

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра *Металургії*

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

*перший (бакалаврський) рівень*

(рівень вищої освіти)

на тему *Аналіз технологічних аспектів десульфурзації  
чавуну і сталі.*

Виконав: студент *3с* курсу, групи *6.1369-мш-с*

спеціальності *136 „Металургія“*

(код і назва спеціальності)

освітньої програми *Металургія*

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації \_\_\_\_\_

(код і назва спеціалізації)

*П.В. Головков*

(ініціали та прізвище)

Керівник *доц. кафедри металургії, канд. техн. наук О.С. Воденіков*

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент *доц. кафедри металургії, канд. техн. наук О.Р. Беретин*

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М. ПОТЕБНИ

Кафедра металургії

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень  
(перший (бакалаврський) рівень, другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 136 "Металургія"  
(шифр і назва)

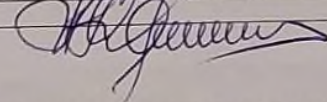
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

Освітня програма Металургія  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри металургії

О.Г. Кудриченко



ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Головкову Павлу Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкту) Аналіз угодних аспектів децелюфурації ковунці сталі.

керівник роботи канд. техн. наук, доцент Воденнікова Оксана Сергіївна  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від "17" січня - 2022 року № 90-с

2. Строк подання студентом роботи 18.06.2022р.

3. Вихідні дані до роботи Науково-технічна література, статті у фахових виданнях, матеріали конференцій, патенти, ГОСТи та ДСТУ.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Скорочення та умовні позначки. Вступ. Децелюфурація металу: вибір реагент-децелюфратора та ефективність децелюфурації. Загорданні дроби децелюфурації ковану та сталі. Аналіз Чно - розрахункова обробка показників децелюфурації ковану Український досвід децелюфурації ковану та сталі

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

Титульний лист - 1. Вступ - 1. Розділ 1 - 6. Розділ 2 - 4. Розділ 3 - 0. Розділ 4 - 5. Загальні висновки - 2.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Децимування в металургійному реакторі-децимуваторі та ефективність децимування	доцент О.С. Воденнікова	17.02.2022р <i>[підпис]</i>	17.02.2022р Томас
2. Закардовий ефект децимування; гравіту та стійкості	доцент О.С. Воденнікова	17.02.2022р <i>[підпис]</i>	17.02.2022р Томас
3. Український досвід децимування чавуну та стійкості	доцент О.С. Воденнікова	17.02.2022р <i>[підпис]</i>	17.02.2022р Томас
4. Аналітично-розрахункова обробка показників децимування; гравіту	доцент О.С. Воденнікова	17.02.2022р <i>[підпис]</i>	17.02.2022р Томас

7. Дата видачі завдання 17.02.2022р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Скорочення та зміна механіки. Вступ. Розділ 1	з 02.05.22 по 08.05.22	
2	Розділ 2	з 08.05.22 по 14.05.22	
3	Розділ 3	з 01.06.22 по 07.06.22	
4	Розділ 4	з 08.06.22 по 13.06.22	
5	Заключні висновки. Перелік джерел посилаюнь	з 14.06.22 по 15.06.22	
6	Третьої главі частини.	з 16.06.22 по 17.06.22	

Студент *[підпис]* П.В. Томов  
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) *[підпис]* О.С. Воденнікова  
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер *[підпис]* О.Г. Кириченко  
(підпис) (ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 68 с., 22 рис., 16 табл., 50 джерел посилання.

ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ МЕТАЛУ, РЕАГЕНТ-ДЕСУЛЬФУРАТОР, СТУПІНЬ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ, УСТАНОВКА ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ, ПОЗАПІЧНА ОБРОБКА СТАЛІ, УСТАНОВКА «ПЧ-КІВШ», ВМІСТ СІРКИ

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: Аналіз сучасних аспектів десульфурації чавуну та сталі.

Мета роботи – проаналізувати сучасні технології десульфурації металу та на їх основі виконати аналітично-розрахункову обробку відомих експериментальних та розрахункових даних показників десульфурації чавуну.

У розділі 1 проаналізовано сучасні методи десульфурації чавуну, приведено аналіз різних видів реагент-десульфураторів для позадоменної десульфурації чавуну, проаналізовано сучасні технології позапичної десульфурації чавуну та розглянуто основне устаткування для позадоменної десульфурації чавуну.

