магнетиту, вюститу і залишками коксу.

Сильно виражена гетерогенність процесу спікання криворізької шихти є основною причиною, що сприяє зниженню міцності верхніх частин зразка. Контакт різних за складом і структурі мікрообсягів агломерату є найменш міцним.

Основними причинами нерівномірного складу та неоднакової кількості зразка по висоті є сегрегація матеріалів при завантаженні шихти на стрічку і несприятливий температурно – тепловий режим по висоті спікається шару.

Негативний вплив сегрегації можна зменшити, знизивши верхня межа крупності руди та вапняку. Наявність великої кількості скла зменшує міцність агломерату, знижуючи його цінність як сировини для доменної плавки [10].

## 2.2 Розподіл мінералогічного складу по висоті зразка проби агломерату

В період відбору проб агломерат мав наступний хімічний склад (барабанна проба -29,3%), % (табл. 2.2.).

Таблиця 2.2 Компонентний склад агломерату до випробувань

| Fe | Fe | S | CaO | $SiO_3$ | $Al_2O_3$ | MgO | $CaO + SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 55,0 | 18,9 | 0,0061 | 10,18 | 8,0 | 2,52 | 2,39 | 1,27 |

При мікроскопічному вивченні проб агломерату виявилося, що основною фазою агломерату є магнетит, який зустрічається у вигляді трьох морфологічно і генетично різних утворень:

- залишкових зерен руди; вони здебільшого знаходяться у верхній частині агломераційного пирога, де температура спікання невисока і дія її короткочасно. В результаті цього середина великих шматків руди залишається незмінною;
- правильних кубічних кристалів (рис. 2.2), що рівномірно розсіяні в шлакової масі агломерату, і складають основну масу виробничого агломерату (кубічні» кристали магнетиту є результатом перекристалізації результатного речовини в пластичному стані);
- дендритних і глобулярних утворень, що кристалізуються з залізосилікатному розплаву як надлишкова фаза; часто ці виділення являють собою твердий розчин герцинита в магнетит $[Fe\ (Al,\ Fe)]_3O_4$, який за

оптичними властивостями відрізняється від чистого магнетиту більше низькою відбивною здатністю, яка тим нижче, чим більше кількість розчиненого в магнетиті герциніта. Поява твердих розчинів герциніта в магнетиті пояснюється тим, що в ділянках залізосилікатного розплаву, збагаченого залізом і глиноземом, першим кристалізується магнетит, адсорбує з розплаву глинозем, а потім утворюються облямівки, за складом відповідні чистому магнетиту. Ступінчатий процес кристалізації встановлює чітко виражену зональність таких утворень. Тверді розчини $[Fe\ (Al, Fe)]_3O_4$ мають в агломератах локальне поширення, що пояснюється нерівномірним розподілом глинозема в шихті (рис. 2.3)



Рисунок 2.2 - Структура руди у верхній частині агломерату (х300)

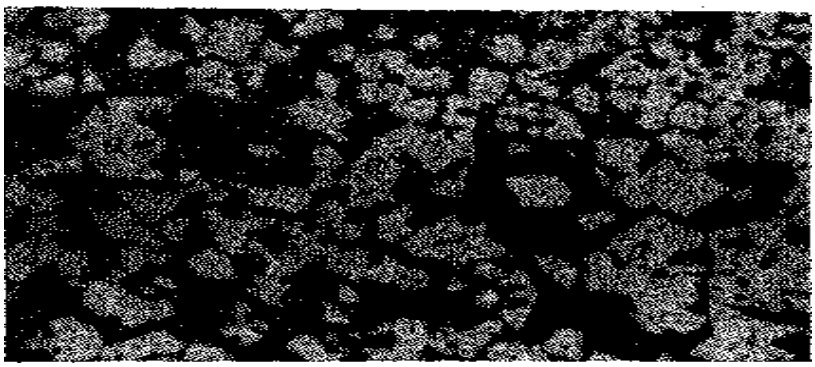


Рисунок 2.3 - Структура кристалів магнетиту *(* х200)

Наявність цих твердих розчинів негативно впливає на металургійні властивості виробничих агломератів.

Гематит $\alpha Fe2O_3$ і маггемит $\gamma Fe_2O_3$ зустрічаються як продукт вторинного окислення і мають обмежене поширення. Вони зазвичай утворюються в місцях, найбільш доступних для проходжень повітря при охолодженні агломерату - в порах і рихлих, сильно тріщинуватих шматках руди, яка не прореагувала, що знаходяться в масі щільного агломерату. У першому випадку гематит спостерігається у вигляді чітких псевдоморфоз по кристалам магнетиту (ширина окисленої зони не перевищує 1-2 мм (рис.2.24)). У другому випадку гематит утворює великі стовпчасті кристали, що перетинають пухку масу вихідної руди (рис. 2.5). Часто кристали гематиту оточені безформними утвореннями магнетиту, що кристалізується по тріщинах руди або утворюючи псевдоморфози із залишковим зерном магнетиту.

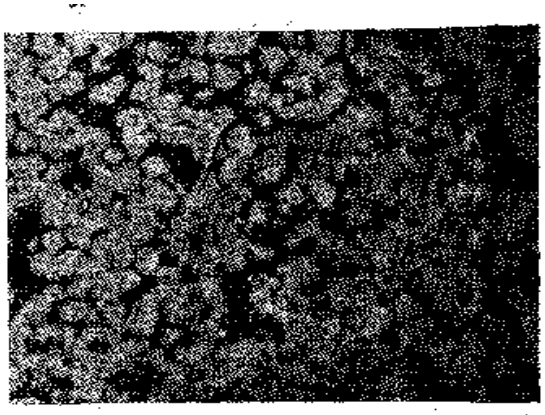


Рисунок 2.4 - Тверді розчини герциніту в магнетит (х900, відбите світло)



Рисунок 2.5 - Стовпчасті кристали гематиту в масі руди (х300)

Ферит кальцію в агломератах зустрічається рідко у зазвичай погано спечених ділянках. Зерна фериту кальцію в минаючому світлі мають яскраво-

красний колір у відбитому світлі вони світло-сірі з різко вираженим ефектом анізотропії. По оптичним властивостям цей ферит можна віднести до однокальцієвого ($CaO\text{-}Fe_2O_3$). У верхніх частинах агломераційного пирога він зустрічається у вигляді скупчень округлих зерен, що повторюють контур початкового шматка вапна. Така форма утворення фериту дозволяє розглядати його як продукт контактної взаємодії вапна з гематитом при короткочасному і невисокому підвищенні температури в шарі шихти.

Найбільш поширеною формою кристалізації фериту є голчасті кристали в склі (рис. 2.6). Вони утворюються у вигляді щільних кірок навколо дендритів магнетиту з охолодженого залізосилікатного розплаву який кристалізуються навколо дрібних утворень магнетиту. У всіх досліджених пробах агломератів ферити кальцію зустрічалися в тісній асоціації з геденбергитом і склом. Асоціація цих мінералів характерна для початкової стадії агломерації, при якій не досягаються умови рівноважної кристалізації, так як реакції між вихідними компонентами (оксидами кальцію, заліза, кремнію і магнію) ще не встигають закінчитися до затвердіння.

Деякі дослідники вважають, що для одержання високоякісного офлюсованого агломерату процес агломерації необхідно вести при знижених температурах, оскільки отримуваний при тому феритний агломерат володіє підвищеними металургійними властивостями.



Рисунок 2.6 - Голчасті кристали фериту кальцію в склі (х200)

Однак при основності агломератів 1,4-1,6 ферити кальцію утворюються тільки у вигляді нерівноважної фази і тому дана рекомендація мало обґрунтована - невелике відхилення в режимі спікання неминуче призводить до істотної зміни мінералогічного складу агломерату і, зокрема, до заміни феритів кальцію залізокальциєвими силікатами, які більш стійкі в агломератах основності 1,4-1,6.

Геденбергит в агломератах спостерігається у вигляді стовпчастих кристалів і перистих утворень буро - зеленого кольору. Для нього характерний слабкий плеохроизм зеленувато-бурого кольору, кут торкання близько 46° і показник заломлення у межах 1,737-1,754; по діаграмі складів це відпо-відає приблизно 50% геденбергитової складової ($CaFeSi_2O_6$) і 50% диопсидової a$MgSi_2O_6$). Таким чином, його хімічний склад виражається формулою Ca(Mg, Fe)$Si_2O_6$.

Феромонтичеліт є найбільш поширеною силікатною фазою в промислових агломератах. Він представлений (рис. 2.7) безбарвними, ксеноморфними зернами з прямим згасанням, позитивним подовженням і є негативним. Показник заломлення дорівнює 1,722 - 1,730.

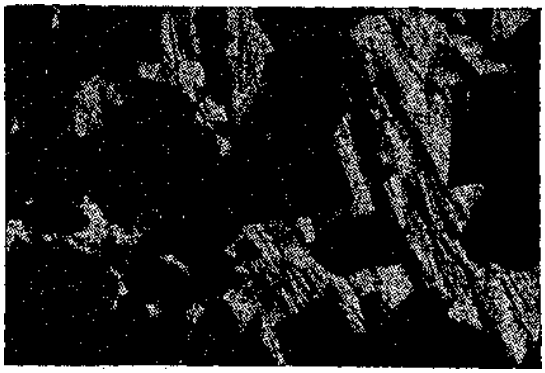


Рисунок 2.7 - Ксеноморфні виділення феромоничеліту

Утворення ортосилікату Ca(Mg,Fe)$SiO_4$ замість металосилікату Ca(Mg, Fe)$Si_3O_6$ і фериту кальцію вказує на більш високу температуру перетворення вихідної шихти, при якій співвідношення компонентів утворення рідкої фази агломератів наближається до характерної для рівноважних умов кристалізації.

Мелиліт виявили у кількох пробах у вигляді дрібних одиничних зерен. Його утворення не є характерним для магнітогорських агломератів. Мабуть, велика частина глинозему встигає увійти до складу твердого розчину $[Fe(Al, Fe)]_3O_4$, який кристалізується з залізосилікатного розплаву, в першу чергу до утворення силікатів.

