МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(повна найменування вищого навчального закладу)
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ
(назва факультету)
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, ЕКОЛОГІЇ ТА ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота/ проєкт

другий (магістерський) рівень вищої освіти
(рівень вищої освіти)

на тему «Сучасні аспекти використання плавленого вапна в металургійному виробництві»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1364- мчм-з

спеціальності 136 «Металургія»
(код і назва спеціальності)

освітньо-професійна програма «Металургія чорних металів»
(назва освітньої програми)

Кармазіна Аліна Сергіївна
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент, канд. техн. наук, доцент Воденнікова О.С.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доцент, канд. техн. наук, доцент Нестеренко Т.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра *металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*
Рівень вищої освіти *другий (магістерський) рівень*
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність *136 «Металургія»*
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма *Металургія чорних металів*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри *МТЕТБ*
Ю.О. Бєлоконь
“__” _____2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТУ

Кармазіній Аліні Сергіївні
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) «Сучасні аспекти використання плавленого вапна в металургійному виробництві»

керівник роботи (проєкту) *Воденнікова Оксана Сергіївна, канд. техн. наук, доцент*
(прізвище, ім’я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від *“27” 02 2025 р. № 319-с*

2. Строк подання студентом роботи (проєкта) *01.12.2025р.*

3. Вихідні дані до роботи (проєкта) *Науково-технічна література, ДСТУ, патенти.*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Металургійне вапно: види, властивості і застосування. Дослідження технологічних параметрів виробництва плавленого вапна. Аналіз структури та властивостей плавленого вапна. Аналіз шляхів застосування плавленого вапна у металургійному виробництві. Охорона праці та техногенна безпека. Загальні висновки. Перелік джерел посилання.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов’язкових креслень) *Титульний лист – 1. Вступ – 1. Розділ 1 – 0. Розділ 2 – 2. Розділ 3 Розділ 4 – 2. Розділ 5 – 0. Загальні висновки – 1.*

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Металургійне вапно: види, властивості і застосування	*Воденнікова О.С., доцент*	
Дослідження технологічних параметрів виробництва плавленого вапна	*Воденнікова О.С., доцент*	
Аналіз структури та властивостей плавленого вапна	*Воденнікова О.С., доцент*	
Аналіз шляхів застосування плавленого вапна у металургійному виробництві	*Воденнікова О.С., доцент*	
Охорона праці та техногенна безпека	*Воденнікова О.С., доцент*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., професор*	

7. Дата видачі завдання *02.03.2025р.*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	*Реферат. Зміст. Вступ.*		
2	*Металургійне вапно: види, властивості і застосування*		
3	*Дослідження технологічних параметрів виробництва плавленого вапна*		
4	*Аналіз структури та властивостей плавленого вапна*		
5	*Аналіз шляхів застосування плавленого вапна у металургійному виробництві*		
6	*Охорона праці та техногенна безпека*		
7	*Загальні висновки. Перелік джерел посилання*		
8	*Графічна частина*		

Студент _____ *Аліна КАРМАЗІНА*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи) _____ *Оксана ВОДЕННІКОВА*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 79 с., 17 табл., 28 рис., 23 джерела посилання та 1 додаток.

ПЛАВЛЕНО ВАПНО, ШМАТКОВЕ ВАПНО, СТУПІНЬ ГІДРАТАЦІЇ, ТВЕРДІ ШЛАКОУТВОРЮЮЧІ СУМІШІ, ФУТЕРОВКА ПЕЧІ

Тема кваліфікаційної роботи – сучасні аспекти використання плавленого вапна в металургійному виробництві.

Мета роботи – проаналізувати сучасні шляхи застосування плавленого вапна у металургійному виробництві

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями:

– розглянути можливості використання плавленого вапна у складі твердих шлакоутворюючих сумішей;

– розглянути можливості використання плавленого вапна як футерувальний матеріал.

Об'єкт дослідження: структури порошкоподібного металургійного та плавленого вапна, процес гідратації вапна, процес футеровки печі за допомогою плавленого вапна.

Предмет дослідження: технологія виробництва плавленого вапна.

Методи дослідження: загальні (емпіричні, комплексні та теоретичні) та спеціальні (графічні та кореляційні) методи наукових пізнань.

Наукова новизна одержаних результатів: Представлені результати промислових випробувань застосування твердих шлакоутворюючих сумішей на основі плавленого вапна в умовах різних металургійних підприємств України:

– позапічна обробка шлакоутворюючими сумішами на основі плавленого вапна підшипникової сталі в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»;

– обробка нержавіючої сталі плавленим вапном на установці аргонно-кисневого рафінування в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»;

– випробування технології позапічної десульфурації конвертерної сталі з використанням плавленого вапна в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»;

– випробування ТШС із плавленим вапном у мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь».

Практичне значення одержаних результатів: матеріали роботи можуть бути впроваджені в освітній процес Запорізького національного університету при читанні лекцій з навчальної дисципліни «Металургія чорних металів» (зокрема при викладанні лекції за темою «Вихідні матеріали металургійного виробництва, їх підготовка до переробки (плавки)» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю G10 «Металургія» очної (денної) та заочної (дистанційної) форм здобуття освіти.

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідались і обговорювались на 1 конференції (Воденнікова О. С., Воденніков С. А, Кармазіна А. С. Сучасні аспекти використання плавленого вапна в металургійній промисловості України. *Наука і металургія* : Всеукраїнська науково-технічна конференція : збірник тез (Дніпро, 19–20 листопада 2025р.). Дніпро : -, 2025. С. 30).

ЗМІСТ

ВСТУП…. 8
1 МЕТАЛУРГІЙНЕ ВАПНО: ВИДИ, ВЛАСТИВОСТІ І ЗАСТОСУВАННЯ…. 9
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЦТВА ПЛАВЛЕНОГО ВАПНА……. 14
2.1 Пристрій електропечі для отримання плавленого вапна…… 14
2.2 Дослідження технології отримання плавленого вапна……... 16
2.3 Будова блоку плавленого вапна……
3 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАВЛЕНОГО ВАПНА….. 23
3.1 Аналіз хімічного складу плавленого вапна…….. 24
3.2 Порівняння щільності та насипної ваги металургійного та плавленого вапна…….. 26
3.3 Аналіз структури порошкоподібного металургійного та плавленого вапна…… 29
3.4 Гідратація вапна…….. 34
4. АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАВЛЕНОГО ВАПНА У МЕТАЛУРГІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ……..... 41
4.1 Використання плавленого вапна у складі твердих шлакоутворюючих сумішей……..…… 42
4.2. Використання плавленого вапна як футерувальний матеріал……... 44
4.3 Промислове випробування твердих шлакоутворюючих сумішей на основі плавленого вапна……..... 47
4.3.1 Позапічна обробка шлакоутворюючими сумішами на основі плавленого вапна підшипникової сталі в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»……. 47
4.3.2 Обробка нержавіючої сталі плавленим вапном на установці аргонно-кисневого рафінування в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»……. 48
4.3.3 Промислове випробування технології позапічної десульфурації

конвертерної сталі з використанням плавленого вапна в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»…….... 51
4.3.4 Промислове випробування ТШС із плавленим вапном у мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь»……. 56
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТАТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА……. 59
5.1 Правила техніки безпеки й виробничої санітарії при виробництві вапна…. 59
5.2 Заходи безпеки при виробництві вапна……. 60
5.3 Техногенна безпека при виробництві вапна……. 63
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……...…. 73
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ…… 74
ДОДАТКИ……. 77
ДОДАТОК А ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА…….. 77

ВСТУП

На сьогодні виробництво вапна є життєво важливим та необхідним етапом для виробництва як чорних металів, так і супутніх продуктів у промислових металургійних умовах. У світі щорічно виробляється значна кількість чорних металів та сплавів, що сприяє широкому асортименту експорту, але важливу роль у світовій економіці, де певні країни залежать від металів [1].

Металургія для вапнякової галузі – основний покупець. Дві третини обсягу припадає саме на підприємства гірничо-металургійного комплексу.

Вважається, що при виробництві тонни сталі або чавуну використовується приблизно 50 кг негашеного вапна. Вапно є основним шлаком, який очищає залізну руду. Вапняк застосовується в якості флюсу, який додають до руди для зниження температури плавлення.

Вапнякові продукти при плавленні утворюють захисний шар шлаку на поверхні сталі. Це зменшує втрати тепла і дає змогу економити енергоресурси. Вапно також використовується для обробки води [2].

Вапно для агломераційного виробництва застосовують у шихті для агломерації концентратів і дрібних залізних руд з метою інтенсифікації процесу спікання. Для сталеплавильного виробництва використовують звичайне вапно ВС, вапно доломітизоване – ВСД, вапно для феросплавного виробництва – ВФ [3].

Вапнякова галузь в Україні представлена трьома крупними виробниками: ПрАТ «Новотроїцьке рудоуправління», ТзОВ «Виробнича компанія «Гірничодобувна промисловість» та ПрАТ «Тернопільський кар'єр», загальна частка яких складає 74,0% всього виробництва вапняку [4].

Основними споживачами вапна залізницею, як і загалом на ринку, залишаються підприємства ПАТ «Запоріжсталь» та ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» [5].

1 МЕТАЛУРГІЙНЕ ВАПНО: ВИДИ, ВЛАСТИВОСТІ, ЗАСТОСУВАННЯ

Вапно (рис. 1.1) – це продукт переробки вапняку або крейди при високих температурах (1000–1300°C) [6].



Рисунок 1.1 – Вапно технічне комове негашене [6]

На сьогодні залежно від технології виробництва отримують різні його вапна:

1. Негашене вапно (CaO).

Виготовляється шляхом обпалу вапняку при високих температурах. При додаванні води перетворюється на гашене вапно з виділенням тепла (реакція гашення);

2. Гашене вапно ($Ca(OH)_2$).

Отримується при додаванні води до негашеного вапна. Є порошком або пастою, яку використовують для приготування будівельних розчинів, побілки та покращення ґрунтів;

3. Хлорне вапно (сполука з додаванням хлору, яка використовується як

дезінфікуючий засіб);

4. Вапняне тісто (суміш гашеного вапна з водою до пастоподібного стану. Застосовується в будівельних та оздоблювальних роботах);

5. Вапняковий борошно.

Отримується шляхом подрібнення вапняку в порошок. Використовується в сільському господарстві для нейтралізації кислотності ґрунтів.

Перевагами вапна є:

- Екологічність: вапно – це натуральний матеріал, отриманий з природного вапняку (рис. 1.2). Воно не виділяє токсичних речовин, що робить його безпечним для навколишнього середовища та людини;

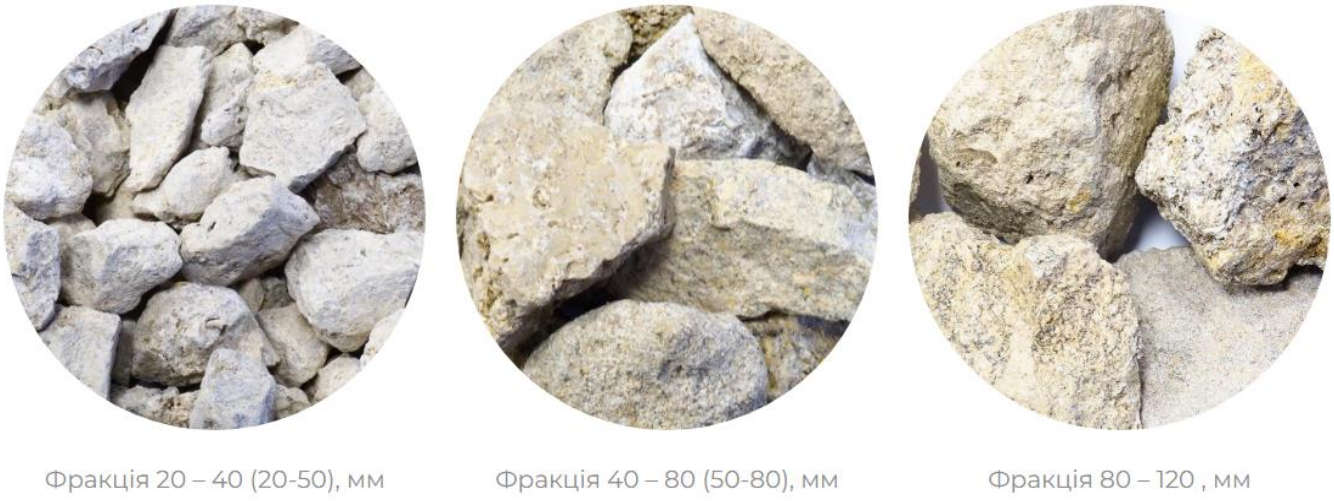


Рисунок 1.2 – Вапняк (ПрАТ «Тернопільський кар'єр») [8]

- Універсальність застосування: у будівництві вапно використовується як зв’язуючий матеріал для приготування розчинів, покращуючи їх пластичність та адгезію. У сільському господарстві застосовується для вапнування ґрунтів, підвищуючи їх родючість. У водоочищенні використовується для видалення домішок і нейтралізації кислотності;
- Антисептичні властивості: вапно має антибактеріальні властивості, що допомагає запобігати росту цвілі, грибка та бактерій. Це особливо важливо при обробці стін у вологих приміщеннях або для дезінфекції;
- Довговічність: розчини та покриття з додаванням вапна відрізняються

високою стійкістю до впливу вологи та температурних перепадів, що збільшує термін їх служби;

- Покращення структури матеріалів: додавання вапна в будівельні суміші робить їх більш пластичними та зручними в роботі, а також знижує ймовірність появи тріщин після висихання;
- Регулювання кислотності: вапно активно використовується для нейтралізації кислот у різних середовищах. У ґрунтах воно допомагає підтримувати оптимальний pH, покращуючи умови для росту рослин. У водоочищенні усуває кислотність води;
- Доступність та економічність: один з най доступніших і недорогих матеріалів, що робить його затребуваним як серед професіоналів, так і в побуті;
- Тепло- та звукоізоляційні властивості: вапняні розчини добре утримують тепло і знижують шум, що покращує мікроклімат у будівлях;
- Легкість у використанні: вапно легко транспортується, зберігається та застосовується, що робить його зручним навіть для непрофесіоналів [7].

У чорній та кольоровій металургії вапно (рис. 1.3) виконує одразу кілька критичних функцій:

1. Флюс у доменних і сталеплавильних процесах. Воно знижує температуру плавлення шлаку, покращує його текучість і сприяє відокремленню домішок.

2. Очищення металу. Вапно зв’язує сірку, фосфор і кремній, покращуючи якість сталі.

3. Очищення доменних газів. При контакті з вапном гази звільняються від оксидів сірки та вуглецю, що робить виробництво екологічнішим [9].

У металургійній промисловості, як правило, застосовується вапно негашене, щоб очистити метал від фосфорних, сірчаних або кремнієвих домішок, що утворюються при введенні кисню в розплавлений чавун або сталь. Введення в процес виробництва відбувається в три етапи: по-перше для виробництва окатишів (напівфабрикати заліза, які і завантажуються в плавильну піч), по-друге, очищають матеріал від сірки перед плавкою, і по-третє: після того, як до плавленому матеріалу



Рисунок 1.3 – Металургійне вапно [9]

домішується кисень, вапно в твердому або подрібненому стані додають в печі, щоб утворилися тверді шлаки, які легко можна видалити на даному етапі. Подібне використання робить сталь надчистої: саме в такому вигляді вона найбільше цінується на ринку.

Активно застосовують вапно і для виробництва металевої продукції: в створенні дроту або фірмових елементів вона незамінна в якості свого роду «змащення». У першому випадку дріт без проблем простягається крізь матрицю, а готовий виріб без праці відходить від посипаною «крейдою» форми.

Освоєно і використання негашеного вапна у виробництві кольорових металів: виплавка дорогоцінних металів без неї не обходиться. Відомо, що золоту і срібну руду на певному етапі подрібнюють, змішують з розчином ціаніду і вапном. Остання забезпечує необхідний кислотний баланс, який перешкоджає випаровуванню шкідливих речовин в атмосферу.

Не менш відомі нам мідь або свинець також виробляються не без участі цього універсального матеріалу. Шкода від небезпечних випарів скорочується, коли вони пропускаються через так зване «вапняне молоко» (водний розчин) [10].

Правила безпеки при роботі з вапном комовим негашеним наступні:

1. Матеріал може завдати шкоди людині, при невиконанні норм техніки безпеки роботи з ним. Вапняний пил, потрапляючи через дихальні шляхи, може завдати шкоди у вигляді опіків слизових оболонок. Небажано допускати попадання винищити на руки та відкриті ділянки тіла при гасінні.

2. Рекомендується дотримуватися наступних правил:

– приміщення, де проводитимуться роботи, повинно бути добре провітрюваним;

– використати щільний одяг, щоб не допустити попадання найдрібніших часток на тіло;

– забезпечити захист рук (цілком підійдуть брезентові або щільні, гумові рукавички);

– працювати треба в захисних окулярах і масці (респіратор) [6].

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИРОБНИЦТВА ПЛАВЛЕНОГО ВАПНА

При виробництві тугоплавких вогнетривких електроплавлених матеріалів основним методом плавки є плавка на блок. Плавка в електропечі супроводжується значними втратами тепла в результаті охолодження поверхні кожуха печі, винесення тепла газами, що відходять, акумуляції тепла футеровкою печі і шихтовими матеріалами. При плавці на блок шихта, що не проплавилася, у кожуха печі є утеплювачем; від її товщини, правильно обраної конструкції та режиму плавки залежить питома витрата електроенергії.

2.1 Пристрій електропечі для отримання плавленого вапна

Плавлене вапно отримували в напівпромисловій трифазній електродуговій печі потужністю 140 кВА (рис. 2.1). Елементи печі змонтовані на металевій основі. На ньому встановлені три стійки з механізмами переміщення електродів. Вертикальне переміщення каретки здійснюється за допомогою рейки та шестерні, пов'язаної з виконавчим механізмом типу ІМ-2/120. Крайні стійки механізмів переміщення електродів встановлені на підп'ятники, що дозволяє повертати навколо вертикальної осі. Стійка середньої фази має механізм поздовжнього переміщення. Дана конструкція закріплення стійок електродотримачів дозволяє змінювати діаметр розпаду електродів від 150 мм при запуску печі та збільшення до 400 мм у процесі плавки. Це сприяє отриманню великих блоків наплавляемого матеріалу, виключає місцеві перегріви рідкого розплаву і стабілізує процес плавки.

