

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М.ПОТЕБНИ

Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки  
(повна назва кафедри)

**Кваліфікаційна робота / проект**

другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз поведінки залізородної сировини в умовах доменної плавки

---

---

Виконав: студент II курсу, групи 8.1361-мчм  
спеціальності 136 Металургія  
(код і назва спеціальності)  
освітньої програми Металургія чорних металів  
(код і назва освітньої програми)  
спеціалізації \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціалізації)

О.В.Пугач  
(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.х.н., с.н.с. Прутцьков Д.В.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц., к.т.н., доц. Нестеренко Т.М.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2022

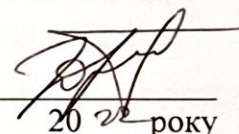
**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки  
 Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
 Спеціальність 136 Металургія  
(код та назва)  
 Освітня програма Металургія чорних металів  
(код та назва)  
 Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« 02 » сб 20 22 року



**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)**

Пугачу Олександр Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз поведінки залізорудної сировини в умовах доменної плавки

керівник роботи Прутцьков Дмитро Володимирович, д.х.н., проф.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 02 » червня 2022 року № 597-с

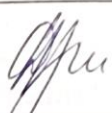

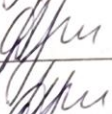

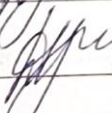

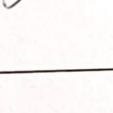

2 Строк подання студентом роботи 12.12.2022

3 Вихідні дані до роботи дослідження умов перетворень залізорудних матеріалів в умовах доменної печі

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат; вступ; Розділ 1 Аналітичний огляд процесів розм'якшення залізорудних матеріалів доменної плавки; Розділ 2 Методика дослідження розм'якченості окатишів і опис установки; Розділ 3 Дослідження поведінки залізорудної сировини в доменній печі; Розділ 4 Охорона праці та техногенна безпека; Висновки; Перелік джерел посилання; Додаток А

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
креслень

## 6 Консультанти розділів роботи

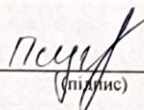
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1 Аналітичний огляд процесів розм'якшення залізородних матеріалів доменної плавки	Прутцьков Д.В., професор		
Розділ 2 Методика дослідження розм'ягченості окатишів і опис установки	Прутцьков Д.В., професор		
Розділ 3 Дослідження поведінки залізородної сировини в доменній печі	Прутцьков Д.В., професор		
Розділ 4 Охорона праці та техногенна безпека	Прутцьков Д.В., професор		

7 Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, реферат	21.11-25.11.2022	
2	Розділ 1 Аналітичний огляд процесів розм'якшення залізородних матеріалів доменної плавки	26.11-30.11.2022	
3	Розділ 2 Методика дослідження розм'ягченості окатишів і опис установки	01.12-04.12.2022	
4	Розділ 3 Дослідження поведінки залізородної сировини в доменній печі	05.12-08.12.2022	
5	Розділ 4 Охорона праці та техногенна безпека	09.12-11.12.2022	
6	Висновки, перелік джерел посилання	12.12.2022	

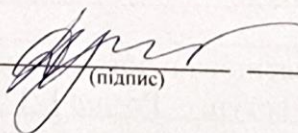
Студент

  
(підпис)

О.В.Пугач

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)

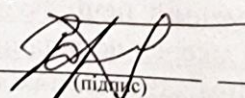
  
(підпис)

Д.В.Прутцьков

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

  
(підпис)

Ю.О.Белоконь

(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 78 с., 11 табл., 8 рис., 1 дод., 51 джерело

АГЛОМЕРАТ, КОТУНИ, РОЗМ'ЯКШЕННЯ, ОСНОВНІСТЬ, ВИТРАТА  
КОКСУ, ГАЗОПРОНИКНІСТЬ, МІЖШАРОВИЙ ЕФЕКТ, ІНТЕНСИВНІСТЬ  
ПЛАВКИ

Об'єкт дослідження – технологічні показники процесу розм'якшення залізорудних матеріалів доменної плавки.

Предмет дослідження – закономірності і механізми фізико-хімічних процесів технології розм'якшення агломерату та окотишів в доменній печі.

Мета роботи – дослідження процесу розм'якшення залізорудних матеріалів під час доменної плавки.

Методи дослідження – хімічний аналіз, петрографічний аналіз, порівняльний аналіз, статистичний аналіз, візуальний аналіз.

Наукова новизна:

1. Встановлено, що невідновлені агломерат і котуни починають розм'якшуватися при досить високій температурі (1112 °С; 1095...1100 °С відповідно), що пояснюється наявністю гематиту та магнетиту. При підвищенні ступеня відновлення у зразках збільшується кількість легкоплавкої складової – вюститу ( $Fe_xO$ ), що призводить до мінімальних значень температури розм'якшення. Підвищення температури початку розм'якшення при відновленні понад 80% пояснюється утворенням металевого каркасу з відновленого заліза у всьому обсязі зразка.

2. Доведено формування раціональної структури стовпа шихти в доменній печі, що забезпечує підвищення ступеня використання газового потоку на 1 % (абс.) в рівних шихтових та дутьових умовах, за результатами математичного моделювання дозволяє знизити витрату коксу приблизно на 1,8

%, що можна порівняти з економією коксу від підвищення основності залізорудної шихти з 0,515 до 1,215.

Практичне значення:

1. Встановлено, що якості шихтових матеріалів у вихідному стані, зниження вмісту в них дрібних фракцій впливають на температурний інтервал початку злипання – розплавлення маси шару залізорудних матеріалів.

2. Визначено, що властивості залізорудних матеріалів повинні забезпечити високу температуру початку розм'якшення рудної сировини та короткий інтервал її розм'якшення, що має велике технологічне значення для доменної плавки.

У розділі 1 представлений аналітичний огляд процесів розм'якшення залізорудних матеріалів доменного процесу.

У розділі 2 наведена методика дослідження розм'ягченості залізорудних матеріалів і представлений опис установки для визначення розм'якшення; показані результати досліджень.

У розділі 3 досліджена поведінка залізорудної сировини в доменній печі; проведений порівняльний аналіз показників доменної плавки із застосуванням у шихті котунів різної основності; досліджена розм'ягченість відновленого агломерату різних фракцій.

У розділі 4 наведені питання охорони праці та техногенної безпеки в процесі проведення дослідницької роботи.

Результати проведеного дослідження рекомендуються для дослідно-промислових випробувань в умовах доменних цехів України.

## ЗМІСТ

С.

Вступ.....	7
1 Аналітичний огляд процесів розм'якшення залізорудних матеріалів доменної плавки .....	11
1.1 Поняття розм'якшення .....	11
1.2 Дослідження розм'якшення рудних матеріалів.....	13
1.3 Дослідження розм'якшення агломератів.....	19
1.4 Дослідження розм'якшення котунів .....	22
2 Методика дослідження розм'ягченності окатишів і опис установки.....	35
2.1 Установка для визначення розм'якшення .....	35
2.2 Методика дослідження процесу розм'якшення залізорудних Матеріалів .....	38
2.3 Результати дослідження .....	39
3 Дослідження поведінки залізорудної сировини в доменній печі.....	45
3.1 Порівняльний аналіз показників доменної плавки із застосуванням у шихті котунів різної основності .....	45
3.2 Дослідження розм'ягченності відновленого агломерату різних фракцій..	54
4 Охорона праці та техногенна безпека .....	60
4.1 Основні шкідливості і небезпечності в лабораторії ЦЗЛ.....	60
4.2 Засоби індивідуального захисту .....	61
4.3 Побутові і допоміжні приміщення лабораторії.....	62
4.4 Пожежна безпека.....	64
Висновки .....	66
Перелік джерел посилання .....	68
Додаток А Публікації за темою кваліфікаційної роботи .....	74

## Вступ

**Актуальність проблеми.** В даний час чорна металургія розвивається в напрямку вдосконалення підготовки сировини до доменної плавки, яке включає подальше підвищення вмісту заліза, поліпшення способів окускування, підвищення якості залізорудної сировини. Вибір раціональних шляхів підвищення техніко-економічних показників доменної плавки багато в чому визначається повнотою знань про поведінку шихтових матеріалів у печі, про зміну їх агрегатного стану та теплофізичних властивостей у процесі нагрівання.

На всіх етапах розвитку доменного виробництва найважливіше місце у вирішенні завдання збільшення виплавки чавуну посідають питання поліпшення фізико-хімічних властивостей сировини. Вибір раціональних шляхів підвищення техніко-економічних показників доменної плавки багато в чому визначається повнотою інформації про поведінку шихтових матеріалів печі, про зміну їх агрегатного стану в процесі нагрівання при різних температурах. Для підвищення інтенсивності плавки велике значення мають процеси розм'якшення та плавлення залізорудних матеріалів. Поведінка матеріалів визначається, головним чином, температурними умовами, фізико-хімічними властивостями та ступенем відновлення. Особливої актуальності вивчення даних питань набуває в умовах подальшого вдосконалення доменного процесу, спрямованого на забезпечення рівного ходу печі, покращення техніко-економічних показників плавки та отримання якісного чавуну.

Відповідно до сучасних уявлень ведення доменного процесу рівний хід печі, висока продуктивність, низька витрата коксу можуть бути забезпечені тільки за високої якості шихтових матеріалів. Найбільш важливими є високотемпературні властивості агломерату, котунів, їх сумішей і, отже, їх показники визначальні. Для вітчизняних шихтових матеріалів високотемпературні дослідження підготовленої сировини виконували фрагментарно. Внаслідок цього відсутня загальне чітко сформульоване розуміння розвитку процесів формування розплаву із залізорудних матеріалів

різного хімічного складу та способу підготовки, що стримує розробку більш досконалих прийомів окускування сировини та раціональних умов застосування їх у доменній плавці.

Лімітуючою ланкою доменного процесу є газопроникність стовпа матеріалів доменної печі. Продуктивність доменної печі при постійній питомій витраті коксу визначається кількістю коксу, що спалюється в горні в одиницю часу, що, у свою чергу, визначається кількістю дуття, що подається в піч, а точніше - кисню. Чим більше подається дуття, тим більше спалюється коксу і тим вища продуктивність печі. Проте збільшення кількості дуття призводить до збільшення кількості газів, що продуваються через стовп шихтових матеріалів печі, тобто. збільшення швидкості газового потоку. Потік газу, що рухається з великою швидкістю, створює в стовпі шихти підйомну силу, яка при певному збільшенні швидкості газу стає настільки великою, що врівноважує силу тяжкості стовпа шихти. Опускання шихти припиняється і відбувається зависання шихти. Робота печі припиняється, оскільки завантажувати нові порції матеріалу на колошник не можна. Таким чином, збільшення кількості дуття, що подається в піч, лімітується зависанням шихти.

Підйомна сила потоку великою мірою залежить від газопроникності стовпа матеріалів в печі - шихта з великих міцних шматків агломерату і коксу дозволяє продути багато газів без зависання, в той час як завантаження в піч пилюватих і неміцних матеріалів різко зменшує граничну кількість дуття, т.е. е. продуктивність печі.

Ось чому найважливішими вимогами до шихтових матеріалів є повна відсутність дрібних, особливо пилюватих, фракцій та висока міцність при звичайній та високій температурі [1].

Великий вплив на газопроникність стовпа матеріалів доменної печі надають процеси розм'якшення і плавлення залізорудних матеріалів. Стан залізорудної сировини та її поведінка в низькотемпературній ділянці печі досить докладно розглянуті теоретично та вивчені експериментально. У меншій мірі вивчено поведінку залізорудних матеріалів у високотемпературній зоні



печі, у якій відбуваються процеси розм'якшення та плавлення шихти. Поведінка матеріалів тут визначається, головним чином, температурними умовами, фізико-хімічними властивостями та ступенем відновлення матеріалів. Зазначені питання вивчені недостатньо повно.

В останні роки розширюється виробництво котунів. Новий вид залізорудної сировини - котуни за своїми фізичними властивостями не повинні сильно відрізнятися від властивостей агломерату.

Щоб порушувати процес первинного шлакоутворення агломерат і котуни повинні розм'якшуватися одночасно, тобто, мати однакову температуру початку та кінця розм'якшення. Якщо цього буде досягнуто, то зона первинного шлакоутворення буде нестійка і розтягнута за висотою доменної печі.

Дослідженнями та практикою встановлено основні недоліки котунів при використанні їх у доменній плавці:

- при відновленні до ~30% у доменній печі котуни утворюють багато дрібниць, тим самим погіршує газопроникність стовпа шихтових матеріалів;

- котуни виробляють неофлюсованими (ПГЗК) або частково офлюсованими (ЦГЗК, ПівнГЗК), що вимагає додаткової витрати флюсу на офлюсування їх порожньої породи або підвищення основності агломерату ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) від 1,5 до 2,0 залежно від витрати котунів. У цьому металургійні властивості агломерату погіршуються;

- Використання котунів у шихті доменних печей призводить до зниження стійкості засипних апаратів, т.к. при завантаженні в піч вони дають дрібнодисперсний пил, який виводить з ладу контактну поверхню великого та малого конусів.

Тому в даний час витрата котунів у шихті доменних печей до 30%.

Даною дослідницькою роботою ставилася мета вивчити розм'якшування котунів і порівняти з розм'якшенням офлюсованого агломерату.

**Мета роботи** – дослідження процесу розм'якшення залізорудних матеріалів під час доменної плавки. За допомогою виконаних досліджень довести технічні показники і необхідність вдосконалення технології доменної плавки, що

гарантує стабільність якості та хімічного складу.

**Завдання роботи** – на основі фізико-хімічних досліджень, використання останніх досягнень металургійної науки, дослідити технологічні передумови поведінки залізородних матеріалів в доменній печі. Це дозволить покращити хід процесу та, в значній мірі, прогнозувати кінцевий хімічний склад чавуну.

Дана задача буде вирішуватися за рахунок сучасних засобів та методів аналізу та експериментальних підходів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було вирішити такі **завдання:**

1. Провести дослідження поведінки залізородної сировини в доменній печі.
2. Порівняти показники доменної плавки із застосуванням у шихті котунів різної основності
3. Дослідити розм'ягченість відновленого агломерату різних фракцій.

**Апробація результатів роботи.** Результати досліджень, включених в кваліфікаційну магістерську роботу, доповіли на: II Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України. (Запоріжжя, 2022); наукових семінарах ІННІ Запорізького національного університету.

### **Публікації**

Основні результати роботи викладені в тезах конференції.

### **Структура и об'єм роботи**

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 51 найменувань, викладена на 78 сторінках машинописного тексту включаючи 8 рисунків, 11 таблиць.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОЦЕСІВ РОЗМ'ЯКШЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

## 1.1. Поняття розм'якшення

Основними компонентами залізорудної частини доменної шихти є агломерат та котуни. Шихта в печі, опускаючись, поступово нагрівається і за певної температури розм'якшується і плавиться. Одночасне плавлення мінералогічних складових шихти неможливе. Першими починають плавитися з'єднання та суміші з'єднань з низькою температурою плавлення. Поява розплаву змінює механічні властивості шихти: вона стає податливою – легко деформується та ущільнюється під навантаженням. Цю сукупність змін прийнято називати розм'якшувачістю.

У доменній печі істотний вплив на рух газів при постійному гранулометричному складі шихти надають розм'якшена маса залізорудних матеріалів, а також кількість і властивості шлаку, що утворюється в розпарі і заплечиках. Велика зона розм'якшених мас по висоті печі, а також густі та в'язкі шлаки, склеюючи шматки коксу, перешкоджають руху газів та погіршують їх розподіл. Це зумовлює розвиток нерівного ходу печі, погане використання хімічної та теплової енергії газу, і, зрештою, зниження продуктивності доменної печі та збільшення питомої витрати коксу. Очевидно, що менше за висотою печі зона розм'якшених мас, і чим швидше відбувається процес плавлення залізорудних матеріалів, тим краще газодинамічні умови роботи доменної печі, що забезпечують більш рівномірний розподіл газового потоку по перерізу печі, а отже, і економічнішу її роботу. Для оптимальних умов доменної плавки потрібні агломерат і котуни, що мають досить високу температуру початку розм'якшення і плавляться у вузькому температурному інтервалі. Таким чином, особливий теоретичний та практичний інтерес є процесом плавлення шихтових матеріалів в умовах доменної печі. Плавлення шихти передуює її розм'якшення, тому доцільно розглядати їх разом. Однак,

безпосереднє вивчення процесів розм'якшення та плавлення у доменній печі пов'язане з відомими труднощами. У більшості випадків ці процеси досліджуються в лабораторних умовах, вважаючи, що їх перебіг ідентичний у будь-яких обсягах.

Процес розм'якшення дуже важливий у доменному процесі, оскільки внаслідок розм'якшення утворюється зона когезії, яка впливає на газопроникність стовпа шихтових матеріалів, а також впливає на ряд інших процесів, що протікають у цій галузі.

Розм'якшення відбувається внаслідок втрати залізородними матеріалами механічної міцності при нагріванні. З цього виходить що якщо більше навантаження, то при меншій температурі почне втрачати міцність агломерат, а значить, зона когезії утворюється тим вище доменної печі, чим більше механічне навантаження на шихтові матеріали і менша їхня міцність.

Навантаження на шихту визначається рудним навантаженням. Рудне навантаження для різних умов плавки може бути неоднаковим. Також рудне навантаження змінюється за радіусом доменної печі, що з характером розподілу матеріалів по радіусу печі. Крім всього іншого важливим є показник міцності самої шихти. Для однієї тієї ж шихти показник міцності може бути різний при різній її крупності.

Зона когезії – область у доменній печі, у якій матеріали змінюють свій агрегатний стан, переходячи з твердого стану в рідкий через пластичний. Як відомо із зарубіжних та вітчизняних наукових праць, дана зона надає значний вплив на перебіг доменної плавки. Зона когезії може впливати на процеси відновлення.

Зона когезії утворюється в ділянці доменної печі, в якій температури відповідають початку розм'якшення залізородної частини шихти.

Експериментальному дослідженню температур розм'якшення залізородних матеріалів присвячено низку робіт.

## 1.2 Дослідження розм'якшення рудних матеріалів

Вперше з цього питання було опубліковано роботу Гончаревського М.С.[1]. Досліди проводились у силітовій печі у фарфоровому тиглі. Температура замірялася платина-платинородієвою термопарою, змонтованою у фарфоровій трубці, яка служила натискним штоком. У верхній частині порцелянової трубки містилася градувальна шкала, за якою визначалася величина усадки. При досягненні температури початку розм'якшення матеріалу шток вдавлювався гирею (500 г) в масу. Під час досліду в робочий простір печі безперервно подавався азот. Підйом температури печі проводився вручну. Досліджувалися криворізькі руди та агломерати різного хімічного та мінералогічного складу.

Було встановлено, що з підвищенням в агломерат вмісту FeO з 14,11 до 23,62% і SiO<sub>2</sub> з 9,34 до 15,90% температура початку розм'якшення знижується з 1120 до 950 °С. Автор пояснює це впливом зростаючого вмісту в агломераті кремнезему та фаяліту. Також досліджувався вплив ступеня відновлення мартитової руди на температуру початку розм'якшення. Невідновлена руда починає розм'якшуватися за температури 1100 °С. Відновлення руди на 66,3% знижує температуру початку розм'якшення до 800 °С. Подальше відновлення руди до 95,6% призводить до підвищення температури початку розм'якшення до 900 °С.