Процес агломерації протікає в складних фізико-хімічних умовах при нагріванні шихти за короткий час до 1300-1550°С. На підставі вивчення речовинного складу агломерату можна відокремити три чіткі зони мінералоутворення.

Верхня, пухка зона погано спеченого агломерату висотою 1 – 2 см речовино представлена мінералам вихідної шихти: магнетитом, кварцом, кальцитом, гранатом, діопсидом. У макроструктурі видно окремі вкраплення вапна, яке не прореагувало, і ділянки незгорілого коксика.

У зв'язку з короткочасним і невеликим підняттям температури цієї зони в період запалювання палива шихти процеси, що протікають з участю рідкої фази, мають обмежений розвиток. Продуктами цих реакцій є ферит кальцію контактного походження і скло, утворюються лише в місцях найбільшого скупчення палива.

Найбільш характерні для верхньої зони реакції в твердих фазах, зокрема окислення первинного магнетиту шихти до магнетиту і гематиту під час охолодження агломерату; тому серед новоутворень тут переважають магнетит і гематит.

Друга зона (висотою 3 – 4 см) є проміжковою між погано спеченою шихтою і готовим агломератом. Тут вирішальне значення мають реакції, що протікають з участю рідкої фази, що пояснюється більш високими температурами спікання. Реакції в твердих фазах мають підпорядковане значення.

Головний мінерал у другій зоні — магнетит у вигляді кубічних кристалів, серед яких спостерігаються окремі залишкові зерна первинного магнетиту. Зв'язкою служить скло з вставленими в нього дрібними кристалами феритів

кальцію і геденбергиту. Наявність великої кількості скла, що не встигає повністю розкристалізуватися, пояснюється різким охолодженням цього шару агломерату потоком холодного повітря.

Процеси вторинного окислення розвинені нешироко; утворення гематиту і маггеміту спостерігається у країв пор і поблизу залишкових шматків вапна, яке не прореагувало, де холодне повітря може проходити легше всього.

Так як серед маси зерен магнетиту, які перекристалізувалися, залишаються великі включення пухкої вихідної руди, а зв'язкою служить скло, міцність агломерату цієї зони мала.

Третя, і основна зона (висотою 10 см), починається відразу за зоною скловатого агломерату, доходить до самого низу пирога. Вона характеризується максимальними температурами в шарі, що призводить до повного перетворення вихідної шихти. Реакції тут протікають головним чином в рідкому і пластичному стані. Переважаючою фазою агломерату є кубічний магнетит без слідів залишкового магнетиту шихти. Його правильні за формою кристали рівномірно розсіяні в масі агломерату. Оскільки основна маса готового агломерату охолоджується дуже гарячим потоком повітря, кристалізація проходить повільно. При цьому всі компоненти шихти, що знаходяться в рідкому стані, встигають відреагувати між собою і замість фериту кальцію, геденбергиту і скла утворюється полнокристалічний феромонтичеліт; отже, умови кристалізації силікатних складових наближаються до рівноважних [9].

Процеси вторинного окислення для третьої зони не характерні: повітря тут може проходити тільки через пори, а вони, як правило, бувають покриті з поверхні щільною плівкою кристалів феромонтчеліту, що перешкоджає проникненню повітря до кристалів магнетиту.

Таким чином, магнітогорський агломерат має рівномірно-зернисту структуру, де правильні кубічні кристали магнетиту занурені в масу повно кристалічного феромонтичеліту, який є міцної зв'язкою; міцність третьої зони; вище, ніж верхніх.

Температурний режим кристалізації і хімічних реакції між окремими компонентами шихти неоднакові в різних точках агломерату кожної із зон. Так, у другій (скляній) зоні поряд з переважаючими геденбергитом і ферритами кальцію в місцях найбільшого скупчення палива є окремі ділянки кристалів феромонтичеліту. У третій (феромонтичелітовій) зоні спостерігаються скляні ділянки з голчастими кристалами геденбергиту. Таким чином, в процесі спікання умови рівноважної кристалізації зв'язуючої маси не досягаються; не відбувається і повного взаємодії компонентів шихти в рідкому стані і тому агломерат не можна розглядати як продукт кристалізації з однорідного розплаву.

Процес агломерації є процесом не рівноважної кристалізації, в якому одночасно беруть участь речовини в пластичному і рідкому стані; в мікробсязі одного і того ж складу в залежності від температури спікання може утворюватися зв'язка або у вигляді скла з дрібними кристалами геденбергиту і фериту кальцію, або у вигляді полнокристалічного феромонтичеліту.
Повернення цілком складається з агломерату 1-ї і 2-ї зон.

Підвищення міцності верхньої частини пирога до міцності основний (третьої) зони повинно різко підвищити вихід придатного (фракції більше 6 *мм).*

У верхній частині пирога не можливо створити потрібних температурних умов при запаленні тільки одним гірському. Поліпшити запалювання шихти на аглоленте, інтенсифікувати процес спікання і зменшити витрату твердого палива можна, повеличив довжину існуючих або встановивши доповнитільні горни або екрани [9].

При меншому вмісті палива в нижньому шарі низ пирога охороняється від надмірного оплавлення, але при цьому загартування верхній частині і утворення крихкого агломерату все одно відбувається. Оптимальних температурних умов можна досягти лише при підігріві повітря, який подається на першу третину агломашини, у спеціальних повітряних нагрівачах, або спалюванням газу (комбінований нагрів).

Якість агломерату буде підвищуватися також при поліпшенні підготовки шихти, наприклад при усередненні хімічного складу шихти і шихтових компонентів, більш рівномірному змішуванні шихти і більш досконалому способі завантаження її на агломашину, а також при добавках вапна, що є спільною інтенсифікацію процесу агломерації.

Мінералогічний склад готового агломерату визначається температурою і часом протікання процесу: чим вище температура та тривалій процес спікання, тим умови кристалізації зв'язуючої силікатної маси агломерату стають більш до рівноважних.

Встановлено наявність твердого розчину герциніту в магнетиті, із збільшенням концентрації якого знижується відбивна властивість твердого розчину. Утворення цього розчину обумовлено високими температурами процесу, при яких глинозем переходить до складу розплавленої частини агломерату і при кристалізації в першу чергу взаємодіє з оксидами заліза.

Утворення феритів кальцію в агломератах визначається не хімічним складом (при меншій основності), а температурою шихтової суміші.

В агломератах з основністю 1,3 - 1,4 спостерігаються ферити кальцію у вигляді проміжної фази на початку процесу спікання при температурах 1100 – 1200 $^0$С. У готовому агломераті основності 1,3 - 1,4 ферити кальцію заміщуються залізокальцієвими силікатами.

Структура і мінералогічний склад агломерату визначаються режимом охолодження. При різкому охолодженні верхньої частини пирога агломерат має структуру скла внаслідок загартування. При розвантаженні з машини ця частина пирога руйнується і йде до повернення; попадання такого агломерату в доменну піч викликає утруднення проходу газів. Нижні шари агломерату, охолоджувані підігрітим повітрям, мають кристалічну будову і більш високу міцність.

Властивості агломерату середньої частини пирога (по висоті) близькі до оптимальним для доменної плавки.

Підігрів або комбінований нагрівання повітря спалюванням газу дозволить підвищити міцність верхньої частини пирога до міцності агломерату середніх верств. При цьому слід очікувати підвищення виходу фракції більше 6 м [9].

## 2.3 Вплив температури спікання на мінералогічний склад і металургійні властивості агломерату

При спіканні магнетитових руд для отримання агломерату з високою міцністю необхідні певні температури в шарі, тривала витримка при цих температурах і уповільнене охолодження гарячим повітрям, що забезпечує більш повне взаємодія між компонентами шихти і утворення повнокристалічної феромонтичелітової зв'язки. В тих же умовах підвищується і вихід придатного, так як верхня зона пирога зі агломератом зі склом звужується.

Під час дослідження проводили по два паралельних спікання. У кожному досліді вимірювали температуру шару в трьох точках по висоті пирога (становила 220 мм) хромель-алюмелевой термопарою на відстанях 20; 70 і 115 мм від поверхні колосників. Кожна термопара використовувалася лише один раз і витримувала температуру до 1300 °С. Термопари виготовлялися з дроту діаметром 0,8 - 1,0 мм; ділянка, яка поміщена в шар шихти, захищали двоканальної порцелянової соломкою, а гарячий спай обмуровували вогнетривкою масою (80% безводній окису алюмінію і 20% вогнетривкої глини). Після висихання обмазку спаю змочували тонким шаром рідкого скла [11].

Спечений пиріг скидали на деко, через 10 хв. розбивали плитою, а через 30 хв. розбирали по фракціях.

Фракцію більші за 15 мм вважали придатним агломератом, а всі інші - поверненням. Механічну міцність агломерату (барабанне число) визначали по виходу фракції менше 5 мм при барабанному випробуванні придатного

агломерату. Зразки для мінералогічного дослідження відбирали безпосередньо у спаю термопари після скидання пирога на деко.

При підвищенні вмісту вуглецю температуру в нижніх шарах шихти, яку спекли зростала (табл. 2.3). У середніх шарах агломерату ця тенденція проявлялася менш чітко і зовсім не спостерігалась в верхніх шарах: тут при збільшенні затримання вуглецю від 3,5 до 4,0 % температура спікання знизилася від 1320 до 1305 °С. Це можна пояснити погіршенням газопроникності шихти при збільшеній кількості коксику в ній. У нижній частині пирога при 3,0 і 3,5 % С температура запроменіла більш низькою, ніж в середній, а при 3,0 % С навіть нижче, ніж у верхній частині спікається агломерату; очевидно, при нестачі палива в аглошихті колосники надають сильну охолоджувальну дію на нижній шар пирога [11].