Підведення електричної енергії до робочого простору печі здійснюється графітованими електродами квадратного перерізу 50х50 мм. Живлення печі здійснюється від силового трансформатора ТТ-140 кВА, сухого, трифазного, стрижневого типу з природним повітряним охолодженням.

Ванна печі встановлена на рухому платформу, переміщення якої навколо вертикальної осі забезпечує механізм обертання, що складається з двигуна

постійного струму та черв'ячного редуктора. Редуктор з'єднаний із ванною зубчастою передачею. Швидкість обертання ванни печі змінюється від 0,1 до 3 об/хв. Поділа викладена магнезитовою цеглою, всуху. Товщина подини 230 мм. Стінки зафутеровані в один шар магнезитової цегли товщиною 85 мм. Для полегшення вилучення наплавленого блоку з печі, кожух зроблений роз'ємним з відкидною боковиною.



Рисунок 2.1 – Напівпромислова трифазна електродугова піч потужністю 140 кВА

Управління піччю здійснюється з переносного пульта, на якому розташовані ключ управління контакторами перемикання ступенів напруги трансформатора, ключі управління механізмами підйому та опускання електродів, прилади контролю величини робочого струму та напруги, ключ приводу обертання ванни.

Витрата електричної енергії контролюється лічильниками активної та реактивної енергії по високій стороні, крім того, на низькій стороні для визначення витрати електроенергії, що споживається безпосередньо піччю, встановлено кіловатметр Н348.

Технологічна характеристика печі

Потужність трансформатора, кВА……140

Первинне напруга, В……380

Вторинна напруга, В……..30-85

Максимальний струм, А……1600

Розмір електрода, мм…….50х50

Діаметр розпаду електродів, мм……...150-400

Діаметр кожуха печі, мм……..900

Висота кожуха печі, мм……...900

Швидкість обертання кожуха печі, про./хв…….0,0-3,0

Метод плавки……...на блок

Вага блоку, кг……120-250

Тривалість плавки, час…….…..1,5-2,5

Питома витрата електродів, г/кг……...…18-25

Питома витрата електричної енергії, кВт/кг…….…..2,0-2,5

2.2 Дослідження технології отримання плавленого вапна

Як вихідну шихту для отримання плавленого вапна використовують металургійне вапно марки ІФ-1,2 (ОСТ 14-16-165-85) виробництва АТ «Запорізький завод феросплавів», одержуване у вапняно-обпалювальній печі. Хімічний склад застосовуваного металургійного вапна наведено в таблиці 2.1.

У процесі підготовки шихтових матеріалів до плавки великі шматки металургійного вапна піддавали попередньому дробленню на щоковій дробарці до фракції - 25 мм. У шихту додавали також повернення - недоплав та осип з блоків попередніх плавок.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад металургійного вапна

Масова частка, %								Втрати при прожарюванні, %
CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	FeO	C	S	P	
89,500-90,500	0,930-1,100	0,450-0,620	0,860-0,920	0,220-0,400	0,280-0,350	0,120-0,150	0,009-0,012	6,000-8,200

Плавку вели на гарнісажі з приготовленої шихти завтовшки до 200 мм, що виключало контакт рідкого розплаву з магнезитової кладки днища та стін печі.

Запуск печі здійснювали за допомогою графітових перемичок перерізом 25х25 і довжиною 250–300 мм, що укладаються на засилку на поді печі. Вмикання печі проводили на двох електродах. У міру утворення ванни рідкого розплаву під електродами за рахунок обертання корпусу печі дуга загорялася і під третім електродом. У момент запуску печі діаметр розпаду електродів становив 200 мм. Плавку починали зазвичай на першому ступені трансформатора при струмі, що досягає в окремі моменти 1000–1500 А. Після утворення достатньої кількості рідкого розплаву трансформатор перемикали на більш високий ступінь, а діаметр розпаду електродів збільшували до 400–450 мм. За кодом плавки проводилося рівномірне підвантаження шихти, переважно до стінки кожуха. При цьому використовували обертання ванни, внаслідок чого шихта від стін поступово обсипалася в зону плавлення.

Електричний режим плавки регулювали за рахунок зміни положення електродів по відношенню до рідкого розплаву або перемиканням ступенів

напруги силового трансформатора печі. У міру проплавлення шихти та утворення достатньої кількості рідкого розплаву електричний режим плавки стабілізувався. Величина робочого струму змінювалася не більше 900–1100 А, напруга 55–65 В. Довжина електричних дуг коливалася не більше 40–60 мм.

Плавку закінчували, коли рівень рідкого розплаву досягав 200 мм до верхнього зрізу кожуха печі, при зменшенні витрати шихти і безперервному обертанні ванни.

Наплавлений блок остигав у печі протягом доби, після чого витягувався і очищався від недоплаву. Діаметр блоків коливався в межах 500–600 мм, висота 450–600 мм, вага 120–165 кг. Загальний вигляд наплавленого блоку наведено на рис. 2.2.

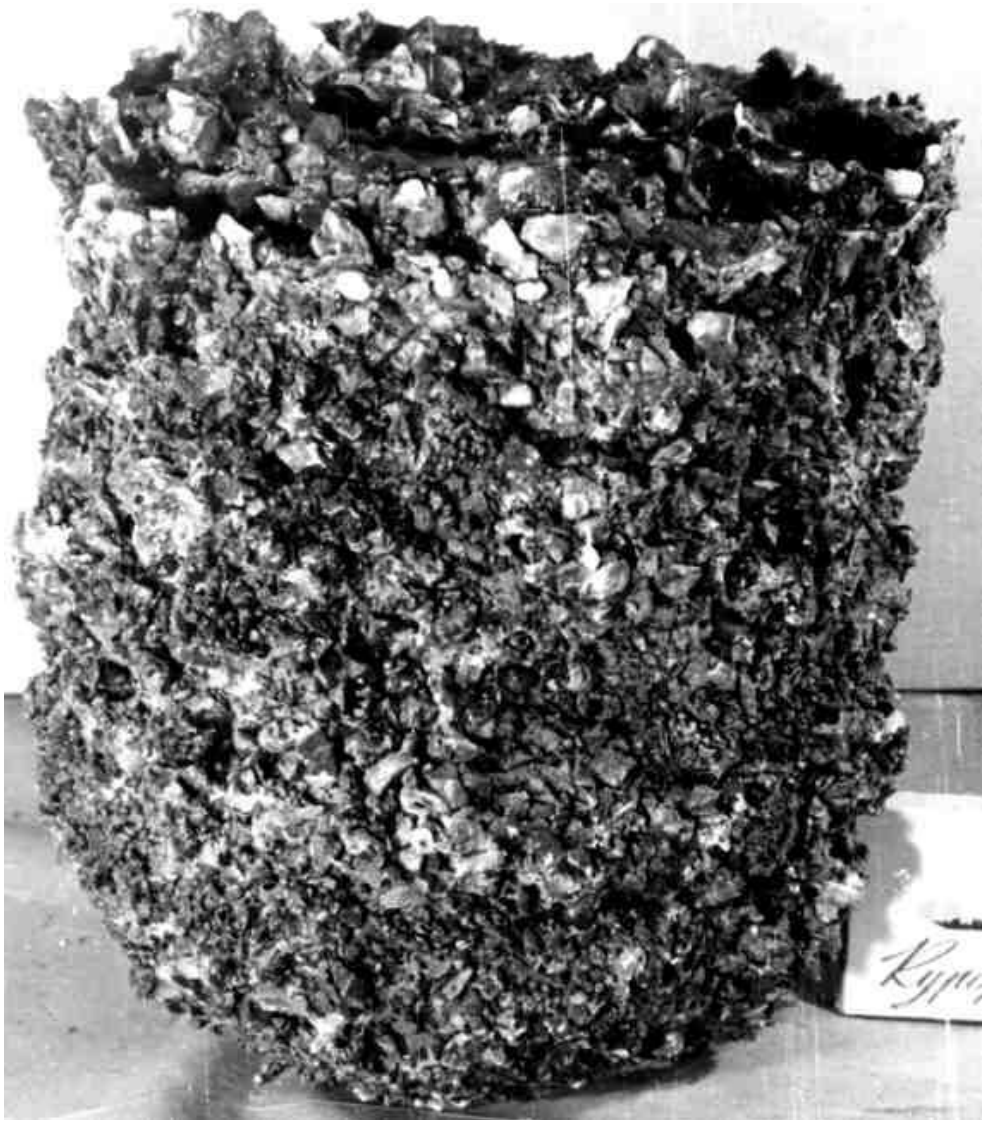


Рисунок 2.2 – Блок плавленого вапна

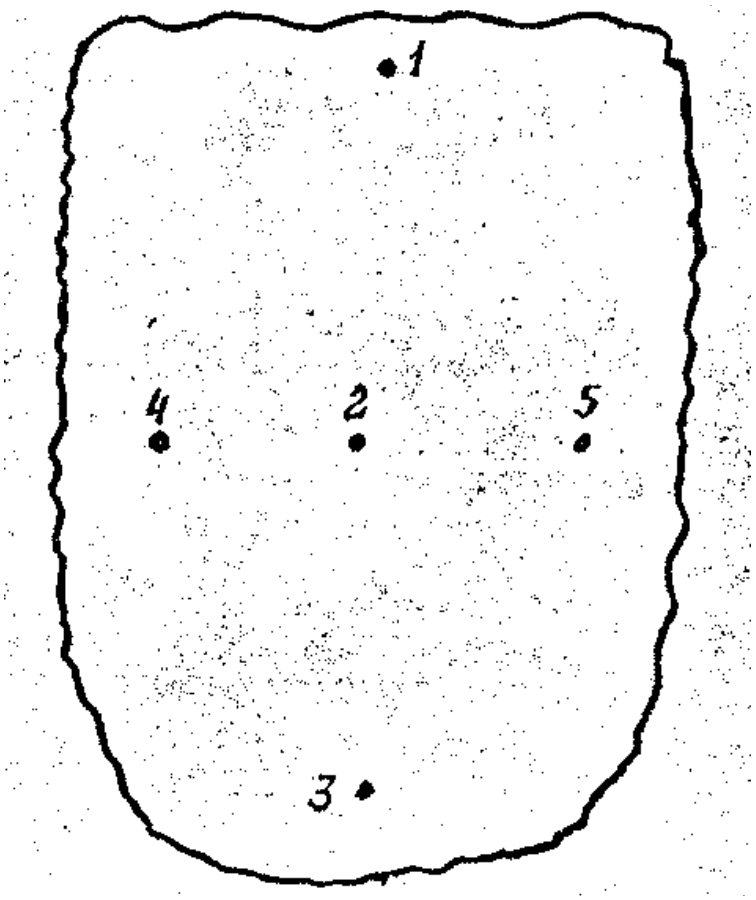
Між кожухом печі та блоком залишався шар не проплавленого вапна товщиною 100–150 мм, що зменшує нагрівання кожуха печі та знижує теплові втрати.

Основні технологічні параметри серії плавок наведено у таблиці 2.2.

2.3 Будова блоку плавленого вапна

Після повного остигання блоку і очищення від частини шихти, що не проплавилася, проводилися його виміри і зважування. Далі блок піддавався обробці шляхом дроблення. Від кожного блоку відбиралися проби для хімічного, петрографічного аналізу та зразки дня дослідження з гідратації.

Схема відбору проб при обробці блоку наведено на рис. 2.3.



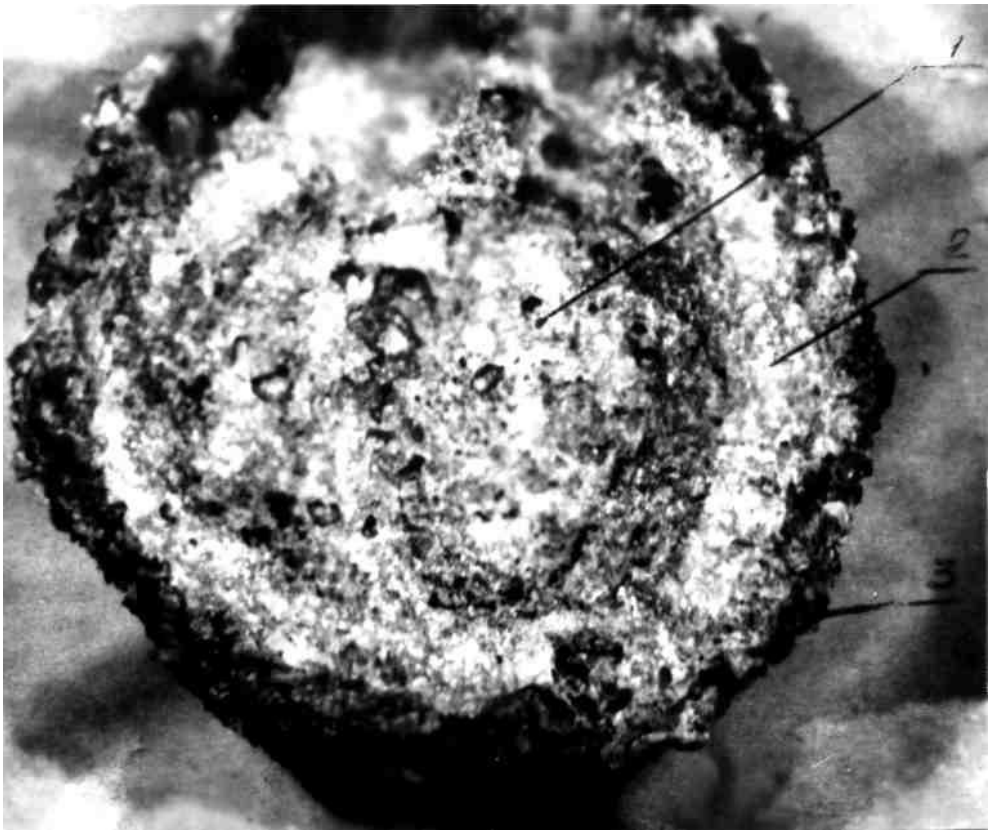
1 – верх блоку; 2 – середина блоку; 3 – низ блоку; 4, 5 – середина зони монокристалів

Рисунок 2.3 – Схема відбору проб при обробці блоку

Таблиця 2.2 – Основні технологічні параметри серії плавок в печі потужністю 140 кВА

Умовний номер плавки	Трива-лість плавки, час	Задано в піч, кг		Витрата на плавку		Отримано, кг			Питомі показники		Продук-тивність печі, кг/год
		на падину	період заван-таження	електро енергія, кВт·год	елект-роди, кг	блок	недо-плав	потери	електро-енергії, кВт*год/ кг	електро -ди, г/кг	
1	2,05	46	258	266,2	2,5	156	135	13	1,71	16,02	75,0
2	2,30	46	261	313,4	2,0	166	137	6	1,91	12,20	65,6
3	2,20	45	251	313,8	2,6	157	123	11	2,00	17,60	67,3
4	2,15	47	268	265,6	2,6	150	150	15	1,92	17,00	66,7
5	2,15	46	247	320,3	3,5	155	121	17	2,07	22,58	68,9
Середне значення	2,17	46	257	295,86	2,64	156,8	133,2	12,4	1,922	17,08	68,7

Обробка блоку проводилася в поперечному та поздовжньому перерізі. На рис. 3.4 наведено поперечний скол блоку плавленого вапна, представлений трьома характерними зонами.



1 – центральна зона дрібних кристалів; 2 – зона монокристалів; 3 – недоплав

Рисунок 2.4 – Поперечний скол блоку плавленого вапна

Центральна зона – дрібні, добре розкристалізовані, кристали. Весь обсяг зони характеризується наявністю окремих пір розмірами від мікроскопічних до 0,5–2,0 мм і більше.

Зоні монокристалів – найбільш щільна, великокристалічна. Кристали витягнуті у радіальному напрямку.

Недоплав складається з частково оплавлених шматочків шихти. Товщина цієї зони 20–30 мм.

Висока температура плавлення вапна та різні умови кристалізації наплавлюваного блоку зумовлюють неоднорідну будову та міграцію домішок. Нижня частина блоку, що найбільше перебуває в рідкому стані і під впливом

високих температур, найбільш щільна, як правило, білого кольору з жовтуватим відтінком. У продукті цієї частини блоку вміст оксиду кальцію досягає 96,0–97,5%. Центральна частина блоку більш пухка, але також збагачена оксидом кальцію; домішки витісняються в основному до бокових та верхніх частин блоку. Визначення хімічного складу матеріалу різних частин блоку свідчить про часткове відновлення та відліт оксидів кремнію, магнію та заліза. Вміст сірки вбирається у 0,009–0,010%, фосфору 0,010%.

3 АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАВЛЕНОГО ВАПНА

Плавлене вапно слід віднести до технічних порід середньої твердості, зусилля роздавлювання яких не перевищує 80 МПа. Це крихкий матеріал, при ручному дробленні досить легко розбивається на шматки.

Грубе дроблення здійснювали у щоковій дробарці (рис. 3.1) до фракції 5,0–1,5 мм. Тонку фракцію отримували в кульовому млині або багаторазовим пропусканням через щокову дробарку з подальшим розсіванням.

Паралельно з відбором проб плавленого вапна відбиралися проби металургійного вапна, яку використовували як шихта при наплавленні блоків.