Аналогічні дані отримано у роботі Ростовцева С.Т. та Якубцинера Н.М. [2]. У ній проба агломерату крупністю 0,4-1,2 мм завантажувалася попередньо нагрітий до 800 °С магнезитовий тигель розміром 45×60 мм і поміщався в криптолову піч. Після цього на випробуваний матеріал у тиглі ставилася запаяним кінцем корундова трубка зовнішнім діаметром 14 мм, усередині якої містилася платина-платинородієва термопара. На верхньому кінці штока містився вантаж 1,6 кг і градувальна шкала. При температурі, що відповідає початку розм'якшення агломерату, шток починав рухатися. Досліди закінчувалися за нормальної температури 1280 °С незалежно від глибини

занурення штока. За температурою нагрівання зразка та глибиною занурення шпинделя будувалися криві.

Результати дослідження показали, що зі збільшенням вмісту закису заліза в агломераті від 20,1-22,6% до 29,3-32,6% він стає легкоплавкішим.

Велику роботу з дослідження температур розм'якшення руд і агломератів було проведено Цилевим Л.М. [3]. Як нагрівач автором використана трубчаста піч. Тиск штока на зразок становив 0,196 МПа. Наважку матеріалу крупністю 2-3 мм і вагою 5 г поміщали попередньо нагріті до 600 °С магнезитовий тигель і піч. Швидкість нагрівання зразка становила 10 град/хв. Усадка проби автоматично записувалася у вигляді кривої [4].

Температура початку розм'якшення залізняку знаходилася в межах 740-1080 °С. Агломерати, що містять підвищену кількість закису заліза, розм'якшувалися за нижчої температури, ніж офлюсовані агломерати, що містять невелику кількість силікатів заліза.

Велику увагу Цилевим Л.М. [4] приділено визначенню температур розм'якшення відновлених руд та агломератів. Зразки, відновлені в струмі водню за різної температури, поміщалися в металеву склянку на тонкий шар графіту. Поверхня проби також покривалася шаром графіту, що створювало відновне середовище та виключало можливість окислення.

Руди, відновлені на 30-60%, мали нижчу температуру розм'якшення, ніж сирі руди; найменша температура спостерігалася за ступенем відновлення 30-40%, коли значну кількість заліза перебував у закисному стані. Підвищення ступеня відновлення вище 50% збільшувало температуру початку розм'якшення руд, проте вона була нижчою за температуру початку розм'якшення невідновленої руди. Відновлення агломерату до 33,5% сприяло зниженню температури початку розм'якшення з 1020 до 900 °С.

Дослідження процесів розм'якшення та плавлення криворізьких руд та агломератів було проведено Воловиком Г.А. та Горштейном І.І. [5]. Дослідження проводили у печі, нагрівальним елементом якої служила графітова труба. Нагрівання печі проводилося зі швидкістю 10 град/хв.

Вивчалися температури розм'якшення руд та агломератів у природному та частково відновленому стані.

Дослідження показали, що збільшення вмісту FeO в агломераті сприяло зниженню температури початку розм'якшення. Так, підвищення вмісту FeO з 16,6 до 36% знизило температуру початку розм'якшення на 40-50 °С.

Відновлені агломерати отримували на установці визначення відновлюваності агломератів. Частково відновлені зразки розм'якшувалися в трубчастій електричній печі в атмосфері азоту. Ступінь відновлення всіх проб становила 25% та 60-70%. При відновленні зразків на 25-70% температура початку розм'якшення агломератів знижувалася на 100-140 °С.

Козлович І.З. та Аюков А.С. [6] вивчали вплив хімічного складу руд та агломератів на температуру їхнього розм'якшення. Дослідження проводилося у графітовому тиглі у печі опору. На поверхню руди встановлювався порожнистий графітовий стрижень, який зверху зміцнювався вантаж. У середині стрижня у фарфоровому чохлі містилася платина-платинородієва термопара.

Результати досліджень показали, що збільшення вмісту FeO в агломераті з 12,7 до 24,5% знижує температуру початку розм'якшення з 1040 до 1000 °С.

Віллемс, Діккенс та Еше опублікували результати вивчення поведінки руд при розм'якшенні [7]. Для визначення температури розм'якшення використовували установку, що застосовується при випробуванні вогнетривів на вогнестійкість під навантаженням. Зразки виготовлялися у вигляді циліндрів діаметром та висотою 50 мм та у вигляді кубиків з довжиною ребра 50 мм. Досліди проводили в магнезитових та вугільних тиглях при навантаженні на пробу 0,196 МПа та швидкості нагрівання в середньому 8 град/хв. У всіх опитах застосовувався вугільний стрижень, що зумовлювало відновлювальну атмосферу при застосуванні магнезитових тиглів. Зразки поміщали у піч, нагріту до 200 °С. При досягненні усадки 40% дослід закінчувався.

Дослідженнями встановлено, що прожилки кварцитів у руді спричиняють утворення силікату заліза, який знижує температуру початку розм'якшення.

Спільна присутність кремнекислоти та закису заліза веде до утворення фаяліту і водночас зниження температури розм'якшення.

Процес розм'якшення залізняку при високих температурах вивчався Гривом А. [8]. Для цього було застосовано піч із платиновою обмоткою, що дозволило підвищити температуру випробування до 1500 °С. Більшість руд починало деформуватися у температурному інтервалі 900-1000 °С.

Автором було встановлено, що багаті руди (Fe = 63%) мали високу температуру розм'якшення (1400 °С) і розм'якшувалися різко при невеликій усадці. Бідні руди розм'якшувалися за нижчої температури (1260 °С).

Крім цього, вивчалися відновлені зразки руд. Отримані результати показують, що з ступеня відновлення 20 і 30% спостерігалось збільшення швидкості розм'якшення, яке автор пояснює появою закису заліза у зразках.

Нову систему реєстрації усадки матеріалу під час розм'якшення запропонував Астахов А.Г. [9]. Ним було розроблено спеціальну електричну систему, з допомогою якої вертикальне переміщення стрижня перетворювалося на електричний струм. Електрична схема зібрана у вигляді моста, діагональ якого включений гальванометр. Дослідження проводилися за такою методикою. Тигель з агломератом фракції 1-2 мм встановлювався у графітовій склянці. Металевий стрижень занурення мав порцеляновий наконечник. Навантаження на стрижень дорівнювало 0,196 МПа. Нагрів тигля з матеріалом вироблявся в печі опору зі швидкістю 10 град/хв. Запис температури нагріву зразка та глибини занурення стрижня здійснювався на діаграмних стрічках. Однією з переваг установки слід відзначити більш точну та надійну реєстрацію усадки зразка.

Хохлов Д.Г., Гирдимов Ю.А. та Володарський опублікували роботу, в якій описано прийняту ними методику визначення температур розм'якшення руд [10]. Досліджуваний матеріал крупністю < 1 мм брикетувався в таблетки діаметром і висотою 20 мм і поміщався вертикальну піч опору. Зверху на зразок встановлювали кварцову трубку, на верхній кінець якої був важіль дзеркала. На дзеркало спрямовували світловий промінь, відображення якого фіксувалося на



радіальній шкалі. Перед початком досліду «світловий зайчик» встановлювався на нульову позначку шкали. Коли зразок давав усадку положення дзеркала та «світлового зайчика» на шкалі змінювалося, завдяки цьому фіксувалася величина усадки матеріалу.

Дослідження показали, що добавка вапняку сприяла зниженню температури розм'якшення, що пов'язано з утворенням легкоплавких евтектик за участю феритів та силікатів кальцію.

До найгрунтовніших робіт щодо визначення температур розм'якшення агломератів слід віднести дослідження Потебні Ю.М. [11]. Матеріал, що вивчається, крупністю 1-3 мм завантажувався в тигель з жароміцної сталі і нагрівався в печі опору. Роль шпинделя грала порцелянова трубка з вогнетривким наконечником і вмонтованою у неї термопарою. Загальний тиск становив 0,196 МПа. Показання термопари фіксувалися самописним потенціометром. Крива розм'якшення записувалася на діаграмній стрічці із збільшенням у 5 разів. Вивчався вплив деяких мінералів на температуру розм'якшення сплавів та офлюсованих агломератів.

Температура початку розм'якшення сплавів, що містять 15-20% феритів кальцію, становила 1040-1085<sup>0</sup>С та зі збільшенням останніх до 50-70% знижувалася до 960-1030<sup>0</sup>С. Зі збільшенням у сплаві фаяліту з 30% до 75% температура початку розм'якшення знижувалася з 1080 до 1060<sup>0</sup>С.

Дослідження зазнали також агломерати основністю від 0,3 до 2,0. Дане дослідження показало, що залежність температури початку розм'якшення від основності має екстремальний характер. Найбільшу температуру початку розм'якшення та найменший інтервал мали агломерати основністю 1,3-1,5. Зниження або підвищення основності цих значень призводило до зниження температури початку розм'якшення агломератів.

Діяльність Некрасова З.І., Гладкова Н.А. та Єрмоєнко Д.П. [12] описана установка та методика визначення температур розм'якшення матеріалів доменної плавки. Установка включала реєструючий пристрій, нагрівальну піч;

на діаграмній стрічці приладу були поєднані глибина занурення штока та температура досліджуваного матеріалу.

Досліджуваний матеріал містився в магнезитовий тигель. Нагрів зразків вироблявся в печі, що дозволяла одержувати температуру до 1500<sup>0</sup>С. Нагрівальними елементами її служили 10 стрижнів карборундових, розташованих вертикально навколо фарфорової труби діаметром 50 мм. Досліджувався матеріал крупністю 1-2 мм в інертному газовому середовищі. Проба поміщалася у піч, нагріту до 800<sup>0</sup>С. Подальша швидкість нагрівання підтримувалася лише на рівні 10 град/хв. Тиск на зразок становив 0,196 МПа.

Залежність між температурою розм'якшення промислового агломерату та ступенем його відновлення була вивчена у роботі [13].

Пробу агломерату комбінату «Запоріжсталь» основністю 1,23 дробили, а потім навішування (70 г) фракції 1-3 мм на установці визначення відновлюваності залізородних матеріалів відновлювали на 10, 20, 30 і т.д. до 100%. Ступінь відновлення оцінювали за втратою ваги зразка. Для визначення температури розм'якшення з усієї маси відновленого агломерату брали 50 г (решту проби піддавали хімічному аналізу), поміщали в тигель з жароміцної сталі заввишки 50 і діаметром 30 мм, ущільнювали і рівномірно зі швидкістю 10 град/хв. печі опору у атмосфері аргону.

Перед установкою в піч на поверхню агломерату встановлювали наконечник із жароміцної сталі діаметром 18 мм із введеним у нього відкритим спаєм хромель-алюмелевої термопари. Алундова соломка виконувала роль натискного штока. Тиск наконечника на агломерат створювався набором спеціальних вантажів і становив 0,196 МПа. При розм'якшенні агломерату наконечник поринав у нього на 15 мм, що умовно вважалось кінцем розм'якшення. Температурою початку розм'якшення вважалася та, за якої починалася усадка агломерату.

В результаті проведених експериментів авторами зроблено такі висновки:

1. При ступені відновлення до 50-70% температура початку розм'якшення агломерату знижувалася на 60-120<sup>0</sup>С. Подальше його

відновлення до 90-95% супроводжується підвищенням температури початку розм'якшення, яка, однак, не перевищує температури початку розм'якшення невідновленого агломерату.

2. У міру відновлення температурний інтервал розм'якшення агломерату збільшується.

Таким чином, при роботі доменних печей на сирій руді вивчалася температура початку та кінця розм'якшення залізняку [1, 3-8, 10]. Встановлено, що найбільша температура початку розм'якшення у багатій руді ( $\text{Fe} > 63\%$ ) –  $1080-1130^{\circ}\text{C}$ , найнижча – у бурого залізняку ( $700-895^{\circ}$ ). Магнетито-силікатна руда ( $\text{Fe} < 60\%$ ) розм'якшувалась при  $1030^{\circ}\text{C}$  [1, 3-5, 7, 8]. Низька температура початку розм'якшення пояснювалася наявністю силікатної порожньої породи [5]. Спільна присутність кремнезему та закису заліза веде до утворення фаяліту ( $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ), що знижує температуру розм'якшення залізняку [7]. Руда з магнезійно-глиноземистою породою мала температуру початку розм'якшення на  $80-100^{\circ}\text{C}$  вище, ніж руда з кремнеземистою породою [6].

Вивчення температури плавлення руд дозволило встановити, що мартитова руда ( $\text{Fe} = 52-59\%$ ) переходить у рідкий стан при  $1340-1350^{\circ}\text{C}$ , бурі залізняки ( $\text{Fe} = 43$  і  $48\%$ ) - при  $1350^{\circ}\text{C}$  і  $1430^{\circ}\text{C}$  відповідно, а магнетитова ( $57,4\%$ ) - при  $1260^{\circ}\text{C}$  [5].

### **1.3 Дослідження розм'якшення агломератів**

З появою нового виду сировини для доменних печей – агломерату – виникла потреба вивчення його металургійних властивостей. Поряд з вивченням відновлюваності визначалася температура початку та кінця розм'якшення агломерату.

При вивченні властивостей неофлюсованого агломерату було встановлено, що з підвищенням вмісту  $\text{FeO}$  знижувалася температура початку розм'якшення [1, 3 - 6].

Автори робіт [3, 4] встановили, що офлюсований агломерат починав розм'якшуватися при вищій температурі, ніж неофлюсований.

Згідно з даними роботи [11], найбільшу температуру початку розм'якшення ( $1150^{\circ}\text{C}$ ) мали агломерати основністю 1,3-1,5. При підвищенні чи зниженні основності від зазначених значень температура початку розм'якшення знижувалася.

Як відомо, залізорудні матеріали надходять у нижню зону шахти та розпар доменної печі значною мірою відновленими. Дослідження попередньо відновлених руд показало, що найменша температура початку розм'якшення спостерігалася за ступенем відновлення 30-40% [4,10] та 66% [1], коли значна кількість заліза перебувала у закисному стані. Після повного відновлення температура початку розм'якшення підвищувалася [1,4].

Вивчення попередньо відновлених агломератів [4,5] дозволило встановити, що вони розм'якшувалися при нижчій температурі, ніж невідновлені.

Слід зазначити, що недосконалість дослідного обладнання, що застосовувалося, а також різні методики дослідження призводили до отримання різних результатів. Особливо велику роль відіграють такі фактори, як величина навантаження на зразок, крупність частинок, швидкість нагрівання, склад газової атмосфери в печі, матеріал стрижня та тигля.

Дослідниками вивчалися проби матеріалів у різному вигляді. Деякі автори випробовували з цілого шматка руди циліндричної або кубічної форми [7,8], з насипної маси зерен подрібненого матеріалу різної крупності [2-7, 9, 11-13] з пресованих циліндричних брикетів, отриманих з порошку крупністю  $<1$  мм [10]. Вибір крупності зерен випробуваної проби матеріалу має великий вплив на ступінь надійності результатів. Тому не випадково в роботах [3, 5, 9, 11-13] проби готувалися з зерен матеріалу крупністю 1-3 мм. Спеціально проведені дослідження [14] показали, що при випробуванні проб матеріалу з насіння крупністю 1-3 мм температура початку і кінця розм'якшення відповідно на  $60$  і  $800^{\circ}\text{C}$  вище, ніж для проб із зерном 10-12 мм. Це більш оптимальною

упаковкою матеріалу і стабільною міцністю зерен агломерату 1-3 мм, ніж проб із зерном 10-12 мм. Найменша контактна поверхня великих зерен матеріалу призводить до більших питомих навантажень між ними в місцях контакту. Крім того, при випробуванні проби із зерном 10-12 мм відбувається руйнування зерен по мікротріщин. У зв'язку з цим спостерігається спотворення результатів дослідження у бік зниження температури початку та кінця розм'якшення.

Швидкість нагріву випробуваних зразків більшістю дослідників приймалася близькою до швидкості нагріву матеріалів доменної печі, а саме 8-10 град/хв [3-5, 7, 9, 10-13]. Матеріал, з якого виготовлялися тиглі, також був різним. Застосовували порцелянові тиглі [1], магнезитові [2-4, 7, 12] та графітові [6, 7]. При високих температурах матеріал тиглів по-різному взаємодіє з досліджуваним матеріалом. Наприклад, графіт відновлює частину заліза з оксидів і сприяє, таким чином, зниження температури початку розм'якшення агломерату. У роботах [3, 4, 11, 13] були застосовані металеві тиглі, які мали ряд переваг у порівнянні з тиглями з інших матеріалів:

- мінімальна хімічна взаємодія з досліджуваним матеріалом;
- швидке і рівномірне нагрівання всієї маси тигля і досліджуваного матеріалу;
- багаторазовість використання.

Для визначення температури розм'якшення залізородних матеріалів було розроблено кілька установок, конструктивна відмінність яких полягала у влаштуванні реєстрації усадки проби при її розм'якшенні. У перших установках [1, 2, 6] за переміщенням штока спостерігали візуально, потім переміщення штока записувалося на діаграмній стрічці [5]. Надалі з метою збільшення масштабу показань приладу застосували важільні системи [3, 11, 13].

Перші установки мали ряд істотних недоліків, з яких основними були:

- підйом температури в печі проводився вручну, що викликало нерівномірне нагрівання проби в часі;
- температура визначалася з допомогою приладів низького класу точності;

- в більшості випадків глибина занурення штока та відповідна їй температура вимірювалися окремо або записувалися в малому масштабі, через що криву розм'якшення доводилося будувати за точками у збільшеному масштабі [1-3, 6].

У роботі [12] описана дослідницька установка, вільна від перерахованих вище недоліків, яка дозволяла із заданою швидкістю підвищувати температуру в печі за допомогою спеціальної системи регулювання та виконувати автоматично запис кривої розм'якшення в координатах: температура, °С – усадка, мм.

Ще більш досконалою системою автоматичного регулювання температури в печі та її реєстрації одночасно з усадкою випробуваної проби матеріалу мала установка, наведена в роботі [13].

Розглянуті роботи з дослідження властивостей залізних руд та агломератів значною мірою сприяли вдосконаленню технології доменного процесу у напрямку інтенсифікації та економічнішої роботи доменних печей.

#### **1.4 Дослідження розм'якшення котунів**

Розвиток збагачення та експлуатації родовищ бідних руд призвели до швидкого зростання виробництва тонкоподрібнених концентратів та збільшення їх частки в агломераційній шихті. Однак виявилось, що це призводить до істотного зниження продуктивності агломераційних машин на 20-40%. У той самий час транспортування концентрату великі відстані створювало значні труднощі. Перевезення ж агломерату на великі відстані нерациональне через значне його руйнування. Ці обставини призвели до появи нового способу окускування тонкоподрібнених концентратів - виробництва котунів.

Основними причинами інтенсивного розвитку обгортання методом обгортання з'явилися:

- низька продуктивність агломашин при спіканні тонкоподрібнених концентратів;
- підвищений вміст заліза в порівнянні з агломератом;
- висока транспортабельність котунів, що має велике значення за наявності перевантажувальних пунктів, усереднювальних складів, приймальних та перевантажувальних пристроїв;
- рівномірна кускуватість котунів і низький вміст у них дрібниці, що сприяє поліпшенню газопроникності доменної шихти та підвищенню інтенсивності доменної плавки.

При сучасному рівні технології доменного процесу необхідне комплексне дослідження та визначення якості шихтових матеріалів. Тому оцінка якості котунів займає в даний час важливе місце в системі контролю якості рудних складових шихти доменних печей.

Основною металургійною властивістю котунів є їх поведінка в процесі розм'якшення. Якщо відновність шихтових матеріалів безпосередньо впливає на витрату коксу в доменній печі, то розм'якшення визначає місцезнаходження зони шлакоутворення в доменній печі, впливає на рух газів у печі та утворення шлаку.