Таблиця 2.3 - Залежність температури по висоті зразка від вмісту коксику в шихті

| Зона зразка | Зміст вуглецю, % | Температура, °С |
|---|---|---|
| Верх пирога | 3,00 | 1200 |
| | 3,50 | 1350 |
| | 4,50 | 1450 |
| Середина пирога | 3,00 | 1319 |
| | 3,50 | 1330 |
| | 4,50 | 1300 |
| Низ пирога | 3,00 | 1340 |
| | 3,50 | 1375 |
| | 4,50 | 1400 |

Всі досліджені агломерати складалися з гематиту ($Fe_2O_3$), магнетиту ($Fe_3O_4$), однокальцієвого фериту ($CaFe_2O_4$), геденбергиту ($CaFeSi_2O_6$), феромонтичеліту [$Ca(Fe, Mg)SiO_4$] та скла; в окремих випадках зустрічався мелиліт; в не спеченій частині агломерату були вапно і кокс.

Агломерати, спечені при різному співвідношенні палива, характеризувалися різною завершеністю процесу спікання і тому відрізняються за мінералогічним складом, структурою і металургійним властивостями.

При спіканні магнетитової руди з 3,0% С (досвід I) агломерат отримують пухким. Агломерати, спечені з 3,5% С, за мінералогічним складом були в основному такими ж, але з меншою кількістю гематиту і скла, збільшеним вмістом магнетиту і геденбергиту; в них з'являлися також невеликі кількості феромонтичеліту; все це свідчить про більш високі температури процесу та більш глибокому перетворення вихідної шихти. Замість скла тут з'являвся крупнокристалічний геденбергит; його голчасті агрегати поряд зі склом грали роль зв'язки і заповнювали простір між кристалами магнетиту. Кристали феритів кальцію тут кілька укрупнювалися і з'являлися скелетні форми росту феромонтичеліту. Стекло заповнювало проміжки між усіма цими мінералами [11].

Агломерати, спечені з 4,0% С, зазнавали найбільш глибокі фазові перетворення. Мінерали вихідної шихти в дуже невеликій кількості зустрічалися лише у верхній частині пирога. Вся рудна частина таких агломератів була представлена правильними октаедричними кристалами магнетиту і в меншій мірі дендритними і глобулярними утвореннями твердого розчину герциниту в магнетит. Серія досліджених агломератів з 4% С за своїм мінералогічним складом, структурою і металургійними властивостям була найближче до виробництва агломерату комбінатом.

Зміна речовинного складу агломерату із збільшенням вмісту вуглецю в шихті цілком закономірно й цілком визначається змінами температурно-теплового режиму в зоні спікання.

При недостатньо високій температурі в шарі (3,0% С) вихідні компоненти нерудної частини шихти ($SiO_2$, CaO, MgO і FeO) не встигають повністю прореагувати між собою в рідкому стані і кристалізуються у склі у вигляді нерівноважних (для даного співвідношення компонентів) мінеральних

фаз - багатого кремнеземом геденбергиту і фериту кальцію, не містить кремнезему.

З підвищенням температури спікання (4,0% С) вихідні компоненти шихти більш повно взаємодіють в рідкому і пластичному стані і в результаті виходить мономінеральна зв'язка, більш близька за складом до рівноваги: відокремлюється повнокристалічні агрегати феромонтичеліту.

При вмісті 3,5% вуглецю в шихті склад зв'язки виявляється перехідним: феромонтичеліт з'являється поряд з феритами кальцію і геденбергитом, укладеними в склі.

Зміни в мінералогічному складі безпосередньо впливають на основні металургійні властивості агломератів. Наявність скловатих зв'язків в агломераті з 3,0% С зумовлює його низьку міцність (барабанне число 43,8 - 47,3%). При появі повнокристалічної зв'язки у вигляді агрегатів феромонтичеліту міцність різко зростає (до 34,5 - 35,2%).

Зі збільшенням температури спікання все більша кількість тривалентного заліза встигає відновитися до двовалентного стану і в водночас розчинитися в силікатному розплаві, кількість якого також збільшується. Чим більше утворюється і переходить у розплав катіонів $Fe^{2+}$, що утворюють при охолодженні силікати заліза і кальцію, тим менше залишається в агломераты легковідновлювальних оксидів заліза. Таким чином, вміст закису заліза залежить від темпіратурно-теплового режиму спікання і окислювально-відновлювальних умов, які визначають властивості агломерату. Підвищення кількості закису заліза пов'язано з підвищенням температур спікання, збільшенням відновного потенціалу і зміною умов охолодження.

Так, агломерати з 3,0% С, що складаються з великої кількості залишкових шматків руди, локально пов'язаних виділеннями скла, мають у своєму складі мінімальна кількість закису заліза (14,3-15,3%); невисокі температури спікання цих агломератів і, отже, слабке розвиток в них рідкої фази, а також високий окислювальний потенціал, що значно обмежує можливість розчинення закису заліза. Завдякі пухкій структури таких

агломератів і невеликого вмісту силікатною зв'язки з розчиненою в ній закисом заліза відновлювальність виходить високою (50,8-52,6%).

З підвищенням частки зв'язки з кристалічного феромонтичеліту вміст закису заліза значно зростає (до 19,2—19,9%) і при наявності високих температур в шарі і розвитку великої кількості рідкої фази закис переходить з рудної частини шихти в силікатну зв'язку агломерату.

У мінералогічному відношенні виробничий агломерат відрізнявся від досліджувального з 4,0% С з більш високим вмістом феромонтичеліту і меншим геденбергитом, феритів кальцію і скла.

Міцність агломерату більшою мірою визначаються його структурою і мініралогічним складом, ніж вмістом закису заліза, тим більше, що в сумарному змісті двовалентного заліза по хімічному аналізу не розрізняється закис заліза, що входить в окисну фазу магнетиту і силікатні фази агломератної зв'язки.

Агломерати, в мікроструктурі яких серед маси новоутворень магнетиту зустрічаються залишковіе зерна шихти і зв'язкою служать локальні виділення скла з дрібними кристалами геденбергиту та феритів кальцію, характеризуються низькою щільністю (у зв'язку з відсутністю міцної зв'язки). Локальні осередки скла не забезпечують достатньої міцності, та, крім того, скло при транспортуванні агломерату легко руйнується від ударів. Така структура виходить в рази недостатньої кількості палива в цілому в шихті й у верхніх частинах пирога, тобто при короткочасному і невисокому підйомі температури та швидкому охолодження холодним повітрям.

Агломерати, в мікроструктурі яких переважає перекристалізований магнетит, а зв'язкою служить розвинуте повсюдно скло з укладеними в ньому дрібними кристалами геденбергиту та феритів кальцію, характеризуються низькою щільністю (внаслідок крихкості скла, який є зв'язкою між рудними зернами) і низькою відновлювальністю (у зв'язку з утворенням тонких плівок скла, що покривають зерна магнетиту і перешкоджають доступу газу-відновника до окислів заліза). Такий агломерат виходить при швидкому

підйомі температури, короткочасної витримки при максимально досягнутої температурі та охолодженні, коли вихідні компоненти не встигають повністю прореагувати між собою і швидко застигають у вигляді скла. Ці умови можливі при спіканні верхній третини агломераційного пирога, агломерат звідси розбивається вже при падінні з стрічки і йде повернення, а частково надходить у доменну піч, погіршуючи показники її роботи [11].

Дослідження показало, що для отримання агломерату з високою міцністю, стійкістю до зберігання потрібні одні і ті ж умови і поєднувати ці властивості цілком можливо. Так, агломерат, що складається з кристалів магнетиту і кристалічного цементу, одночасно є і легковідновлювальним і високоміцним. Такий агломерат не руйнується при охолодженні і зберіганні.

Більш високі температури спікання небажані, так як це може призвести до розчинення в силікатному розплаві значних кількостей рудних складових і, крім того, до утворення твердих розчинів герцениту в магнетит.

Знижені температури спікання теж небажані - при цьому не вдається досягти повної перекристалізації вихідного магнетиту в кристалічний каркас. Решта великих шматки незмінної руди будуть знижувати міцність агломерату. Силікатні складові не зможуть повністю прореагувати між собою і пройдуть через рідкий або в'язкий стан тільки в місцях найбільшого скупчення палива. У зв'язку з цим зв'язка, що утворюється за складом буде далека від однорідної і при швидкому охолодженні дасть перекристалізоване скло, по якому надалі почнеться руйнування агломератів.

При спіканні офлюсованого агломерату ($CaO/SiO_2$ =1,3 4 - 1,4) з добавкою доломіту 2,4 - 2,8% MgO в агломераті зміцнюючи зв'язкою між зернами магнетиту є феромонтичелит, який утворюється в середній і нижній частинах пирога.

Для поліпшення металургійних властивостей агломерату і підвищення продуктивності агломашин доцільно застосовувати підігрів повітря, яким подувають агломерат [11].

## 2.4 Вплив фракційного складу шихти на ефективність роботи домни

Щоб дослідити вплив фракційного складу агломерату на основні техніко – економічні показники доменної печі, на ЕОМ були прораховані варіанти з різним фракційним складом агломерату (табл. 2.4):

Таблиця 2.4 - Фракційний склад поромислового агломерату

| № | +80 | 80-60 | 60-40 | 40-25 | 25-10 | 10-5 | -5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| вих | 1,1 | 1,3 | 2,2 | 8,0 | 34,4 | 38,3 | 14,7 |

Варіанти для розрахунку були складені наступному чином:

Варіант 1: розрахунок з фракційним складом агломерату комбінату «Запоріжсталь» (табл. 2.4)

Варіант 2: приймаємо вміст фракції – 5мм в агломераті – 10%

Варіант 3: приймаємо вміст фракції – 5мм в агломераті – 5%

Варіант 4: приймаємо вміст фракції – 5мм в агломераті – 0 % (повний висновок дрібниці з агломерату)

Варіанти розрахунку на ЕОМ з різним фракційним складом агломерату наведені в таблиці 2.5.