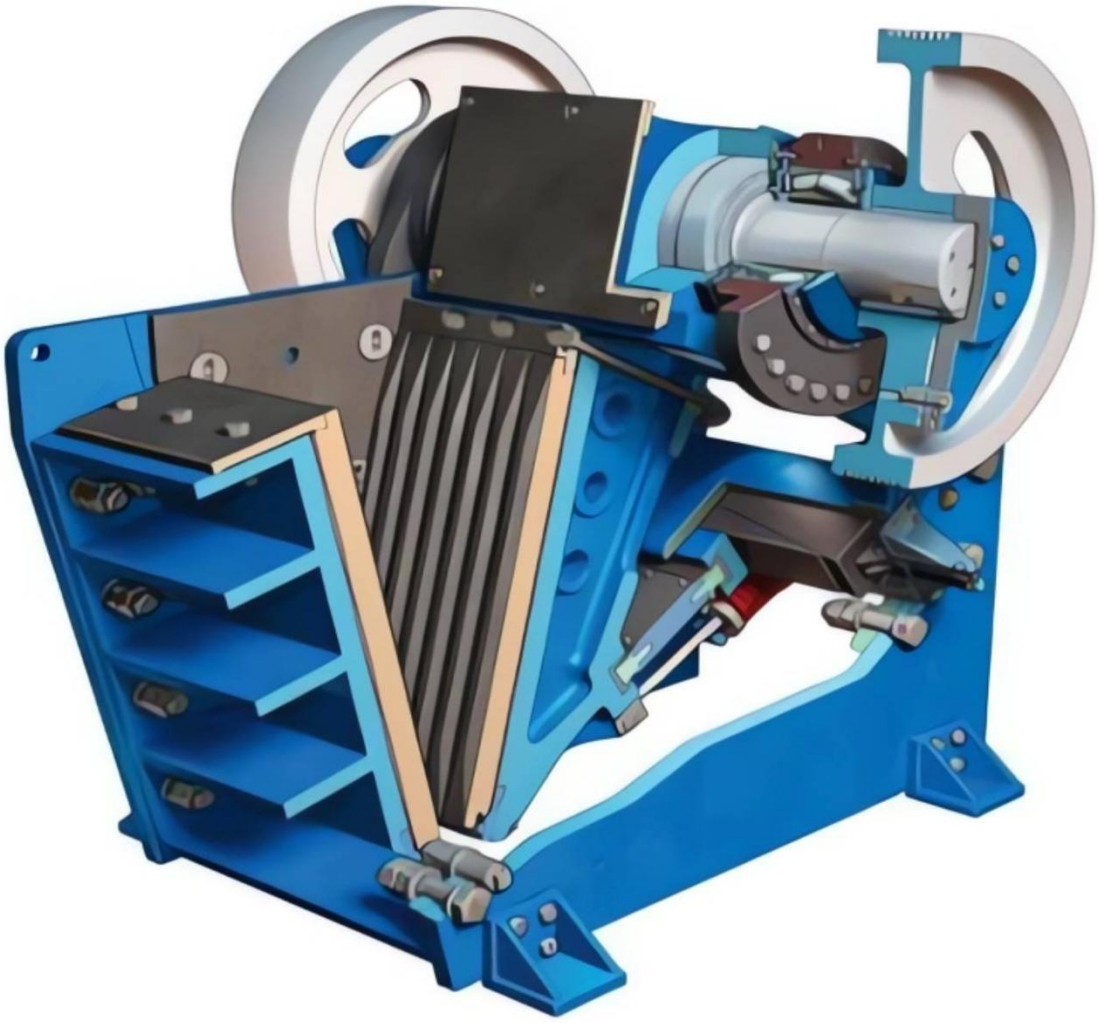


Рисунок 3.1 – Щокова дробарка N-MAK [11]

3.1 Аналіз хімічного складу плавленого вапна

У вихідній шихті (металургійного вапна виробництва АТ «Запорізький завод феросплавів», недоплаву, осипу та очищення блоків попередніх плавок) вміст оксиду кальцію коливався в межах 86,5–89,0 %; вуглецю 0,27–0,50 %; кремнезему 0,45–1,26 %; глинозему 0,39–0,85 %; оксиду магнію 0,2–1,0 %; сірки 0,06–0,12 %; фосфору 0,009–0,012 %.

Досліджено п'ять блоків плавленого вапна. Вага блоків коливалася в межах 150–166 кг. Висота блоків 420–500 мм, діаметр 450–570 мм. Під час обробки блоків відбиралися проби по висоті блоків (1–3), а також у середині блоків із зони монокристалів (4, 5). Схема відбору проб при обробці блоків плавленого вапна наведено раніше.

Верхня проба 1 відбиралася з відривом 50–70 мм від верху центру блоку. Проба 2 – на половині висоти блоку, проба 3 вище низу блоку на 50–70 мм. Крім того, відібрано по 2 проби в середині блоку 4, 5 на відстані 100–200 мм від стінки блоку (середина зони монокристалів).

У відібраних пробах зроблено повний хімічний аналіз двох паралельних зразках.

Хімічний склад проб плавленого вапна, відібраних на висоті кожного блоку, наведено у таблиці 3.1, а усереднений по п'яти блоках у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Середній хімічний склад проб плавленого вапна, відібраних по висоті п'яти блоків

№ проби	Масова частка, %							
	CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	$Fe_{заг}$	C	S	P
1	96,27	0,17	1,71	0,02	0,79	0,067	0,008	0,002
2	97,31	0,11	0,87	0,08	0,54	0,046	0,004	0,001
3	96,30	0,18	1,55	0,07	0,89	0,017	0,006	0,002

Таблиця 3.1 – Хімічний склад проб плавленого вапна, відібраних по висоті блоків

Умовний номер плавки	Номер проби	Масова частка, %							
		CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	$Fe_{заг.}$	C	S	P
1	1	96,21	0,25	1,55	0,07	0,098	0,105	0,0120	0,002
	2	97,40	0,10	0,88	0,08	0,049	0,070	0,0080	0,002
	3	96,21	0,25	1,60	0,08	0,119	0,090	0,0100	0,002
2	1	96,10	0,10	1,90	0,08	0,070	0,120	0,0070	0,002
	2	97,20	0,06	0,87	0,08	0,042	0,080	0,0050	0,001
	3	97,00	0,11	1,21	0,05	0,077	0,100	0,0100	0,002
3	1	96,00	0,24	1,67	0,06	0,053	0,058	0,0036	0,002
	2	97,58	0,21	0,89	0,07	0,049	0,020	0,0048	0,002
	3	97,28	0,15	1,59	0,07	0,070	0,026	0,0040	0,002
4	1	96,82	0,17	1,81	0,08	0,097	0,019	0,0060	0,002
	2	97,39	0,10	0,88	0,08	0,079	0,033	0,0020	0,001
	3	96,62	0,25	1,70	0,07	0,080	0,021	0,0040	0,002
5	1	96,21	0,15	1,60	0,05	0,079	0,026	0,0150	0,002
	2	97,39	0,08	0,83	0,08	0,051	0,032	0,0020	0,002
	3	96,39	0,13	1,65	0,06	0,048	0,020	0,0028	0,002

Результати хімічного аналізу проб плавленого вапна, відібраних із зони монокристалів (4 та 5), показано в таблиці 3.3.

У різних зонах виплавлених блоків спостерігається деяка неоднорідність за хімічним складом, щільністю, макро- та мікроструктурою. Неоднорідність обумовлена багатьма факторами: високою температурою плавлення оксиду кальцію та інших домішок, зональною будовою блоку, умовами кристалізації в різних ділянках блоку, міграцією домішкових оксидів, а також вуглецю та сірки.

Аналізуючи результати хімічного аналізу, слід, перш за все, відзначити позитивний вплив процесу переплаву на підвищення концентрації оксиду кальцію у всіх зонах блоку до 96–98% за рахунок зниження вмісту окисних домішок як результат міграції в зовнішню частину блоку, так і переходу в газову фазу рідкого розплаву під впливом високих.

Різко зменшується у готовому продукті вміст вуглецю до 0,03–0,10%, сірки до 0,002–0,010%, фосфору до 0,002%.

3.2 Порівняння щільності та насипної ваги металургійного та плавленого вапна

Теоретична щільність оксиду кальцію за літературними даними становить 3,36 т/м^3 [12].

Фактична щільність плавленого вапна оцінена нами на підставі вимірювання геометричних параметрів та маси відплавлених блоків. Дані цих вимірів представлені у таблиці 3.4.

Як видно з даних таблиці 3.4 фактична щільність плавленого вапна знаходиться в межах 2,80–3,05 т/м^3. Насипна вага металургійного та плавленого вапна визначали за загальноприйнятою методикою на порошках фракції – 0,4 мм і – 0,63 мм. Порошки металургійного вапна отримували зі шматків свіжообпаленого металургійного вапна виробництва АТ «Запорізький завод феросплавів» шляхом багаторазового дроблення на щоковій дрібниці з наступним розсіванням на стандартних ситах (рис. 3.2).

Таблиця 3.3 – Хімічний склад проб плавленого вапна, відібраних у середині блоків із зони монокристалів

Умовний номер плавки	Номер проби	Масова частка, %							
		CaO	MgO	SiO_2	Al_2O_3	$Fe_{заг}$	C	S	P
1	4	97,48	0,12	0,43	0,05	0,38	0,034	0,003	0,002
	5	97,26	0,11	0,84	0,08	0,46	0,041	0,004	0,002
2	4	97,77	0,06	0,83	0,07	0,44	0,028	0,002	0,002
	5	97,84	0,07	0,76	0,06	0,52	0,036	0,003	0,002
3	4	97,65	0,12	0,86	0,07	0,37	0,041	0,003	0,002
	5	97,92	0,10	0,91	0,07	0,41	0,038	0,002	0,002
4	4	97,85	0,08	0,66	0,08	0,43	0,044	0,003	0,003
	5	97,15	0,10	0,72	0,06	0,38	0,036	0,003	0,002
5	4	97,48	0,08	0,66	0,06	0,44	0,032	0,003	0,002
	5	97,67	0,90	0,78	0,07	0,39	0,038	0,002	0,003



Рисунок 3.2 – Сита лабораторні металопробивні СЛП-300 [13]

Таблиця 3.4 – Фактична щільність плавленого вапна

Умовний номер плавки	Вага блоку, т	Розмір блоку, м		Фактична щільність, т/м^3
		висота	діаметр	
1	0,156	0,40	0,42	2,816
2	0,166	0,41	0,41	3,031
3	0,157	0,40	0,40	3,048
4	0,150	0,40	0,40	2,985
5	0,155	0,41	0,42	2,730
Средне значення				2,922

Порошки плавленого вапна отримували зі шматків блоку плавленого вапна після дроблення на щоковій дробарці та розсіву. Наведені нижче результати визначення насипної ваги є середньоарифметичними із п'яти визначень (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5 – Насипна вага вапна

Фракція, мм	Насипна вага, т/м^3	
	Металургійне вапно	Плавлене вапно
0,40	0,82	1,46
0,63	0,87	1,55

3.3 Аналіз структури порошкоподібного металургійного та плавленого вапна

Метою цього дослідження є порівняльний аналіз складу та будови порошкоподібного металургійного та плавленого вапна (таблиця 3.6), отриманого методом дроблення в щоковій дробарці та кульовому млині та наступним розсіванням на фракції – 0,63; – 0,315 та – 0,16 мм.

Таблиця 3.6 – Зерновий склад досліджуваних матеріалів

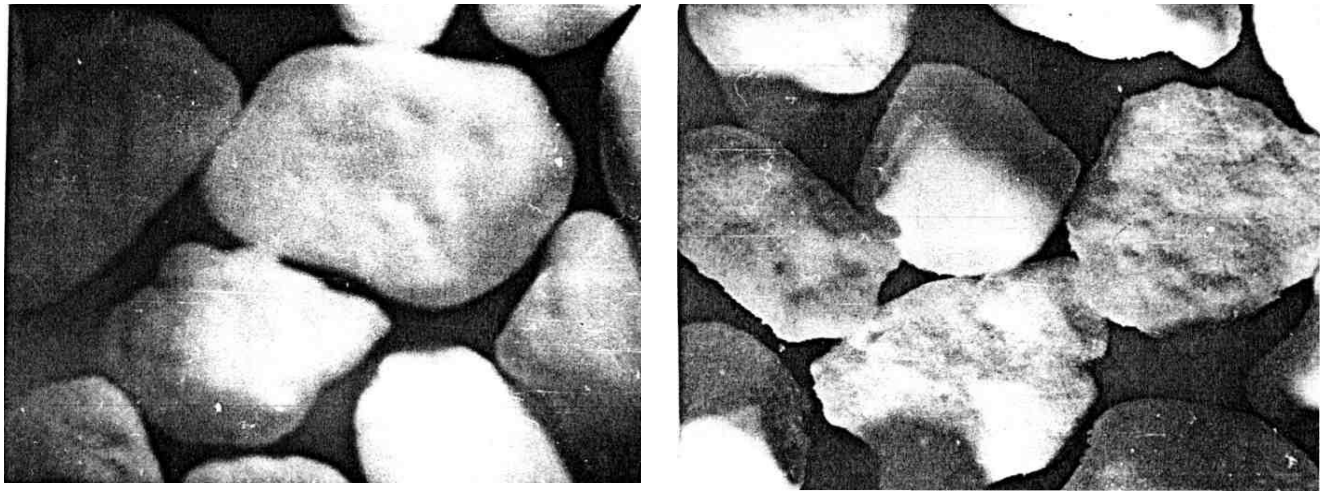
Фракція, мм	Зерновий склад, %	
	Металургійне вапно	Плавлене вапно
0,630	16,2	12,5
0,315	12,0	19,8
0,160	26,8	17,5
≤0,160	32,0	42,0

Вивчення форми та розмірів порошкоподібних матеріалів необхідно для вирішення низки технологічних завдань (абразивного впливу при пневмотранспортуванні, сипучості, отримання якісних пресованих та набивних виробів) показало, що залежність форми частинок від їх розмірів незначна.

Більшість частинок металургійної вапна, отриманих дробленням, як у щоковій дробарці, так і в кульовому млині, мають гладкі обриси, ізометричну або неправильну форму, що обумовлено їх мікрозернистим будовою, тобто. вони

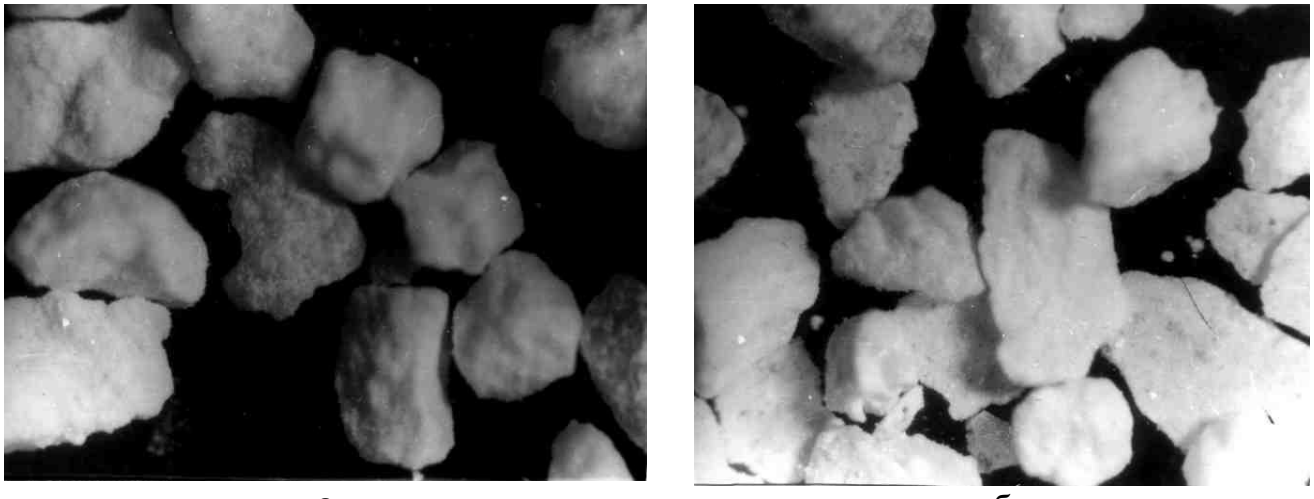
складаються не з осколків кристалів, а з дрібних зернят, більш менш міцно пов'язаних між собою. У всіх досліджених фракціях зустрічаються агрегати портландиту $Ca(OH)_2$ і досить значні кількості карбонату кальцію та магнію, що збереглися у центрах великих частинок обпаленого вапна.

Поділ на фракції дробленої проби металургійної вапна шляхом ситового аналізу (рис. 3.3–3.5) є досить умовним, бо окремі великі асоціації слабо



а б

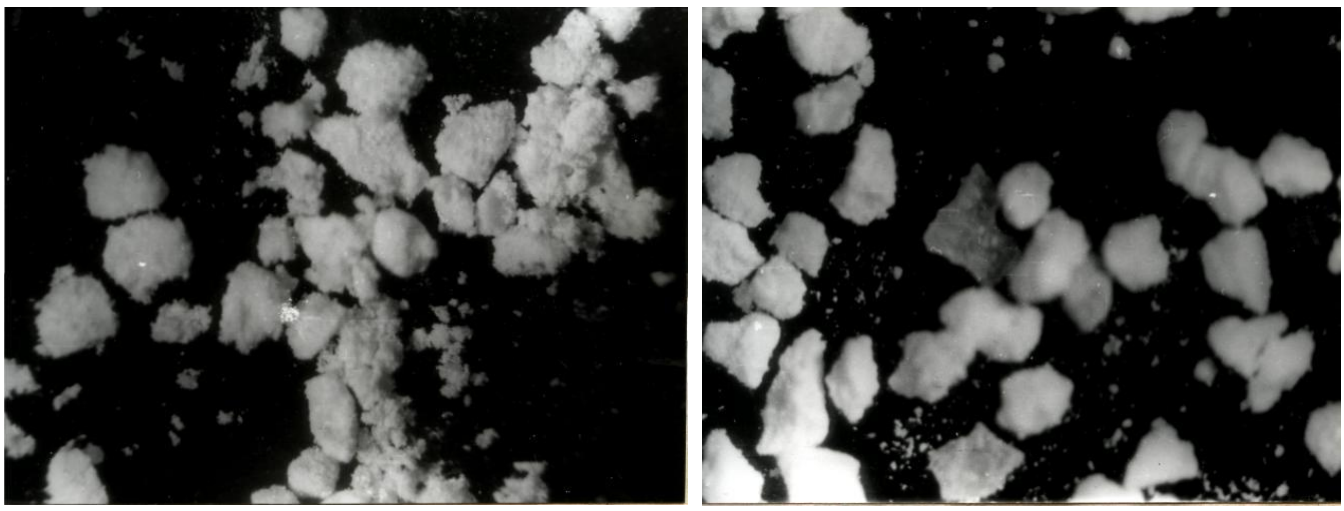
Рисунок 3.3 – Вапно металургійне фракції 0,63 мм при Х 32, отримане в кульовому млині (а) і щоковій дробарці (б)



а б

Рисунок 3.4 – Вапно металургійне фракції 0,315 мм при Х 32, отримане в кульовому млині (а) і щоковій дробарці (б)

пов'язаних частинок зберігають цілісність лише завдяки найтоншим прошаркам і включенням силікатів кальцію і при незначному натисканні легко розсипаються на дрібніші частинки. Більшість зерен CaO, що утворилися при термічній асоціації карбонатів, має дефектну кристалічну решітку з великою кількістю ненасичених зв'язків і тому легко гідратує, перетворюючись на криптокристалічний дрібнопластинчастий портландит. Серед агрегатів портландиту виявляються дрібні зерна силікатів та карбонатів кальцію. Останні, судячи з показників заломлення N_0=1,760–1,680; Ne=1,520–1,500 близькі до доломіту та кальциту. Ці ж карбонати, але у вигляді дрібнозернистих агрегатів утворюють окремі уламки. Вони мають ізометричну і таблитчатую форму, що добре виражає досконалу спайність. Вони чітко проявляються псевдоадсорбція, високі (4-й порядок) кольору інтерференції. Часто вони обволікаються гідратованим вапном. Криптозернисте або мікролуската будова більшості уламків дробленого металургійного вапна забезпечує ізометричну або неправильну їх форму незалежно від способу дроблення.