У розділі 2 розглянуто закордонний досвід десульфурації чавуну та сталі на прикладі металургійних підприємств Російської Федерації (зокрема, АС «ЄВРАЗ Нижньотагільський металургійний комбінат», ПАТ «Северсталь», ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат»), Молдови (зокрема, ВАТ «Молдавський металургійний завод»), Узбекистану (зокрема, АТ «Ташкентський механічний завод»), Білорусії (зокрема, ВАТ «Білоруський металургійний завод») та Туреччини (зокрема, Іскендерунського металургійного комбінату (İsdemir)).

У розділі 3 розглянуто український досвід десульфурації металу на прикладі металургійного виробництва ПрАТ «МК «Азовсталь»», ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Держинського», ВАТ «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод» та ТОВ «Електросталь».

У розділі 4 на основі відомих експериментальних та розрахункових даних приведено аналітично-розрахункову обробку залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при застосуванні різних реагент-десульфураторів, а також залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні різних реагент-десульфураторів.

Результати роботи можуть бути використані при викладанні спеціальних дисциплін для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 136 «Металургія».

## ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ.....	7
ВСТУП.....	8
1 ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ МЕТАЛУ: ВИБІР РЕАГЕНТ-ДЕСУЛЬФУРАТОРА ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ.....	11
1.1 Сучасні методи десульфурації чавуну.....	11
1.2 Сучасні реагент-десульфуратори для позадоменної десульфурації чавуна.....	12
1.3 Аналіз ефективності десульфурації металу.....	17
1.4 Основне устаткування для позадоменної десульфурації чавуну.....	21
1.5 Висновки.....	27
2 ЗАКОРДОННИЙ ДОСВІД ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ ТА СТАЛІ.....	29
2.1 Аналіз технологічних аспектів десульфурації металу в умовах закордонних металургійних підприємств.....	29
2.2 Висновки.....	42
3 УКРАЇНСЬКИЙ ДОСВІД ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ ТА СТАЛІ.....	43
3.1 Аналіз технологічних аспектів десульфурації металу в умовах українських металургійних підприємств.....	43
3.2 Висновки.....	46
4 Аналітично-розрахункова обробка показників десульфурації чавуну...	47
4.1 Аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при застосуванні різних реагент-десульфураторів.....	47
4.2 Аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні різних реагент-десульфураторів.....	53
4.3 Висновки.....	57

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	62

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

УДЧ – установка десульфурації чавуну;

УПК (або LF) – установка «піч-ківш»;

ТУ – технічні умови;

VD/VOD – вакуумна дегазація;

RN/RH-RTB – вакуумна циркуляція;

CAS-OB – Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling – Oxygen Blowing;

ВДЧ – відділення десульфурації чавуну;

АТ – відкрите акціонерне товариство;

ВАТ – відкрите акціонерне товариство;

ПАТ – публічне акціонерне товариство.

ПрАТ – приватне акціонерне товариство;

ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю;

МК – металургійний комбінат;

РЗМ – рідкоземельні метали;

СШ – шкороутворююча суміш;

ТШС – тверда шкороутворююча суміш.

## ВСТУП

На сьогодні якість сталі – найважливіша характеристика для виробників металопродукції, при цьому особливо це стосується сталі з низьким вмістом сірки, необхідної для трубної та танкерної промисловості. Якість сталі залежить від параметрів, що характеризують роботу агрегатів у процесі виплавки та доведення сталі. Відомо, що для виплавки сталі певного сортаменту необхідно дотримуватись вимог технологічної інструкції: підтримувати необхідну температуру розплаву, стежити за хімічним складом, забезпечувати режим продування та інше [1]. Ефективність процесу десульфурації металу в кисневому конвертері оцінюється ступенем десульфурації, величина якого становить 30–40 %, що забезпечує отримання вмісту сірки в готовій сталі на рівні 0,020-0,025 % [2].

Тобто сучасні технологічні схеми виробництва сталі не дозволяють домогтися безпосередньо на випуску низького ( $< 0,01$  % S) та наднизького ( $< 0,005$  % S) вмісту сірки в металі, і тому з метою її видалення часто застосовують позапічну обробку сталі [3]. Так безпосередньо використання технологічних комплексів «установка десульфурації чавуну (УДЧ) – сталеплавильний агрегат» та «установка десульфурації чавуну – сталеплавильний агрегат – установка «піч-ківш» (УПК)» стає все більш пріоритетними шляхами для отримання низькосірчатої сталі [4, 5].