Основні техніко - економічні показники роботи доменної печі корисним об'ємом V = 1513 м$^3$, отримані за допомогою ЕОМ, наведено в таблиці 2.5.

Маючи значення КИПО (табл. 2.5) порахували продуктивність доменної печі №4 по формулі:

$$\text{Р} = \frac{V\text{п}}{\text{КИПО}} = \frac{1513}{0{,}577} = 2622 \text{ т/сут.}$$

Таблиця 2.5 - Варіанти розрахунку на ЕОМ з різним фракційним складом агломерату

| № варіанту | +80 | 80-60 | 60-40 | 40-25 | 25-10 | 10-5 | -5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1,1 | 1,3 | 2,2 | 8,0 | 34,4 | 38,3 | 14,7 |
| Зменшення фракції – 5мм | | | | | | | |
| 2 | 1,2 | 1,4 | 2,3 | 8,4 | 36,1 | 40,1 | 10 |
| 3 | 1,2 | 1,4 | 2,4 | 8,9 | 38,1 | 42,4 | 5 |
| 4 | 1,3 | 1,5 | 2,6 | 9,4 | 40,3 | 44,9 | 0 |

Основні техніко - економічні показники роботи доменної печі корисним об'ємом V = 1513 м$^3$, отримані за допомогою ЕОМ, наведено в таблиці 2.6

Маючи значення КИПО (табл. 2.6) порахували продуктивність доменної печі №4 по формулі:

$$\text{Р} = \frac{V\text{п}}{\text{КИПО}} = \frac{1513}{0{,}577} = 2622 \text{ т/сут.}$$

Ми визначили продуктивність печі за вихідними даними, тобто фракційний склад не змінювався і кількість дрібниці – 5 мм в агломераті було 14,7% (табл.2.6).

Тепер порахуємо продуктивність печі при зміні агломераті дрібниці – 5мм. При зменшенні дрібниці – 5мм до 10% продуктивність печі буде:

$$\text{Р} = \frac{1513}{0{,}560} = 2702 \frac{\text{т}}{\text{сут}}.$$

Зменшення дрібниці на 4,7% дало можливість підвищити продуктивність печі на 2702 – 2622 = 80 т/добу або на 3,1%.

При зменшенні дрібниці – 5мм до 5% продуктивність печі зростає до:

$$P = \frac{1513}{0{,}535} = 2828 \text{ т/добу},$$

тобто на 2828 – 2622 = 206 т/добу або на 7,86%.

Таблиця 2.6 - Техніко - економічні показники роботи доменної печі при зменшенні фракції -5 мм в агломераті

| Умовне позначення | Параметри | Заводський агломерат | Кількість фракції -5мм | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 14,7% | 10% | 5% | 0% |
| q 4 | Обсяг шматків +80мм | 0,027 | 0,027 | 0,028 | 0,028 |
| q 5 | Обсяг шматків 80-60мм | 0,098 | 0,099 | 0,099 | 0,099 |
| q 6 | Обсяг шматків 60-40мм | 0,29 | 0,291 | 0,291 | 0,292 |
| q 7 | Обсяг шматків 40-25мм | 0,206 | 0,208 | 0,211 | 0,213 |
| q 8 | Обсяг шматків 25-10мм | 0,179 | 0,188 | 0,198 | 0,209 |
| q 9 | Обсяг шматків 10-5мм | 0,255 | 0,264 | 0,276 | 0,288 |
| q 10 | Обсяг шматків -5мм | 0,082 | 0,061 | 0,036 | 0,008 |
| q 11 | Сумарна поверхня | 1857,573 | 1487,019 | 1055,617 | 561,833 |
| q 13 | Еквівалентний, мм | 2,066 | 2,581 | 3,636 | 6,832 |
| q 24 | КІПО | 0,577 | 0,560 | 0,535 | 0,492 |
| q 25 | Іх | 817,929 | 842,495 | 881,78 | 958,932 |
| P | Добова пр-ть. т/доб | 2622 | 2702 | 2828 | 3075 |

Якщо зменшити кількість дрібниці до 0, тобто повністю вивести дрібниця зі складу агломерату, то продуктивність печі збільшиться до:

$$P = \frac{1513}{0{,}492} = 3075 \text{ т/сут},$$

або на 453 т/добу тобто на 17,3%.

Таким чином, повний висновок дрібниці з агломерату дає істотний приріст продуктивності печі.

Розрахунки показують, що перше зниження дрібниці в агломераті на 4,7% сприяло підвищенню продуктивності печі на 3,1%. Зменшення дрібниці в агломераті до 5% (тобто загальне зниження на 9,7%) підвищує продуктивність печі на 7,86% (в даному випадку зниження дрібниці на 5% з 10 до 5% підвищило продуктивність печі на 7,86 – 3,1 = 4,76%). Повний висновок дрібниці з шихти призводить до збільшення продуктивності печі на 17,3%.

Отже, продуктивність печі підвищується не пропорційно зниженню дрібниці в агломераті.

Так, перше зниження з 14,7 до 10% (на 4,7%) підвищило продуктивність печі на 3,1%, тобто на кожен 1% зниження дрібниці, продуктивність печі зросла на 3,1/4,7 = 0,66%.

Подальше зменшення дрібниці до 5% тобто на 14,7 – 5 = 9,7% підвищило продуктивність печі на 7,86% або на кожен 1% зниження дрібниці продуктивність печі збільшується на 7,86/9,7 = 0,81%.

Повний висновок дрібниці з агломерату дає найбільший ефект – продуктивності печі зростає на 17,3%. У цьому випадку на кожен 1% зменшення дрібниці – 5мм продуктивність печі зростає на 17,3/14,7 = 1,2%.

За даними наведених розрахунків побудували залежність продуктивності печі від кількості дрібниці – 5мм в агломераті.

Розглянуте вплив дрібниці на продуктивність печі можна пояснити зміною еквівалентного діаметру каналів між частинками шихтових матеріалів.

Зменшення дрібниці в агломераті з 14,7 до 10% сприяло збільшенню dекв з 2,066 до 2,581 мм т.е, на 2,581 – 2,066 = 0,515 мм.

Зменшення дрібниці в агломераті з 10,0 до 5% призвело до збільшення dекв до 3,636мм тобто на 3,636 – 2,066 = 1,57 мм

Зменшення дрібниці в агломераті з 5,0% до 0% підвищило $d_{екв}$ до 6,832 мм, тобто на 6,832 – 2,066 = 4,77 мм

При зменшенні дрібниці з 14,7 до 10% на кожен 1мм збільшення dекв, продуктивність збільшується на 3,1% / 0,515 = 6%. При зменшенні дрібниці з 14,7 до 5% на кожен 1мм збільшення $d_{екв}$, продуктивність печі збільшується на 7,86% /1,57 = 5,0%

При зменшенні дрібниці в шихті поліпшується газопроникність шихти, збільшується кількість повітря, що вдихається, відповідно збільшується продуктивність доменної печі.

При зменшенні дрібниці з 14,7 до 0% на кожен 1 мм збільшення $d_{екв}$ продуктивність печі збільшується на 17,3 % / 4,77 = 3,6%

Таким чином при зменшенні дрібниці в агломераті з 14,7 до 10% зростання $d_{екв}$ на 1 мм призводить до зростання продуктивності печі на 6,0%.

- при зменшенні дрібниці з 10,0 до 5,0%, на 5%;
- при зменшенні дрібниці з 5,0 до 0% на 3,6%.

# ВИСНОВКИ

1. Проведено повний аналіз доменного процесу, встановлено механізми та способи вдосконалення процесу, спрямовані на економію шихтових матеріалів та прискорення фізико-хімічних процесів.

2. Розглянуто методи одержання та встановлені механізми підвищення якості кускових рудних компонентів доменної шихти. Встановлено перевагу агломерату по відношенню до окатишів.

3. Розглянуто механізми процесу спікання агломерату, встановлено раціональні температурно-часові режими та газодинамічні механізми проведення спікання.

4. Визначено особливості механізмів спікання та умови рівномірного розподілу хімічного складу за висотою пирога. Встановлено вплив температури на формування властивостей агломерату та режими доменного процесу.

# 3 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СОРТОВАНОГО АГЛОМЕРАТУ НА МЕТАЛУРГІЙНИХ КОМБІНАТАХ

## 3.1 Досвід застосування сортового агломерату

В умовах серійного виробництва проведено дослідження роботи доменної печі на сортованому агломераті [5]. Для підвищення показників роботи доменних печей важливо знизити кількість дрібниці в шихті. Необхідно також застосовувати офлюсований агломерат, що дозволяє повністю видалити сирої вапняк з шихти доменної печі. Офлюсований агломерат став на доменних печах основним компонентом залізорудної частини шихти і займає майже половину об'єму печі. Тому важливе значення набуває ситовий складу цього агломерату.

У доменних печах сучасних комбінатів проплавляють агломерат з основністю 1,15 ситовий складу якого наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Фракційний склад агломерату дослідного виробництва

| Фракції, мм | Кількість фракції, % | Фракції, мм | Кількість фракції, % |
|---|---|---|---|
| + 100 | 1,1 | 40 – 25 | 20,3 |
| 100 – 80 | 1,3 | 25 – 10 | 42,7 |
| 80 – 60 | 2,0 | 10 – 5 | 14,3 |
| 60 – 40 | 9,4 | – 5 | 8,9 |

З наведених даних видно, що доменні печі отримують з офлюсованим агломератом багато дрібниці, яка шкідливо відбивається на розподілі матеріалів і газового потоку в печі, підвищує витрату коксу і знижує інтенсивність плавки. Можна з упевненістю сказати, що видалення дрібниці, наприклад, фракції – 5 мм, з офлюсованого агломерату перед завантаженням

його в доменну піч дозволить значно збільшити продуктивність доменних печей і знизити витрату коксу.