а б

Рисунок 3.5 – Вапно металургійне фракції 0,16 мм при Х 32, отримане в кульовому млині (а) та щоковій дробарці (б)

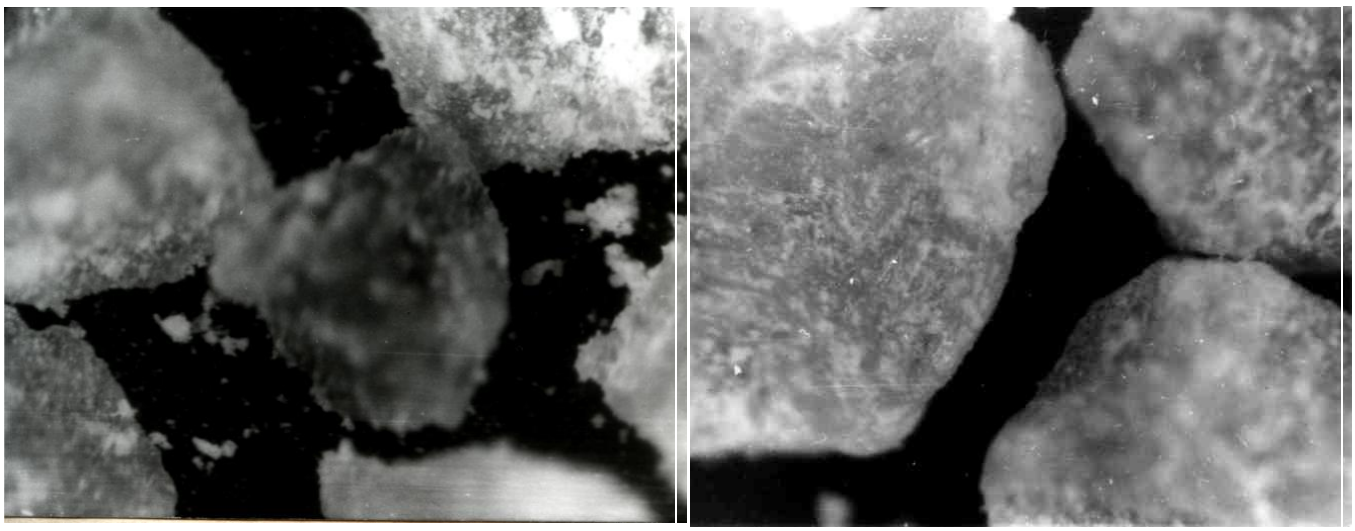
Присутність у пробах металургійного вапна тонкодисперсної маси портландиту знижує сипкість матеріалу.

Частинки плавленого вапна досліджуваних фракцій характеризуються світлим рожево-сірим забарвленням і лише іноді виявляються темніші червонувато-бурі і темно-сірі до чорного кольору уламки. Зміна фарбування частинок пов'язана з наявністю одиничних включень, що відрізняються складом та мікроструктурою.

Переважна маса проб плавленого вапна різних варіантів дроблення складається з уламків кристалів і меншою мірою дрібнозернистих агрегатів вапна, проміжки між яких заповнені дрібнозернистими включеннями двох - і трикальцієвого силікату.

Проведене дослідження проб плавленого вапна різних варіантів дроблення показало, що деяка залежність форми уламків від способу дроблення існує (рис. 3.6–3.8).

Частинки плавленого вапна після дроблення в кульовому млині зазвичай набувають ізометричної форми. Деяка частина уламків має таблетчасту, незграбну, короткостовпчасту форму.



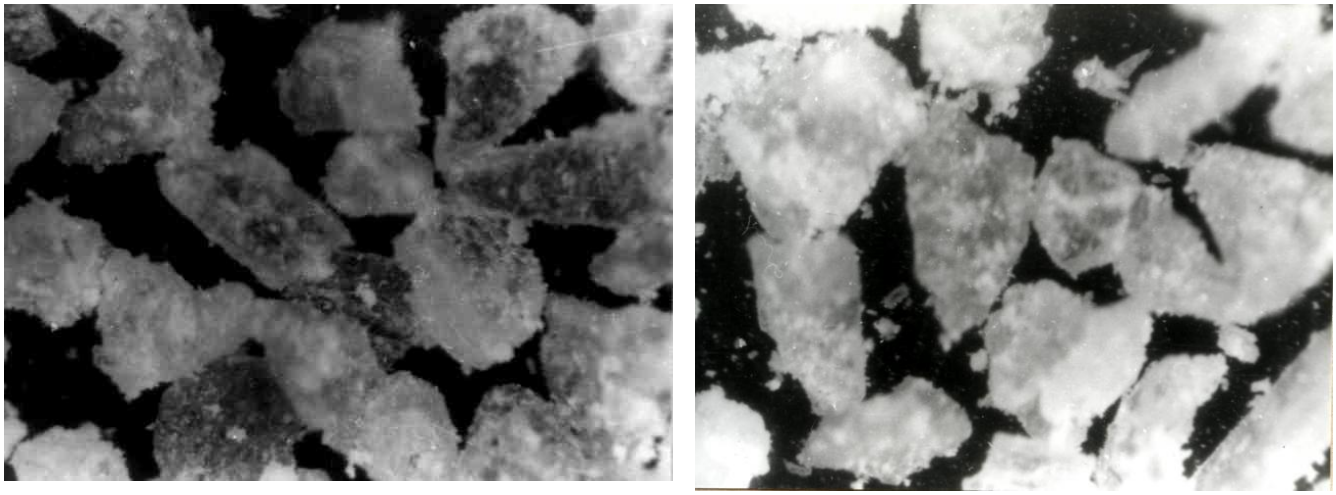
а б

Рисунок 3.6 – Вапно плавлене фракції 0,63 мм при Х 32, отримане в кульовому млині (а) і щоковій дробарці (б)

При дробленні плавленого вапна в щоковій дробарці частіше зустрічаються подовжені формою стовпчасті, клиноподібні зерна з гострорізальними, частина –

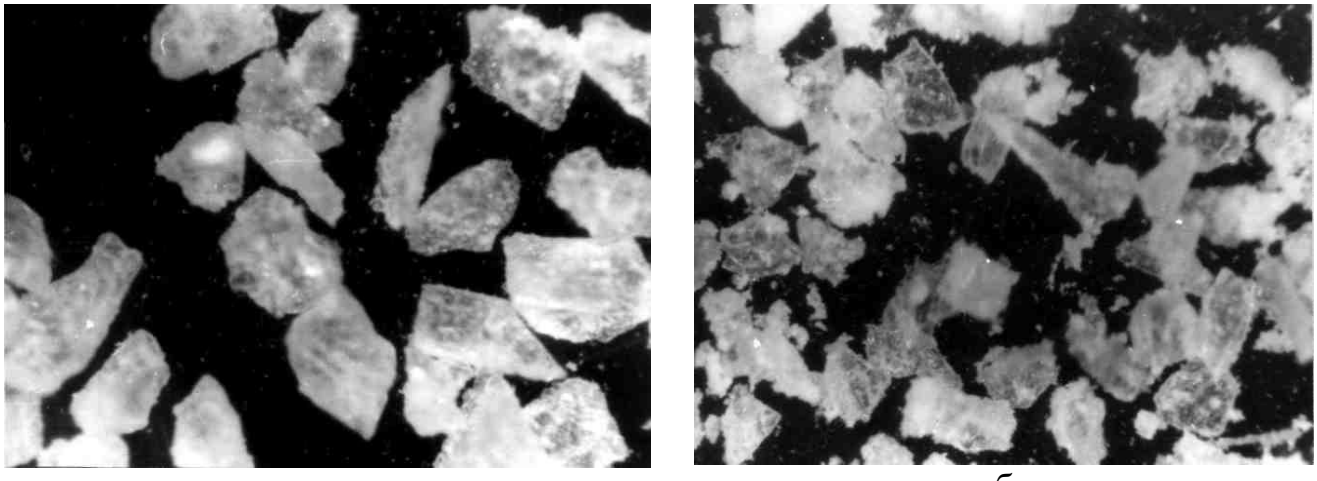
більш зазубреними, краями. Особливо це помітно на зразках дрібних фракцій (рис. 3.8).

Таким чином, плавлене вапно має значні переваги перед металургійним вапном. Вона більш однорідна за мінералогічним та зерновим складом, менш гігроскопічна, відрізняється більш високою сипкістю.



а б

Рисунок 3.7 – Вапно плавлене фракції 0,315 мм при Х 32, отримане в кульовому млині (а) і щоковій дробарці (б)



а б

Рисунок 3.8 – Вапно плавлене фракції 0,16 мм при Х 32, отримане в кульовому млині (а) і щоковій дробарці (б)

3.4 Гідратація вапна

Одним із суттєвих недоліків окису кальцію, що перешкоджають у використанні його як основи твердих шлакоутворюючих сумішей (ТШС) або вогнетривких виробів, є висока активність до водних пар.

При взаємодії окису кальцію з вологою повітря відбувається перетворення окису кальцію на гідрат за реакцією:

$$CaO + H_2O = CaO(OH)_2 \qquad (3.1)$$

Гідратація окису кальцію є екзотермічним процесом і протікає з виділенням 65 кДж тепла на 1 г/моль негашеного вапна. Це викликає великий підйом температури та різке збільшення об'єму.

Ступінь гідратації (К, %) визначалася із співвідношення:

$$K = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{\Delta P}{P_1} \cdot 100, \qquad (3.2)$$

де P_1 – початкова вага зразка, г;

P_2 – кінцева вага зразка, г;

ΔP – зміна ваги зразка за досліджуваний період, г.

Результати досліджень з гідратації як металургійного, так і плавленого вапна представляють певний інтерес з точки зору визначення умов зберігання, упаковки та транспортування плавленого вапна.

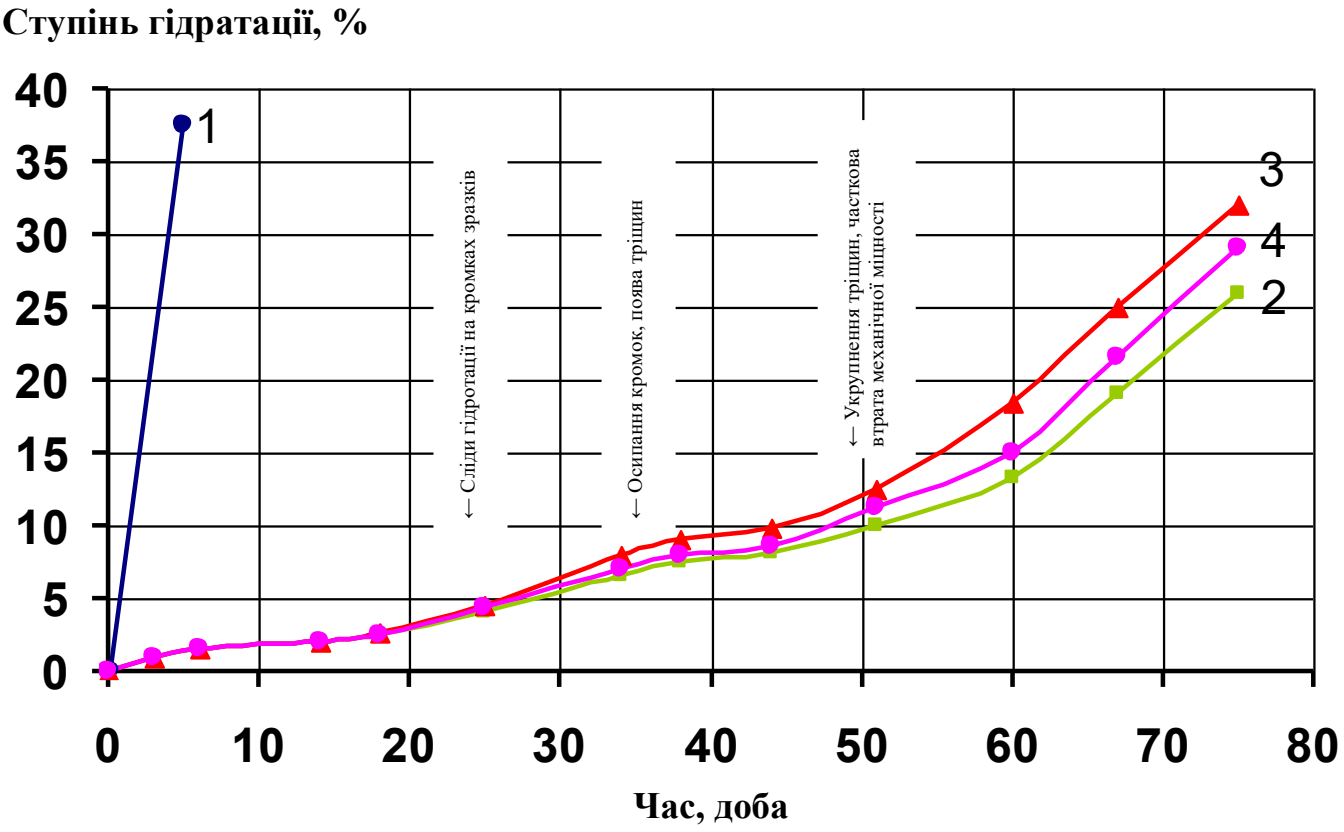
Досліди з гідратації проводили на повітрі, при відносній вологості 50–70 % і температурі 18–25 °С.

Зразки для дослідження відбиралася від кожної партії металургійного вапна, що використовується як шихта і від наплавлених блоків.

Дослідження з гідратації металургійного вапна – вихідної сировини для виробництва плавленого вапна виконано на трьох партіях, які завозилися перед

початком компанії з вапняно-палюючої печі АТ «Запорізький завод феросплавів».

Враховуючи високу швидкість гідратації металургійного вапна, зважування проводила через 6–12 годин. Результати розрахунків ступеня гідратації за трьома партіями та середні значення наведені в таблиці 3.7 і на рис. 3.9.



1 – вапно металургійне; 2 – зразки верхньої частини блоку;

3 – зразки нижньої частини блоку; 4 – зразки середньої частини блоку

Рисунок 3.9 – Гідратація вапна в шматках

Вже через 6–12 годин від початку експерименту шматкових зразків металургійного вапна на кромках зразків з'являються сліди гідратації у вигляді білого нальоту $Ca(OH)_2$. Через 24 години після початку експерименту вся поверхня зразків покрита тонким шаром гідроксиду кальцію. Через дві доби зразки збільшилися в об'ємі, на поверхні видно тріщини, механічна міцність зразків низька. Через 2,5 діб зразки розсипалися. Подальша витримка призводить до повної гідратації оксиду кальцію, що залишився.

Таблиця 3.7 – Гідратація металургійного вапна

№ партії	Розмір, мм	Ступінь гідратації (%) при тривалості експерименту (годин)														
		6	12	24	30	36	48	54	60	72	78	84	96	102	108	120
Кускове вапно																
1	5x15	1,85	2,86	4,12	5,81	7,34	10,74	12,85	15,60	19,02	21,42	23,98	27,80	30,65	32,12	35,12
2	5x15	1,68	2,44	3,64	5,02	6,89	10,63	13,02	15,81	18,09	20,63	23,13	28,35	30,05	32,82	35,78
3	5x15	2,14	3,11	4,98	6,86	8,11	12,87	14,31	16,37	18,95	21,74	24,96	29,85	31,64	33,12	37,14
Середне значення	5x15	1,98	2,80	4,25	5,89	7,45	11,43	13,39	15,92	18,68	21,26	24,02	28,66	30,78	32,68	36,01
Порошкоподібне вапно																
1	0,40-0,63	2,41	3,96	5,90	8,11	11,40	14,34	17,35	19,89	23,90	25,15	26,88	31,20	33,02	35,34	39,00
	1,60-2,50	2,07	3,91	4,81	6,17	8,56	11,72	13,90	15,74	18,84	20,12	22,10	23,90	25,68	28,07	32,40
2	0,40-0,63	1,89	2,75	5,61	8,04	9,65	12,94	14,71	17,02	21,15	23,14	25,81	28,80	30,11	31,85	36,81
	1,60-2,50	2,01	2,96	4,74	7,14	8,88	11,62	12,78	14,82	19,27	21,34	22,09	24,35	25,12	27,62	29,99
3	0,40-0,63	2,34	3,68	5,18	7,78	9,92	12,98	13,65	16,84	21,17	22,78	23,31	29,10	21,72	33,28	36,05
	1,60-2,50	2,12	3,58	4,07	6,01	8,58	10,12	12,76	14,68	17,14	18,04	19,71	22,28	24,91	26,81	27,40
Середне значення	0,40-0,63	2,21	3,46	5,56	7,98	10,32	13,42	15,23	17,92	22,07	23,69	25,66	29,70	31,62	33,49	37,28
	1,60-2,50	2,06	3,48	4,54	6,44	8,67	11,15	13,14	14,91	18,42	19,83	21,30	23,51	25,24	27,50	29,93

Протягом експерименту проводилося візуальне спостереження та фотографування стану поверхні зразків, що фіксувалося у робочому журналі.

Як видно з наведених даних зі збільшенням експерименту, ступінь гідратації зростає. Гідратація зразків починається із поверхні, на гранях яких з'являється наліт. У подальшому пилоподібні нашарування з'являються на всій поверхні зразків. Корочка гідрату кальцію, що утворюється, рихла, неміцна і не перешкоджає проникненню вологи всередину зразка.

Тому процес гідратації йде безперервно. Утворення гідрату кальцію відбувається зі збільшенням обсягу, що призводить до розтріскування зразків, зниження їх механічної міцності, відколювання окремих шматочків і до кінця експерименту до втрати механічної міцності.

Процес гідратації, як металургійної, так і плавленого вапна, аналогічний. Однак зміни, що спостерігаються під час дослідів, відбуваються у різний час.

Дослідження гідратації плавленого вапна в шматках виконано на зразках, відібраних з верхньої, середньої та нижньої частини блоку. Розмір шматків – 5–15 мм у поперечнику. Шматки плавленого вапна були поміщені у порцелянові чашки та залишені на повітрі. Температура навколишнього середовища коливалася у межах 20–25 ^{0}C, відносна вологість повітря коливалася в межах 52–68%. Загальна вага навішування склала 15 г. Експеримент дублювався на двох паралельних зразках. Тривалість експерименту 75 діб, протягом якого проводилося візуальне спостереження за станом поверхні зразків та періодичне їхнє фотографування.