О.Бургхардт, К.Гребе опублікували результати дослідження механічних характеристик залізних руд та котунів при ізотермічному відновленні [15]. Автори виділяють такі причини поганої відновлюваності деяких компонентів шихти:

1. Збільшення обсягу у процесі відновлення. При відновленні гематитових руд і котунів, особливо при високих температурах (1000<sup>0</sup>С), спостерігається збільшення обсягу. У зв'язку з цим зменшується обсяг порожнеч у стовпі шихти та погіршується його газопроникність. Одночасно розбухання веде до розтріскування і частково до руйнування шматків руди або котунів; у будь-якому випадку воно пов'язане із зменшенням міцності шихти.

2. Розпад зерна через зміну структури. Крім розбухання або високотемпературного руйнування, багато шихтових матеріалів схильні до розпаду зерна при 400-600<sup>0</sup>С у слабковідновлювальній атмосфері у верхній частині печі. Це веде до подрібнення зерен шихти та погіршення її газопроникності. Особливо сильно це явище виражене у гематитових руд і котунів, а також у агломерату середньої основності.
3. Різне розм'якшення. Руди розрізняються за схильністю до пластичної деформації та показниками розм'якшення при відновленні.

Дослідження проводили при тиску 0,08 МПа. Для руд і котунів встановили однакову крупність 10-12,5 мм, вага проби становила 1,8 кг, що дозволяло отримувати досить високі перепади тисків. Висота шару шихти з котунів становила 50-55 мм, з руди 45-55 мм. Оптимальна висота шару приймалася рівною 40-50 мм, т.к. за такої висоті забезпечується рівномірний розподіл навантаження. Було встановлено, що при більшій висоті шару верхні шари проби ущільнюються і перепад тисків по висоті проби змінюється.

Випробування проводилися за різних температур (900, 950, 1000 і 1050<sup>0</sup>С). У процесі відновлення при 1000 і 1050<sup>0</sup>С визначалися одночасно швидкість втрати кисню, усадка та опір проби газовому потоку. Показано, що внаслідок розм'якшення опір газовому потоку в деяких руд і котунів значно зростає; інші матеріали у тих самих умовах зберігають хорошу газопроникність. При визначенні швидкості втрати кисню було виявлено, що втрата кисню помітно уповільнюється при додатку механічного навантаження, що найчіткіше проявляється у руд і котунів з низькою міцністю, тобто, у багатьох гематитових руд. У магнетитових руд це уповільнення майже виявляється. Це зменшує перевагу гематитових, що полягає в тому, що при відновленні без навантаження вони відновлюються краще за магнетитові руди.

У роботі [18] досліджено зміну металургійних властивостей залізородних матеріалів при використанні як відновників Н<sub>2</sub>, СО та газових сумішей різного складу типу СО-СО<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>.



Відновленню піддавали котуни діаметром 12-16 мм і виготовлені з агломерату кубики зі сотроною 12-14 мм. Досліджувалися котуни ЦГЗК, ССГЗК (промислові та двошарові офлюсовані), котуни фірми Фест (Австрія) та фірми Кобе стил (Японія).

У піч, нагріту до 300<sup>0</sup>С, поміщали у підвішеному до ваги ніхромовому кошику зразки відновлюваного матеріалу, який прожарювали до постійної маси в струмі азоту протягом 10-15 хв. Відновлення рудного матеріалу проводили при неперервному підвищенні температури в реакційній зоні від 300 до 1200<sup>0</sup>С протягом 4 год при періодичній зміні складу газу-відновника типу СО-СО<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> (витрата 4 дм<sup>3</sup>/хв). Після відновлення залізорудні матеріали охолоджували в струмі азоту та визначали зміну об'єму після відновлення, міцність на роздавлювання та стирання.

Найбільшу відновлюваність при нагріванні до 1200<sup>0</sup>С мають котуни ЦГЗК (91,8%) і промислові котуни ССГЗК (84,4%). Характерно, що двошарові офлюсовані котуни ССГЗК, котуни фірм Фест (Австрія) і Кобе стил (Японія), що краще зберігають міцнісні властивості при відновленні, мали нижчу відновність - відповідно 76, 74,4 і 81,5%.

При відновленні обсяг залізорудних матеріалів зростає на 7-24%, досягаючи максимуму при ступеню відновлення 30-45%, при найбільшому вмісті FeO кубічні грати магнетиту ( $\alpha=8,38 \text{ \AA}$ ), що протікає через утворення магнетиту. Дослідження показали, що перший ступінь цього перетворення  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  йде зі збільшенням обсягу на 7,7%, тоді як фазове перетворення  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ , що протікає через утворення магнетиту  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , в кінцевому рахунку характеризується зменшенням на 15-25%.

При знакозмінній зміні обсягу рудних компонентів сировини у зразках виникають напруги, що призводять до їх розтріскування зі збільшенням об'єму та зниженням міцності. Зміна обсягу тим більша, чим вище температура відновлення.

Відновлені зразки випробовували на роздавлювання та стирання. На початок процесу перетворення гематиту на магнетит міцнісні властивості

залізорудних матеріалів змінюються незначно. При утворенні магнетиту (ступінь відновлення 11,2-14,6%) міцнісні властивості всіх залізорудних матеріалів (як котунів, так і агломератів) знижуються. Міцність на роздавлювання котунів ЦГЗК, звичайних і двошарових котунів ССГЗК зменшилася відповідно з 151, 166 і 198 до 75, 28,5 і 31 кг/окатиш. Агломерати при відновленні до магнетиту мають значно більшу міцність при роздавлюванні, ніж багато видів котунів. Однак міцність добре обпалених японських котунів знижувалася в цих умовах з 233 до 122 кг/окатиш і була порівнянна з міцністю стабілізованого агломерату.

Міцність при стиранні котунів ЦГЗК, ССГЗК (звичайних і двошарових), що оцінюється по виходу фракції >5 мм після випробування в ребристому барабані, знизилася до 40, 41,5 і 84% (при відновленні до магнетиту та вюститу). Характерно, що міцність при стиранні двошарових котунів, при отриманні яких високоосновний розплав поширюється на значну глибину оболонки, порівнянна з міцністю агломерату. При випробуванні на роздавлювання ці котуни так само розсипалися в порошок, як котуни ЦГЗК і ССГЗК, а руйнувалися подібно агломерату на шматочки крупністю 5-7мм. При збільшенні у зразках частки металевого заліза їх характеристики міцності дещо зростають [18].

У роботі [19] було досліджено зміну структури та міцності котунів на різних стадіях відновлення природним газом.

Досліджували котуни з рудною та шлаковою зв'язками. Для отримання рудної зв'язки (магнетитової) неофлюсовані котуни обпалювали в нейтральній атмосфері при 1100<sup>0</sup>С для отримання шлакової зв'язки - при 1200<sup>0</sup>С. Відновлені котуни охолоджували в струмі природного газу.

Результати дослідів показали, що котуни з рудною зв'язкою (неофлюсовані) мають у процесі відновлення меншу міцність, ніж котуни зі шлаковою зв'язкою (офлюсовані). Руйнування зв'язки та обумовлене цим зниження міцності на початку процесу відновлення суто рудних котунів пов'язане з інтенсивним розвитком фази вюститу. Деяке зростання міцності

спостерігається в металізованих котунах, основу структури яких становлять слабозв'язані між собою губчасті агрегати металевого заліза. Однак при збільшенні часу відновлення до 20 хв і більше одночасно з процесом металізації відбувається інтенсивне відкладення сажистого вуглецю і внаслідок цього розпушування котунів.

При відновленні офлюсованих котунів шлакова зв'язка розтріскується і перетворюється на дрібнозернистий силікат, що містить вкрай дрібні включення рудного мінералу.

У стадії відновлення, що відповідає мінімальному зниженню міцності, у складі котунів переважає вюстит. Перетворення магнетиту на вюстит в периферичній частині зазвичай супроводжується сильним руйнуванням зерен з утворенням витягнутих пір, що призводить при подальшому відновленні до утворення тонких волокнистих і сітчастих агрегатів металу. У центральній частині виникають переважно губчасті агрегати металевого заліза.

У навуглецьованих котунах залізо в периферичній частині дисперговано. При цьому міцність котунів знижується, досягаючи мінімального значення 20-25 кг/окатиш при вмісті вуглецю 10-12%.

Введення в шихту котунів 5-10% твердого відновника призводить до збільшення швидкості відновлення котунів сирим природним газом на 15-20% [19].

Бачиніна Г.А., Андронов В.М., Єфанова Н.І., Берестовецький В.Л. в роботі [20] досліджували залежність температури початку пластичної деформації промислових офлюсованих ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2=0,7$ ) та дослідних неофлюсованих ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2=0,1$ ) окатишів від температури та ступеня відновлення. Окатиші були виготовлені на Криворізькому центральному гірничо-збагачувальному комбінаті та служили для виробництва губчастого заліза у дослідно-промисловій шахтній печі об'ємом 10 м<sup>3</sup> комбінату «Запоріжсталь». Відновником був конвертований газ, що вдмухується в піч при температурі 1150-1200<sup>0</sup>С.

У дослідах використовували котуни діаметром 12-15мм. Була вивчена відновність офлюсованих і неофлюсованих котунів при 800 і 900<sup>0</sup>С. Витрата водню становила 3л/хв.

При 900<sup>0</sup>С офлюсовані котуни відновлювалися краще за неофлюсовані, при 800<sup>0</sup>С ця відмінність значною мірою зменшувалася. Відмінність у відновлюваності котунів пояснюється тим, що пористість офлюсованих котунів трохи вище, ніж неофлюсованих, проте мікропористість їх приблизно однакова.

Випробування котунів на розм'якшення проводили на установці наступної конструкції. У середині силітової печі вертикально закріплена сталева труба з кришками, що нагвинчуються на кінці. У нижній кришці є штуцер для введення газу та штуцер для встановлення термомпари у робочій зоні печі. У середній частині труби за допомогою відрізка меншого труби діаметра встановлено склянку, по периферії днища якого просвердлено ряд отворів для вільного виходу газу. Ступінь відновлення котунів визначали за втратою ваги зразка. Усадка зразка фіксувалася на діаграмі потенціометра одночасно з температурою робочої зони. Нагрів проводили зі швидкістю 7-10<sup>0</sup>С/хв. Навантаження на окатиш становило 2 кг.

За температуру початку розм'якшення приймали температуру, за якої на лінії, що відповідає рівномірному переміщенню штока, спостерігався перегин. При температурі відновлення 900<sup>0</sup>С температура розм'якшення офлюсованих котунів на 25-30<sup>0</sup>С нижче температури розм'якшення неофлюсованих котунів при всіх ступенях відновлення. Зі збільшенням ступеня відновлення котунів обох видів температура розм'якшення безперервно знижується і для повністю відновлених котунів становить близько 1050<sup>0</sup>С. При температурі відновлення 1200<sup>0</sup>С на кривій спостерігається мінімум, що відповідає невеликим ступеням відновлення (10-15%), потім температура розм'якшення знову підвищується.

Для котунів зі ступенем відновлення 90% температура початку деформації в інтервалі температур 700-1100<sup>0</sup>С не залежить від температури відновлення. Підвищення температури розм'якшення відбувається лише за температури відновлення вище 1100<sup>0</sup>С.

Подібне зміцнення пояснюється утворенням міцного металевого каркасу за високих температур відновлення. При відновленні пористість залізородних котунів зростає. Окатиш при цьому набуває будови, що нагадує губку. Розм'якшення такого пористого матеріалу супроводжується пластичною деформацією, зминанням стінок пір. При температурі 800<sup>0</sup>С виділення металевого заліза мають вигляд ажурної сітки. При температурі відновлення 1150<sup>0</sup>С металеве залізо зосереджено на поверхні пір, вся структура нагадує осередки, облямовані при високих ступенях відновлення товстою плівкою заліза. Міцність такого каркаса досить велика і для його зминання потрібні вищі температури.

Зміцнення котунів, що відновлюються при 1200<sup>0</sup>С, відбувається вже при низьких ступенях відновлення, коли процес відновлення протікає з великою швидкістю. Тому на поверхні окатишу вже утворюється каркас із металевого заліза, що оберігає окатиш від зминання, а внутрішню частину окатиша від розм'якшення [20].

Окатиші, що отримуються при відновленні в дослідно-промисловій шахтній печі об'ємом 10 м<sup>3</sup>, на вигляд можна розділити на два типи: котуни зі звичайною шорсткою поверхнею і котуни з гладкою, дуже ущільненою поверхнею. Ці два типи котунів різко відрізняються властивостями міцності. При однаковій мірі відновлення, що наближається до 100%, міцність звичайних котунів з шорсткою поверхнею досягає 200-400 кг/окатиш. Температура початку деформації під навантаженням для котунів першого типу близько 1050-1080<sup>0</sup>С, а для котунів другого типу 1350<sup>0</sup>С.

Мінералогічне дослідження котунів обох типів показало, що міцність котунів другого типу обумовлена наявністю ущільнених монолітних структур металевого заліза на поверхні зразка. Виділення металевого заліза на периферії котуна з гладкою поверхнею утворюють суцільні, зрощені один з одним агрегати на відміну від тонкої «ажурної» сітки металевого заліза в центрі котуна.

Основною причиною утворення щільного поверхневого шару у котунів, що відновлюються у шахтній печі, є перебування їх у фурменній зоні – області найвищих температур. Тут відбувається перегрів поверхні металізованого окатишу вище температур початку пластичної деформації, ущільнення зернистих агрегатів металевго заліза поверхні суцільний каркас. Окатиш набуває значної міцності, що оберігає його від руйнування при подальших перевантаженнях та транспортуваннях.

Деформація шару котунів визначається насамперед його порізністю, пористістю окремих котунів і ступенем їх відновлення, причому при кожній даній температурі система прагне до рівноваги: зовнішнє навантаження на ділянку шару врівноважується силами зчеплення між окремими котуни в точках їх дотику, а також між оками. При підвищенні температури міцність у цих точках виявляється недостатньою. Відбувається взаємне переміщення частинок у шарі, при якому збільшуються число контактів між частинками та площа їх дотику, що компенсує часткову втрату міцності насіння.

У лабораторних дослідах аналогічні явища відбуваються між фазовими складовими окатишу, розділеними порами.

Таким чином, температура початку розм'якшення відновлених котунів визначає початок деформації зразка. Температура початку деформації тим нижче, що менше число контактів у шарі і більше його порізність, і навіть більше пластичність зразка, тобто. коли пористість та вміст металевго заліза великі [20].

У роботі [22] були проведені досліди з метою вивчення поведінки котунів та агломерату в доменній печі на різних горизонтах. Вибір матеріалів виконували за допомогою зонда. Проби відібраних матеріалів досліджували на міцність, мінералогічний склад та ступінь відновлення.

Вивчалися котуни (окислені та неокислені) основністю 0,5-1,5, крупністю 14-16мм і міцністю у вихідному стані 80-320 кг/окатиш.

Дані досліджень показали, що характер відновлення агломерату та котунів по висоті печі практично однаковий. Вихідна міцність гранул

агломерату була в 2-2,5 рази нижче, ніж котунів тієї ж основності. Після відновлення, навпаки, міцність агломерату на середніх горизонтах шахти виявилася вищою за міцність котунів. Мимовільне руйнування агломерату крупністю 10-20 мм було незначним.

Міцність котунів на першому горизонті (верх шахти) збереглася досить високою (80-200 кг/окатиш), але на глибині 10 м (середина шахти, другий горизонт), вона знизилася на 10-40 кг/окатиш.

Оплавлені котуни походилися подібно до агломерату. На поверхні гранул неокислених котунів, обпалених в атмосфері двоокису вуглецю, а також котунів на цементній зв'язці тріщин не спостерігалось (середина шахти); при ступені відновлення 15-20% їх міцність знижувалася до 45-65 кг/окатиш. Міцність котунів і агломерату між другим і третім горизонтами (10-15 м нижче рівня засипу) змінювалася менш різко, ніж до другого горизонту. Фізико-механічний стан котунів і агломератів у шахті визначалося структурними змінами, що відбуваються головним чином між першим та другим горизонтами.

Максимальне зниження міцності котунів на одиницю висоти доменної печі спостерігалось при зміні ступеня відновлення від 5 до 15%. У процесі розміщення більшості залізородних матеріалів найбільша кількість дрібниць утворювалася при досягненні ступеня відновлення 25-35%.

Відновлення до металевого заліза на нижніх горизонтах шахти сприяло стабілізації, а іноді й покращенню характеристик міцності котунів. При ступеня відновлення 70-80% міцність гранул порівняно із зразками, що складаються з вюститу, зростала у 2-3 рази.

Цементна зв'язка в котунах перешкоджала зварюванню зерен заліза. При високих температурах змінювався агрегатний стан цементної зв'язки, що призводило до набухання котунів з подальшим руйнуванням і утворенням великої кількості пилюватих фракцій.

У процесі інтенсивного відновлення окислених котунів металеве залізо утворюється в основному після порушення цілісності структури в процесі перебудови ромбодричних ґрат в кубічну ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  -  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Тому міцнісні

характеристики котунів внаслідок утворення металевого заліза не покращувалися і котуни, як правило, мимоволі руйнувалися по всьому перерізу печі. Найбільшого руйнування зазнавали погано обпалені котуни. Добре обпалені неокислені котуни мимоволі не руйнувалися. Неофлюсовані котуни руйнувалися менше, і на нижніх горизонтах їхня міцність була в 1,5 рази вищою, ніж офлюсовані.

Високоофлюсовані котуни з феритомагнетитової структурою, отримані з концентратів з низьким вмістом  $\text{SiO}_2$ , при високих ступенях відновлення зберігали 50% вихідної міцності без зовнішніх ознак руйнування.

Таким чином, зниження міцності агломератів і котунів у верхніх горизонтах печі при малій мірі відновлення пояснюється сумарним впливом температури та процесів виникнення нової фази (на початку відновлення).

Стійкими до руйнування в умовах доменної плавки є неокислені котуни, а також агломерат і котуни з дрібнозернистою структурою. Найбільшого руйнування в печі піддаються погано обпалені котуни. Зміна міцності агломерату та котунів на печах, що працюють з різною інтенсивністю, залежало від ходу процесів відновлення [22].

Робота [23] присвячена визначенню газодинамічного опору шару залізорудних матеріалів у процесі відновлювально-теплової обробки. Сутність такого способу полягає в наступному: пробу матеріалу поміщають у трубчастий реактор між ґратами для відновлення під постійним навантаженням. О. Бургхардт та К. Гребе [15] застосували аналогічний метод для дослідження механічних характеристик залізних руд та котунів при озотермічному відновленні.

Газодинамічний стан шару матеріалів оцінювали за величиною його усадки  $\Delta H$  та перепаду тиску газу  $\Delta p$ , а розвиток відновного процесу – щодо зміни ступеня використання хімічної енергії газів  $\Delta \text{CO}$ .

У початковий період досліду більш пористі і легковідновлювані котуни приводять до кращого використання хімічної енергії газу, ніж важковідновний агломерат, що має меншу відкриту пористість. Однак у міру підвищення



відновного потенціалу газу, що подається в шар, починаючи з температури  $700^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\text{CO}$  агломерату перевищує  $\Delta\text{CO}$  котунів. З наведених даних випливає, що в результаті більшої схильності до розм'якшення котунів, порівняно з агломератом, їх підвищена відновність може не реалізуватися в умовах доменної печі [23].

У роботі [24] зміни, що відбуваються у шарі залізородних матеріалів при їх відновлювально-тепловій обробці, вивчали в реакторі діаметром 100 мм, в якій проба була під навантаженням 0,196 МПа. Витрата газу становила 30 л/хв.