**Мета роботи** – проаналізувати сучасні технології десульфурації металу та на їх основі виконати аналітично-розрахункову обробку відомих експериментальних та розрахункових даних показників десульфурації чавуну.

Поставлена мета в роботі вирішується **наступними завданнями**:

- проаналізувати сучасні методи позадоменної десульфурації чавуну;
- визначити найбільш техніко-економічно ефективні реагент-десульфуратори для позадоменної десульфурації чавуну;
- проаналізувати сучасні технології позадоменної десульфурації з застосуванням різних реагент-десульфураторів;



- проаналізувати технологічні аспекти десульфурації металу в умовах закордонних металургійних підприємств;
- проаналізувати технологічні аспекти десульфурації металу в умовах українських металургійних підприємств;
- на основі відомих експериментальних та розрахункових даних запропонувати аналітично-розрахункову обробку показників десульфурації чавуну.

**Об’єкт дослідження:** реагент-десульфуратори для позадоменної десульфурації чавуну, ступінь десульфурації, ступінь використання магнію на десульфурацію.

**Предмет дослідження:** технологія десульфурації чавуну з використанням різних реагент-десульфураторів, шляхи зменшення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну для отримання низькосірчастої сталі.

**Методи досліджень.** У роботі застосовувалися загальні (емпіричні, комплексні й теоретичні) та спеціальні (графічні та кореляційні) методи наукових пізнань. Так при узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку сучасного огляду українського та закордонного досвіду десульфурації металу використовувався комплексний підхід. Аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних (фактичних) та розрахункових даних залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну проводилася кореляційно-регресійним методом в програмі Excel (з оцінкою коефіцієнту детермінації). Аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних та розрахункових даних залежності ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні в якості реагент-десульфуратору гранульованого магнію марки МГП-99 (згідно з ТУ 1714-004-43055164-2004) та суміші гранульованого магнію й флюїдизованого вапна (згідно з ТУ У 26.5-00193714-042-2001) проводилася кореляційно-регресійним методом в програмі Excel (з оцінкою коефіцієнту детермінації).

**Наукова новизна:**

1. Показано залежність ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну (на прикладі природно-легованого та переробного чавунів) від концентрації сірки в металі при застосуванні в якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію та суміші гранульованого магнію й флюїдизованого вапна. Здобула подальший розвиток аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних та розрахункових даних з оцінкою коефіцієнту детермінації, що показує на можливості збільшення ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну до 90 %.

2. Показано вплив вмісту магнію в чавуні на вміст сірки після десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію, пасивованого магнію у шматках, порошкового магнієвого дроту, суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна. Здобула подальший розвиток аналітично-розрахункова обробка відомих експериментальних (фактичних) та розрахункових даних з оцінкою коефіцієнту детермінації, що показує на можливості зменшення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну до 0,003 %.

**Практичне значення:**

1. Результати кваліфікаційної роботи бакалавра застосовуються в навчальному процесі кафедри металургії Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету при викладанні лекційного матеріалу з навчальних дисциплін «Металургія чорних металів», «Теорія та технологія сталеплавильного виробництва» та «Фізико-хімічні процеси позаагрегатного рафінування металу» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 136 «Металургія» (освітньо-професійна програма «Металургія») очної (денної) та заочної (дистанційної) форм здобуття освіти.

# 1 ДЕСУЛЬФУРАЦІЯ МЕТАЛУ: ВИБІР РЕАГЕНТ-ДЕСУЛЬФУРАТОРА ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ

## 1.1 Сучасні методи десульфурації чавуну

Відомо, що найбільш популярними у всьому світі методами десульфурації чавуну є процес «Kanbara Reactor» (в якості реагент-десульфуратора використовується тільки вапно), процес «Ukraine Desmag» (монінжекція магнію) та процес «Co-injection» (процес спільної інжекції магнію та вапна або карбіду кальцію) (рис. 1.1). Їх техніко-економічне порівняння приведено в таблиці 1.1. З точки зору на виробничі та експлуатаційні витрати процес «Kanbara Reactor» є найкращим варіантом для десульфурації чавуну, коли основною метою є отримання низької концентрації сірки, при цьому втрати температури та заліза не є суттєвими. А процес «Co-injection» найбільш гнучкий та надійний [6]. Так за допомогою процесів «Kanbara Reactor» та «Co-injection» концентрація сірки досягає значень нижче 0,001 % [7].