В експериментальних умовах агломерат після видачі з чашевых охолоджувачів надходить на вібраційний грохот з відсівом фракції -5 мм. Однак при русі до доменних печей агломерат відчуває кілька перевантажень, при яких додатково подрібнюється, в результаті чого в ньому зменшується вміст великих фракцій і знову утворюються дрібні фракції. Як видно з таблиці, агломерат, відібраний з бункерів, містить близько 9% фракції -5 мм, що хоча і менше, ніж на інших заводах, але все ж перешкоджає інтенсифікації плавки. Видалення дрібниці з офлюсованого агломерату є істотним елементом сортування сировинних матеріалів, однак не вичерпує всіх можливостей цього методу. Помітного підвищення газопроникності шихти можна досягти за рахунок поділу агломерату по величині шматків і роздільної подачі в піч різних класів.

Завантаження окремими подачами руд різних фракцій сприятливо впливає на характер розподілу матеріалів на колошнику. При роздільної подачі руда дрібного класу не буде розташовуватися переважно біля стін шахти, а буде зсипатиметься до осі, а велика руда, що подається окремо, буде розподілятися більш рівномірно по перерізу колошника, не зосереджуючись в центрі. Роздільна завантаження різних за крупністю класів усуне зосередження біля стін дрібниці, а в осі – великих шматків, дозволить більше завантажити центр шахти і розпушити периферію, що в свою чергу поліпшить розподіл газового потоку по перерізу шахти. Це особливо важливо для роботи потужних доменних печей з великою корисною висотою і великими поперечними розмірами.

Найбільший ефект від поділу матеріалу на класи крупності вийде при різкій різниці у величині дрібних і великих шматків. Якщо ця різниця буде низька, тоді можливо розділити шихту на менше число класів. Цей факт полегшує задачу сортування.

Рівномірність опору проходу газів по перетину печі може бути досягнута при відносно найбільшого розміру шматків найменшого не більше ніж 2 : 1, а при менш суворих вимогах – 4 : 1.

Фахівці пропонують, видаливши з офлюсованого агломерату дрібниця нижче 5 мм, отримати в основній масі шматки агломерату крупністю 5 – 80 мм. При поділі такого агломерату на два класу крупністю 5 – 25 мм та 25 – 80 мм, сегрегація за розміром шматків при завантаженні агломерату в піч буде зведена до мінімуму.

Про доцільність переходу до сортування агломерату по крупності свідчить досвідчена плавка, проведена на Череповецькому металургійному комбінаті. Для поділу агломерату на класи +25 – 25 мм були пристосовані вібраційні грохоти аглосортировки, призначені для відсіву дрібниці від агломерату після видачі його з охолоджувачів. Після розсіву агломерату на грохоті з зазором між колосниками 25 мм у великому класі вміст фракції + 25 мм склало понад 79 % ( в середньому за весь період дослідів). Однак при транспортуванні і перевантаженнях агломерат подрібнювався, в результаті чого вміст фракції + 25 мм у великому класі агломерату, взятого з бункерів доменної печі, знизився, а зміст дрібниці (-5 мм) підвищилося. Таким же чином змінився ситовий склад дрібного класу агломерату (табл.3.2.).

Таблиця 3.2 - Ситовый складу агломерату в дослідних плавках

| Тип складу | Вміст фракцій, (мм) | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | +80 | 80-60 | 60-40 | 40-25 | 25-15 | 15-10 | 10-5 | 5-3 | 3-0 | +25 | -5 |
| Великий, % | 1,8 | 1,9 | 11,3 | 25,9 | 23,5 | 13,3 | 11,7 | 3,8 | 6,8 | 40,9 | 10,6 |
| Дрібний, % | немає | не-має | не-має | 9,9 | 34,7 | 23,9 | 19,7 | 5,0 | 6,8 | 9,9 | 11 |

Дослідна плавка на сортированому агломераті тривала 20 діб. Застосування сортованого агломерату в дослідних умовах дозволило знизити

витрату коксу (сухого) на 2,5% з 596 до 581 кг/т і підвищити продуктивність печі на 2,4%. При кількісній оцінці результатів дослідів слід врахувати, що вони отримані на печі, яка працювала до дослідів з самим низьким витратою коксу в порівнянні з іншими доменними печами. У відносно короткий досвідчений період не можна було відпрацювати режим плавки, використовує всі переваги від сортування агломерату. Безсумнівно, при переході до постійної роботи на сортированому агломераті і створення умов для збереження заданої класифікації до завантаження агломерату в скіп показники плавки покращаться. Для виконання останньої умови необхідно розташувати сортування агломерату можливо ближче до місця його споживання.

Найбільш доцільно розсівати агломерат по крупності і видаляти з нього дрібниця відразу ж після видачі його з бункерів, перед завантаженням в скіп. У цьому випадку задана класифікація агломерату по крупності краще збережеться за рахунок зменшення числа перевантажень після сортування. Деякий подрібнення агломерату буде відбуватися і при залишилися перевантаженнях. Однак ступінь руйнування агломерату при цьому буде незначною, так як зі всієї маси агломерату доходить до бункерів в кусковому стані найбільш міцна частина. Механічна міцність агломерату, взятого з вагонів, завжди вище міцності агломерату після видачі з агломашин.

З результатів дослідної плавки на сортованому агломераті випливає, що для великих печей агломерат потрібно розділяти по крупності перед завантаженням його в скіп, при цьому сортування на аглофабриці стає непотрібною [5].

### 3.2 Якість сортованого агломерату

Для відсіву дрібниці з агломерату на решітці віброгрохотів сортування необхідно зазор збільшити з 9 до 11 мм, а для виділення дрібного класу зменшити з 25 до 17 мм.

В результаті ситовий складу великого і дрібного класів агломерату покращився (табл. 3.3); вміст дріб'язку – 5 мм знизилося в них на 3 - 4%.

Таблиця 3.3 - Ситовый складу великого (чисельник) і дрібного (знаменник) класів агломерату

| 100-150 | 80-100 | 60-80 | 40-60 | 25-40 | >25 | 15-25 | 10-15 | 5-10 | 3-5 | -3 | -5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,6/0 | 1,2/0 | 4,6/0 | 10,6/0 | 27,6/4 | 44,8/6 | 28,4/26 | 12,5/39,8 | 8,3/24,8 | 2,1/4,2 | 3,9/3,2 | 6,0/7,4 |
| 0,4/0 | 1,0/0 | 2,6/0 | 8,4/0 | 26,7/8 | 39,1/8 | 29,4/26 | 15,8/38,6 | 9,1/26,2 | 2,4/4,6 | 4,2/3,4 | 6,6/8,0 |

Проте великий клас все ж не складався повністю з шматків крупніше 15-25 мм (найбільшого розміру шматків дрібного класу) і не відрізнявся від-сортованого агломерату лише більш високим вмістом фракції 10 – 5 мм і кілька меншим кількістю дрібниці. За хімічним складом (табл. 3.4) дрібний клас агломерату відрізнявся від великого лише кілька більш високим вмістом закису заліза.

Вихід класів сортування агломерату залежить від ходу агломераційного процесу та інших факторів. Ємність бункерів доменного цеху дозволяла витримувати заданий співвідношення між класу агломерату протягом лише декількох діб; до того ж це співвідношення штучно міняли для вивчення його впливу на хід печі. За окремі добу частка; великого агломерату коливалася від 60 до 80%, а в середньому за весь дослідний період склала 68,5% [6].

Таблиця 3.4 - Хімічний склад великого (чисельник) і дрібного (знаменник) класів агломерату

| Періоди | Вміст, % | | | | Основність |
|---|---|---|---|---|---|
| | Fe | FeO | CaO | $SiO_2$ | $CaO/SiO_2$ |
| 10.04-25.04 | 51,1/51,1 | 15,8/16,8 | 14,7/14,4 | 13,3/13,0 | 1,11/1,11 |
| 26.04-12.05 | 49,82/49,9 | 17,58/18,60 | 15,34/15,10 | 13,85/13,90 | 1,11/1,09 |

### 3.3 Вплив основності на якість агломерату

Практика роботи доменних печей різних заводів показує, що при введенні в доменну шихту офлюсованого агломерату значно покращуються показники їх роботи: збільшується продуктивність, скорочуються витрати коксу і винос пилу. Тому подальшим поліпшенням якості агломерату стало підвищення його основності [7].

Збільшення основності агломерату з 0,9 до 1,24 - 1,26 набагато поліпшило техніко-економічні показники доменної плавки за рахунок виведення вапняку з доменної шихти і поліпшення процесу шлакоутворення. Однак з підвищенням основності агломерату відбулося зниження його міцності і погіршення гранулометричного складу. Цей факт певною мірою негативно вплинув на роботу доменних печей (табл. 3.5). Ці дані переконливо показують, що з ростом основності агломерату зменшився середній діаметр шматка і збільшилася в ньому кількість дрібниці фракцій – 5мм, погіршується розподіл матеріалів і газового потоку, підвищується витрата коксу і знижується інтенсивність плавки [8].

Таблиця 3.5 - Зміна фракційного складу агломерату від його основності

| Основність | Фракційний склад, % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | - 5 | 5 – 10 | 10 – 25 | 25 – 40 | + 40 |
| 0,1 | 6,0 | 11,3 | 10,7 | 4,6 | 67,4 |
| 0,81 | 4,2 | 11,0 | 26,2 | 7,5 | 51,1 |
| 0,92 | 7,7 | 24,6 | 30,5 | 19,6 | 17,6 |
| 1,00 | 14,8 | 42,7 | 29,4 | 5,3 | 7,8 |
| 1,13 | 17,8 | 30,5 | 41,8 | 4,4 | 5,5 |
| 1,24 | 23,0 | 34,9 | 32,1 | 5,5 | 4,5 |
| 1,25 | 22,9 | 40,2 | 28,4 | 4,7 | 3,8 |
| 1,26 | 23,5 | 45,6 | 23,1 | 4,8 | 3,0 |
| 1,24 | 21,0 | 43,5 | 25,5 | 5,7 | 4,3 |
| 1,25 | 17,7 | 42,8 | 30,3 | 5,1 | 4,3 |
| 1,24 | 13,7 | 38,2 | 38,3 | 5,4 | 4,4 |
| 1,26 | 13,0 | 37,5 | 34,2 | 8,2 | 7,1 |
| 1,25 | 12,0 | 41,6 | 34,8 | 6,4 | 5,2 |
| 1,26 | 11,8 | 37,3 | 34,2 | 8,2 | 8,5 |

Помітне підвищення газопроникності шихти досягається за рахунок видалення дрібниці з офлюсованого агломерату по величині шматків на класи з роздільною подачею їх у піч.