В результаті досліджень було отримано такі висновки:

1. Досліджені типи залізородних матеріалів (агломерати та котуни) суттєво різняться за газодинамічними характеристиками шару в неізотермічних умовах відновлювально-теплової обробки. Порівняно з агломератом, котуни вище  $850\text{-}1000^{\circ}\text{C}$  зазнають великої усадки і для них характерний більший перепад тиску в шарі, що обумовлено особливостями зміни макро- і мікроструктури матеріалів, їх агрегатного стану та мінералогічного складу.
2. У досліджених матеріалах до температури  $850^{\circ}\text{C}$  фазові та структурні перетворення протікають у твердій фазі. Основні процеси полягають у переході  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$  та  $\text{Fe}_x\text{O}$ . Зменшення газопроникності шару у цьому температурному режимі обумовлено руйнуванням матеріалу під впливом відновлювального процесу.
3. Вище  $850^{\circ}\text{C}$  основна стадія відновлення відповідає перетворенню  $\text{Fe}_x\text{O} \rightarrow \text{Fe}_{\text{мет}}$ . Корінні зміни шлакової зв'язки полягають у розкловуванні скла та виділенні при цьому волластоніту, а також у взаємодії вюститу та силікатів з утворенням олівіну у твердій фазі або у розплаві. Інтенсивне збільшення усадки та перепаду тиску газу при температурах вище  $850^{\circ}\text{C}$  обумовлено збільшеною здатністю шматків до

деформації та процесами спікання вюститу або металевого заліза у присутності рідкої фази. На утворення відносно низькотемпературного розплаву при взаємодії вюститу та силікатних фаз сприятливо впливають калій, алюміній та кремній, що входять до їх складу.

4. На відміну від агломератів, в котунах створюються умови для одночасного утворення великої кількості розплаву практично по всьому об'єму гранули. Крім того, менша відновність агломерату обумовлює більш виражену зональність у шматку по його периферії та навколо великих пір. Зазначені обставини пояснюють різну швидкість усадки агломератів і котунів при температурі вище 850<sup>0</sup>C [24].

## **2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗМ'ЯГЧЕНОСТІ ОКАТИШІВ І ОПИС УСТАНОВКИ**

### **2.1 Установа для визначення розм'якшення**

З наведених у літературному огляді даних видно, що методики і установки, що застосовувалися тривалий час, для визначення температури початку і кінця розм'якшення мали ряд недоліків і не могли забезпечити отримання цілком достовірних і об'єктивних результатів, хоча в деякій мірі відповідали якості залізорудних матеріалів, що проплавляються в той час у доменних печах. Однак, у міру розвитку доменного виробництва та підвищення вимог до якості залізорудних матеріалів удосконалювалися установки та методика визначення температури розм'якшення. Спочатку дослідження були присвячені вивченню розм'якшення руд та агломератів, а після появи у 60-х р.р. нового способу окускування тонкоподрібнених концентратів - обгортання, почалися і дослідження розм'якшування котунів. В даний час залізорудна частина шихти доменних печей більшості металургійних заводів складається з агломерату та котунів. Кількість котунів у шихті доменних печей комбінату «Запоріжсталь» становить 30%.

Окатиші в печі, опускаючись, поступово нагріваються і за певної температури розм'якшуються і плавляться. Окатиші складаються з багатьох мінералогічних складових, одночасне плавлення яких неможливе. Першими починають плавитися з'єднання та суміші з'єднань з низькою температурою плавлення. Поява розплавів змінює механічні властивості котуна: він стає податливим - деформується і ущільнюється під навантаженням, одним словом. Розм'якшується. Розм'якшення котунів відбувається в інтервалі температур, який залежить від хімічного та мінералогічного складів концентрату, розміру зерна, умов випалу, швидкості нагрівання та навантаження на матеріал.

У доменній печі істотно впливає рух газів надає розм'якшена маса залізорудних матеріалів. Чим менше за висотою печі зона розм'якшених мас, і

що швидше відбувається процес плавлення залізородних матеріалів, краще газодинамічні умови роботи доменної печі, що забезпечують більш рівномірний розподіл газового потоку по перерізу печі і, отже, більш економічну роботу. Для оптимальних умов доменної плавки потрібні котуни, що мають досить високу і близьку до агломерату температуру початку розм'якшення і плавляться у вузькому температурному інтервалі.

Таким чином, особливий теоретичний і практичний інтерес представляє вивчення процесу розм'якшення котунів в умовах доменної печі.

Для визначення температури розм'якшення котунів була використана установка, що має наступні переваги в порівнянні з попередніми:

- нагрів зразка здійснювався за програмою, що забезпечувало однаковий режим нагріву всіх зразків;

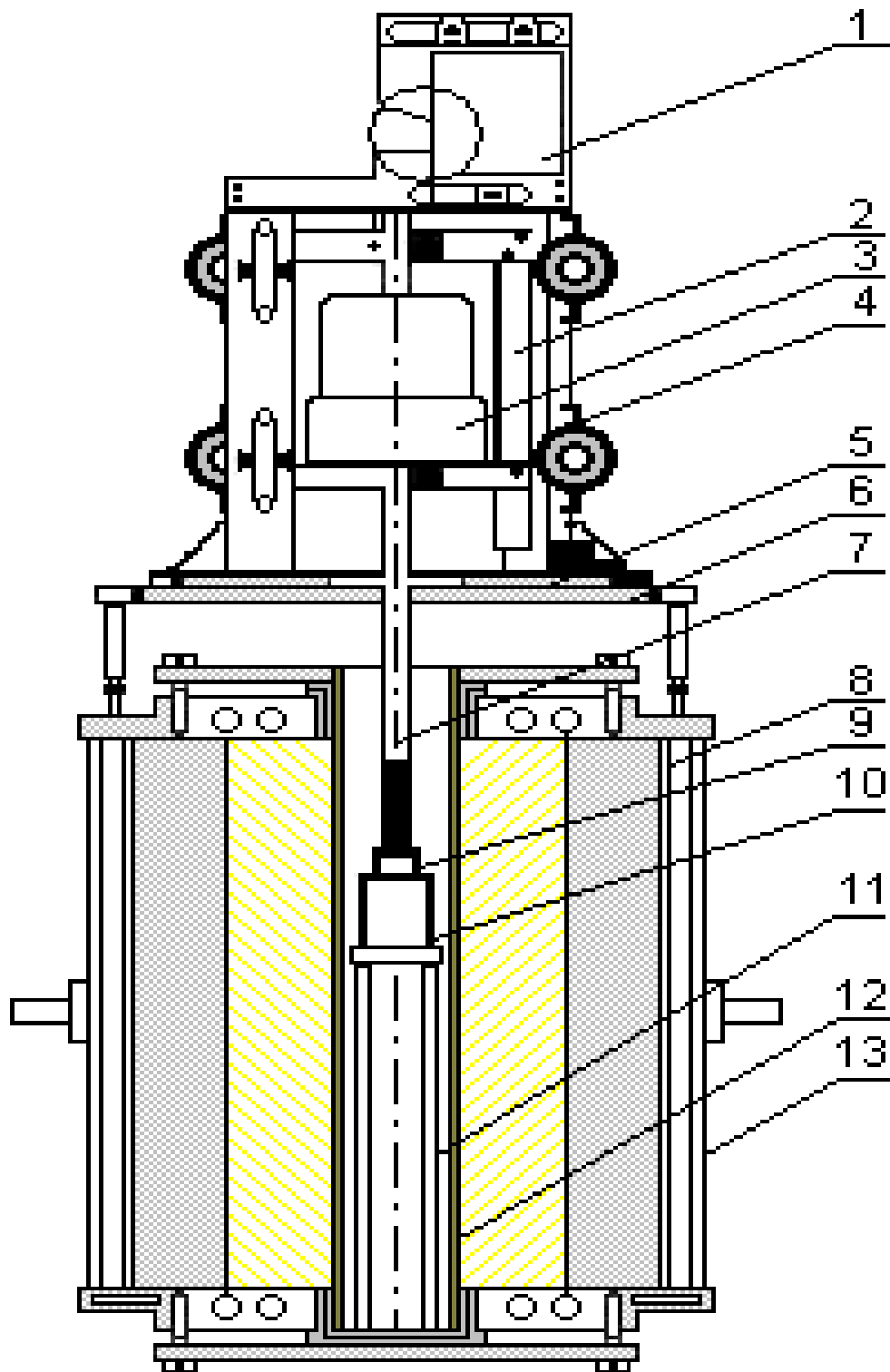
- реєструючий прилад робив запис температури та усадки матеріалу на діаграмній стрічці, внаслідок чого записувалася крива розм'якшення досліджуваного матеріалу;

- Датчик усадки дозволяв встановлювати необхідний масштаб кривої розм'якшення на діаграмі.

Схема установки наведена на рисунку 2.1.

Нагрівач печі (графітова труба внутрішнім діаметром 76 мм) живиться через пічний трансформатор ОСУ-40 від мережі 380 В. Крива залежності усадки проби матеріалу від температури відтворюється на стандартній діаграмі в системі координат: температура<sup>0</sup>С – усадка (мм) із збільшенням у 5 разів.

Максимальну температуру початку усадки та мінімальний температурний інтервал розм'якшення мають невідновлені котуни (1100<sup>0</sup>С і 1250<sup>0</sup>С відповідний). Мінімальну температуру початку і кінця усадки мають котуни, відновлені на 58,7% (955 і 1120<sup>0</sup>С відповідно). Ступеню відновлення 92,1% відповідає найбільший температурний інтервал розм'якшення (225<sup>0</sup>С).



1 - потенціометричний датчик; 2 - рухома рамка; 3 – вантаж; 4 - дві вертикальні стійки; 5 - верхні санки; 6 - нижні санки; 7 - шток з термопарою; 8 - корпус печі; 9 – металевий наконечник; 10 - тигель; 11 - підставка для тигля; 12 - графітова труба; 13 – дві шини струмопідведення

Рисунок 2.1 - Установка для визначення розм'якшення котунів

У відновлених на 92,1% котунів на кривій розм'якшення відсутня закруглена ділянка в початковий момент розм'якшення, що викликається ущільненням зразка при розм'якшенні невідновлених і відновлених до ~70% котунів. Усадка відбувалася практично по прямій лінії пропорційно до підвищення температури.

## **2.2 Методика дослідження процесу розм'якшення залізородних матеріалів**

Визначення температури початку та кінця розм'якшення випробуваного матеріалу проводилося наступним чином. Пробу котунів дробили, а потім навішування (70 г) фракції 1-3 мм на установці з визначення відновлюваності залізородних матеріалів у струмі водню при 800<sup>0</sup>С піддавали різного ступеня відновлення. Ступінь відновлення зразків оцінювали за втратою їхньої маси при відновленні. Для визначення температури розм'якшення з усієї маси відновлених котунів брали 50 г (решту проби піддавали хімічному аналізу), поміщали в тигель з жароміцної сталі (внутрішній діаметр тигля 30 мм, висота 50 мм, товщина стінки 3 мм). На поверхню матеріалу встановлювався наконечник із жароміцної сталі діаметром 18 мм. Тигель з пробкою та наконечником ставився у піч, попередньо нагріту до 600<sup>0</sup>С. Зверху в наконечник вводився гарячий спай хромель-алюмелевої термопари, захищеної соломкою алунодової діаметром 10 мм, яка виконувала роль натискного штока. Шток жорстко з'єднувався з рухомою рамкою затискним гвинтом.

Перед початком дослідження рухома рамка встановлювалася на висоті 15 мм від упору. Тиск наконечника на матеріал 0,196 МПа. Швидкість нагріву проби у печі – 10 град/хв. За температуру початку розм'якшення була прийнята температура, що відповідає початку усадки матеріалу. Температурою кінця розм'якшення умовно прийнята температура, при якій наконечник поринав у пробу на глибину 15 мм. Для зменшення впливу газового середовища на

результати експерименту протягом усього досвіду робочий простір печі подавали очищений азот.

### 2.3 Результати дослідження

Досліджували розм'якшення котунів ЦГЗК та ПГЗК, продукція яких у різні роки надходила на комбінат «Запоріжсталь». Хімічний склад досліджуваних котунів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Хімічний склад досліджуваних матеріалів

Гірничозбагачувальний комбінат	Вміст оксидів, %												інш. окатиша, кг/окат.
	Fe	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	P	S	CaO+MgO/SiO <sub>2</sub>	
ПГЗК	60,08	3,26	82,20	0,37	0,88	12,21	0,47	0,039	0,044	0,003	0,002	0,10	231
ЦГЗК	60,27	3,02	82,74	4,73	1,07	7,4	0,53	0,029	0,06	0,021	0,030	0,78	215
Агломерат	51,46	13,98	58,00	13,2	1,58	10,71	1,46	-	1,0	0,03	0,04	1,38	-

Для вивчення розм'якшення відновлених котунів зразки піддавали відновленню до різного ступеня в струмі водню на спеціальній установці. Ступінь відновлення зразка оцінювали втратою його маси при відновленні.

Хімічний склад відновлених зразків котунів ЦГЗК (табл. 2.2 і рис. 2.3) ілюструє зміну вмісту металевого заліза та його оксидів при відновленні котунів. Вміст Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> різко зменшується з 82% (невідновлений зразок) до 18,06% при ступеня відновлення 16,6%. Подальше відновлення котунів до 92,1% сприяє зниженню його до мінімуму (1,85%). Вміст FeO змінюється за екстремальною залежністю. У початковий період відновлення FeO зростає рахунок різкого зниження Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, досягаючи максимуму (65,47%) при відновленні до 16,6%. Потім, коли в котунах залишається невелика кількість оксиду заліза (16,0%), закис заліза починає зменшуватися до мінімуму (5,8%) при відновленні до 92,1%.

Таблиця 2.2 – Склад відновлених котунів ЦГЗК

Ступінь відновлення %	Вміст оксидів та елементів, %			
	$Fe_{обш.}$	$Fe_{мет.}$	$FeO$	$Fe_2O_3$
0	60,06	-	3,26	82,18
12,0	62,68	-	52,23	31,15
16,6	63,51	-	65,47	18,06
21,1	64,06	3,54	63,41	16,00
36,4	65,4	15,91	54,15	10,61
47,6	67,95	26,65	45,30	8,68
58,7	70,80	39,26	35,00	6,20
67,9	74,20	50,24	25,61	5,80
79,2	77,10	61,10	16,46	4,57
87,9	78,93	70,15	8,21	3,43
92,1	81,97	76,17	5,80	1,85

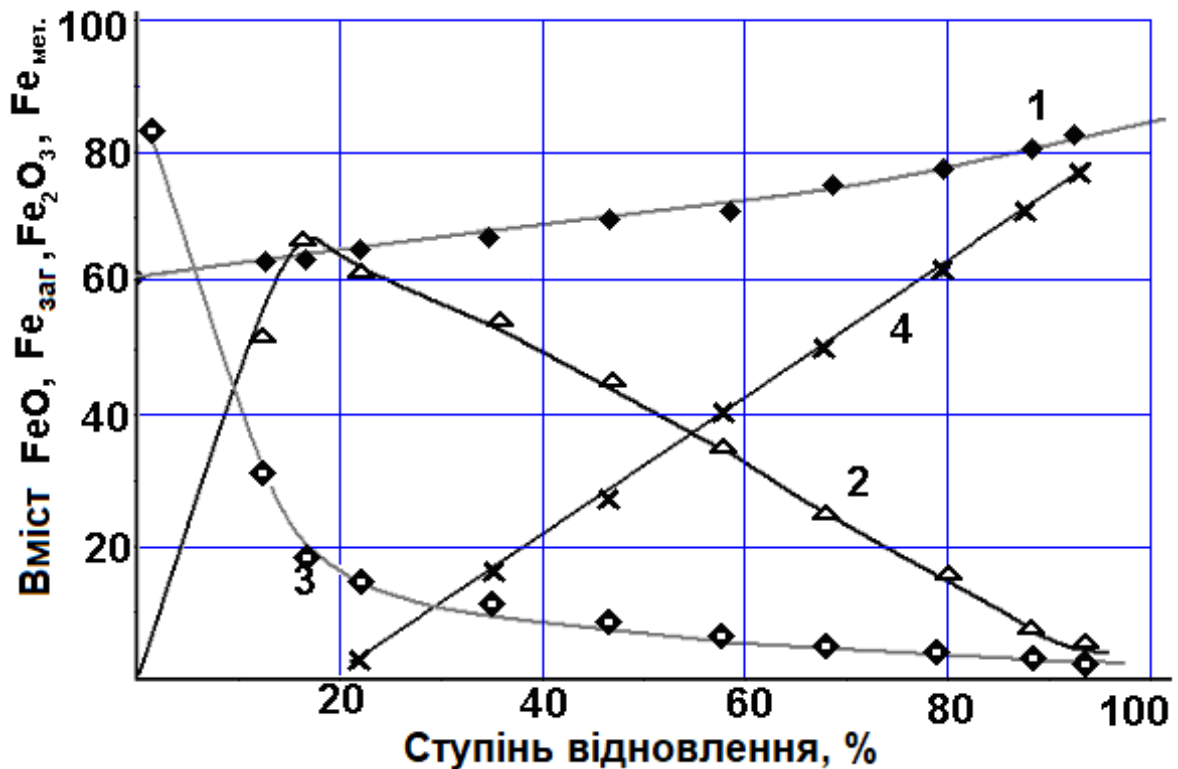


Рисунок 2.3 – Залежність хімічного складу котунів ЦГЗК від ступеня відновлення



У міру відновлення вміст загального заліза зростає з 60 до 82%, залежно від близької до прямолінійної за рахунок втрати кисню пробою котунів.

Металеве залізо (3,54%) з'явилося в окатишах за ступенем відновлення до 21,1% і потім, у міру її підвищення, кількість заліза зростає до максимальних значень 71,17% за ступенем відновлення 92,1%.

Результати дослідження розм'якшення відновлених котунів наведено в таблиці 2.3 та на рисунку 2.4.

Таблиця 2.3 – Середні значення температури початку ( $t_1$ ), кінця ( $t_2$ ) та інтервалу ( $\Delta t$ ) розм'якшення відновлених залізородних матеріалів

Залізо-матеріали	Параметр, °C	Ступінь відновлення, %										
		0,0	12,0	16,6	21,1	36,4	47,6	58,7	67,9	79,2	87,9	92,1
Окатиші ЦГЗК	С.В.	0,0	12,0	16,6	21,1	36,4	47,6	58,7	67,9	79,2	87,9	92,1
	$t_1$	1100	1035	1020	1020	1000	982	955	960	995	985	1000
	$t_2$	1225	1135	1130	1120	1120	1120	1120	1125	1140	1172	1225
	$\Delta t_2$	125	100	110	100	120	138	165	165	145	187	225
Окатиші ПГЗК	С.В.	0,0	9,2	16,9	22,4	38,1	44,3	52,6	68,8	75,4	86,5	92,4
	$t_1$	1095	1070	1045	1030	1010	990	990	990	1000	1045	1060
	$t_2$	1300	1220	1175	1170	1150	1120	1125	1130	1150	1170	1175
	$\Delta t_2$	205	150	130	140	140	130	135	140	150	125	115
Агломерат	С.В.	0,0	8,2	17,5	24,1	33,6	45,1	53,0	63,8	76,1	83,8	95,6
	$t_1$	1112	1069	1073	1036	1044	1035	1032	1019	1048	1025	1063
	$t_2$	1202	1160	1158	1150	1152	1169	1170	1184	1200	1231	1307
	$\Delta t_2$	90	91	85	114	108	134	138	165	152	206	234

Як видно з рисунка 2.4, температура початку розм'якшення котунів ЦГЗК знижується з 1100 °C (невідновлений зразок) до 955...960°C при відновленні до 58,7...67,9%. Подальше відновлення до 92,1% підвищує температуру початку розм'якшення котунів до 1000 °C.