На рис. 3.10 показано три чашки з досліджуваними зразками перед початком експерименту. Зразки мали блискучу кристалічну поверхню із гострими гранями. Усереднені результати визначення ступеня гідратації паралельних зразків наведено у таблиці 3.8.

При подальшому вилежуванні зразків ступінь гідратації дещо зростає, а кількість білого нальоту на поверхні зразків і особливо на гранях помітно збільшується (рис. 3.10 б). Зразки ще мають високу механічну міцність. На тридцяту добу спостерігається обсипання кромок та поява невеликої кількості мікротріщин.

Після сорока діб експерименту гідратація зразків відбувається більш інтенсивно, що можна пояснити укрупненням тріщин та збільшенням поверхні контакту зразків із вологою повітря. Механічна міцність зразків знижується. Спостерігається їх часткове руйнування, що призводить до різкого збільшення поверхні контакту зразків з вологою повітря (рис. 3.10). До кінця експерименту зразки частково зруйнувалися. На той час ступінь гідратації досягає 30%.

Таблиця 3.8 – Гідратація шматкового плавленого вапна

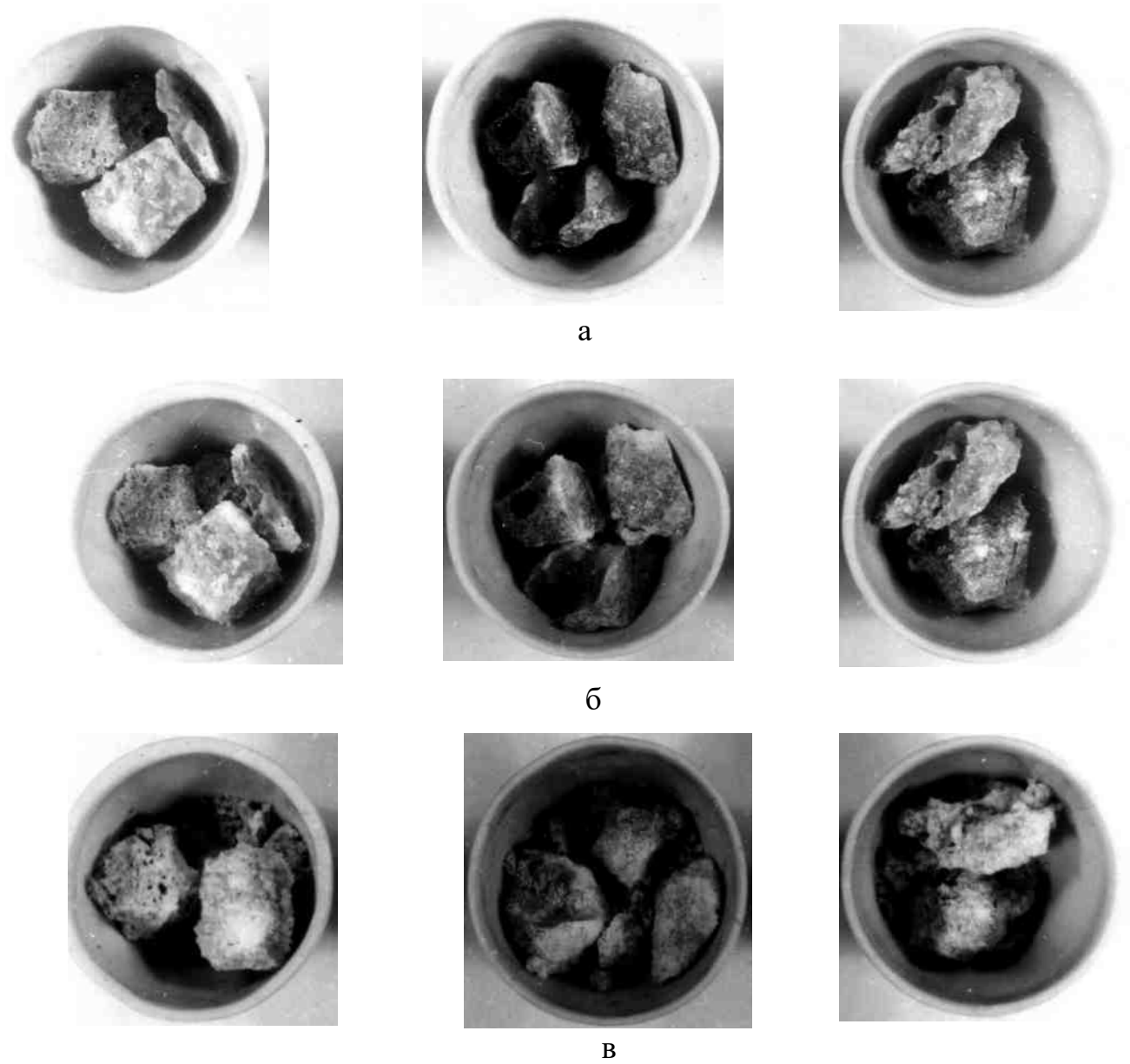
Розмір зразку, мм	Варіант відбору проби від блоку	Ступінь гідратації (%) при тривалості експерименту (добу)								
		1	6	12	21	33	43	54	64	75
5x15	другий	0,25	1,96	2,24	3,23	7,66	8,62	11,62	16,21	26,15
5x15	третій	0,02	2,02	3,23	3,38	7,89	9,92	13,36	21,01	32,68
5x15	четвертий	0,01	2,01	3,01	3,21	7,81	9,02	12,02	18,03	28,04

Гідратація порошків металургійного вапна відбувається більш інтенсивно через велику поверхню контакту досліджуваного матеріалу з вологою повітря. Так уже через 6 годин від початку експерименту на поверхні порошку – суцільний білий наліт гідроксиду кальцію. Збільшення обсягу порошку спостерігається наприкінці першої доби експерименту. На другу добу ступінь гідратації перевищила 40%, і процес гідратації порошку металургійного вапна практично закінчився, що видно на рис. 3.10.

Механізм взаємодії порошків плавленого вапна різного фракційного складу з вологою повітря аналогічний описаному вище процесу гідратації металургійного вапна. Загальна тривалість експерименту з порошками плавленого вапна різних фракцій склала 75 діб. Порівняно з гідратацією порошку металургійного вапна процес йде значно повільніше. За однакових умов експерименту на кінцевий результат впливає фракційний склад порошків. Дрібна фракція – 1,0–0,063 мм гідратує швидше, ніж велика. На підставі вимірів

збільшення ваги досліджуваних порошків та визначення ступеня їх гідратації наведено криві 2, 3, 4 на рис. 3.11.

Лш



а

б

в

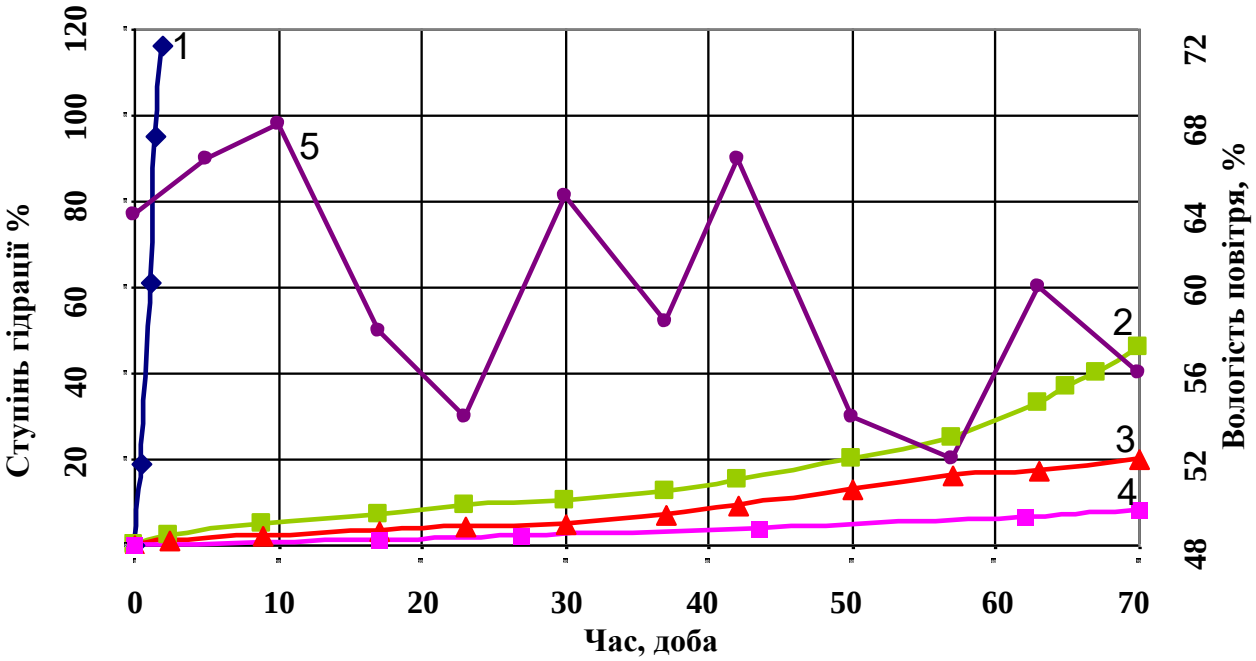
а – початок експерименту; б – на 25 добу; в – на 50-ту добу

Рисунок 3.10 – Зразки плавленого вапна

Крива 5 на рис. 3.11 показує зміну відносної вологості, що коливалася від 52 до 68%. На нашу думку, такі незначні коливання не мають істотного впливу на зміну умов гідратації.

Зіставлення наведених результатів дозволяє зробити практичний висновок, що плавлене вапно набуває практично нової властивості - досить високу стійкість

проти гідратації, що дозволяє використовувати вогнетривкі матеріали на основі плавленого вапна як основи ТШС і футерування відкритих і вакуумних індукційних печей, а також інших плавильних агрегатів.



1 – вапно металургійне, фракції 1,0–0,063 мм; 2 – вапно плавлене, фракції 1,0–0,063 мм; 3 – вапно плавлене, фракції 2,0–0,063 мм; 4 – вапно плавлене, фракції 4,5–0,063 мм; 5 – вологість повітря, % відн.

Рисунок 3.11 – Гідратація вапна різного фракційного складу

4 АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАВЛЕНОГО ВАПНА У МЕТАЛУРГІЙНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Як футерувальні матеріали більшості сталеплавильних агрегатів в даний час використовуються основні вогнетриви, і, в першу чергу, магнезіальні. Збільшується попит на доломіт, але, на жаль, Україна не має в достатній кількості ні магнезитової, ні доломітової сировини.

Загальновідомо різко виражені основні властивості оксиду кальцію, його висока термо- та металостійкість. Були спроби використати металургійне вапно для виготовлення футерування сталеплавильних агрегатів або для обмазування магнезитових тиглів з метою глибокої десульфурації металу. Однак непереборною перешкодою широкому практичному використанню металургійного вапна як вогнетривкий матеріал є її висока схильність до гідратації.

Розглядаючи властивості плавленого вапна можна припустити можливість використання її як вогнетривкий матеріал для виготовлення елементів футеровки відкритих і вакуумних індукційних печей та інших плавильних агрегатів, а також як розкислювач і десульфуратор рідких металевих розплавів. Висока десульфуруюча здатність плавленого вапна не може бути пояснена тільки великою сульфідною ємністю оксиду кальцію, і тому слід зважати на можливість розвитку в ході електрометалургійної обробки вапна процесів, що призводять до порушення стехіометрії оксиду кальцію.

Відмінності в параметрах електроплавленого кристалічного вапна (4,8075А) та металургійного вапна, отриманого традиційним способом (4,799А), можливо також пов'язані з порушенням стехіометрії оксиду кальцію.

Відомо два основні шляхи застосування плавленого вапна та композицій на його основі в металургійній промисловості України:

– як основа твердих шлакоутворюючих сумішей (ТШС) для позапічної обробки рідких металевих розплавів;

– як матеріал для тиглів вакуумних та відкритих індукційних печей;

керамічних елементів футеровки кисневих конвертерів та дугових сталеплавильних печей, елементів проміжних ковшів установки безперервного лиття заготовок, елементів розливних стаканів сталерозливних кошів, елементів устрою для фільтрації рідких металевих розплавів.

4.1 Використання плавленого вапна у складі твердих шлакоутворюючих сумішей

Розробкою технологій обробки рідкого металу твердими шлакоутворюючими сумішами металурги займаються тривалий час. У технічній літературі є достатня кількість даних про доцільність використання ТШС, переваги та недоліки цього способу підвищення якості сталі, що виплавляється.

В конвертерному цеху ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (зараз ПрАТ «КАМЄТ-СТАЛЬ») освоєно технологію обробки вуглецевої і низьколегованої спокійної сталей кускової твердої шлакоутворювальної сумішшю, що складається зі свіжообпаленого металургійного вапна і сухого плавикового шпату в співвідношенні 4:1 250 т. Введення ТШС у шматках розміром до 50 мм у ківш здійснюють через вертикальний тракт для подачі сипких та феросплавів. Обробка ТШС освоєна на сталях марок 20, 35, 09Г2, 16ХГ, 10ХС та ін. Витрата ТШС становила зазвичай 7 кг/т. Зміст сірки у металі перед випуском коливалося не більше 0,025–0,050 %, у готовому металі 0,010–0,030 %. Ступінь десульфурації склала 182–315%.

Встановлено, що застосування ТШС спричинило додаткове зниження температури в середньому на 10 ^{0}С. Екологічна ситуація в цеху не погіршується.

На «Криворіжсталь» (зараз «АрселорМіттал Кривий Ріг») вуглецеву і низьколеговану сталь, виплавлену в 150 т конвертерах, обробляли в ковші шматковою шлакоутворювальною сумішшю вапна та плавикового шпату. Витрата шматкового вапна становив 2,3–7,8 кг/т сталі. Вихідний вміст сірки у металі під час випуску плавки становило 0,037%. Ступінь десульфурації стали коливалася в межах 15–30%.

На ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь»» (існував до 2022р.) розроблено та освоєно технологію десульфурації конвертерної сталі у ковші твердими шлакоутворюючими сумішами на основі офлюсованого вапна, що відрізняється від звичайного вапна підвищеним вмістом заліза – до 3,3% та меншою величиною втрат при прожарюванні – 1,5. Офлюсоване вапно подавали в 350 т ківш трактом сипучих матеріалів. Одночасно в ківш вводили плавиковий шпат; при цьому співвідношення ТШС плавикового шпату і вапна витримували 1:(3–4). Обробці піддавали низьколеговану сталь 13ГС, 16ГС та ряд рядових марок. На початку випуску плавки під струмінь сідали алюміній у злитках (0,4-0,5) кг/т сталі, через 20–30 сек. з початку випуску вводили ТШС до 8 кг/т.

На ефективність обробки ТШС в ковші стали рядових марок (Ст 3сп) вид вапна менший вплив (див. таблицю 4.1).

Таблиця 4.1 – Технічні показники обробки ТШС

	Офлюсоване вапно	Неофлюсоване вапно
Витрата ТШС, кг/т	4,11	4,20
Вміст сірки в сталі, %		
на випуску	0,0260	0,0258
в готовій	0,0193	0,0198
Ступінь десульфурації, %	28,30	23,26

Є дані по обробці в сталерозливному ковші спокійної вуглецевої і низьколегованої сталі, що виплавляється в 140 т конвертерах, твердими шлакоутворюючими сумішами з мелених (до фракції не більше 50 мм) плавикового кг/т сталі.

Встановлено зв'язок маси присадки ТШС та температурним режимом плавки. Температура перегріву сталі у конвертері при рекомендованих витратах суміші має становити 15–20 ^{0}С.

ТШС доцільно присаджувати на самому початку випуску плавки разом з навуглежувачем. Для отримання шлаків з температурою плавлення не вище

1350 ^{0}C необхідно мати в них щонайменше 15–20% плавикового шпату. Показано, що застосування ковшів зі смолодомітовою футеровкою дає можливість сформувати в ковші шлак з більш високою основністю і більшим ступенем десульфурації, ніж у ковшах з шамотним футеруванням. За висновками авторів цей метод не дозволяє отримати метал із вмістом сірки менше 0,015–0,020% .

Як бачимо з описаних технологій, застосування твердих шлакоутворюючих сумішей на основі металургійного вапна мають деякі переваги способу, але не позбавлені істотних недоліків. Так у більшості випадків застосування ТШС на основі металургійного вапна вимагає деякого перегріву металу, збільшує час на утворення рідинного шлаку, т.к. шихта здебільшого – шматки 50 мм. Найчастіше ступінь десульфурації не перевищує 15–30%, що не забезпечує реальних вимог сьогодення – вміст сірки в готовій сталі має бути не більше 0,006–0,015%.

Тому в даний час позапічна обробка рідких металевих розплавів з використанням твердих шлакоутворюючих сумішей знаходить все ширше застосування і є невід'ємною частиною технологічного процесу виробництва високоякісної сталі.

На кафедрі металургії чорних металів Запорізької державної інженерної академії (зараз Запорізький національний університет) тривалий час займаються розробкою технології обробки рідких металевих розплавів твердими шлакоутворюючими сумішами на основі плавленого вапна, підбором її хімічного та гранулометричного складу. У лабораторних умовах проведено експерименти з обробки рідкого металу під час плавки та випуску металу з відкритої індукційної печі. Отримані матеріалу дозволили перевірити та підтвердити позитивні результати застосування твердих шлакоутворюючих сумішей на основі плавленого вапна у промислових умовах, що описано в наступному розділі роботи.

4.3.2 Використання плавленого вапна як футерувальний матеріал

У літературі є досить опублікованих матеріалів щодо застосування

основних вогнетривких матеріалів для виготовлення тиглів відкритих та вакуумних індукційних печей, елементів футерування конвертерів та дугових електричних печей. Відзначено, що широке впровадження інтенсифікованих металургійних процесів та перспективи у цій галузі значною мірою залежать від застосування високовогнетривких матеріалів та якості футерування. Це особливо проявляється у відкритих та вакуумних індукційних печах. В даний час використовують набивні магнезитові та хромомагнезитові вогнетривкі матеріали. У вакуумних індукційних печах успішно здійснюються процеси дегазації, розкислення та обезуглерожування металу. Однак десульфурація та дефосфорація металу в ній не набувають помітного розвитку.