Для поліпшення техніко-економічних показників доменної плавки необхідно підвищити міцність аглоспеку.

Одним із способів зміцнення агломерату є збільшення висоти спікається шару шихти. Це викликає при незмінній витраті твердого палива підвищення температурно-теплового рівня процесу, в результаті чого збільшується міцність аглоспеку і поліпшується гранулометричний склад агломерату.

Крім того, високий шар більше накопичує теплової енергії і середня температура його підвищується за рахунок більш повної віддачі тепла газами. Це позитивно впливає на швидкість охолодження і кінцеву температуру готового спека.

Із збільшенням висоти шару швидкість охолодження агломерату зменшується, агломерат сходить з палет більш гарячим, а це, в свою чергу, зменшує температурний напругу і тим самим забезпечує підвищену міцність агломерату [7].

### 3.4 Відпрацювання фракційного складу агломерату

У зв'язку з недостатньою ефективністю застосовувався у дослідних плавках способу поділення агломерату на класи крупності на вібраційних грохотах і руйнуванням його при транспортуванні від вагонів до вагів в доменні печі потрапляє значна кількість дрібниці.

Руйнування агломерату (особливості великого класу) спотворює задане співвідношення класів та знижує можливий ефект застосування сотованого агломерату.

Перевантаження сортованого агломерату слід звести до мінімуму, а самє сортування, як показали досліди, вести після видачі його з бункерів доменної печі; ефективність класифікації при цьому підвищиться, тому що до вагон-вагів в кусковому стані доходить найбільш міцна частина агломерату.

Досвід Череповецького заводу показав, що в нормальних умовах досить мати запас агломерату в бункерах на 7-8 год.

Збільшувати кількість бункерів на випадок довгої зупинки агломашин недоцільно, так як запас на 1-2 дні можна мати на рудному дворі. Деякє руйнування при цьому агломерату не позначиться на роботі печі, оскільки дріб'язок з нього відсівається до завантаження в скіп.

Так як при транспортуванні агломерату після його сортування спостерігається значне здрібнення великого класу (+25 мм), у зв'язку з чим при видачі вагон-вагів великий клас містить ті ж фракції, що і несортований агломерат, лише з дещо вищим вмістом шматків крупніше 25 мм, - слід сортувати агломерат не на аглофабриці, а в доменному цеху після видачі коксу з бункерів доменної печі.

Дрібний клас (-25 мм) являє собою добре класифікований продукт. Сортування агломерату необхідно від кожного класу ретельно відсівати дрібниця -5 мм.

Сортування агломерату по крупності призвела до падіння перепаду тиску газу в верхній частині печі на одну третину, незважаючи на збільшення на 20% відносної частки прямих подач в циклі загрузки. Це дозволило, без зниження інтенсивності роботи печі досягти більш рівномірного відносини навантажень агломерату і коксу по перетину печі і поліпшити використання енергії газів зменшення з підвищенням питомої витрати коксу; перепад тиску газу в нижній частині печі не змінився.

Роздільна завантаження великого і дрібного класів агломерату без додаткового відсіву дрібниці супроводжувалася зниженням питомої витрати коксу в середньому на 2,3% при незмінною інтенсивності плавки (985 кг/м$^3$) і підвищення порушенням продуктивності печі також на 2,3%.

Ці результати мають істотно покращитися при більш досконалому поділі агломерату на класи крупності з одночасним відсівом дрібниць [6].

### 3.5 Вплив фракційного складу на газопроникність агломераційної шихти

Агломераційна шихта [3] як зернистий матеріал класифікується за гранулометричним складом на грубозернисту (2 – 15мм), дрібнозернисту (0,05 – 2 мм) і порошкоподібну (– 0,05 мм).

Шихти аглофабрик містять суміш крупнозернистих і порошкоподібних матеріалів. Гранулометричний склад шихти та її складових наведено в таблиці 3.6. Співвідношення кількості фракцій суміші впливає на газопроникність шихти в період спікання. У промислових умовах завантаження агломераційної шихти на колосникові ґрати візків, що спікають, відбувається за схемою бункер – барабанний живильник – завантажувальний лоток.

Таблиця 3.6 - Гранулометричний склад агломераційної шихти, %

| Продукт | Фракція, мм | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | >15 | >9 | >5 | >3 | >1,61 | >0,8 | >0,28 | >0,22 | >0,1 | >0,071 | <0,071 |
| Шихта комкова | 5.1 | 28,4 | 8,77 | 12,4 | 19,7 | 3,24 | 3,24 | 1,3 | 0,45 | 3,0 | 14,4 |
| Концентрат | - | - | - | - | | - | 0,6 | 1,3 | 1,3 | 7,0 | 89,8 |
| Вапняк | - | - | 2,7 | 3,6 | 15,7 | 17,2 | 22,1 | 7,6 | 3,8 | 8,5 | 16,4 |
| Кокс | - | - | 1,37 | 1,53 | 23,8 | 22,77 | 22,8 | 7,5 | 3,7 | 3,33 | 13,2 |
| Аглоруда | | 13,0 | 11.8 | 9,6 | 13,2 | 0,88 | 15,08 | 6,6 | 2,2 | 8,4 | 9,24 |

Як видно з даних, наведених в табл. 3.6, навіть комкована шихта перед завантаженням на агломашину містить достатню кількість дрібнодисперсних фракцій, що призводить до погіршення газопроникності. При цьому початкова газопроникність шихти залежить від способу укладання частинок. Укладання частинок сипучого середовища є основним параметром, що характеризує її фізико – механічні властивості. Величина гідродинамічного опору шару залежить від щільності укладки частинок. Агломераційна шихта являє собою суміш фракцій широкого діапазону. Дрібнозернисті матеріали шихти,

розташовуючись в порожнинах між великими частинками, погіршують газопроникність шару, так як зменшують переріз каналів, по яких проходить повітря або газ. Обсяг порожнеч залежить не стільки від розміру частинок, скільки від способу їх укладки, тобто від взаємного розташування і орієнтації частинок відносно один одного. Коефіцієнт щільності укладання сипучого матеріалу залежить від умов формування сипучого середовища, стан поверхні частинок, умов руху сипучого середовища і ряду інших факторів. Умови формування сипучого середовища визначають початкову величину коефіцієнта щільності укладання і можуть значною мірою на неї вплинути. Це зміна тісно залежить від кількості контактів, що припадають у середньому на одну частинку сипучої речовини. Укладання частинок шихти на спекательному візку визначається і вагою верхніх шарів шихти, а також дією вакууму в момент запалювання. Таким чином, газопроникність шихти можна поліпшити, якщо при її завантаженні на колосникові ґрати спекательного візка підтримувати збільшення співвідношення розмірів найбільших і найменших частинок зверху вниз.

При роботі з зернистими матеріалами відомо, що при формуванні шару великі фракції зосереджуються біля основи шару.

Величина середнього діаметра частинок зростає по мірі наближення до підошви шару для всіх досліджуваних матеріалів. При формуванні шару спостерігається два види сегрегації: гравітаційна і по площині сформованого укосу. Кут нахилу площини укосу до горизонтальної поверхні дорівнює куту природного укосу. Кут природного укосу шихти, що містить 100% концентрату, вище ніж шихти, що містить 100% руди. Це пояснюється тим, що з виведенням кожних 10% руди з шихти комкуемость її погіршується із – за неоднорідності гранулометричного складу. [3]

### 3.6 Вплив завантаження шихти на газопроникність

В залежності від кута нахилу завантажувального лотка змінюється газопроникність шихти (табл. 3.7). Найбільш високий коефіцієнт порозності укладання виходить, коли завантаження шихти відбувається під кутом природного укосу.

Так, для шихти, що містить в залізорудній частині 100% концентрату, при збільшенні кута нахилу завантажувального лотка на $17^{про}$ коефіцієнт порозності зменшується на 7,8%. Для шихти, що містить 10% руди, коефіцієнт порозності зменшується на 18,5%, а для шихти, що містить 30% руди, на 20,5%. Отже, зі збільшенням нерівномірності гранулометричного складу вихідної шихти в результаті введення руди, що містить в основному грубозернисті фракції, коефіцієнт щільності укладання комкованої шихти зростає із – за розташування дрібної фракції між великими частинками.

Таблиця 3.7 - Значення коефіцієнта порозности в залежності від кута нахилу завантажувального лотка.

| Вміст у шихті, % | | Кут нахилу завантажувального лотка, град.-мін. | Коефіцієнт порозності, $м^3/м^3$ |
|---|---|---|---|
| Концентрат | Руда | | |
| 100 | 0 | 50-10 33-10 67-10 | 0,529<br>0,570<br>0,442 |
| 90 | 10 | 48-49 31-49 65-49 | 0,463<br>0,568<br>0,450 |
| 70 | 30 | 50-26 33-26 67-26 | 0,446<br>0,561<br>0,389 |

Установка завантажувального лотка під кутом, рівним або близьким до кута природного укосу для завантаженої шихти, що дозволяє отримати максимальну її газопроникність. Але у виробничих умовах агломератчик змушений змінювати висоту шару у зв'язку з технологічною необхідністю. Тоді зі зміною висоти шару необхідно змінювати кут нахилу завантажувального лотка, так при зміні висоти шару, наприклад, з 200 до 270 мм нахил лотка змінюється на 6 %. В процесі виробництва може змінюватися і складу шихти, що також вимагає зміни кута нахилу завантажувального лотка [3].