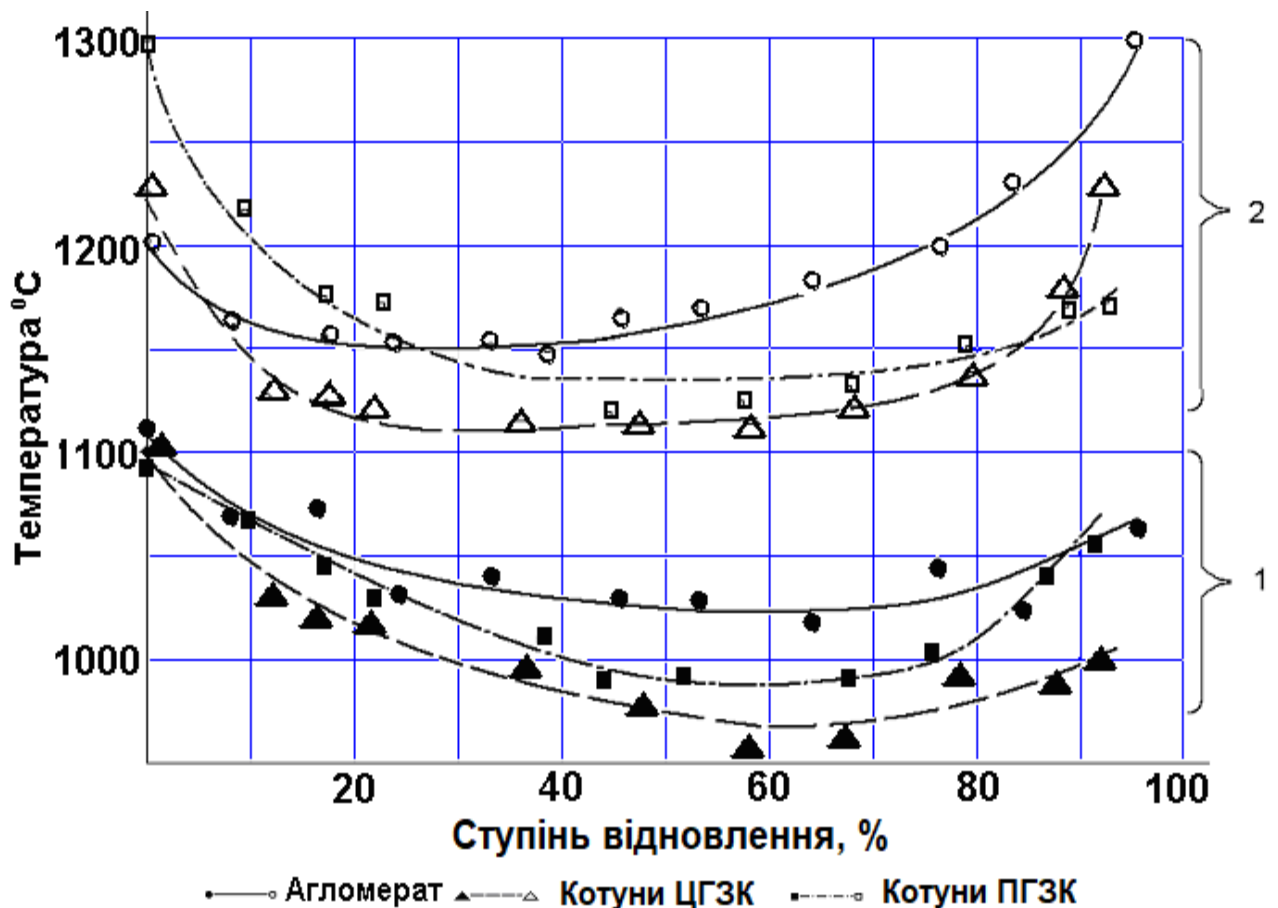


Рисунок 2.4 – Вплив відновлення залізорудних матеріалів на їх температуру початку (1) та кінця(2) розм'якшення

Температура кінця розм'якшення при відновленні змінюється приблизно так само, як температура початку розм'якшення. У котунів ЦГЗК відновлення на 10...20% сприяє зниженню температури кінця розм'якшення з 1225 °C (невідновлений зразок) до 1130...1120 °C і її величина не змінюється аж до ступеня відновлення 70...75%. Відновлення до 92,1% призводить до підвищення температури до 1225 °C.

Аналогічно змінюється температура початку розм'якшення котунів ПГЗК, проте вона дещо вища, ніж для котунів ЦГЗК. Температура початку розм'якшення невідновлених котунів - 1095°C. Для котунів, відновлених до 44,3...68,8%, мінімальне значення температури початку розм'якшення становить 990 °C, при подальшому відновленні до 92,4% температура початку розм'якшення зростає до 1060 °C.

Для котунів ПГЗК спостерігається більш плавне зниження температури кінця розм'якшення, її мінімальні значення (1120...1130 °С) мали місце при ступені відновлення 44,3...68,8%. Відновлення котунів до 92,4% підвищує температуру кінця їх розм'якшення до 1175 °С.

Таким чином, має місце однаковий характер зміни температури початку і кінця розм'якшення при відновленні котунів ЦГЗК і ПГЗК, а відрізняються лише абсолютні значення температури. Окатиші ПГЗК починають розм'якшуватися при вищій температурі, ніж котуни ЦГЗК. Це пояснюється тим, що котуни ЦГЗК частково офлюсовані і при дії температури і тиску вони починають раніше розм'якшуватися, так як їх шлакова складова має у своєму складі легкоплавкі сполуки на основі  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ . Окатиші ПГЗК є неофлюсованими з більш тугоплавкою шлаковою складовою ( $\text{SiO}_2$ ).

Хімічний склад досліджуваного агломерату наведено у таблиці 2.1.

Видно, що характер зміни температури початку і кінця розм'якшення агломерату при його відновленні такий же як і для котунів, проте агломерат починає розм'якшуватися при вищій температурі у всьому інтервалі відновлення, ніж котуни.

Для умов доменної плавки ця обставина має вирішальне значення. Агломерат в печі починає розм'якшуватися при вищій температурі і сприяє розташуванню зони первинного шлакоутворення нижче за висотою печі, ніж котуни. Це збільшує (по висоті печі) «суху» зону залізорудних матеріалів, що відновлюються, і, як наслідок, сприяє кращому використанню хімічної та теплової енергії висхідного відновлювального газу, що супроводжується зниженням витрати коксу. Крім того, зменшення по висоті печі зони первинного шлакоутворення знижує опір висхідному потоку горнового газу, що дозволяє подавати в піч більшу кількість повітря та підвищити її продуктивність.

Вплив ступеня відновлення котунів на розм'якшення можна пояснити їх мінералогічним складом. У невідновленому зразку спостерігається значна кількість тугоплавких фаз – гематиту та магнетиту. Підвищення ступеня

відновлення призводить до зникнення гематиту та різкого зменшення вмісту магнетиту (18,06% за ступенем відновлення 16,6%). Подальше відновлення котунів до 92,1% сприяє зниженню вмісту  $Fe_2O_3$  до мінімуму (1,85%). У початковий період відновлення вміст вюститу зростає за рахунок різкого зниження кількості  $Fe_2O_3$ , досягаючи максимуму (65,47%) за ступенем відновлення 16,6%. Максимальному вмісту вюститу відповідають мінімальні значення температури початку та кінця розм'якшення.

Петрографічний аналіз показав, що у зразках, відновлених більш ніж на 70-75%, металевого заліза так багато, що утворюється просторовий каркас у вигляді губки у кожному шматочку котунів. Тому зерна металевого заліза сусідніх шматочків зростаються між собою, утворюючи суцільний металевий каркас у всьому обсязі зразка, що досліджується, який повільно розм'якшується під впливом температури і тиску. У зв'язку з цим зразки починають розм'якшуватися при вищій температурі (окатиші ЦГЗК - 1000 °С, ПГЗК - 1060 °С). Температура кінця розм'якшення також зростає до максимальних значень: для котунів ЦГЗК - 1225 °С; ПГЗК - 1175 °С.

До раніше зазначених недоліків використання окатишів у шихті доменних печей додається ще один – нижчі температури початку розм'якшення, що сприяє більш ранньому початку первинного шлакоутворення і, як наслідок, розширення по висоті печі зони розм'якшених мас, що погіршує газодинаміку печі в цілому.

## **3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ**

### **3.1 Порівняльний аналіз показників доменної плавки із застосуванням у шихті котунів різної основності**

Агломерат, що характеризується меншою окисленістю, більш низькою міцністю при транспортуванні, перевантаженнях і великою кількістю зв'язки, має більш високу гарячу міцність, що призводить до вирівнювання вмісту дрібниці в шихті печі при проплавленні агломерату і котунів, схильних до розтріскування при відновленні [1]. Порівняльні результати промислових плавок на різних видах окускованої сировини неоднозначні [2] і показують менш ефективне використання підвищеного вмісту заліза в котунах внаслідок утворення пилюватих фракцій при їх відновленні, а також необхідності застосування вапняку для компенсації низької основності [3]. Перехід доменних печей на роботу з підвищеною часткою котунів у шихті супроводжується збільшенням витрати сирого вапняку до 150-200 кг/т чавуну, що суттєво погіршує показники доменної плавки. При високій витраті флюсу щодо ефективна заміна сирого вапняку вапном або конвертерним шлаком. Недоліком застосування вапна в доменній плавці є підвищений винос дрібних фракцій з колошниковим пилом.

Заміна офлюсованого агломерату неофлюсованими окатишами та спільне проплавлення неофлюсованих окатишів з високоосновним агломератом виявилися неефективними [2, 4], що також пояснюється розширенням зони когезії при використанні в шихті кількох видів залізородної сировини з різною розм'якшенням [5].

Аналіз результатів промислових дослідів [2] однозначно показав необхідність офлюсування окускованих матеріалів для виведення сирого флюсу з доменної шихти, при цьому ступеня офлюсування агломерату і котунів повинні бути близькими.

З метою проведення порівняльного аналізу роботи доменної печі на шихті, що складається з 30% агломерату та 70% котунів при зміні основності останніх, виконано математичне моделювання показників плавки, результати якого представлені на рис. 3.1. Базовий хімічний склад залізорудних матеріалів наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Хімічний склад окатишів та агломерату

Матеріал	Fe	FeO	CaO	$B = CaO/SiO_2$
Окатиші	63,56	2,02	3,00	0,60
Агломерат	52,96	13,30	12,30	1,25

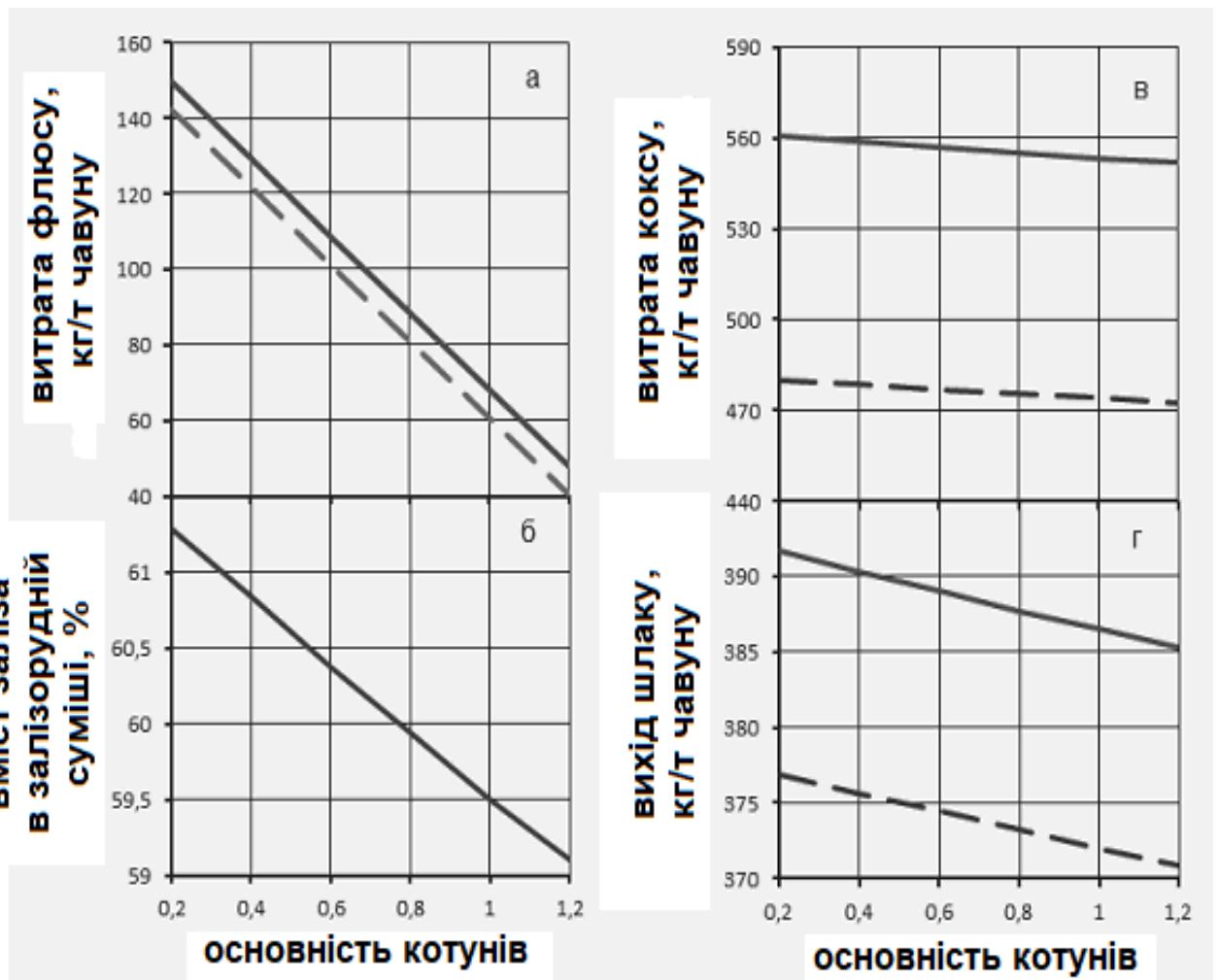


Рисунок 3.1 - Показники доменної плавки при підвищенні основності котунів

Моделювання показників плавки проводилося при постійних дутьових параметрах (вміст кисню у дутті 24,29 %, інтенсивність по дуттю 1,52 м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·хв), витрата природного газу 102,8 м<sup>3</sup>/т чавуну), що застосовувалися у практиці ведення доменної печі МК «Азовсталь», що працювала з питомою продуктивністю 1,438 т/(м<sup>3</sup>·добу) на шлаку основністю 1,185. Втрати при прожарюванні флюсу (сирого та частково обпаленого вапняку) становили 34,18%. Розрахунок проводився при постійній продуктивності печі та ступеня використання відновлювальної здатності газу щодо реакції відновлення FeO ( $\eta_{\text{FeO}}$ ), що дорівнює 20 (рис. 3.1, а, в, г, суцільні лінії) та 28% (пунктирні лінії), що відповідає реальним межам зміни даного показника в умовах МК «Азовсталь» [6].

Вміст заліза в залізорудній шихті змінювалося від 61,3 до 59,1 % у разі підвищення основності котунів від 0,2 до 1,2 (рис. 3.1, б) і відповідному збільшенні основності суміші агломерату та котунів від 0,515 до 1,215. У розглянутому інтервалі основності котунів зниження витрати флюсу склало 101,5 та 101,3, коксу 8,8 та 7,2, виходу шлаку 6,4 та 6,1 кг/т чавуну при  $\eta_{\text{FeO}} = 20$  та 28 % (рис. 3.1, а, в, г) відповідно. Ступінь прямого відновлення за М. А. Павловим  $r_d$  характеризувалася незначним зростанням на 1,16-1,44% (абс.).

Спільне застосування офлюсованих котунів і агломерату основністю 1,25 не забезпечило в розглянутих технологічних умовах повного виведення флюсу з шихти, який можливий при введенні в шихту поряд з основними котуни (В = 1,2) високоосновного агломерату (В = 1,8). Однак слід враховувати, що технологічно неможливо виробляти котуни з необхідною для доменної плавки основністю (за CaO/SiO<sub>2</sub> вище 0,8) при використанні залізорудних концентратів, що містять більше 5,0% кремнезему [7].

Зарубіжний досвід роботи доменних печей з часткою котунів у шихті 86,5-100 %, що містять 66-69 % заліза, та витратою вапняку 76-164 кг/т чавуну показав низький вихід шлаку 143-306 кг/т чавуну з підвищеним до 12- 19% вмістом MgO та високою основністю (CaO + MgO) / SiO<sub>2</sub> до 1,27-1,45. Внаслідок низького виходу шлаку в чавуні містилося підвищене до 0,035-

0,080% кількість сірки та знижений кремній [8].

Результати математичного моделювання показників доменної плавки, проведеного за дотримання умови сталості хімічного складу чавуну, %: 0,788 Si, 0,781 Mn, 0,021 S, 0,035 P, показали значний вплив на витрату коксу ступеня використання газу  $\eta_{\text{FeO}}$ . Підвищення  $\eta_{\text{FeO}}$  з 20 до 28 % за незмінних шихтових і дутьових умов сприяло зниженню витрати коксу практично на 80, флюсу на 8 і виходу шлаку на 14 кг/т чавуну.

Ступінь використання газу функціонально пов'язана зі ступенем непрямого відновлення  $r_i=(1-r_d)$  і залежить від тих самих факторів, що  $r_i$ : кількості та складу горнового газу, розподілу температури по висоті печі, часу перебування шихти при різних температурах та її фізико-хімічних властивостей, розподілу матеріалів із перерізу печі [9]. Застосування в доменній шихті котунів, що характеризуються більшою насипною масою і меншим коефіцієнтом внутрішнього тертя в порівнянні з агломератом, вносить зміни до структури стовпа шихтових матеріалів у печі, яка обумовлює його газопроникність як в цілому, так і розподіл газу по радіальних зонах колошника, і, інтенсивність плавки.

Статистичний аналіз виробничих даних показав тісний зв'язок між часткою котунів у залізородній частині шихти O (%) та інтенсивністю доменної плавки по газу в умовах МК «Азовсталь» (коефіцієнт парної лінійної кореляції  $r = -0,76$ ). Підвищення частки котунів у шихті з 48 до 84% супроводжувалося зниженням інтенсивності плавки по газу  $I_r$  (рис. 3.2) і описувалося рівнянням,  $\text{м}^3 / (\text{м}^3 \cdot \text{хв})$ :

$$I_r = 0,0004 O_2 - 0,0638 O + 4,657. \quad (3.1)$$

Теоретичне кореляційне відношення склало  $\eta_{\text{теор}} = 0,9$ , що свідчить про тісний зв'язок між інтенсивністю плавки та вмістом котунів у шихті.