Вихідний матеріал для виготовлення тиглів – дрібно подрібнене плавлене вапно різного фракційного складу від 3–5 до 0,063 мм. Як тимчасовий сполучний (пластифікатор) при виготовленні тиглів і елементів футерування вакуумних і відкритих індукційних печей використовувалася натуральна оліфа. Зміст оліфи у вогнетривкій масі варіювалося в межах 2,0–4,0%.

Формування виробів проводилося методом гідравлічного пресування при питомому тиску 60–100 МПа. Зразки після формування піддавалися сушінню протягом 10–30 годин при температурі 120–150 ^{0}C.

Випал проводився в силітовій печі за наступним режимом. Нагрів разом із піччю протягом 7–8 годин до температури 1250 ^{0}C і витримкою протягом двох годин при цій температурі. Пекти вимикали і вироби остигали разом з піччю. Час остигання 16–18 годин. З печі зразки вилучалися за нормальної температури 50–80 ^{0}C. Подальше охолодження – поза печі на повітрі. Після повного остигання вироби піддавалися візуальному огляду, обмірам і запаювалися в целофанові мішки. У такому вигляді вони можуть зберігатись протягом 2–4 місяців.

Випробовано випал тиглів для індукційних печей у тунельній випалювальній печі цеху високоглиноземистих виробів Запорізького вогнетривкого заводу. Максимальна температура випалу 1620–1640 ^{0}C, сумарний час випалу 78–96 годин.

Підвищення температури випалу сприяло підвищенню характеристик

міцності і практично позбутися обсипаності кромок зразків.

За результатами випробування вапняних тиглів у відкритій лабораторній індукційній печі показана можливість використання їх і в промислових умовах. Тиглі індукційної печі в масштабі 1:3 показано на рис.4.1.

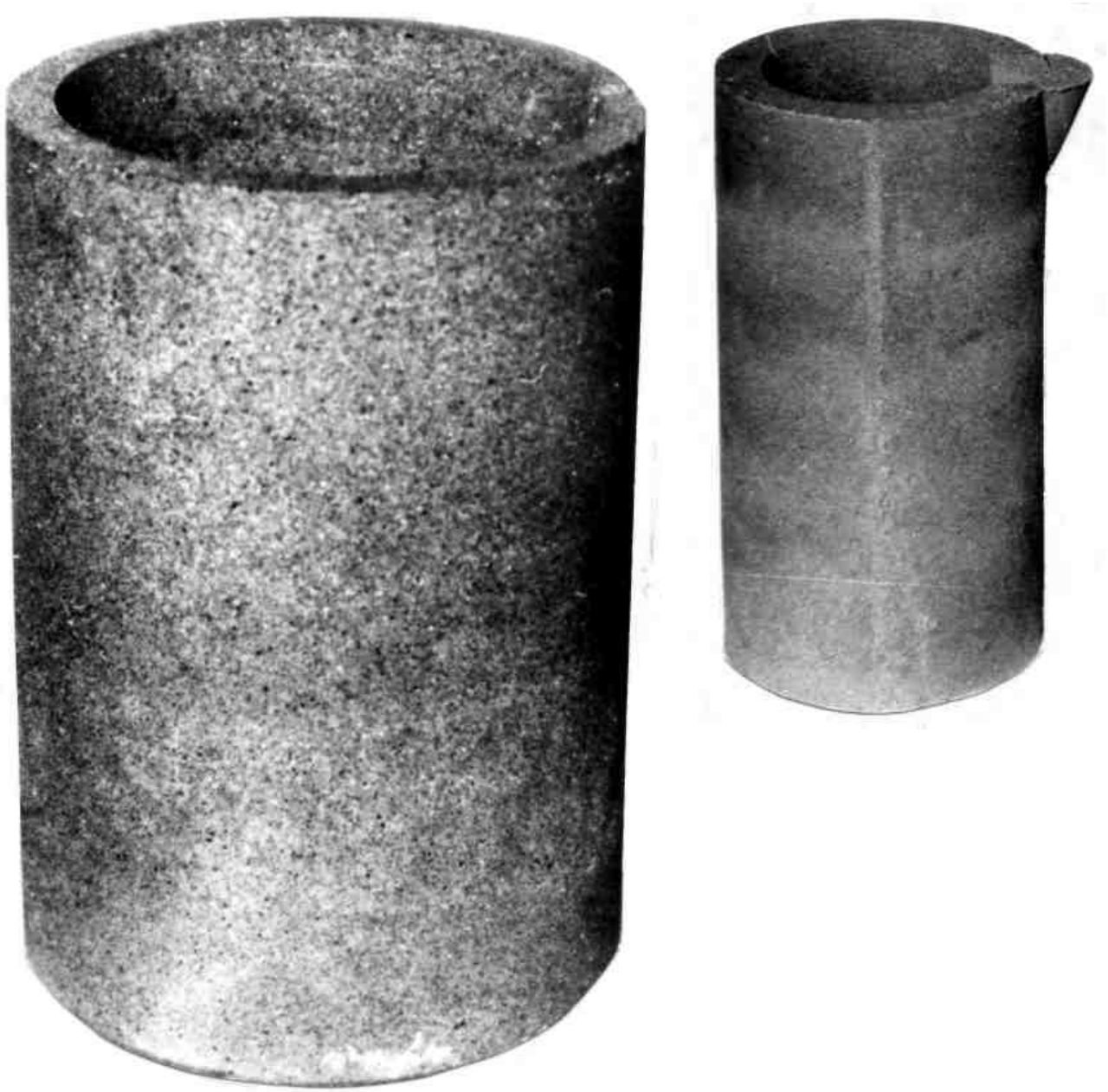


Рисунок 4.1 – Тиглі індукційної печі з плавленого вапна

Дослідження десульфурующей здатності тигля індукційної печі з плавленого вапна показало, що витримка рідкого чавуну протягом 20–30 хв. забезпечує зниження концентрації сірки з 0,026 до 0,005–0,008%. Встановлено

також, що при витримці металевого розплаву у вапняному тиглі поряд з глибокою десул'фурацією відбувається і дефосфорадія металу, що досягає 15–30%.

Тиглі з плавленого вапна випробувані також у промислових умовах ПАТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя) у вакуумних індукційних печах при виплавці сплаву ЧС-70-ВІ.

Існуючий технологічний процес виливки турбінних лопаток здійснюється в муллітокорундових тиглях виробництва заводу "Казогнеупор". У цьому вихід придатних литих виробів становить 45–50%.

Застосування тиглів з плавленого вапна призводить до збільшення виходу придатних лопаток до 66–79% залежно від типу лопатки. При цьому відбувається помітне зменшення кількості виробів із поверхневими дефектами та шлаковими включеннями.

4.3 Промислове випробування твердих шлакоутворюючих сумішей на основі плавленого вапна

Відпрацювання технології отримання плавленого вапна в досить великих кількостях (вага блоку до 250 кг) дозволила підготувати необхідну кількість твердих шлакоутворювальних сумішей на основі плавленого вапна для випробування їх у промислових умовах. Нижче наведено результати виконання експериментів у промислових умовах.

4.3.1 Позапічна обробка шлакоутворюючими сумішами на основі плавленого вапна підшипникової сталі в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»

В умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь» виплавка підшипникової сталі марок ШХ15 та ШХ15СГ проводиться у 60-тонних дугових печах вСПЦ-3 із позапічною обробкою твердими шлакоутворюючими матеріалами.

Розплавлення шихти та окисний період проводяться за прийнятою технологією.

У період рафінування в піч сідали шлакоутворювальні матеріали у такій кількості:

– плавиковий шпат 1,0–1,5 кг/т;

– шамот 1,5–2,0 кг/т;

– металургійне вапно 2,0–4,0 кг/т.

Розкислення шлаку не проводилося. Перед випуском шлак видалявся з печі.

У спеціальний бункер, не пізніше ніж за 20 хв. до випуску плавки, завантажувалися шлакоутворювальні матеріали: металургійне вапно 9–10 кг/т, плавиковий шпат 2–3 кг/т, а також феросиліцій та феромарганець з урахуванням вмісту кремнію та марганцю в металі перед випуском плавки.

На дно ковша до випуску металу сідав шматковий або порошкоподібний алюміній у кількості 0,5 кг/т.

При такому варіанті технології в практиці виробництва досягається кінцевий вміст сірки в межах 0,010–0,015% за ступенем десульфурації 45–55%.

За альтернативним варіантом, що передбачає присадку в ківш суміші плавленого вапна з порошковим алюмінієм, було проведено три промислові плавки, результати яких представлені в таблиці 4.2. Феросплави та плавиковий шпат задавали в ківш по ходу зливу металу.

Вміст сірки у підшипниковій сталі дослідних плавок становило 0,005–0,009%. Досягнута ступінь десульфурації металу 72–81% свідчить про високу рафінуючу здатність плавленого вапна.

4.3.2 Обробка нержавіючої сталі плавленим вапном на установці аргонно-кисневого рафінування в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»

З метою з'ясування можливості використання шлакоутворювальних сумішей на основі плавленого вапна для глибокої десульфурації нержавіючої сталі на установці аргонно-кисневого рафінування в СПЦ-2 ПрАТ «Дніпроспецсталь» було проведено за заводською технологією дві плавки нержавіючої сталі 12Х18Н10Т і 08 ковші плавленим вапном.

Сталь виплавляли у СПЦ-2 дуплекс-процесом електропіч-конвертер. Виплавку напівпродукту здійснювали у дуговій печі ємністю 50 т методом переплаву легованих відходів. Шихта складалася з вуглецевих відходів, нікелю, відходів марок сталей, що виплавляються, і сталей близького хімічного складу.

Таблиця 4.2 – Показники виплавки стали ШХ15 з обробкою в ковші плавленим вапном

№ плавки			$T_м$, ^0C в ковші			Добавки		Кількість, кг
355520			1570			$(CaO)_{пл.}$		400
						$Al_{пор}$		70
						$Al_{кус}$		14
						плавиковий шпат		150
C	*Mn*	*Si*	*S*	*P*	*Cr*	*Ni*	*Cu*	*Al*
1,01	*0,25*	*0,35*	*0,005*	*0,009*	*1,47*	*0,05*	*0,09*	*0,04*
штанга Ø 130 мм								
355782			1550			$(CaO)_{пл.}$		400
						$Al_{пор}$		76
						$Al_{кус}$		14
						плавиковий шпат		150
C	*Mn*	*Si*	*S*	*P*	*Cr*	*Ni*	*Cu*	*Al*
1,01	*0,31*	*0,32*	*0,009*	*0,023*	*1,64*	*0,06*	*0,07*	*0,02*
штанга Ø 130 мм								
356522			1560			$(CaO)_{пл.}$		400
						$Al_{пор}$		70
						$Al_{кус}$		14
						плавиковий шпат		150
C	*Mn*	*Si*	*S*	*P*	*Cr*	*Ni*	*Cu*	*Al*
1,02	*0,27*	*0,34*	*0,007*	*0,017*	*1,40*	*0,10*	*0,15*	*0,03*
штанга Ø 75 мм								

Розплавлення шихти виробляли при максимальній потужності, що вводиться. Кисень, зазвичай, не застосовувався. Вміст вуглецю з розплавлення 0,30–0,31%, кремнію 0,16–0,21%, хрому 11,49–12,06%, нікелю 9,80–9,96%, сірки 0,033–0,030%. Шлак періоду плавлення підкачували на 50–80% і оновлювали за

рахунок присадки 5–10 кг/т металургійного вапна та 3 кг/т плавикового пшата. Розкислення шлаку виробляли порошком феросиліцію в кількості 0,5 кг/т.

Середня тривалість плавки напівпродукту 4:00, 20 хв.

Температура напівпродукту у печі перед випуском 1580–1590 °С, у ковші 1550–1570 °С.

Після зливу плавки ківш транспортували у відділення АКР, де проводили вимірювання температури металу, зважування напівпродукту та відбір проби металу на повний хімічний аналіз.

Перед заливкою напівпродукту в конвертер сідали тверду частину шихти: ферохром марки ФХ800. Маса твердої шихти становила 5,6-8,5% маси напівпродукту.

Після завантаження твердої шихти і заливки напівпродукту починався перший період продування сталі киснем і природним газом до досягнення вмісту вуглецю сталі 0,16–0,20% і температури 1720–1730 °С.

У другому періоді здійснювали продування металу сумішшю аргону з киснем до досягнення марочного вмісту вуглецю.

У третьому періоді продування металу проводиться чистим аргоном з присадкою крем'янистих розкислювачів та ферохрому.

Десульфурація металу у конвертері не проводиться.

Під час кожного періоду по ходу плавки відбиралися проби металу та шлаку для хімічного аналізу відповідно до вимог чинної нормативно-технічної документації.

Десульфурація металу в ковші випробувана за двома варіантами.

За першим варіантом у ківш сідала у паперових мішках порошкоподібне плавлене вапно з розрахунку 9,5 кг/т сталі.

За другим варіантом - плавлене вапно в кількості 5,3 кг/т у суміші з 0,94 кг/т плавикового шпату.

За звичайною технологією витрата металургійного вапна становить 15 кг/т і плавикового шпату 4,2 кг/т.

Як очевидно з даних, наведених у таблиці 4.3, у процесі обробки металу

шлакоутворюючими сумішами, присадженими в ківш перед випуском плавки, відбувається десульфурація металу.

На рядових плавках середній ступінь десульфурації по 50 плавках досягає 58,1% при витраті 16 кг/т металургійного вапна та 4,2 кг/т плавикового шпату.

На дослідній плавці 902934 рідкий метал у ковші оброблявся тільки плавленим вапном без присадки плавикового шпату. Шлак був густий, чим пояснюється високий залишковий вміст сірки в готовому металі (0,013%).

Значно кращі результати десульфурації металу в ковші отримані на плавці 902994. При значно меншій витраті плавленого вапна (5,3 кг/т) і 0,9436 плавикового шпату, вміст сірки в нержавіючої сталі склало – 0,00986, а ступінь десульфурації – 6.

Необхідно відзначити позитивні результати, отримані під час виконання цих досліджень.

Після коригування технології позапічної обробки нержавіючої сталі та вибору оптимальної кількості та складу шлакоутворюючих матеріалів на основі плавленого вапна вміст сірки в готовому металі може бути знижено до 0,005–0,007 %, а ступінь десульфурації доведено до 75–85 %.

4.3.3 Промислове випробування технології позапічної десульфурації конвертерної сталі з використанням плавленого вапна в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

У киснево-конвертерному цеху Дніпровського металургійного комбінату ім. Ф.Е. Дзержинського (зараз ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ») проведено промислові плавки сталі з десульфурацією металу в ковші на установці комплексного доведення сталі шлаковою сумішшю з плавленого вапна та плавикового шпату. Плавки проводили за такою технологією. При зливі металу, виплавленого в 250 т конвертері, в ківш на струмінь металу після введення феросплавів подавали кускову шлакоутворювальну суміш з металургійного вапна і плавикового шпату у співвідношенні 85 % вапна, 15 % плавикового шпату в кількості 0 шлаку. Потім

Таблиця 4.3 – Технологічні параметри виплавки нержавіючої сталі

Метод виплавки	№ плавки, марка сталі	Витрата шлакоутворюючих матеріалів для позапічної десульфурації			Вміст сірки в металі		Ступінь десульфурації, %	Температура металу, ^{0}C	
		вапно металур-гійне, кг/т	вапно плавлене, кг/т	плавико-вий шпат, кг/т	перед випуском з конвертера	в готовому металі		в конвертор і перед випуском	в ковші
Дослідні плавки	902934 12Х18Н10Т	-	9,5	-	0,025	0,013	48,0	1625	1585
	902994 08Х18Н10Т	-	5,3	0,94	0,028	0,009	67,9	1610	1580
Рядові плавки*	8-12Х18Н10Т	15	-	4,20	$\frac{0{,}025–0{,}033}{0{,}031}$	$\frac{0{,}009–0{,}020}{0{,}013}$	58,1	$\frac{1590–1610}{1600}$	$\frac{1550–1590}{1570}$

* – дані по 50 плавкам.

ківш з металом передавали на установку комплексного доведення сталі, де проводили посередню продувку металу в ковші аргоном занурювальної футерованою неохолоджуваною фурмою протягом 5 хв. Після цього заміряли температуру стали занурювальним блоком ТПР-2075 та її окисленість датчиком УКОС-1, відбирали пробу для хімічного аналізу пробовідбірником ПМ. Потім проводили продування металу порошкоподібною сумішшю плавленого вапна та плавикового шпату, взятих у співвідношенні 4:1. Продування металу проводили до отримання заданої температури розливання металу для даної марки сталі. Ступінь десульфурації стали визначали як відношення різниці вмісту сірки в ковшової пробі готового металу та у вихідній пробі металу після продувки посередника аргоном протягом 5 хв. і вмісту сірки в ковшової пробі готового металу.

Порошкоподібну суміш готували при спільному помелі в кульовому млині попередньо подрібнених до фракції 3–5 мм вапна і плавикового шпату. Після помелу отримано фракційний склад порошку: 100% менше 0,1 мм.

Хімічний склад був наступним: 83,91% CaO, 4,58% SiO_2, 0,30% MgO, 0,31% Fe_2O_3, 0,51% Al_2O_3, 0,17% вологи, 9,65% CaF_2.

Порошкоподібну суміш завантажили в пневмонасос ємністю 1 $м^3$. З використанням порошкоподібної суміші вищевказаного складу проведено три промислові плавки сталі. Результати показані у таблиці 4.5.

На всіх проведених плавках окислення сталі, виміряна датчиком УКОС-1 перед введенням десульфуруючей суміші, коливалася від 0,001% до 0,008%.

Виконані випробування механічних властивостей готового прокату плавки сталі №913311, обробленої десульфуруючою сумішшю з плавленим вапном. Результати випробувань наведено у таблиці 4.5. Для порівняння в цій же таблиці наведені дані про механічні властивості металопрокату за результатами здавачів із сталі цієї марки (обробка даних 80 плавок і прокатаних на стані 350 на той же профіль).

Як видно з наведених даних, метал, оброблений плавленим вапном, має більш високі механічні властивості. Так, значення ударної в'язкості зростають з

16,05 до 20,6 кг см/см^2 на 19,9% відн. в порівнянні з металом звичайної виплавки, а після старіння – на 17,5% відн. Підвищення механічних властивостей дослідного металу можна пояснити нижчим вмістом сірки – 0,027% проти 0,035% на рядових плавках.