### 3.7 Ефективність впливу сотрированного агломерату на продуктивність домни

Вдосконалення доменного виробництва передбачає встановлення конвеєрної подачі шихтових матеріалів до скіпового підйомника. Це дає можливість відсіяти частину дрібниці – 5мм з агломерату перед подачею в скіп. Цей факт представляє можливість встановити ступінь підвищення ефективності доменної печі.

Для оцінки ступеня ефективності потрібно виконати порівняльний аналіз між доменною піччю, що працює з завантаженням агломерату в скіп вагон – вагами (ДП-1) і конвеєрним завантаженням (ДП-2).

Для порівняльного аналізу обрані доменна піч ДП-1, обладнана вагон-вагами і доменна піч ДП-2 з конвеєрної шихтоподачею. Попередній період для аналізу вибрано тривалістю 1 рік. Вміст фракції – 5 мм в скиповому агломераті склало 15,8 % (ДП-1) і 9,52% (-6,28%) (Д П-2).

Зменшення втрат від подрібнення коксу становила 0,45%, збільшення використовуваної від аспірації пилу піднявся до 0,5 кг/т чавуну.

Згідно технологічної інструкції ТИ 226 – Д – 06 – 2006 «Введення доменної печі» зменшення фракції – 5мм в залізорудній частині шихти на кожен 1% призводить до зниження витрати коксу до 0,5% і збільшення продуктивності печі на 1,0 %.

Таким чином, за нормативними даними витрата коксу складе:

$$\Delta K" = \frac{526*6,28*0,5}{100} = 16,5 \text{ кг/т чавун.}$$

Збільшення обсягу виробництва складе:

$$\Delta P = \frac{2073*6,28*1,0}{100} = 130,2 \text{ т/сут.}$$

Фактично питома витрата коксу знизилася на 46 кг/т чавуну. Баланс факторів показав, що за рахунок технологічних факторів питома витрата коксу знизилася на 3 кг/т чавуну. Отже, за технологічним факторам питома витрата коксу знизилася на 3 кг/т чавуну і за рахунок зниження дрібниці -5мм зменшився на 16,5 кг/т чавуну.

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено оптимальний фракційний склад агломерату, що забезпечує раціональний процес доменної плавки чавуну. Дано оцінку впливу механізму та способу подачі шихти в шахту домни, показано умови подачі, які підвищують якість газодинамічних процесів у доменній плавці.
2. Проведено оцінку економічної ефективності в результаті використання модернізованої доменної шихти, розрахунковим шляхом показано збільшення продуктивності домни на 130,2 т/добу.

# 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

## 4.1 Небезпечні та шкідливі фактори у виробничому середовищі

У доменному цеху постійно або тимчасово діючими небезпечними і шкідливими виробничими чинниками, що роблять різний вплив на організм є запиленість і загазованість повітря, шум, теплове опромінення, небезпека вибуху, електричний струм. [12]

*Загазованість.* Випуск чавуну і шлаку з домни супроводжується виділенням значних кількість шкідливих газів і з'єднань: оксиду вуглецю, сірчистого газу, різних вуглеводнів. В залежності від технологічних умов доменний газ складається з наступних компонентів (%): (14 – 18) - $C_2$; (22 – 28) - C; (6,5 – 8,5) - $H_2$; (0,1 – 0,3) - $CH_4$ і (50 – 57)- $N_2$.

Оксид вуглецю – найбільш шкідливий в доменному цеху. Цей газ не має кольору, запаху, смаку і подразнюючих властивостей, викликають отруєння без видимих попередніх відчуттів. Оксид вуглецю здатний накопичуватися в організмі до небезпечних концентрацій. При вдиханні оксиду вуглецю порушуються нормальні процеси газового обміну і окислення. У цьому випадку серце працює з великою напругою, проявляється биття в скронях, слабкість, запаморочення. Гранично допустима концентрація CO – 20 мг/м$^3$.

При випуску шлаку виділяється сірчистий газ, який володіє різким запахом і чинить негативний вплив на дихальні шляхи
і, особливо, на зір. Гранично допустима концентрація 10 мг/м$^3$ [12].

*Запиленість.* У доменному цеху пил утворюється на рудному дворі і бункерній естакаді при розвантаженні шихтових матеріалів, у підбункерном приміщенні при наборі і зважування шихти, в скіповий ямі, на колошнику при завантаженні в піч, під час випуску пилу з пиловловлювачів, при випуску чавуну і т. д.

На рудному дворі і бункерній естакаді пил утворюється з мінеральної та горючої частини шихти. Така пил характеризується високою дисперсністю з

переважанням фракцій (2 – 4) мкм і містить велику кількість вуглецю, оксидів кремнію та заліза [12].

Велика фракція пилу (більше 10 мкм) не досягає легенів, фракції менше 10 мкм проходять в легені і викликають важкі захворювання: легені втрачають еластичність, порушуються їх функції і кровообіг, при цьому організм відчуває кисневе голодування. Гранично допустима концентрація пилу становить 4 мг/м$^3$.

Найбільш небезпечна для організму пил на основі кремнезему. Величина гранично допустимої концентрації такої пилу залежить від наявності вільної кремнеївої кислоти, особливо в кристалічній формі. Гранично допустимий вміст пилу в повітрі не більше 1 мг/м$^3$ (для пилу, що містить понад 70% вільного $SiO_2$); при вмісті в пилу (10 – 70) % гранична запиленість повітря не повинна перевищувати 2 мг/м$^3$.

*Шум.* Джерелами постійних шумових навантажень є вібропітателі, коксові грохоти, вентиляційні установки, різні звукові сигнали. Постійний вплив шуму на організм призводить до захворювань органів слуху, серцево – судинної системи, вегетативної нервової системи. Гранично допустимий рівень шуму не більше 80,0 Дцб [12].

*Теплова небезпека*. Теплове опромінення в доменному цеху коливається в широких межах від 0,35 до 1,12 кВт/м$^2$. Джерелами випромінювання є розплави чавуну і шлаку ( температура чавуну 1380 – 1500 $^0$С, шлаку 1450 – 1600 $^0$С), перегріті гази, нагріті вузли обладнання і конструкцій.

Безпосередній дотик до розплавленим масам чавуну викликає опіки шкіри і важкі травми. Виконання операцій по обслуговуванню жолобів може призвести до теплового удару.

Найбільш небезпечними ділянками в доменному цеху є місця випуску гарячого агломерату, подачі його в скіп, літературний двір, міжконусний простір при ремонтах.[12]

Тривала робота в умовах високої температури і теплового опромінення може призвести до перегрівання організму, викликаючи зневоднення і знежирення.

*Вибухонебезпечність.* Дуже значну небезпеку в доменному цеху являє прогар повітряних фурм холодильників системи водяного охолодження. Своєчасний ремонт та заміна водоохолоджуючої апаратури, відключення подачі води в прогорів холодильник запобігає злив великої кількості води в вогнетривку кладку, запобігає передчасному її руйнування і запобігає небезпека виникнення вибухів при контакті розплавленого чавуну і шлаку з водою, викидів розплавлених і розпечених матеріалів на робочу площадку, витоку газів. Межі вибуховості повітряно-газової середовища становить при вмісті газу (%): окис вуглецю – 12,4 і 75; водень – 4,1 і 74; метан – 5,35 і 14,3 [12].

### 4.2 Аналіз факторів виробничого і трудового процесу

З аналізу умов праці вогнетривщика доменного цеху слід, що кількість шкідливих чинників значно перевищує допустимі норми. Умови праці на робочому місці відносяться до особливо шкідливим і особливо важким.

Робоче місце має в наявності два фактори 1 – й ступеня, чотири чинники 2 – го ступеня і три чинники 3 – го ступеня. Визначальними факторами, що впливають на здоров'я працівників, які працюють на ремонтів металургійних агрегатів, є порушення технологічних процесів виробництва, при цьому їх усунення залежить від розроблених заходів [13].

Основними джерелами інтенсивних теплових випромінювань є: розплави чавуну і шлаку, нагріта внутрішня вогнетривка футеровка печі і поверхня розплавленого шлаку. Робітники ливарного двору також періодично піддаються впливу інфрачервоного випромінювання. Інтенсивність опромінення на робочих місцях становить від 0,01 до (3,6 – 7) кВт/м$^2$.

Для захисту від тепловиділень передбачається аерація через припливні поворотні щити в нижній зоні; душуюча вентиляція кондиціонованим повітрям у льоток для випуску чавуну і шлаку. В результаті впливу високих температур виділяються печами, жолобами для зливу чавуну і шлаку відбувається зневоднення організму працюючих, це викликає згущення крові, порушення діяльності серцево – судинної системи. Для відновлення порушеного водного балансу в організмі робітників доменного цеху організовується постачання підсоленою питної води (0,5% кухонної солі) [13].

### 4.3 Організаційно-технічні рішення щодо виробничої санітарії

*Планувальні рішення цеху***.** Проектні рішення по доменному цеху припускають його розташування з підвітряного боку по відношенню до житлового району з урахуванням рози вітрів. Розташування будівель і споруд, що забезпечує найбільш сприятливі умови аерації та природного освітлення приміщень. В межах вимог СНИП для підприємств чорної металургії поздовжня вісь ливарного двору повинна бути розташована під кутом 45 – 90 до напрямку панівних вітрів. Розташування повітронагрівачів організовується в одну лінію паралельно осі доменних печей.

Центральний пост управління роботою доменної печі розміщується в окремому звуко- і звукоізольованому приміщенні з подачею в нього кондиційованого повітря [12].

Проходи між окремими агрегатами, стінами та обладнанням ізольовані тепло золювальними екранами. Перехідні містки над чавунними і шлаковими канавами та іншими гарячими поверхнями забезпечуються теплоізоляцією і огорожею з боків суцільними щитами висотою не менше 1м

Для обслуговування шкарпеток чавунних і шлакових жолобів по краях ливарного двору облаштовуються майданчиками консольного типу з теплозахисними екранами, а біля стін будівель ливарного двору вище рівня жолобів – майданчиками для проходу людей. Поблизу жолобів і ковшів

проходи облаштовуються теплоізолюючими екранами. При одноносковой розливанні чавуну з боку зливного отвору встановлюється майданчик з тепловим захисним екраном для обслуговування рухомого жолоби заввишки не менше 1,2 м з відбортовкою по низу на висоту не менше 140 мм.