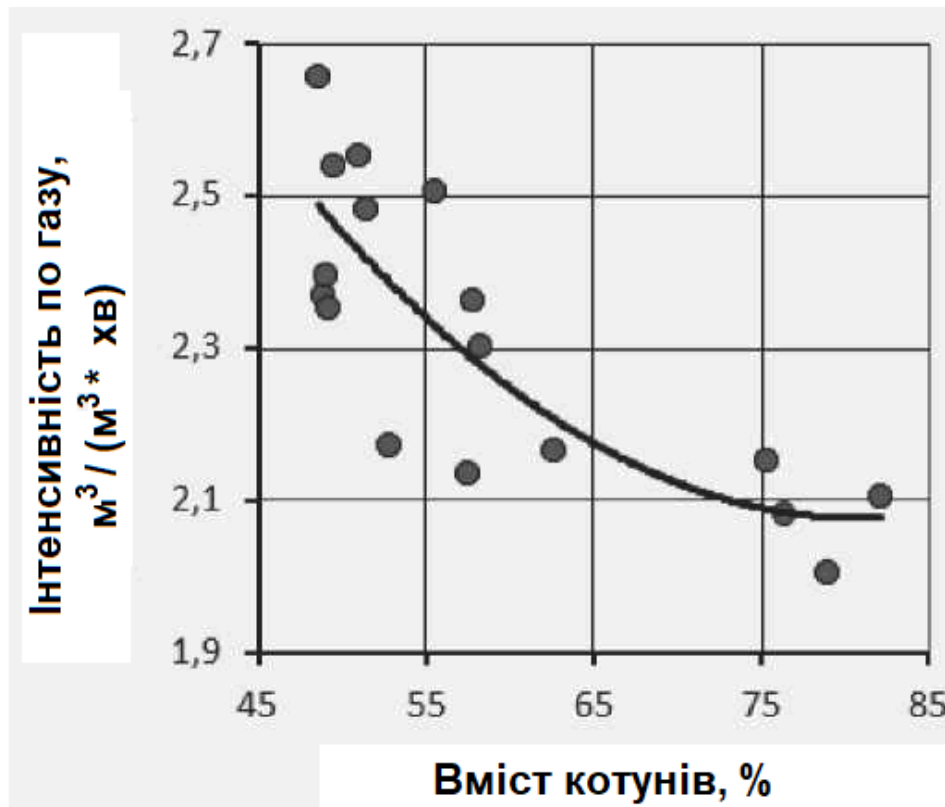


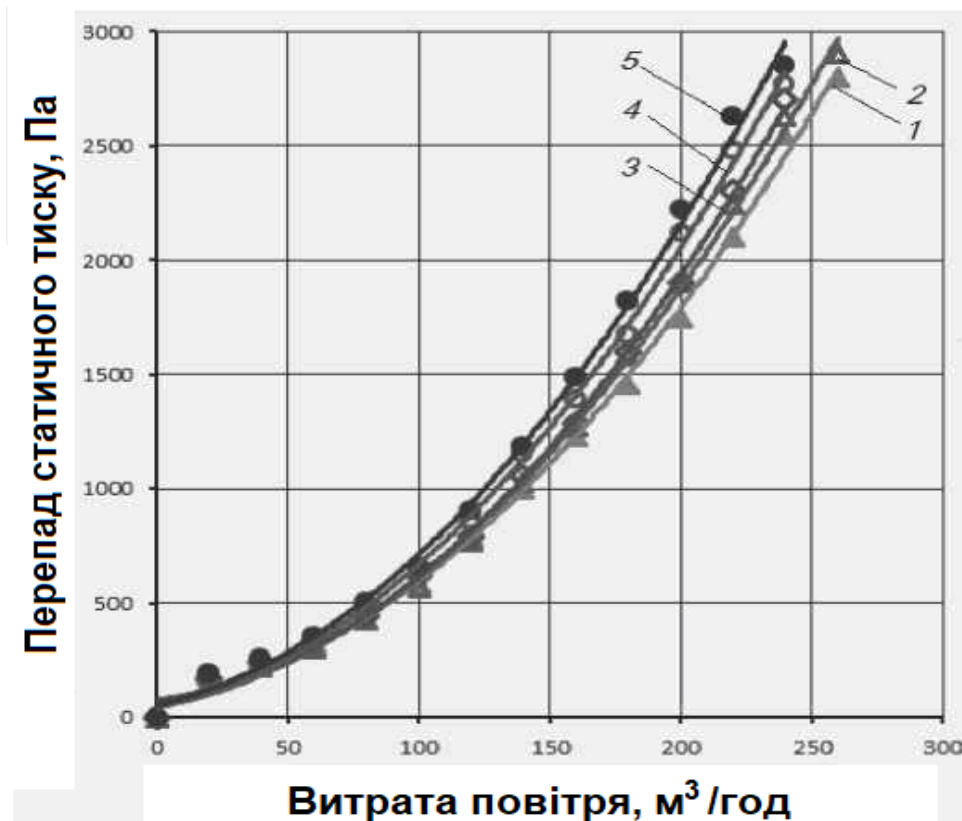
Рисунок 3.2 – Інтенсивність плавки газу при підвищенні частки когунів у шихті в умовах МК «Азовсталь»

Для вивчення впливу частки когунів на газопроникність залізорудної шихти проведено лабораторні дослідження. Одним із методів визначення опору матеріалів руху газів є вимірювання перепаду статичного тиску газу  $\Delta P$  у шарі сипучого матеріалу, який укладається в газодинамічний циліндр і продувається повітрям з послідовним збільшенням його витрати. Відомо, що найменшим опором проходження газів характеризується кокс, а перепад тиску газу в шарі залізорудних компонентів доменної шихти зростає з підвищенням у них частки дрібниці. Розподіл газу в стовпі шихтових матеріалів відбувається прямо пропорційно до газопроникності його окремих обсягів [10], тому в проміжній зоні доменних печей, що характеризується високим рудним навантаженням і великою кількістю дрібних фракцій, спостерігається найменша швидкість газового потоку.

Дослідження [11] перепаду статичного тиску газу в шарі промислових проб залізорудних матеріалів показали гіршу газопроникність агломерату, що

містить підвищену кількість дрібних фракцій, порівняно з котуни. При цьому збільшення частки котунів до 30% в суміші з агломератом сприяло підвищенню газодинамічного опору шару, а подальше зростання вмісту котунів в суміші призводило до його зниження.

Лабораторні дослідження в газодинамічному циліндрі діаметром 0,22 м перепаду статичного тиску газу (рис. 3.3) у шарах агломерату А (крива 1) та котунів О (крива 5) фракції 34 мм рівної висоти, що становить 150 мм, підтвердили кращу газопроникність агломерату [9] за відсутності у матеріалах дрібної фракції. При витраті повітря 180 м<sup>3</sup>/год перепад статичного тиску газу в шарі котунів вище, ніж в аналогічному шарі агломерату, на 25 %. Газопроникність шихти при пошаровому укладанні агломерату і коксу також вище в порівнянні з пошаровим укладанням котунів і коксу [12].



1 – агломерат; 2 – 25% котунів; 3 – 50% - котунів; 4 – 75% котунів; 5 – 100% котуни

Рисунок 3.3 – Газопроникність залізорудної частини доменної шихти при різному вмісті котунів (пояснення в тексті)

Лабораторні дослідження перепаду статичного тиску газу в бінарному шарі доменної шихти, представленому агломератом і котуни, з вертикальною межею розділу при різному співвідношенні компонентів показали поступове зниження її газопроникності зі зростанням вмісту котунів (див. рис. 3.3) 25 (крива 2), 50 (крива 3) та 75 % (крива 4) при рівній витраті повітря. Приріст газодинамічного опору у бінарних шарах залізородних матеріалів (криві 2-4) щодо різниці перепадів тисків в моношарах агломерату (крива 1), що розташовується на периферії, і котунів (крива 5), що розташовуються в центрі газодинамічного циліндра, був практично пропорційний частці останніх у шарі.

У виробничих умовах (див. рис. 3.2) підвищення частки котунів у шихті супроводжується уповільненням зниження інтенсивності плавки по газу, обумовленому, у тому числі, частковим перемішуванням котунів з коксом. Згідно з дослідженнями [13] газопроникність сумішей залізородних матеріалів з коксом вище вихідної газопроникності агломерату і котунів, тому застосування системи завантаження АККО↓, що сприяє змішуванню котунів і коксу в шарі подачі, дозволяє досягти найбільш високої і рівномірної по радіусу газопроникності шихти при 4 %. При завантаженні в доменні печі більш рухливі котуни, що мають менший у порівнянні з агломератом кут природного укусу, зміщуються в центральну зону печі [11, 14]. Отже, на доменних печах, що працюють з осьовою коксовою віддушиною, котуни з проміжної зони частково перетікають в осьову зону, перемішуючи з коксом. При цьому газопроникність осьової віддушини дещо знижується, проте залишається газопроникнішою в порівнянні з іншими радіальними зонами колошника. Таким чином, при відносно низьких витрат котунів у доменній шихті значного зростання газодинамічного опору стовпа матеріалів у печі не спостерігається.

У лабораторних умовах при частці котунів у шихті, що становить 25 %, приріст газодинамічного опору в бінарному шарі залізородних матеріалів (див. рис. 3.3, крива 2) щодо різниці перепадів тисків у моношарах агломерату та котунів (криві 1 і 5) дещо перевищував (на 13 %) частку котунів у шарі, що обумовлено максимальною (в даних умовах експерименту) площею дотику

двох вертикальних шарів зернистих матеріалів, що припадає на 1 % вмісту котунів, розташованих у центрі реактора, що склала 2 % від площі бічної поверхні робочого простору реактора  $S_6$ , зайнятого шихтою. При частці котунів у шихті, що становить 75%, площа зіткнення вертикальних шарів залізорудних матеріалів знижується до 1,15% від  $S_6$ , а приріст газодинамічного опору в зернистому шарі (крива 4) був дещо нижчим (на 14 %) вмісту котунів у шихті.

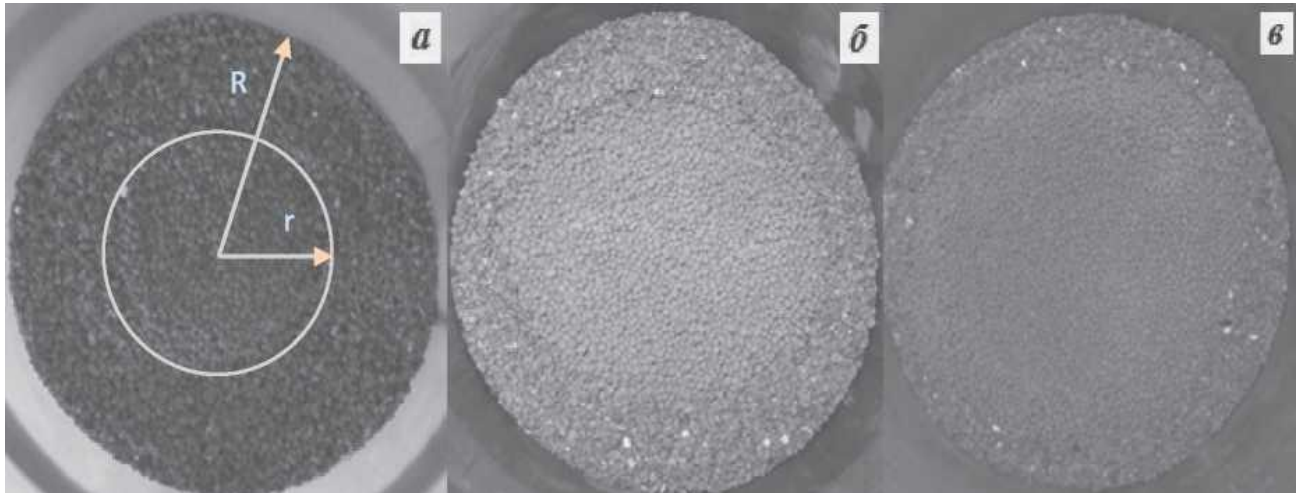


Рисунок 3.4 – Розташування залізорудних матеріалів у газодинамічному циліндрі вертикальними шарами з розміщенням біля стін агломерату та в центральній зоні котунів у кількості, %: 25 (а); 50 (б); 75 (в) (пояснення у тексті)

Таким чином, вплив міжшарового ефекту на вертикальній межі зіткнення матеріалів виявлялося пропорційно до питомої площі міжшарової поверхні  $S_{mc} = S_{ц} / V_{ц} = 2 / r$ , що припадає на 1 % вмісту котунів, розташованих у центрі реактора у вигляді циліндра об'ємом  $V_{ц}$  з радіусом  $r$  і площею бічної поверхні циліндричного шару котунів  $S_{ц}$  (рис. 3.4). При розглянутому розташуванні компонентів шихти зростання частки котунів у шихті супроводжується відповідним зниженням  $S_{mc}$  з  $4 / R$  при 25% окатишів у шихті до  $2,83/R$  та  $2,31/R$  при 50 та 75% відповідно, де  $R$  радіус робочого простору газодинамічного циліндра.

Крім того, бічна поверхня циліндричного шару котунів зі зростанням

його радіусу  $r$  має різний рельєф, що характеризується об'ємом порожнин або в поперечному перерізі (рис. 3.5) вільною площею  $S_{св}$ , що припадає на один котун, між поверхнею власне котунів і колом, що описує їх, яка є горизонтальною проекцією бічної поверхні циліндра. Для шару (рис. 3.5, а), представленого в поперечному перерізі трьома окатишами, вільна площа  $S_{св}$  становить  $0,53 S_{ок}$ , де  $S_{ок}$  площа перерізу одного окатиша, і може заповнюватися частинками агломерату, що мають неправильну форму, що призводить до зниження порізності міжшарової зони. При зростанні частки котунів у шихті радіус, утвореного ними циліндра збільшується (рис. 3.5, б), а вільна площа  $S_{св}$  скорочується. Так, вільна площа між шаром котунів, розташованих в одній площині (рис. 3.5, в), і дотичної до них прямої становить  $0,14 S$ . Скорочення  $S$  при підвищенні частки котунів у шихті перешкоджає заповненню порожнин на поверхні розділу компонентів агломератом, що сприяє деякому збільшенню порозності міжшарової зони. Отже, зі зростанням вмісту котунів у шихті при розглянутому укладанні матеріалів вплив міжшарового ефекту слабшає, а приріст газодинамічного опору уповільнюється.

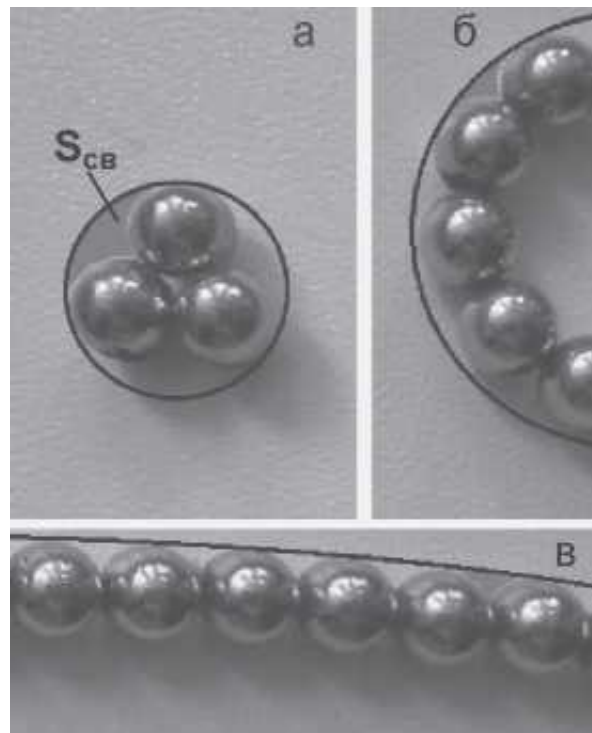


Рисунок 3.5 - Зовнішній шар котунів (пояснення в тексті)

Таким чином, вертикальна міжшарова зона може характеризуватись як підвищеним опором проходження газів, так і зниженим, що в останньому випадку може сприяти утворенню каналного ходу газів у печі, і, як наслідок, зниження ступеня використання теплової та відновлювальної енергії газового потоку.

### 3.2 Дослідження розм'якченості відновленого агломерату різних фракцій

Проби відновленого агломерату різних фракцій (масою 5...7 кг) відбирали під бункерами доменної печі під час розсіювання. Кожну фракцію агломерату дробили, потім розсівали на ситах розміром комірки 3 x 3 та 1 x 1 мм. Для подальших досліджень використали агломерат фракції 1.3 мм. Зразки відновленого агломерату отримували на установці визначення його відновлюваності. Як відновник використовували водень. Ступінь відновлення зразків оцінювали за втратою їхньої маси. Дослідження проводили з використанням методики, описаної у роботах [5,6]. Підвищення температури у робочому просторі печі проводили з постійною швидкістю (10 град/хв).

Температурою початку розм'якшення вважали температуру, за якої починалася усадка агломерату, температурою кінця розм'якшення температуру, за якої наконечник занурювався в агломерат на глибину 15 мм [6].

За своїм хімічним (табл. 3.2) та гранулометричним (табл. 3.3) складом агломерат неоднорідний.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад різних фракцій агломерату

Фракція, мм	Хімічний склад, %								
	<i>CaO</i>	<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>MgO</i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>MnO</i>	<i>Fe</i>	<i>FeO</i>	<i>CaO<sub>св</sub></i>	$(CaO+MgO)/SiO_2$
+60	13,54	10,93	1,06	1,29	0,61	51,49	10,47	1,15	1,34
60...40	13,96	10,74	0,99	1,30	0,48	51,40	11,43	1,09	1,39
40...25	13,71	10,61	1,05	1,36	0,52	51,67	12,55	1,13	1,39
25...10	13,00	12,02	0,98	1,30	0,63	50,91	13,09	1,26	1,16
10...5	13,49	10,48	1,04	1,27	0,48	51,39	13,94	1,41	1,38
-5	13,78	9,43	1,03	1,28	0,58	50,14	11,65	1,76	1,57

Таблиця 3.3 - Фракційний склад досліджуваного агломерату ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» [7]

Фракція, мм	+60	60...40	40...25	25...10	10...5	-5
Вміст, %	1,87	2,10	6,75	28,34	45,74	15,20

Наявність різних фракцій визначається повнотою спікання агломерату на агломераційній стрічці і, отже, повнотою проходження фізико-хімічних перетворень у процесі спікання.

Основна маса агломерату (80,83%) представлена розмірами частинок 5...40 мм. Хімічний склад відновлених агломератів різних фракцій, температура початку  $t_1$  (б) та кінця  $t_2$  (2) розм'якшення, а також інтервал розм'якшення ( $\Delta t$ ) наведені в табл. 3.4.

З табл. 3.4 видно, що агломерат вивчених фракцій має характерну особливість: підвищення ступеня його відновлення до 60...70% призводить до зниження температури початку розм'якшення, а відновлення до 92.94% підвищує температуру початку розм'якшення, проте вона за абсолютним значенням нижче, ніж у невідновленого агломерату .

З аналізу представлених даних випливає, що найнижчу температуру початку та кінця розм'якшення має агломерат фракції менше 5 мм. У міру збільшення крупності фракції температура початку та кінця розм'якшення підвищується та найвища температура зафіксована для агломерату фракції 60...40 мм. Наявність в агломераті фракції менше 5 мм, поряд зі зниженням газопроникності шару шихти, призводить до більш раннього утворення розм'якшеної маси по висоті печі. Для розробки рекомендацій щодо зниження вмісту в готовому агломераті зазначеної дрібної фракції необхідно розглянути умови його спечення шляхом вивчення мінералогічних складових спеченого агломерату.