Таблиця 4.4 – Механічні властивості металопрокату

№ плавки, марка сталі, профиль прокату	Хімічний склад, %				Механічні властивості				
	C	S	Al	Ti	$\sigma_т$, кгс/см^2	$\sigma_в$, кгс/мм^2	δ_5, %	$a_к$, кг·см/см^2	
								-40^0	після старін-ня
913311 09Г2Д, швелер №10	0,54	0,027	0,013	0,025	38,0	54,5	31,0	20,60	18,6
Середне значення по 80 плавкам сталі 09Г2Д, швелер №10	0,56	0,035	0,025	0,022	37,4	48,8	30,4	16,05	15,4

З отриманих результатів випливає, що помітна десульфурація сталі відбувається при вдуванні в метал не менше 200 кг (0,83 кг/т сталі) суміші, що десульфурує. Більш ефективним виявився спосіб введення суміші через фурму. Найменша ефективність плавленого вапна відзначена при введенні її в шматках на дно ковша перед випуском плавки. Так, збільшення кількості десульфуруючої суміші більш ніж утричі підвищила ступінь десульфурації лише на 4,6%.

Слід наголосити, що випробування в конвертерному цеху металургійного

Таблиця 4.5 – Результати промислових плавок сталі з використанням плавленого вапна

№ плавки, марка сталі	Температура металу в ковші, ^{0}C		Вміст сірки в сталі, %		Кількість і вид десульфуруючої суміші	Питома витрата десульфуруючої суміші, кг/т сталі	Ступінь десульфурації, %
	після 5 хв. продування аргоном	після введення десульфуючої суміші перед розливкою	вихідне після 5 хв. продування аргоном	ковшева проба			
923339 20 кал	1615	1565	0,033	0,032	50 кг/плавку порошок	0,21	3,0
923269 10ХСНД	1610	1575	0,037	0,034	140 кг/плавку порошок	0,65	8,1
913311 09Г2Д	1620	1570	0,032	0,027	200 кг/плавку порошок	0,83	15,6
913458 09Г2С	1610	1570	0,035	0,028	630 кг/плавку порошок	2,61	20,0
913980 09Г2С	1595	1570	0,041	0,028	1000 кг/плавку порошок	4,15	31,7

підприємства проведено за несприятливих для успішного перебігу процесу десульфурації умов, пов'язаних з технологією виплавки конвертерної сталі, що діє на комбінаті. До цих несприятливих факторів належать:

– висока окиснення металу і шлаку на випуску з конвертера (вміст вуглецю в металі перед випуском 0,02–0,05% і вміст оксидів заліза в конвертерному шлаку до 30%) і відповідно висока окиснення металу перед введенням десульфурующей суміші 0,008–0,0;

– дослідні плавки проводилися в ковшах з шамотною футеровкою, що призводило до підвищення вмісту кремнезему в шлаку, зниження його основності та негативного впливу на десульфурующую здатність шлаку.

Усунення цих несприятливих факторів, безсумнівно, сприятиме підвищенню десульфурующей здатності суміші на основі плавленого вапна та поліпшенню якості металу.

4.3.4 Промислове випробування ТШС із плавленим вапном у мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь»

У мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь» на печі №5 проведено 500-тонну дослідну плавку сталі 10СП з обробкою металу в ковші твердими шлакоутворюючими матеріалами на основі вапна.

Виплавка стали проведена за технологічною інструкцією, що діє. Випуск металу здійснено у два ковші. На четвертій хвилині після початку випуску сталі в перший ківш були введені розкислювачі та алюміній, на шостій хвилині зроблена присадка 1200 кг твердої шлакоутворюючої суміші, що складається з 85% плавленого вапна та 15% плавикового шпату. Повний хімічний аналіз ТШС наведено у таблиці 4.6.

Випуск металу в другий ківш проведено за чинною технологією. Загальний час випуску сталі з печі 22 хв., Протягом випуску плавки метал у ковшах продувався аргоном через шиберний затвор.

Маркування плавок:

– №1 дослідна з присадкою ТШС;

– №2 без присадки ТШС.

Розливку сталі здійснено за діючою технологією: плавка №1 у виливниці типу 11Б, плавка №2 у виливниці типу 1Б.

У таблиці 4.7 наведено результати хімічного аналізу проб металу, відібраних у ході плавки та розливки.

Таблиця 4.6 – Хімічний склад ТШС

Масова частка, %							
CaO	CaF_2	MgO	SiO_2	Al_2O_3	Fe	C	S
82,500	14,270	0,200	2,970	0,190	0,190	0,021	0,005

Таблиця 4.7 – Зміна вмісту елементів у металі по ходу плавки та розливки сталі 10СП

Елемент	Вміст елементів, %			
	по розплавленню	перед випуском з печі	в ковші №1 після обробки ТШС	в ковші №2 без обробки
C	0,750	0,070	0,100	0,090
Mn	-	0,180	0,650	0,530
Si	-	-	0,240	0,210
S	0,043	0,032	0,019	0,027
P	-	-	0,011	0,010
Cr	-	-	0,080	0,080
Ni	-	-	0,050	0,050
Cu	-	-	0,010	0,090
As	-	-	0,080	0,080

Вихідний вміст сірки в металі перед випуском 0,032%, у ковші після

обробки твердою шлакоутворювальною сумішшю – 0,019%, без обробки – 0,027%. Ступінь десульфурації склала відповідно 40 та 19%. Переділ зливків виготовлений за чинною технологією на лист 1,5 мм. У аркуші з дослідного металу механічні властивості були вищими на 15–30 %,

Необхідно відзначити, що поряд з високою десульфуруючою і розкислювальною здатністю плавленого вапна, застосування твердих шлакоутворюючих сумішей на її основі сприяє також зниженню вмісту фосфору в металі до 30%. Як правило, метал, виплавлений у печах з вапняним футеруванням або оброблений ТШС на основі плавленого вапна, більш чистий за змістом неметалевих включень.

Наведені вище результати свідчать про незаперечність переваги плавленого вапна перед відомими і застосовуваними в металургії матеріалами [14].

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТАТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

Металургійне виробництво вапна трудомістке і потребує великих витрат енергії. Викиди CO_2 у процесі кальцинації у виробництві вапна становлять 50% загальних викидів CO_2 у руді та закриття карбонізаційних установок є важливою проблемою екологічної політики. Основна увага приділяється властивостям вапна для забезпечення її якості та правилам, що регулюють процес, із постійним покращенням умов праці; її основна мета – зменшити вплив на навколишнє середовище. Оскільки енергія, необхідна для випалу вапняку, сильно пов'язана з температурою та спорідненістю реакції карбонізації саме ця частина всього процесу є найбільш ефективною з точки зору енергії. Це питання є більш актуальним через невпинне зростання вартості енергоносіїв. Управління ними в ідеальних умовах значною мірою сприятиме зменшенню впливу на навколишнє середовище. У цьому дослідженні детально розглядаються та пропонуються кілька варіантів перспектив мінімізації енергії у виробництві вапна [1].

5.1 Правила техніки безпеки й виробничої санітарії при виробництві вапна

Відповідальність за стан техніки безпеки та виробничої санітарії та забезпечення трудового законодавства загалом покладається на директорів, заступників директорів та головних інженерів підприємств.

Природне та штучне освітлення у виробничих, адміністративно-конторських, побутових приміщеннях та на території заводу має відповідати вимогам СНіПу (частина II, розділ А, глава 8 «Природне освітлення. Норми проєктування» та частина II, розділ А, глава 9 «Штучне освітлення. Норми проєктування»).

Вентиляція у всіх виробничих та побутових приміщеннях має відповідати вимогам «Санітарних норм проєктування промислових підприємств» [15].

Джерела водопостачання промислових підприємств та якість води повинні

бути встановлені відповідно до вимог ДСТУ ISO 5667-12-2001 [16].

Організаційні заходи з виробничої санітарії наступні:

– дотримання вимог охорони праці жінок та осіб віком до 18 років;

– проведення попередніх та періодичних медичних оглядів осіб, які працюють у шкідливих умовах;

– забезпечення працюючих у шкідливих умовах лікувально-профілактичним обслуговуванням тощо.

Технічні заходи з виробничої санітарії наступні:

– систематичне підтримання чистоти у приміщеннях і на робочих місцях;

– розробка та конструювання обладнання, що запобігає виділенню пилу, газів та пари, інших шкідливих речовин у виробничих приміщеннях;

– забезпечення санітарно-гігієнічних вимог до повітря виробничого середовища;

– улаштування систем вентиляції та кондиціювання робочих місць зі шкідливими умовами праці;

– забезпечення захисту працюючих від шуму, ультра- та інфразвуку, вібрації, різних видів випромінювання [17].

5.2 Заходи безпеки при виробництві вапна

На виробництві вапна використовується різне обладнання: щокові дробарки, молоткові дробарки, трубний млин, стрічкові конвеєри, бункери, циркуляційний сепаратор, аерожолоб. Дане устаткування несе велику загрозу життю у випадку пошкодження або у випадку виходу з ладу. Тому перш за все, технологічне обладнання має бути забезпечене засобами автоматичного керування та контролю ведення технологічного процесу. А також необхідно, щоб устаткування для виробництва мало запобіжні пристрої та блокування для уникнення травм через порушення послідовності етапів роботи, падіння напруги електричній мережі та через перевантаження. Необхідно враховувати габарити машин, зони технологічного обслуговування, ремонту та розташування сировини, проходи для

робочих, шляхи евакуації, розриви між машинами та інші.

Що стосується отруєння оксидом вуглецю та вуглекислим газом, то така загроза існує на майданчику печей, де завантажується сировина. Тому, потрібно виконувати це завантаження за допомогою машин, тобто, підйомників (наприклад, шахтних або скіпових, які не потребують контролю людьми саме на завантажувальній території.

Пил, який містить в своєму складі гашене вапно, а особливо, негашене має здатність подразнювати органи дихання, слизові оболонки і шкіру. Тому, у місцях де виділяється вапняний пил, необхідно встановлювати відсмоктувачі (наприклад, за допомогою вакуумної системи збору пилу (рис. 5.1 та рис. 5.2)). А також обладнати помольні агрегати ефективними обезпилюючи ми пристроями та фільтрами, а транспорт і бункери, що використовуються герметично закривати спеціальними кришками, кожухами тощо.



Рисунок 5.1 – Вакуумна система збору пилу [18]



Рисунок 5.1 – Процес збору пилу [18]

Для уникнення опіків шкіри обличчя та рук при використанні печей, потрібно користуватися лише спеціальними оглядовими вікнами.

В жодному випадку не підходити до них занадто близько. Дані оглядові вікна мають відриватися спеціальними пристроями з безпечної відстані.

У випадку зависання кускового матеріалу, що може виникнути в шахтних печах, необхідно виконувати усі заходи з техніки безпеки при усуненні зависань і здійснювати це через спеціально встановлені оглядові вікна. В жодному разі не можна допустити розбризкування вапняного молока, адже воно роз'їдає шкіру рук і обличчя. Його слід зберігати і перевозити в закритих ємностях, а небезпечні ділянки необхідно огородити бар'єром.

Усі працівники на виробництві мають бути забезпечені спеціальним одягом, що передбачений правилами техніки безпеки.

На даному виробництві горючими предметами є: двері, віконні рами, покрівля, шафи, одяг, фарба на обладнанні та інші.

Основними причинами пожеж на виробництві вапна можуть бути:

– недотримання правил пожежної безпеки;

– пошкодження ізоляції;

– не справне електрообладнання;

– розпечені або нагріті стінки апаратів та обладнання;

– іскри електрообладнання;

– необережне поводження з вогнем;

– удар блискавки в будівлю.

При проєктуванні виробництва необхідно передбачити наступні заходи пожежної безпеки: наявність протипожежного водопроводу, наявність пожежних кранів (діаметрів 50 мм і довжиною рукава 20 м відповідно до СНіП 2.09.02-85), використання пінних вогнегасників ОХП-10 (рис. 5.3). Також повинні бути наявні ємності з піском і пожежні щити, встановлена сигналізація з датчиками РП-50 і СТХ-174.

Для захисту будівлі від прямих ударів блискавки встановлюються блискавковідводи струмового типу [19].

5.3 Техногенна безпека при виробництві вапна

Згідно з пунктом 8 частини 1 статті 20 Кодексу цивільного захисту України на суб'єктів господарювання покладено обов'язки щодо «здійснення навчання працівників з питань цивільного захисту, у тому числі правилам техногенної та пожежної безпеки» [21].

Надзвичайна ситуація техногенного характеру — це порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об’єкті на ній або на водному об’єкті внаслідок транспортної аварії (катастрофи), пожежі, вибуху, аварії з викиданням (загрозою викидання) небезпечних хімічних, радіоактивних і біологічно небезпечних речовин, раптового руйнування споруд; аварії в

електроенергетичних системах, системах життєзабезпечення, системах телекомунікацій, на очисних спорудах, у системах нафтогазового промислового комплексу, гідродинамічних аварій тощо [22].



Рисунок 5.3 – Типи вогнегасників [20]

Для збереження техногенної безпеки фахівцям пропонуються такі заходи:

– виявлення всіх чинників ризику техногенного характеру, включаючи виявлення небезпеки продукції, що випускається, технологічних процесів, операцій, виробничих об’єктів і об’єктів життєзабезпечення населення на даній території;

– встановлення міри небезпеки об’єктів на основі комплексних методів оцінки з обліком пожежної та вибухової безпеки,

– електробезпеки, надійності ємностей і судин, що знаходяться під тиском і т.д., а також реальними гідрогеологічними, територіальними і кліматичними умовами, виявлення найбільш не безпечних вузлів і об’єктів, здатних в

екстремальних умовах викликати ланцюгову реакцію і найбільш руйнівні наслідки;

– розробка прогнозу наслідків катастроф, розмірів утрат і збитку у всіх виявах цієї проблеми;

– розробка профілактичних заходів з метою стійкої й безаварійної роботи підприємств і збереження екологічної рівноваги, в тому числі:

– розроблення методів і способів техногенного характеру щодо попередження аварій, які супроводжуються загибеллю людей, виходом із ладу обладнання, забрудненням навколишнього середовища шкідливими викидами та інші;

– розроблення технічних і організаційних способів зниження збитків людським, матеріальним і природним ресурсам уразі їх виникнення;

– розробка термінових заходів по захисту від можливих диверсій, включаючи напади й загрози тероризму, особливо на ядерних і хімічних підприємствах, а також об’єктах життєзабезпечення населення;

– розроблення заходів по ліквідації наслідків і відновленню нормального режиму роботи підприємств і адміністративно-територіальних освіт загалом [23].

Бажано на виробництві мати плакати «Куточок з охорони праці» (рис. 5.4), «Перша медична допомога при кровотечі та зупинці серця» (рис. 5.5), «Мінна безпека» (рис. 5.6), «Пожежна безпека» (рис. 5.7), «Правила військового обліку призовників, військовозобов’язаних та резервистів» (рис. 5.8) та інші.



Рисунок 5.4 – Плакат «Куточок з охорони праці»



Рисунок 5.5 – Плакат «Перша медична допомога при кровотечі та зупинці серця»



Рисунок 5.6 – Плакат «Мінна безпека»



Рисунок 5.7 – Плакат «Пожежна безпека»

Додаток 2
до Порядку організації та ведення військового обліку призовників, військовозобов'язаних та резервістів, затвердженого постановою КМУ від 30 грудня 2022 р. № 1487

ПРАВИЛА
військового обліку призовників, військовозобов'язаних та резервістів

1. Призовники, військовозобов'язані та резервісти **повинні**:

1) **перебувати на військовому обліку**:

- **за задекларованим (зареєстрованим) місцем проживання** — у відповідних районних (міських) територіальних центрах комплектування та соціальної підтримки (військовозобов'язані СБУ — у Центральному управлінні або регіональних органах СБУ (*далі* — органи СБУ), військовозобов'язані Служби зовнішньої розвідки — у відповідному підрозділі Служби зовнішньої розвідки). Крім того, призовники, військовозобов'язані та резервісти, які проживають в селах та селищах, а також у містах, де відсутні відповідні районні (міські) територіальні центри комплектування та соціальної підтримки, повинні перебувати на персонально-первинному військовому обліку у відповідних виконавчих органах сільських, селищних, міських рад;
- **за місцем роботи (навчання)** — в центральних і місцевих органах виконавчої влади, в інших державних органах, в органах місцевого самоврядування, в органах військового управління (органах управління), військових частинах (підрозділах) Збройних Сил, інших утворених відповідно до законів України військових формувань, а також правоохоронних органах спеціального призначення, на підприємствах, в установах, організаціях, закладах освіти, закладах охорони здоров'я незалежно від підпорядкування і форми власності;
- у разі вибуття за межі України на строк більше трьох місяців — **за місцем консульського обліку** в закордонних дипломатичних установах України;

2) **прибувати за викликом** районних (міських) територіальних центрів комплектування та соціальної підтримки, органів СБУ, підрозділів Служби зовнішньої розвідки на збірні пункти, призовні дільниці, до територіальних центрів комплектування та соціальної підтримки, органів СБУ, підрозділів Служби зовнішньої розвідки у строки, зазначені в отриманих ними документах (мобілізаційних розпорядженнях, повістках, розпорядженнях) районних (міських) територіальних центрів комплектування та соціальної підтримки, органів СБУ, підрозділів Служби зовнішньої розвідки для взяття на військовий облік та визначення призначення на особливий період, оформлення військово-облікових документів, проходження медичного огляду, направлення на підготовку з метою здобуття або вдосконалення військово-облікової спеціальності, призову на військову службу або на навчальні (перевірочні) та спеціальні збори військовозобов'язаних та резервістів;

3) **не змінювати місце проживання** з моменту оголошення мобілізації та у воєнний час без дозволу керівника відповідного районного (міського) територіального центру комплектування та соціальної підтримки (військовозобов'язаних та резервістів СБУ, Служби зовнішньої розвідки — без дозволу відповідного керівника);

4) **проходити медичний огляд та лікування** в закладах охорони здоров'я згідно з рішеннями комісій з питань приписки, призовних комісій або військово-лікарських комісій районних (міських) територіальних центрів комплектування та соціальної підтримки, закладів охорони здоров'я СБУ, а у Службі зовнішньої розвідки — за рішенням керівників відповідних підрозділів або військово-лікарської комісії Служби зовнішньої розвідки;

5) **проходити підготовку** до військової служби, **військову службу** і виконувати військовий обов'язок **у запасі**, проходити службу у військовому **резерві**;

6) особисто прибувати до районних (міських) територіальних центрів комплектування та соціальної підтримки, органів СБУ, підрозділів Служби зовнішньої розвідки з паспортом громадянина України і військово-обліковими документами **для зняття з військового обліку** в разі вибуття в іншу місцевість до нового місця проживання, за межі України на постійне місце проживання або на строк більше трьох місяців, у разі зміни місця проживання в межах міста з переїздом на територію іншого адміністративного району;

7) особисто в семиденний строк з дня прибуття **до нового місця проживання** прибувати із паспортом громадянина України і військово-обліковими документами до відповідного районного (міського) територіального центру комплектування та соціальної підтримки (органу СБУ, підрозділу Служби зовнішньої розвідки, закордонної дипломатичної установи України), який організовує та веде військовий облік на території відповідної адміністративно-територіальної одиниці, для взяття на військовий облік;

8) особисто повідомляти в семиденний строк органам, в яких вони перебувають на військовому обліку, **про зміну персональних даних**, зазначених у статті 7 Закону України «Про Єдиний державний реєстр призовників, військовозобов'язаних та резервістів», а також надавати зазначеним органам документи, що підтверджують **право на відстрочку** від призову на військову службу під час мобілізації з підстав, визначених у статті 23 Закону України «Про мобілізаційну підготовку та мобілізацію»;

9) негайно повідомляти районним (міським) територіальним центрам комплектування та соціальної підтримки, органам СБУ, підрозділам Служби зовнішньої розвідки за місцем військового обліку **про втрату військово-облікового документа**;

10) **звіряти** не рідше одного разу на п'ять років власні персональні дані з обліковими даними районних (міських) територіальних центрів комплектування та соціальної підтримки, органів СБУ, підрозділів Служби зовнішньої розвідки;

11) подавати щороку до 1 жовтня до районних (міських) територіальних центрів комплектування та соціальної підтримки **документи**, що підтверджують право громадян на **відстрочку від призову** на строкову військову службу.