### 4.4 Опалення і вентиляція

Практично всі категорії робіт доменного цеху відносяться до тяжких, тому характеристики виробничих приміщень повинні відповідати особливим вимогам санітарних норм. Основні параметри повітряної середовища для робочих зон зведені в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 - Характеристики повітряного середовища робочої зони

| Період року | Характеристика виробничих приміщень з надмірною тепловыделениям (більше або менше 23 Вт/м2) | Категорія робіт | Період року (теплий, холодний, перехідний) | | | Температура повітря поза постійних робочих місць |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | На постійних робочих місцях | | | |
| | | | t повітря, С | Відносна вологість, % | Швидкість руху повітря, м/с | |
| Холодни | | Важка III | 13-19 | 40-60 | 0,3 | 12-20 |
| Перехідни | | Важка III | 13-18 | 40-60 | 0,4 | 15-20 |
| Теплий | | Важка III | 15-26 | 40-60 | ,4 | 13-20 |

Опалення для виробничих приміщень використовується повітряне, поєднане з припливною вентиляцією.

### 4.5 Санітарно – побутові приміщення

До санітарно – побутові приміщення доменного цеху подаються: приміщенням для прийому їжі, гардеробними, душовими, вбиральнями, курильними кімнатами.

Підлога в вбиралень та душових влаштовують з водонепроникним ухилом до стічні трапу. Стіни на висоту не менше 1,5 м повинні бути покриті вологостійким матеріалом.

Побутові приміщення розташовують можливо ближче до цеху. При наявності у цехах газів, побутові приміщення розташовують з навітряного боку цеху.

Для роздачі питної води встановлюють фонтанчики, закриті баки з фонтануючими насадками, температура води при роздачі 8 – 20 °С. Питна вода може бути сирою, якщо вона безпечна для вживання, або охолодженої кип'яченої. Відстань від робочих місць до питних установок – не більше 75 м [12].

### 4.6 Комплекс заходів щодо підвищення безпеки праці

Для поліпшення умов праці в доменному цеху доцільно провести низку заходів, що запобігають забрудненню повітря. У доменному цеху необхідно передбачати природну вентиляцію (аерацію). Для видалення забрудненого повітря безпосередньо від джерел утворення шкідливих виділень повинна бути передбачена місцева витяжна вентиляція у вигляді витяжних зонтів. Витяжні зонти встановлюються над склепінням печей і над возами в місці випуску металу. Пульти керування печами і разливочными машинами обладнуються припливно-витяжною вентиляцією.

Для зниження рівня шуму в доменному цеху необхідно застосовувати будівельно-акустичні методи і підходи. Обладнання, що є джерелами шуму, необхідно огороджувати звукоізолюючими конструкціями або використовувати звукоізолюючі кожухи. Для персоналу доменних печей і розливних машин повинні бути обладнані звукоізольовані кабіни з оглядовими вікнами і пультами дистанційного керування. Такі кабіни оснвщаются вікнами з подвійним склінням і масивні двері.

Для зниження надлишкового тепла необхідно використовувати аерацію. З цією метою на покрівлі будівлі установливается аераційний ліхтар. У доменному цеху обладнується місцева проточна вентиляція, яка забезпечує обдуває потік повітря, спрямованого на робоче місце [12].

У жаркий час на робочих місцях використовується дрібнодисперсне розпилення води для охолодження повітря, зволоження одягу та відкритих частин тіла працюючих. Водораспыление підвищує ефективність аерації і забезпечує осадження пилу, зваженої в повітрі.

У доменному цеху обладнуються місця для відпочинку робітників. Вони розміщуються поблизу робочих місць і оснащуються захистом від впливу чинників робочої середовища, шкідливих для організму [2].

Заходи з попередження нещасних випадків передбачають проведення інструкцій і навчання працівників безпечним методам праці, виховання у кожного робітника, службовця, інженерно-технічного працівника свідомого ставлення до дисципліни праці, чіткого та беззастережного виконання вимог і правил з охорони праці.

Система підготовки з техніки безпеки і виробничої санітарії включає:

- вступний інструктаж;
- первинний інструктаж на робочому місці;
- навчання на робочому місці;
- повторний інструктаж;
- позаплановий інструктаж;
- курсове навчання;

- цільовий інструктаж [12].

### 4.7 Індивідуальні засоби захисту

Індивідуальні методи захисту за основним вражаючим чинникам:

- захист від теплових впливів – спеціальний одяг служить для запобігання працюючих в гарячих цехах від впливу теплового випромінювання і опіків. Матеріал для спецодягу повинен бути такими, що не займаються, стійким до впливу теплового випромінювання, міцним, м'яким, повітропроникним як в сухому, так і у вологому стані, влагоємними і гігроскопічним [13];

- захист від шкідливих речовин при роботі з забруднюючими і дратівливими речовинами застосовують халати з щільної тканини з зав'язками на рукавах, комбінезони, гумові фартухи, штани з нагрудником, капюшони. Для захисту від пилу використовують глухий комбінезон з пилонепроникної тканини із зав'язками у зап'ясть і щиколоток. Захист органів дихання досягається застосуванням фільтруючих та ізолюючих приладів. В якості фільтруючих приладів використовуються промислові протигази і респіратори;

- захист від шуму – для захисту органів слуху застосовують зовнішні і внутрішні проти шуми (антифони);

- захист від вібрації; – для захисту від вібрації використовують рукавиці з подвійним шаром і з поролону, застосовують також антивібраційні пояси, подушки, взуття і килимки, що гасять вібрацію [12].

# ВИСНОВКИ

1. Проведено повний аналіз доменного процесу, встановлено механізми та способи вдосконалення процесу, спрямовані на економію шихтових матеріалів та прискорення фізико-хімічних процесів.

2. Розглянуто методи одержання та встановлені механізми підвищення якості грудкованих рудних компонентів доменної шихти. Встановлено перевагу агломерату по відношенню до окатишів.

3. Розглянуто механізми процесу спікання агломерату, встановлено раціональні температурно-часові режими та газодинамічні механізми проведення спікання.

4. Визначено особливості механізмів спікання та умови рівномірного розподілу хімічного складу за висотою пирога. Встановлено вплив температури на формування властивостей агломерату та режими доменного процесу.

5. Встановлено оптимальний фракційний склад агломерату, що забезпечує раціональний процес доменної плавки чавуну. Дано оцінку впливу механізму та способу подачі шихти в шахту домни, показано умови подачі, які підвищують якість газодинамічних процесів у доменній плавці.

6. Проведено оцінку економічної ефективності в результаті використання модернізованої доменної шихти, розрахунковим шляхом показано збільшення продуктивності домни на 130,2 т/добу.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Охотський В.Б., Костьолов О.Л., Симонов В.К. та ін. Теорія металургійних процесів: Підручник. К.: ІЗМН, 1997. 512 с.

2. Кривенко С.В. Формирование зон в агломерируемом слое. Металл и литье Украиньї. 2014. № 10(257). С. 17—22.

3. Zhao Z., Li B., et al. Influence of Particle Size Distribution of Sinter on Blast Furnace Permeability. Ironmaking & Steelmaking. 2020. Vol. 47(3). P. 229—235.

4. Chen X., Wang W.; Yang D., Zheng H., Wang B. Mineralization Characteristics of Iron Ore Sinter and the Effects of Cooling Rate on Mineral Phase Structure. ISIJ International. 2023. Vol. 63. Iss. 2. P. 261—270.

5. Терещенко А.В. Агломераційне виробництво. Дніпро: Національний гірничий університет, 2019. 312 с.

6. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. Киев: Вища школа, 1988. 351 с.

7. Величко Г.П., Казаков А.І. Фізико-хімічні основи агломерації. К.: Техніка, 1986. С. 101—118.

8. Zervas E., de Souza R.G. Oxidation and reduction during iron ore sintering: Influence on sinter quality. ISIJ Int. 2017. Vol. 57(9). P. 1534—1542.

9. Бочка В.В., Тараканов А.К., Сова А.В., Бойко М.М., Ягольник М.В., Двоєглазова А.В. Удосконалення технології виробництва якісного агломерату. Теорія і практика металурги. 2019. № 1. С. 5—14.

10. Чечель І.Ф. Агломераційне виробництво. Дніпро: Пороги, 1998. С. 132—148.

11. Ільків В.Я., Зауличний Я.В., Гунько В.М., Зарко В.І., Яворський Ю.В., Карпець М.В., Дудка О.І. Енергетичний перерозподіл валентних електронів сумішей AIX>3 + Ti02 з різним вмістом компонентів внаслідок механоактивації. Фізична інженерія поверхні. 2015. Т. 13. № 3. С. 390—398.

12. Цюпа Н.О., Тогобицька Д.М. Оцінка корозійної активності луговмісних доменних шлаків по відношенню до вогнетривів. Тези Всеукраїнської науково-технічної конференції «Наука і металургія» 22—24 листопада, м. Дніпро. 2022. С. 28—29.

13. Кривенко С.В., Русских В.П., Томаш А.А. Улучшение структури агломерата изменением интенсивности горения топли-ва шихты. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 2(260). С. 36—40.

14. Мяновська Я.В., Мішалкін А.П., Анкудінов Р.В., Токарев С.І., Дворковой О.І. Використання матеріалів рослинного походження в процесах переробки залізовмісних металургійних відходів. Теорія і практика металургії. 2019. № 4. С. 38—49.

15. ОАО Запорожский металлургический комбинат «Запорожсталь». Ведение Доменной печи технологическая инструкция ТИ 226 – Д – 06 – 2006. Запорожье, 2006. 103с.