Таблиця 3.4 - Хімічний склад різних фракцій відновлених агломератів, температура початку  $t_1$ , кінця  $t_2$  та інтервал  $\Delta t$  розм'якшення

Фракція, мм	Хімісклад, %				Ступінь відновлення агломерату, %	Параметри розм'якшення, °C		
	$F_{\text{заг}}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$F_{\text{FeO}}$	$F_{\text{мет}}$		$t_1$	$t_2$	$\Delta t$
+60	51,49	61,93	10,47	-		1144	1231	87
	52,25	35,53	35,20	-	11,60	1081	1191	110
	53,05	22,50	46,54	1,70	18,27	1068	1175	107
	54,96	7,73	57,14	5,10	28,17	1057	1166	109
	55,98	5,47	48,14	14,70	40,99	1045	1173	128
	56,74	3,43	47,74	17,20	44,33	1047	1181	134
	57,22	3,17	38,81	24,80	54,23	1051	1196	145
	59,24	2,80	31,60	31,70	62,41	1033	1188	155
	61,25	1,76	23,96	41,38	72,02	1025	1208	183
	62,05	1,71	12,92	50,80	83,84	1035	1229	194
63,12	1,83	5,06	57,90	92,01	1054	1285	231	
-60 +40	51,40	60,73	11,43	-		1138	1211	73
	53,19	36,70	35,40	-	9,06	1085	1188	103
	54,86	14,23	57,79	-	17,58	1063	1166	103
	56,34	13,38	50,26	7,14	25,82	1059	1169	110
	57,43	6,77	48,72	14,83	38,05	1058	1163	105
	58,52	5,74	46,27	18,55	42,20	1061	1178	117
	59,35	3,23	39,52	26,39	53,03	1049	1183	134
	60,98	4,16	28,95	35,58	63,01	1046	1200	154
	63,72	2,63	18,14	47,79	76,78	1058	1205	147
	65,36	2,43	13,97	52,81	81,55	1057	1223	166
66,11	1,40	4,66	61,51	92,97	1080	1330	250	
-40 +25	51,67	59,87	12,55	-		1138	1206	68
	49,33	42,83	24,88	-	11,42	1074	1195	121
	51,51	15,27	52,50	-	21,69	1075	1176	101
	52,12	12,97	48,65	5,20	29,16	1044	1170	126
	56,89	7,04	39,29	21,40	47,76	1056	1179	123
	57,03	3,67	32,40	29,26	60,00	1048	1183	135
	58,55	4,10	19,31	40,66	73,40	1032	1184	152
	59,38	3,96	15,90	44,24	77,25	1031	1191	160
	60,12	3,00	11,30	49,23	83,57	1045	1210	165
	61,06	1,44	6,58	54,93	90,89	1036	1230	194
61,50	0,70	5,38	56,83	93,20	1043	1250	207	
-25+10	51,91	58,18	13,09	-		1072	1177	105
	54,32	34,98	38,36	-	6,58	1045	1132	87
	54,17	19,38	52,21	-	14,44	1045	1135	90
	55,39	10,04	49,63	9,67	31,14	1042	1145	103
	55,84	9,17	45,62	13,94	36,69	1040	1140	100
	56,15	4,44	42,95	19,64	46,56	1023	1138	115
	57,97	3,77	35,30	27,88	55,89	1020	1160	140
	58,12	3,37	28,68	33,46	63,70	1003	1173	170
	59,95	1,80	20,68	42,61	74,75	1033	1230	187
	60,25	0,77	18,65	45,21	78,49	1020	1220	200
62,54	2,14	9,18	53,90	86,84	1043	1240	197	
-10+5	51,39	57,93	13,94	-		1085	1160	75
	51,92	45,10	26,20	-	5,52	1075	1157	82
	52,84	20,51	49,52	-	16,26	1036	1126	90
	53,14	15,67	51,77	1,95	20,90	1024	1120	96
	54,07	14,81	48,75	5,82	25,44	997	1125	128
	54,84	11,97	44,80	11,65	33,84	1012	1133	121
	55,29	11,23	29,06	24,85	52,00	1008	1143	135
	58,14	6,20	28,23	31,85	60,25	995	1144	149
	59,67	4,59	18,44	42,14	73,29	1022	1163	141
	62,59	2,50	13,44	50,40	81,74	1013	1188	175
63,28	2,40	4,24	58,30	91,89	1038	1253	215	
-5	50,14	58,68	11,65	-		1052	1148	96
	51,01	47,71	22,65	-	4,21	1006	1122	116
	51,93	40,38	30,40	-	6,54	1009	1130	121
	53,16	16,13	51,17	2,08	19,71	1000	1125	125
	54,09	11,11	52,91	5,30	25,26	970	1110	140
	54,70	8,26	46,91	12,47	36,11	956	1110	154
	56,86	4,54	50,56	22,17	48,64	948	1108	160
	57,48	3,70	30,52	31,18	60,92	950	1120	170
	59,79	2,19	17,01	45,04	78,01	940	1135	195
	60,79	1,54	9,07	52,66	87,72	973	1158	185
65,03	2,01	0,72	63,06	94,95	1025	1240	215	



Результати дослідження мінералогічних складових за висотою шару, що спікається [8] показують, що агломерат по висоті шару неоднорідний за складом і властивостями. Верх спеченого шару через короткочасне перебування шихти при високих температурах (до 1400 °С) та подальшого швидкого охолодження повітрям, відрізняється низькою міцністю, містить велику кількість дрібної фракції. Агломерат у нижній частині спеченого шару, перебуваючи тривалий час за високих температур, оплавляється, при цьому його міцність значно зростає. Основні причини нерівномірного складу та якості спеченого агломерату по висоті шару сегрегація матеріалів при завантаженні шихти на агломераційну стрічку та несприятливий температурно-тепловий режим по висоті шару, що спікається.

Неоднаковий температурно-тепловий режим верхнього та нижнього шарів спекаемого агломерату призводить до нерівномірності властивостей агломерату. Температура у горні для запалювання палива шихти становить 1250 °С. Так як температура спікання підвищується поступово, у міру проходження зони горіння зверху вниз, то верхній шар шихтових матеріалів не отримує необхідної кількості теплоти для нормального спікання, не встигає повністю пройти фазові перетворення і, як наслідок, в мікроструктурі отриманого агломерату переважають залишкові зерна шихти, а зв'язка представлена нерозкristалізованим склом.

Максимальна кількість вільного вапна у верхніх шарах спеченого агломерату пояснюється сегрегацією шихти; повне ж зникнення вихідного вапна внизу пояснюється підвищенням температури спікання шихти, збільшенням часу перебування шихти при цій температурі, що сприяє взаємодії вапна з розплавом до повного зникнення. Нерівноважність процесу посилюється локальним збагаченням окремих ділянок шихти коксиком. У місці накопичення коксика швидко зростає температура спікання; відновлювальні умови сприяють утворенню в цьому мікрообсязі легкоплавкого заліzosилікатного розплаву, збагаченого оксидом заліза (II). Швидке охолодження верхньої частини спеченого агломерату холодним повітрям

гальмує перебіг цього процесу; в результаті спостерігаються області агломерату, де в одному мікрообсязі поряд з вихідною гематитовою рудою та кварцом існують ділянки заліzosилікатного розплаву з дрібними кристалітами магнетиту, вюстити та залишками коксиду. Контакт різних за складом та структурою мікрооб'ємів агломерату є найменш міцним. У роботах [9,10] пропонується зменшити негативний вплив сегрегації шихтових матеріалів шляхом зниження верхньої межі крупності руди і вапняку. Одночасно це сприятиме більш глибокому перебігу реакцій утворення агломерату з повним засвоєнням вапна, що, у свою чергу, усуває «білі» вкраплення незасвоєного вапна та області кристалізації двокальцієвого силікату. Для вирівнювання температурно-теплогового режиму слід перенести надлишок теплоти з нижньої частини шару у верхню, збільшивши вміст вуглецю в шихті верхньої частини спекаемого агломерату та одночасного застосування нагрітого повітря на першій третині довжини агломераційної стрічки після запального горна. Також можливе застосування подовженого горна в цьому випадку верхній шар агломерату, що спікається, буде перебувати в зоні впливу високих температур більш тривалий час, що дозволяє часткам агломерату взаємодіяти в більш повному обсязі і сприяє підвищенню його міцності [8].

Невелика кількість новоутворень магнетиту у верхніх зонах пояснюється відсутністю глибоких перетворень у шихті на початку спікання. Великі шматки руди (5.. .12 мм) не встигають розплавитися, що з нестачею теплоти і наступним різким охолодженням. Реакції за участю рідкої фази (реакції утворення скла, рідше феритів кальцію та силікатів) мають обмежений розвиток. У таких умовах неможливе повне проходження розкристалізації всіх компонентів шихти.

У міру наростання температури в спекаемом шарі агломерату рівень взаємодії шихтових матеріалів зростає за рахунок того, що теплоти достатньо для розплавлення частинок шихти і реакції взаємодії протікають в рідкій фазі. Біля колосників агломераційна шихта тривалий час знаходиться при температурі близько 1600 ° С, внаслідок чого агломерат сильно оплавляється,

що позитивно впливає на його характеристики міцності. Різко зростає кількість скла, розкристалізованого до силікатів різного складу.

На вивченому виробничому агрегаті чітко видно нерівноважність процесу агрегації, зумовлена значною неоднорідністю речовинного та гранулометричного складу шихти. Зменшення вмісту верхнього шару у всій масі агрегату можливе шляхом збільшення висоти шару шихти, що спікається, до 500...600 мм. У цьому випадку частка верхнього шару в загальному обсязі агрегату зменшується, а спікання покращується завдяки повному використанню регенерованої теплоти [10-11].

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1. Основні шкідливості і небезпечності в лабораторії ЦЗЛ

На постійних робочих місцях лабораторії доменного виробництва категорія фізичної роботи визначається як середньої важкості (II б), тому що енерговитрати працівника знаходяться в межах 233-290 Вт [43].

Значення метеорологічних умов на робочих місцях лабораторії відповідно [43] наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Значення метеоумов в робочих зонах

Ступінь важкості робіт	Оптимальні			Допустимі			Фактичні		
	Тем-ра, °С	Відносна вологість, %	Швид. руху повітря, м/с	Тем-ра, °С	Відносна вологість, %	Швидк. руху повітря, м/с	Тем-ра, °С	Відносна вологість, %	Швидк. руху повітря, м/с
Середньої важкості	Холодні і перехідні періоди року								
	17-19	60-40	0,2	15-21	75	0,4	12-21	60	0,5-1
	Теплий період року								
	20-22	60-40	0,3	16-27	70	0,5	25-34	50	1,5-2

Шкідливі речовини, якими забруднюється повітря робочого місця: аерозолі оксидів заліза, вуглецю, пил коксу інш. Дані про фактичний вміст цих речовин у повітрі, їх ГДК, а також клас безпеки відповідно [44] - наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Фактична концентрація, ГДК і клас безпеки шкідливих речовин у повітрі робочої зони лабораторії ЦЗЛ

Шкідлива речовина	Фактична концентрація, мг/м <sup>3</sup>	ГДК, мг/м <sup>3</sup> [45]	Клас безпеки [45]	Дія на організм
Серністий ангідрид	до 20	10	III	Алергійна
СО (оксид вуглецю)	до 32,0	20	IV	Гастронаправлена
Кокс (пил)	до 8,5	6	IV	Фіброгенна
NO <sub>2</sub>	до 1,2	2	III	Гастронаправлена

Коксовий пил взагалі має загально-токсичну і дратівну дію, викликає запалювальні хвороби легень, порушення функцій печінки, зниження шлункової секреції, зміни в крові і серцево-судинній системі, діє пил також на очі. Оксид вуглецю має гостро направлену дію на організм людини. Він витискує кисень із крові, при цьому його вміст в повітрі легень може знижуватись з 18-20 до 8 %, що припиняє віддачу кисню трахеям легень. Ці шкідливі речовини при невірній організації виробництва і недотриманні певних профілактичних заходів можуть надавати шкідливий вплив на здоров'я; призводити до гострих хронічних отруєнь і професійних захворювань працівників. Тому потрібна вентиляція приміщення (лабораторії).

Надлишок тепла викликає у працівника підвищене потовиділення, що призводить до збіднення тканин рідиною і солями, а також крові з порушенням серцево-судинної та нервової діяльності

Наявність на ділянці лабораторії електроустаткування та металевих споруд потребує захисту працюючих від дії електроструму при пошкодженні електрики. Приміщення відноситься до категорії з підвищеної безпеки [46].

Недостатність освітленості приміщення лабораторії є слідством того, що приміщення забруднюється пилом. Фактична освітленість ділянки не відповідає нормованій по [47], що може призвести до підвищення травматизму на виробництві.

#### 4.2. Засоби індивідуального захисту

Обслуговуючий персонал лабораторії забезпечується засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) безкоштовно згідно штатного розкладу на підставі «Типових галузевих норм безкоштовної видачі робітникам та службовцям спеціального одягу, спеціального взуття й інших засобів індивідуального захисту» [48].

Розрахунок річної потреби в ЗІЗ персоналу лабораторії надається в таблиці 4.3.

Крім того, персонал лабораторії одержує безкоштовно захисні окуляри, каски, маски та інше.

Таблиця 4.3 - Розрахунок річної потреби в ЗІЗ обслуговуючого персоналу лабораторії

№ п/п	Професія, посада	Кількість робітників (чол.)	Найменування ЗІЗ	Термін носіння (міс.)	Річна потреба (шт.)
1	Зав. лабораторією	1	Костюм бавовняний Черевики шкіряні Рукавиці комбіновані	12 12 2	1 1 6
2	Апаратник (по завантаженню камер та ін.)	1	Костюм сукняний Куртка бавовняна з утеплюючою підкладкою Черевики шкіряні Рукавиці брезентові Шляпа войлочна	12 36 12 3 6	1 1/3 1 4 2
3	Лаборант	3	Халат бавовняний із пилозахисним просоченням Фартух гумовий із на грудях Рукавиці гумові Рукавиці комбіновані	18 Черговий Чергові 6	2   6
4	Слюсар	1	Полукомбinezон бавовняний Рукавиці комбіновані Черевики шкіряні Костюм прогумований Сапоги гумові	12 2 12 Черговий чергові	1 6 1  
	Разом	6	Костюм бавовняний Костюм сукняний Халат бавовняний із пилозахисним просиченням Полукомбinezон бавовняний Куртка бавовняна з утеплюючою підкладкою Шляпа войлочна Черевики шкіряні Рукавиці комбіновані Рукавиці брезентові		1 1 2 1 1/3 1 3 18 4

#### 4.3. Побутові і допоміжні приміщення лабораторії

Лабораторія доменного виробництва по санітарно-гігієнічній характеристиці згідно [49] відноситься до групи 2б, тому що супроводжується

впливом на працюючих надлишків явного конвекційного і переважно променистого тепла від лабораторного обладнання та пилу.

У зв'язку з цим працівники лабораторії повинні бути забезпечені наступними побутовими приміщеннями та устроями: гардеробними, душовими, умивальними, убиральнями, устроями питного водопостачання, приміщеннями їдальні, відпочинку та здоров'ям ЦЗЛ, або заводською лікарнею.

Гардеробні призначені для збереження вуличного, домашнього та спеціального одягу. Вуличний (верхній) одяг зберігається відкритим способом на передбачених для цього гачках і вішалках. Число крючків приймається рівним чисельності робітників лабораторії і з обліком 5% резерва на практикантів. Отже кількість гачків з вішалками дорівнює:

$$6 + 6 \cdot 0,05 = 6,3; \quad \text{приймаємо 7 шт.}$$

Для збереження домашнього і спеціального одягу для кожного робочого надається шафа, що заціпається, із двома відділеннями. Кількість подвійних шаф (з 5% резервом):

$$6 + 6 \cdot 0,05 = 6,3; \quad \text{приймаємо 7 шаф.}$$

Інші приміщення розраховуються по кількості працюючих у лабораторії, бо всі працюють в одну (першу) зміну:

У жіночої і чоловічої душових 1 сітка душу передбачена на обслуговування трьох чоловік, отже загальна кількість сіток у душових:

$$6 : 3 = 2 \text{ шт.}$$

В умивальнях 1 кран розрахований на обслуговування 20 чоловік і тоді:

$$6 : 20 = 0,3,$$

приймаємо 1 кран. Загальне число умивальників дорівнює – 1.

Душові й умивальні розміщені суміжно з гардеробними.

Для харчування трудящих цілодобово працює цехова їдальня, у якій одне посадкове місце розраховане на обслуговування чотирьох людей:

$$6 : 4 = 1,5;$$

приймаємо в розрахунок 2 місця.

Для заповнення витрат вологи і мінеральних солей для робітників у цеху розміщені питні фонтанчики, автомати з підсоленою газованою водою. Джерела питного водопостачання розташовані від робочих місць у цеху не далі 75 м. Кількість джерел водоживлення для групи 2б розраховано по нормі – один питний устрій на 100 чоловік, приймаємо 1 устрій питної води.

Убиральні повинні бути вилучені від робочих місць у цеху не більш 75 м.

Кількість санітарних приладів у них визначено по нормі – 1 санітарний прилад на обслуговування 18 чоловіків у чоловічих або 12 жінок у жіночих убиральнях. Трудящі лабораторії цілодобово обслуговуються лікарським здравпунктом 1 категорії на території заводу [50].

#### 4.4. Пожежна безпека

Виробничий процес у лабораторії по вибухо-пожежебезпеці згідно СНиП 2.09.02-85 [50] відноситься до категорії “Г”, а будівельні конструкції - згідно СНиП 2.01.02 –85 [51] по вогнестійкості відносяться до II ступеня.

Причинами пожеж і вибухів можуть виявитися:

- несправності електроустаткування,
- порушення правил пожежебезпеки персоналом,
- наявність пилу вуглецю більш ГДК та ін.

Для усунення причин виникнення пожеж передбачається:

- своєчасне усунення несправностей устаткування,



-для обмеження поширення вогню використовують неспалені матеріали (азбест, спеціальна вата),

-застосування первинних засобів гасіння: пінні вогнегасники ОХП-10, вуглекислотні вогнегасники типу ОУ-2, ОУ-5, ОУ-8, УП-1М, УП-2М, шкаф із піском 0,5 куб.м та лопатами.

Крім того передбачається доступне розміщення первинних засобів пожежогасіння, розрахунок яких приведений у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Розрахунок первинних засобів гасіння

№ п/п	Найменування приміщення, устаткування	Одиниця виміру	Пінні вогнегасники ОХП-10	Вуглекислотні вогнегасники типу... (шт)			Шафа із піском 0,5 куб.м та лопатами (шт)	Примітка А·п 2 x 2 м
				ОУ-2	ОУ-5 ОУ-8	УП-1М УП-2М		
1	Приміщення лабораторії (90 кв.м)	На 1 приміщення (100кв.м)	1	-	-	-	1	Або азбестове полотно 2x2 м
2	Вентиляційні установки технологічного призначення (4 вент. уст. в приміщенні)	На 4 вентиляторні установки	1	1	-	-	1	При менш 4-х норма не знижується
3	Щит контрольно-вимірювальної апаратури (1 щит в лабораторії)	На 1 щит або приміщення	-	2	-	-	-	-

## ВИСНОВКИ

1. Поліпшення якості шихтових матеріалів у вихідному стані, зниження вмісту в них дрібних фракцій призводять до того, що температурний інтервал (початок злипання – розплавлення всієї маси шару залізорудних матеріалів) набуває все більшого технологічного значення для доменної плавки. Чим ширший цей інтервал, тим більшу частину по висоті печі займає в'язка, непроникна для газів маса, тим важчий рух газів вгору і гірше розподіл їх по перерізу печі. Переміщення зони розм'якшення і плавлення більш нижні горизонти і скорочення протяжності шарів напіврозплавлених рудних матеріалів по висоті і ширині збільшують обсяг сухої частини шихти і одночасно зменшують зону в'язких напіврозплавлених мас, де втрати тиску газу на одиницю висоти печі вище, ніж в інших зонах. Тому при скороченні зони розм'якшення та плавлення та переміщенні її в нижні горизонти печі слід очікувати більш повного використання відновлювальної енергії газу та збільшення газопроникності стовпа шихтових матеріалів у нижній зоні печі. У зв'язку з цим властивості залізорудних матеріалів повинні забезпечити високу температуру початку розм'якшення рудної сировини та короткий інтервал її розм'якшення.