2. Якщо за будь-яких обставин повістка районного (міського) територіального центру комплектування та соціальної підтримки **не надійшла**, громадяни призовного віку прибувають до призовної дільниці в десятиденний строк з дня початку відповідного чергового призову на строкову військову службу, визначеного указом Президента України.

3. Призовники, військовозобов'язані та резервісти **за порушення правил** військового обліку та законодавства про оборону, мобілізаційну підготовку та мобілізацію, зіпсуття або недбале зберігання військово-облікових документів, яке спричинило їх втрату, притягуються **до адміністративної відповідальності** згідно із Кодексом України про адміністративні правопорушення.

4. Громадяни, які **ухиляються** від військового обліку, навчальних (перевірочних) або спеціальних зборів, від призову на строкову військову службу, військову службу за призовом осіб офіцерського складу, військову службу за призовом під час мобілізації, на особливий період, військову службу за призовом осіб із числа резервістів в особливий період, несуть **кримінальну відповідальність**.

Рисунок 5.8 – Плакат «Правила військового обліку призовників, військовозобов'язаних та резервистів»



Рисунок 5.9 – Плакат «Мінна безпека»

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Визначено два основні шляхи застосування плавленого вапна та композицій на його основі в металургійній промисловості України:

– як основа твердих шлакоутворюючих сумішей (ТШС) для позапічної обробки рідких металевих розплавів;

– як матеріал для тиглів вакуумних та відкритих індукційних печей; керамічних елементів футеровки кисневих конвертерів та дугових сталеплавильних печей, елементів проміжних ковшів установки безперервного лиття заготовок, елементів розливних стаканів сталерозливних кошів, елементів устрою для фільтрації рідких металевих розплавів.

2. Приведені результати дослідження гідратації металургійного вапна як вихідної сировини для виробництва плавленого вапна.

3. Представлені промислові випробування твердих шлакоутворюючих сумішей на основі плавленого вапна в умовах різних металургійних підприємств України:

– позапічна обробка шлакоутворюючими сумішами на основі плавленого вапна підшипникової сталі в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»;

– обробка нержавіючої сталі плавленим вапном на установці аргонно-кисневого рафінування в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь»;

– випробування технології позапічної десульфурації конвертерної сталі з використанням плавленого вапна в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»;

– випробування ТШС із плавленим вапном у мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь».

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Витяганець В. С., Пітак І. В. Оптимізація режиму роботи та конструкції шахтної печі для виробництва вапна. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. 2024. № 2. Т 35 (74). С. 230–239. https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/31

2. Вапнякова справа: скільки вапняку виробляють та імпортують в Україну. URL: https://gmk.center/ua/posts/vapnyakova-sprava-skilki-vapnyaku-viroblyajut-ta-importujut-v-ukrainu/ (дата звернення: 05.12.2025).

3. Вапно для агломераційного виробництва. URL: https://studfile.net/preview/5056388/page:2/ (дата звернення: 05.12.2025).

4. Рейтингування брендів вапняної галузі України. URL: http://strategico.com.ua/news/%D1%80%D0%B5%D0%B9%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%B1%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D1%96%D0%B2-%D0%B2%D0%B0%D0%BF%D0%BD%D1%8F%D0%BD%D0%BE%D1%97-%D0%B3%D0%B0%D0%BB%D1%83%D0%B7%D1%96-%D1%83%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8 (дата звернення: 05.12.2025).

5. Постачання вапна залізницею в липні зросли на 15% м./м. URL: https://gmk.center/ua/news/postachannya-vapna-zaliznicеju-v-lipni-zrosli-na-15-m-m/ (дата звернення: 05.12.2025).

6. Вапно технічне комове негашене. URL: https://tatos-bud.com.ua/products/izvest-komovaja-negashenaja-40-kg-97.html (дата звернення: 05.12.2025).

7. Вапно: види, властивості та практичне застосування в господарстві. URL: https://oldimarket.com.ua/cms/blog/porady/vydy_i_vlastyvosti_vapna_ta_praktychne_zastosuvannia/?srsltid=AfmBOorM8DVb70fiTr-KOM6djzNJPOEYZ4srcST1uFBvwAH2R3MX3lyU (дата звернення: 05.12.2025).

8. Продукція для металургії. URL: https://karyer.in.ua/about-us (дата

звернення: 05.12.2025).

9. Вапно у металургії та хімічній промисловості: роль у виробничих процесах. URL: https://caoh2.com.ua/minimalist-japanese-inspired-furniture-16/ (дата звернення: 05.12.2025).

10. Вапно у металургії України https://ukrmet.dp.ua/2016/10/25/vapno-u-metalurgi%D1%97-ukra%D1%97ni.html (дата звернення: 05.12.2025).

11. Щокова дробарка N-MAK. URL: https://hydromarket.com.ua/ua/p1242449330-schekovaya-drobilka-mak.html?srsltid=AfmBOoqUao9k5r-se6ez_0gzXmzZP5UBg_c96tDv3nYQAsrnuO0T7gug (дата звернення: 05.12.2025).

12. Оксид кальцію (негашене вапно) . URL: https://chemsale.com.ua/ua/product/kalczij-oksid-negashennaya-izvest/ (дата звернення: 05.12.2025).

13. Сита лабораторні металопробивні СЛП-300. URL: https://prom.ua/ua/p2021266555-sita-laboratornye-metalloprobivnye.html (дата звернення: 05.12.2025).

14. Воденнікова О. С., Воденніков С. А, Кармазіна А. С. Сучасні аспекти використання плавленого вапна в металургійній промисловості України. *Наука і металургія* : Всеукраїнська науково-технічна конференція : збірник тез (Дніпро, 19–20 листопада 2025р.). Дніпро : -, 2025. С. 30. URL: https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025.

15. НПАОП 26.0-1.07-75. Правила техніки безпеки й виробничої санітарії при виробництві цегли й вапна

16. ДСТУ ISO 5667-12-2001 Якість води. Відбирання проб. Частина 12. Настанови щодо відбирання проб донних відкладів (ISO 5667-12:1995, IDT)

17. Виробнича санітарія та гігієна праці. URL: http://op.rv.ua/article/vyrobnycha-sanitariya-ta-gigiyena-pracі (дата звернення: 05.12.2025).

18. Виробництво цементу, вапна та гіпсу. Вакуумна система аварійного збору просипу цементу та пилоприбирання промислових приміщеньURL:

https://pneumotech.com.ua/ua/a256026-proizvodstvo-tsementa-izvesti.html?srsltid=AfmBOopVnSGuHwQpds3IkASlU9bMdOA6dh_zdONzs42zdmaXxgmHL4W8 (дата звернення: 05.12.2025).

19. Жарєнова Я. В., Полукаров Ю. О. Заходи безпеки при виробництві вапна. URL: file:///C:/Users/user/Downloads/181254-%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%81%D1%82%20%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%82%D1%96-402070-1-10-20191021.pdf (дата звернення: 05.12.2025).

20. Вогнегасники: види, принцип роботи, правила використання. URL: https://www.bezpeka-shop.com/ua/blog/poleznye-sovety/ognetushiteli-vidy-printsip-raboty-pravila-ispolzovaniya/?srsltid=AfmBOor0UCwYIyV80x9dCTsh7ZnE5ArIsdJSbOD6MrcOaWHRdnfRS1cB (дата звернення: 05.12.2025).

21. Хто на підприємстві має право проводити протипожежні інструктажі? URL: https://ohoronapraci.com.ua/consultations/578874-khto-na-pidpryyemstvi-maye-pravo-provodyty-protypozhezhni-instruktazhi (дата звернення: 05.12.2025).

22. Організація забезпечення техногенної безпеки підприємств. URL: https://lviv.dsp.gov.ua/orhanizatsiia-zabezpechennia-tekhnohenno/756/ (дата звернення: 05.12.2025).

23. Техногенна безпека. URL: https://szb.com.ua/tekhnohenna-bezpeka/ (дата звернення: 05.12.2025).

ДАДАТКИ

ДОДАТОК А
ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАН України)
Український державний університет науки і технологій МОН України
Дніпровський державний технічний університет МОН України

Збірник тез

ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

«НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»



DOI: 10.52150/2522-9117-2025-conferens

19-20 листопада 2025
м. Дніпро

5

ЗМІСТ

С.

Металургія чавуну та сталі: технології, інновації, якість

Нестеров О. С., Гармаш Л. І., Лопатенко К. П., Болденко М. Г., Чайка О. Л., Щербачов В. Р. Вплив водню на процеси розм'якшення та плавлення окатишів в доменній печі ... 9

Нестеров О. С., Гармаш Л. І., Лопатенко К. П., Болденко М. Г., Корнілов Б. В., Вішняков В. І. Збагачення відновного газу воднем та його вплив на процеси розм'якшення-плавлення агломерату в доменній печі ... 10

Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Москалина А. О., Муравйова І. Г., Гармаш Л. І., Іванча М. Г., Ізюмський М. М. Перспективи використання водню в умовах роботи ДП №3 ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» ... 11

Голуб Т. С., Молчанов Л. С. Фізико-хімічний аналіз можливості та доцільності термічного розкладання оксидів заліза ... 13

Голуб Т. С., Молчанов Л. С., Мінай О. М. Фізичне та чисельне дослідження газодинамічних властивостей струменів, що формуються складеними соплами під час верхньої продувки ... 14

Молчанов Л. С., Чернятевич А. Г. Розробка та дослідження заходів щодо підвищення енергоефективності конвертерної плавки в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» ... 15

Молчанов Л. С., Чернятевич А. Г., Голуб Т. С., Какушкін Є. С. Співставлення результатів низькотемпературного та високотемпературного моделювання верхньої продувки двофазної рідкої системи з використанням однакової продувної фурми ... 16

Семикін С. І., Голуб Т.С., С. О. Дудченко, Вакульчук В. В. Стендові дослідження активованого електричним розрядом кисневого газового струменя, що витікає з верхньої продувної фурми ... 17

Чернятевич А. Г., Похвалітий А. А., Кондрашенков Д. С. Дослідження процесу попереднього підігріву металевого брухту пиловугільним паливом у кисневому конвертері ... 18

Семенов Ю. С. Дослідження впливу стабільності теплового стану доменної печі на техніко-економічні показники плавки ... 19

Лебідь В. В. Удосконалення способів оцінки розподілу шихти при її завантаженні у піч лотковим безконусним пристроєм ... 20

Похвалітий А. А., Сігарьов Є. М., Круть А. В., Герасименко П. Л. Результати експлуатації модернізованих наконечників кисневих фурм ... 21

Похвалітий А. А., Чубіна О. А., Вовк А. О. Аналіз формування газорідинного потоку у випускному каналі кисневого конвертера ... 22

Губарєва А. І., Кошляк І. М., Руденко Р. М., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р. Удосконалення процесу запалювання агломераційної шихти шляхом розробки блокового пальника з роздільною подачею повітря ... 23

Крячко Г. Ю., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р., Холодний С. А. Вплив інтенсивності доменної плавки на формування структури і радіальний газорозподіл стовпа шихти ... 24

Мізіна І. В., Абдулкін Р. С., Руденко Р. М., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р. Аналіз впливу схеми укладання на рівномірність хімічного складу залізорудного штабеля ... 25

Руденко Р. М., Сігарьов Є. М., Руденко М. Р., Кашеєв М. А., Чубіна О. А. Моделювання процесу усереднення хімічного складу залізорудної шихти при формуванні штабеля ... 26

Сігарьов Є. М., Семірягін С. В., Похвалітий А. А., Кондрашенков Д. С. Обгрунтування умов отримання феронікелю з вторинної сировини ... 27

Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Іванніков С. В. Використання штучного інтелекту в металургійній галузі ... 28

Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Борсук С.А. Використання штучного інтелекту в освітньому процесі за спеціальністю G10 «Металургія» ... 29

Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Карамзіна А.С. Сучасні аспекти використання плавленого вапна в металургійній промисловості України ... 30

Воденнікова О. С., Воденніков С. А. Промислове випробування ТШС із плавленим вапном у мартенівському цеху ПАТ «Запоріжсталь» ... 31

Григор'єв С.М., Яковлєв Д.В. Методологія розрахунку економічної доцільності інноваційного розвитку виробництва губчастого феровольфраму у вітчизняній металургії ... 32

Електрометалургія

Воденнікова О. С., Воденніков С. А., Дубасов Ю.О. Шляхи підвищення стійкості електродів ... 33

УДК 669.18.013(477)

СУЧАСНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ПЛАВЛЕНОГО ВАПНА В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

О. С. Воденнікова[1] к.т.н., доц., С. А. Воденніков[2] д.т.н., проф., А. С. Карамзіна [1]

[1]Запорізький національний університет, м. Запоріжжя
[2]Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

Відомо два основні шляхи застосування плавленого вапна та композицій на його основі в металургійній промисловості України:

– як основа твердих шлакоутворюючих сумішей (ТШС) для позапічної обробки рідких металевих розплавів;

– як тиглі вакуумних та відкритих індукційних печей; керамічні елементи футеровки кисневих конвертерів та дугових сталеплавильних печей, елементи проміжних ковшів установки безперервного лиття заготовок, елементи розливних стаканів сталерозливних кошів, елементи устрою для фільтрації рідких металевих розплавів.

В конвертерному цеху ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (зараз ПрАТ «КАМЕ́Т-СТА́ЛЬ») освоєно технологію обробки вуглецевої і низьколегованої спокійної сталей кусковою твердою шлакоутворювальною сумішшю, що складається зі свіжообпаленого металургійного вапна і сухого плавикового шпату в співвідношенні 4:1 в процесі випуску плавки з конвертера в ківш ємністю 250 т. Обробка ТШС освоєна на сталях марок 20, 35, 09Г2, 16ХГ, 10ХС та ін. Витрата ТШС становила зазвичай 7 кг/т. Вміст сірки у металі перед випуском коливався в межах 0,025–0,050 %, у готовому металі 0,010–0,030 %. Ступінь десульфурації склала 182–315%.

На «Криворіжсталь»(зараз «АрселорМіттал Кривий Ріг») вуглецеву та низьколеговану сталь, виплавлену у 150 т конвертерах, обробляли у ковші шматками шлакоутворювальної суміші вапна та плавикового шпату. Витрата шматкового вапна становив 2,3–7,8 кг/т сталі. Вихідний вміст сірки у металі під час випуску плавки становив 0,037%. Ступінь десульфурації сталі коливалася в межах 15–30%.

На ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь»» (існував до 2022р.) розроблено та освоєно технологію десульфурації конвертерної сталі в ковші твердими шлакоутворюючими сумішами на основі офлюсованого вапна, що відрізняється від звичайного вапна підвищеним вмістом заліза – до 3,3 та меншою величиною втрат при прожарюванні – 1,54%. Офлюсоване вапно подавали в 350 т ківш трактом сипучих матеріалів. Одночасно в ківш вводили плавиковий шпат; при цьому співвідношення ТШС плавикового шпату і вапна витримували 1:(3-4). Обробці піддавали низьколеговані сталі марок 13ГС, 16ГС та ряд рядових марок. На початку випуску плавки під струмінь сідали алюміній у зливках (0,4–0,5) кг/т сталі, через 20–30 сек. з початку випуску вводили ТШС до 8 кг/т.

Тиглі з плавленого вапна застосовуються також у промислових умовах ПАТ «Мотор Січ» у вакуумних індукційних печах при виплавці сплаву ЧС-70-ВІ.Застосування тиглів з плавленого вапна призводить до збільшення виходу придатних лопаток до 66–79% залежно від типу лопатки. При цьому відбувається помітне зменшення кількості виробів з поверхневими дефектами та шлаковими включеннями.

Позитивні результати має застосування ТШС на основі плавленого вапна в промислових умовах, зокрема в умовах ПАТ «Запоріжсталь» на мартенівській печі №5 при проведенні 500-тонної дослідної плавки конструкційної вуглецевої сталі марки 10СП з обробкою металу в ковші ТШС на основі вапна.

В умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь» випробування ТШС на основі плавленого вапна відбувалися наступним чином:

– виплавка підшипникової сталі марок ШХ15 та ШХ15СГ проводиться в СПЦ-3 в 60-тонних дугових електросталеплавильних печах (ДСП) із позапічною обробкою ТШС. Вміст сірки у підшипникових сталях дослідних плавок становило 0,005–0,009%. Досягнута ступінь десульфурації металу 72–81% свідчить про високу рафінуючу здатність плавленого вапна;

– обробка нержавіючих сталей марок 12Х18Н10Т та 08Х18Н10Т плавленим вапном на установці аргонно-кисневого рафінуванні у СПЦ-2. Сталь виплавляли дуплекс-процесом (електропіч-конвертер). Виплавку напівпродукту здійснювали у ДСП ємністю 50 т методом переплаву легованих відходів. Після коригування технології позапічної обробки нержавіючої сталі та вибору оптимальної кількості та складу ТШС на основі плавленого вапна вміст сірки в готовому металі може бути знижено до 0,005–0,007 %, а ступінь десульфурації доведено до 75–85 %.