2. Відновлення окатишів ЦГЗК, ПГЗК і агломерату супроводжується зниженням температури початку та кінця розм'якшення. Характер зміни температури при відновленні залізорудних матеріалів ідентичний і відмінність полягає лише в її абсолютних значеннях: мінімальну температуру мають котуни ЦГЗК, більш високу температуру - котуни ПГЗК і найвищу температуру - офлюсований агломерат.

3. Невідновлені агломерат і котуни починають розм'якшуватися при досить високій температурі ( $1112\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $1095\text{...}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  відповідно), що пояснюється наявністю гематиту та магнетиту. При підвищенні ступеня відновлення у зразках збільшується кількість легкоплавкої складової – вюститу ( $\text{Fe}_x\text{O}$ ), що призводить до мінімальних значень температури розм'якшення.

Підвищення температури початку розм'якшення при відновленні понад 80% пояснюється утворенням металевого каркасу з відновленого заліза у всьому обсязі зразка.

4. Формування раціональної структури стовпа шихти в доменній печі, що забезпечує підвищення ступеня використання газового потоку на 1 % (абс.) в рівних шихтових та дуттьових умовах, за результатами математичного моделювання дозволяє знизити витрату коксу приблизно на 1,8 %, що можна порівняти з економією коксу від підвищення основності залізородної шихти з 0,515 до 1,215.

5. При веденні доменної плавки необхідно не допускати в периферійній та проміжній радіальних зонах можливість утворення вертикальних та близьких до них похилих поверхонь розділу агломерату та котунів, що сприяють виникненню каналного ходу печі.

6. Результати проведених досліджень дозволили встановити, що найнижчу температуру розм'якшення у всьому інтервалі ступеня відновлення має фракція менше 5 мм, найвищу фракцію 60...40 мм.

7. Основними причинами нерівномірного складу та якості спеченого агломерату по висоті шару є сегрегація матеріалів при завантаженні шихти на агломераційну стрічку та неоднаковий температурнотепловий режим по висоті шару, що спікається.

8. Підвищення міцності агломерату можливе шляхом збільшення висоти шару шихти, що спекається, до 500...600 мм. У цьому випадку спікання покращується завдяки більш повному використанню регенованої теплоти, а частка верхнього, менш міцного шару у всьому обсязі агломерату зменшується.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Цылёв Л.М. Восстановление и шлакообразование в доменном процессе. Москва: Наука. 1970. 157с.
2. Потехня Ю.М., Гаврилко С.А., Рихтер Р.Г., Савченко Е.В. Определение температуры размягчения восстановленного агломерата // Известия вузов. Черная металлургия. 1981. № 12. С.27.
3. Потехня Ю.М., Гаврилко С.А. Влияние степени восстановления агломерата на его температуры размягчения / Металлургия и коксохимия. Киев: Техника, 1982. Вып. 29. С.14-20.
4. Копырин И.А., Русакова А.Г., Рябоконт Ф.А., Нестеров Е.П. Изменение металлургических свойств окатышей ССГОК в процессе восстановления// Бюллетень института «Черметинформация». 1988. №9. С.22-26.
5. Пыриков А.Н. Изменение свойств агломерата и окатышей при восстановлении / Сборник научных трудов ИЧМ. Москва: Металлургия, 1991. № 33. С. 26-31.
6. Бернадо В.Ф., Губин Г.В., Дрожилов Л.А. и др. Исследование изменения прочности окатышей при восстановлении природным газом / Сборник научных трудов ИЧМ. Москва: Металлургия, 1991. № 33. С.45-50.
7. Бачинина Г.А., Андронов В.Н., Ефанова Н.И., Берестовецкий В.Л. Исследование температур начала пластической деформации металлизированных окатышей / Бюллетень института «Черметинформация». 1991. №12. С.19-22.
8. Некрасов З.И., Гладков Н.А., Дроздов Г.М., Никифоров В.Н. Изменение свойств агломерата и окатышей в процессе восстановительно-тепловой обработки / Сборник научных трудов ИЧМ. Металлургия чугуна. Москва: Металлургия, 1993. № 1. С. 24-36.
9. Логинов В.И., Парфенов А.И., Колесник И.Л. Поведение агломерата и окатышей в доменной печи / Известия вузов. Черная металлургия. 1993. № 6. С. 31-33.

10. Гладков Н.А., Гребенкин Н.А., Никифоров В.Н. Оценка газопроницаемости слоя железорудных материалов в процессе восстановительно-тепловой обработки / Сборник научных трудов ИЧМ. Доменное производство. Москва: Металлургия, 1995. № 2. С.5-10.

11. Гладков Н.А., Дроздов Г.М., Фурсова Л.А., Гребенкин Н.А., Никифоров В.Н. Особенности изменения свойств железорудных материалов при восстановлении в слое / Сборник научных трудов ИЧМ. Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объёма. Москва: Металлургия, 1997. № 3. С. 90-101.

12. Гладков Н.А., Нестеров А.С. Поведение железорудных материалов с различной степенью восстановления в вязко-пластичной зоне / Сборник научных трудов ИЧМ. Совершенствование технологии доменного производства. Москва: Металлургия, 1998. С.127-31.

13. Нестеров А.С. Исследования процессов формирования жидких фаз из железорудных материалов и разработка на их основе приёмов повышения эффективности доменной плавки: Автореф. канд. техн. наук: 05.16.02 / ИЧМ им. З.И.Некрасова. Днепропетровск, 1993. 20с.

14. Ефименко Г.Г., Гимельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. Киве: Высшая школа. 1981. 496с.

15. Деккер А., Поос А. Новые данные о работе опытной доменной печи в Угрэ / Чёрные металлы. 1988. № 25. С.10-18.

16. Бабарыкин Н.Н., Филатов А.Д., Братченко В.П. и др. Применение офлюсованных окатышей в доменной плавке / Сталь. 1990. № 8. С.673.

17. Жило Н.Л., Першина Р.Ф., Белова А.А. О причинах ускоренного износа кладки и холодильников доменных печей ММК / Сталь. 1997. № 4. С.300-304.

18. Некрасов З.И., Гладков Н.А., Яковлев Ю.В., Новиков В.С., Бабарыкин Н.Н. Опытные плавки с изменением в доменной шихте ММК доли неофлюсованных окатышей от 0 до 100% / Сталь. 1998. № 1. С.11-18.

19. Левченко В.Е., Васильев П.Г., Алпаев Н.Е., Шульга А.В. Исследование характера схода материалов в доменной печи при увеличении доли окатышей в шихте / Известия вузов. Черная металлургия. 1992. № 9. С. 4-7.

20. Большаков В.И., Гладков Н.А., Шутылев Ф.М., Богачев Ю.А. Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 6. С. 11-15.

21. Металлургия чугуна / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев и др. // Под редакцией Ю. С. Юсфина. М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 с.

22. Товаровский И. Г., Севернюк В. В, Лялюк В. П. Анализ показателей и процессов доменной плавки / Днепропетровск: Пороги, 2000. 420 с.

23. Тарасов В. П. Теория и технология доменной плавки. Москва: Интернет Инжиниринг, 2007. 384 с.

24. Томаш А. А. Изменение порозности многокомпонентной доменной шихты при размягчении / Вестник Приазовского государственного технического университета. Сер.: Технические науки: Сб. науч. трудов. Мариуполь: ПГТУ, 1999. Вып. 8. С. 9-14.

25. Русских В. П., Семаков В. В. Анализ показателей восстановимости железорудной шихты доменной плавки / Бюллетень «Чёрная металлургия». 2014. № 11. С. 19-24.

26. Ступник Н. И., Лялюк В. П., Журавлев Ф. М. Разработка технологических параметров получения офлюсованного окускованного железорудного материала для доменной плавки, сочетающего лучшие металлургические характеристики агломерата и окатышей / Вісник Криворізького національного університету, 2014. Вип. 36. С. 39.

27. Минаев А. А., Бирючев В. И., Ярошевский С. Л. Работа доменных печей с высокой долей окатышей в шихте / Металлург. 1998. № 10. С. 23-27.

28. Товаровский И. Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. Москва : Металлургия, 1987. 192 с.

29. Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В. Е. Металлургия чугуна. Киев: Высш. школа, 1988. 352 с.

30.Коробов И. И., Ковшов В. Н., Галаганов А. И. Исследование работы доменной печи на разном количестве окатышей в шихте / *Металлургия и коксохимия*. 1995. В. 43. С. 41-45.

31.Русских В. П., Семаков В. В., Гаврилоглу Д. И. Исследование газопроницаемости доменной шихты при различном расположении слоев компонентов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 1. С. 13-16.

32.Галаганов А. И. Особенности распределения шихты с окатышами на колошнике доменной печи / *Металлургия и коксохимия*. 1998. В. 59. С. 26-28.

33.Русских В. П., Аленгос М. А., Степнов Д. К. Исследование влияния систем загрузки шихтовых материалов на распределение газового потока в доменной печи / *Вісник Приазов. держ. техн. унту : зб. наук. праць / ПДТУ Маріуполь*, 2009. Вип. 19. С. 21-24.

34.Цылев Л. М. Восстановление и шлакообразование в доменном процессе. Москва: Наука, 1970. 157 с.

35.Добронравов Е. П., Кравец Ю. С., Вовк А. А. Производство и применение магнезиального агломерата для доменной плавки / *Металлургия и коксохимия: научн.техн.сб.* Киев: Техника, 1991. Выпуск 24. С. 19-24 (Металлургия чугуна).

36.Некрасов З. И., Бузоверя М. Т., Геращенко В. Е., Покрышкин В. Л. Анализ восстановительных процессов в шахте доменной печи объемом 2700 м<sup>3</sup> / *Доменное производство: отрасл. темат. сб.* Москва: Metallургия, 1995. Вып. 2. С. 85-100.

37. Гладков Н. А. Поведение железорудных материалов с различной степенью восстановления в вязкопластической зоне / *Совершенствование технологии доменного производства: отрасл. темат. сб.* Москва: Metallургия, 1988. С. 27-31.

38.Бернштейн Р. С. Повышение эффективности агломерации. Москва: Metallургия, 1979. 144 с.

39. Малышева Т. Я., Соколов Г. А., Гультяй И. И. О механизме минералообразования при спекании офлюсованного агломерата из смеси криворож-

ских гематитовых руд и тонкоизмельченного магнетитового концентрата / Сталь. 1986. № 10. С. 878-882.

40. Малышева Т. Я., Руднева А. В., Соколов Г. А., Гультия И. И. Получение высокопрочного агломерата с основностью 1,2-1,4 / Сталь. 1987. № 8. С. 673-676.

41. Бернштейн Р. С., Станишевский Б. А., Быткин В. Н. Совершенствование технологии спекания агломерата. Днепропетровск: Промінь, 1985. 120 с.

42. Кухарь А.С., Мартыненко В. А., Шевченко В. П. Производство и качество агломерата. Москва: Metallurgia, 1997. 158 с.

43. СН 245-71 (ДНАОП 0.03-3.01-71) Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=22186](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=22186).

44. ГОСТ 12.1.005-88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=6264](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=6264).

45. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/10/1048.shtml>.

46. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила устройства электроустановок. Электрооборудование специальных установок. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=47257](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=47257).

47. СНиП II-4-79. Природне і штучне освітлення. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=4999](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4999).

48. Типовые отраслевые нормы бесплатной выдачи рабочим и служащим специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты. Выпуск 10, ч.1. Москва: Профиздат, 1988.



49.СНиП 2.09.04-87. Адміністративні і побутові будівлі. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=4170](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4170).

50.СНиП 2.09.02-85. Производственные здания. С изменениями. [Электронный ресурс]. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=48098](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=48098).

51.СНиП 2.01.02-85. Противопожарные нормы. [Электронный ресурс]. Режим доступу: [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=4956](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=4956).

**ДОДАТОК А****ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
Запорізька міська рада  
Запорізька обласна державна адміністрація  
Національний університет «Львівська політехніка»  
Національний університет «Києво-Могилянська Академія»  
Національний університет кораблебудування імені Адмірала Макарова  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
Національний транспортний університет

## **МАТЕРІАЛИ**

**II ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА  
УЧАСТЮ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ  
«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТА  
СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»**

**18-20 жовтня 2022 року**

Запоріжжя

2022

### Список використаних джерел

1. Двоскин Б.В., Шевченко А.Ф., Вергун А.С. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработать ТЛЗ, выполнить технологические проработки по созданию в ККЦ МК «Азовсталь» установки десульфурации чугуна в 350-т заливочных ковшах проектной производительностью 1,0 млн. т/год. Отработать конструкцию прямоточной фурмы для глубокой десульфурации чугуна (0,001 – 0,003 % серы)». Днепропетровск : Институт черной металлургии, 2000. 48 с.

УДК 669.1

Пугач О.В., магістрант 2 курсу, Кузьменко Р.С., магістрант 1 курсу  
Науковий керівник – д.х.н., професор Прутцьков Д.В.

### ОЗНАКОМЛЕННЯ З ПОНЯТТЯМ РОЗМ'ЯКШЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потєбні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

**Актуальність.** В даний час чорна металургія розвивається в напрямку вдосконалення підготовки сировини до доменної плавки, яке включає подальше підвищення вмісту заліза, поліпшення способів окускування, підвищення якості залізородної сировини. Великий вплив на газопроникність стовпа матеріалів доменної печі надають процеси розм'якшення і плавлення залізородних матеріалів.

Стан залізородної сировини та її поведінка в низькотемпературній області печі досить докладно розглянуті теоретично та вивчені експериментально. Найменшою мірою вивчено поведінку залізородних матеріалів у високотемпературній зоні печі, в якій відбуваються процеси розм'якшення та плавлення шихти. Поведінка матеріалів тут визначається, головним чином, температурними умовами, фізико-хімічними властивостями та ступенем відновлення матеріалів. Зазначені питання вивчені недостатньо повно.

**Мета.** Даною роботою ставилася мета розглянути поняття розм'якшування котунів і порівняти з розм'якшенням офлюсованого агломерату.

**Основний текст.** Основними компонентами залізородної частини доменної шихти є агломерат та котуни. Шихта в печі, опускаючись, поступово нагрівається і за певної температури розм'якшується і плавиться. Одночасне плавлення мінералогічних складових шихти неможливе. Першими починають плавитися сполуки та суміші сполук з низькою температурою плавлення. Поява розплаву змінює механічні властивості шихти: він стає податливим – легко деформується та ущільнюється під навантаженням. Цю сукупність змін прийнято називати розм'якшувальністю [1].

У доменній печі істотний вплив на рух газів при постійному гранулометричному складі шихти надають розм'якшена маса залізорудних матеріалів, а також кількість і властивості шлаку, що утворюється в розпарі і заплечиках. Велика зона розм'якшених мас по висоті печі, а також густі та в'язкі шлаки, склеюючи шматки коксу, перешкоджають руху газів та погіршують їх розподіл. Це зумовлює розвиток нерівного ходу печі, погане використання хімічної та теплової енергії газу, і, зрештою, зниження продуктивності доменної печі та збільшення питомої витрати коксу. Очевидно, що менше за висотою печі зона розм'якшених мас, і чим швидше відбувається процес плавлення залізорудних матеріалів, тим краще газодинамічні умови роботи доменної печі, що забезпечують більш рівномірний розподіл газового потоку по перерізу печі, а отже, і економічнішу її роботу. Для оптимальних умов доменної плавки потрібні агломерат і котуни, що мають досить високу температуру початку розм'якшення і плавляться у вузькому температурному інтервалі.

Щоб порушувати процес первинного шлакоутворення агломерат і котуни повинні розм'якшуватися одночасно, тобто мати однакову температуру початку та кінця розм'якшення. Якщо цього буде досягнуто, то зона первинного шлакоутворення буде нестійка і розтягнута за висотою доменної печі.

Дослідженнями та практикою встановлено основні недоліки котунів при використанні їх у доменній плавці:

- при відновленні до ~30% у доменній печі котуни утворюють багато дрібниць, тим самим погіршує газопроникність стовпа шихтових матеріалів;
- котуни виробляють неофлюсованими (ПГЗК) або частково офлюсованими (ЦГЗК, ПівнГЗК), що вимагає додаткової витрати флюсу на офлюсування їх порожньої породи або підвищення основності агломерату ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) від 1,5 до 2,0 залежно від витрати котунів. У цьому металургійні властивості агломерату погіршуються;
- використання котунів у шихті доменних печей призводить до зниження стійкості засипних апаратів, т.к. при завантаженні в піч вони дають дрібнодисперсний пил, який виводить з ладу контактну поверхню великого та малого конусів.

Тому в даний час витрата котунів у шихті доменних печей до 30%.

Таким чином, особливий теоретичний та практичний інтерес є процес плавлення шихтових матеріалів в умовах доменної печі. Плавлення шихти передує її розм'якшення, тому доцільно розглядати їх разом. Однак, безпосереднє вивчення процесів розм'якшення та плавлення у доменній печі пов'язане з відомими труднощами. У більшості випадків ці процеси досліджуються в лабораторних умовах, вважаючи, що їх перебіг ідентичний у будь-яких обсягах.

**Висновки.** Поняття «розм'якшення» залізорудних матеріалів – одне з найважливіших питань в технології доменної плавки. Експериментальне дослідження температур та умов розм'якшення залізорудних матеріалів дозволяє, в певній мірі, керувати процесом виплавки чавуну.

### Список використаних джерел

1. Гладков Н.А., Нестеров А.С. Поведение железорудных материалов с различной степенью восстановления в вязко-пластичной зоне / Сборник научных трудов ИЧМ. Совершенствование технологии доменного производства. Москва : Металлургия, 1988. С.127-31.

2. Большаков В.И., Гладков Н.А., Шутылев Ф.М., Богачев Ю.А. Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2002. № 6. С .11-15.

УДК 621.771 (076)

Пчела М.М., магістрант 2 курсу  
Науковий керівник – к.т.н., доцент Проценко В.М.

### **УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ПОВЕРХНІ ТОНКОШТАБОВОГО ПРОКАТУ З МЕТОЮ ЇЇ ПОКРАЩЕННЯ В УМОВАХ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ**

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потєбні Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

В останні роки все більшої актуальності набувають роботи зі створення автоматизованих систем управління якістю (АСУЯ) продукції, що забезпечують конкурентоспроможність вітчизняних підприємств, у тому числі й чорної металургії, на світових ринках [1].

Для побудови ефективних АСУЯ необхідне вирішення комплексу завдань, що включають дослідження процесів формування вектора показників якості та техніко-економічних показників, розробку інформаційного, математичного та програмного забезпечення систем.

Розглянуто технологічні аспекти та практичні рішення низки важливих завдань листопрокатного виробництва:

- управління площинністю та якістю поверхні холоднокатаних листів та штаб;
- контролю та прогнозування нерівномірності механічних та електромагнітних властивостей у тонколистовому прокаті;
- побудови та практичного впровадження АСУЯ, що включає окремі взаємопов'язані підсистеми управління всіма регламентованими показниками якості продукції ЦХП-1 ПАТ «Запоріжсталь».

Розглянуто метод управління площинністю штаб, що включає два рівні:

- тактичний – вирішується завдання проектування, тобто, заздалегідь (до прокатки конкретного типорозміру) задаються уставки засобів регулювання на основних агрегатах цеху в залежності від заданої площинності готового прокату;
- оперативний – проводиться коригування уставок на кожному агрегаті залежно від величини відхилення фактичної неплоскості від заданого значення.