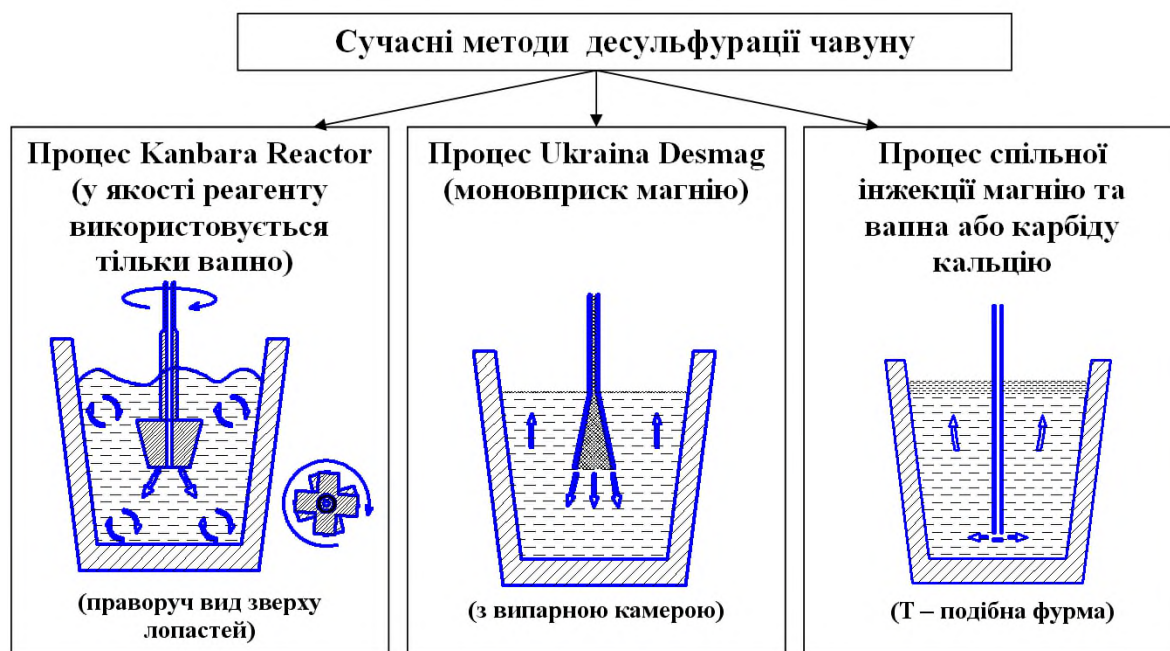


Рисунок 1.1 – Сучасні методи десульфурації чавуну

Таблиця 1.1 – Техніко-економічне порівняння методів десульфурації чавуну [6]

Технологічний показник, на тону гарячого металу	Метод десульфурації чавуну		
	«Kanbara Reactor»	«Ukraina Desmag»	«Co- injection»
Втрати заліза	€7.50	€3.00	€3.00
Витрати реагент- десульфуратора	€0.70	€1.45	€1.60
Знос обладнання	€1.00	€0.70	€0.41
Втрати температури	€0.75	€0.25	€0.25
Всього	€9.95	€5.40	€5.26

Схема моноінжекції, соінжекції та мультиінжекції різних реагент-десульфураторів при обробці гарячого металу приведена на рис. 1.2 [8].

Структура виробничих витрат на десульфурацію чавуну представлена на рис. 1.3. Показано, що зазвичай виробничі витрати тим вищі, чим вище вихідний вміст сірки в чавуні, що пов'язано в основному з великою витратою реагент-десульфуратора та зростанням інших статей витрат, (наприклад, витрат на технічне обслуговування, на фурми та газ-носій) [9].

## 1.2 Сучасні реагент-десульфуратори для позадоменної десульфурації чавуну

У промислових масштабах для десульфурації чавуну в різний час широко використовують магній, кальційвмісні матеріали та соду (табл. 1.2) [10]. Схема установки для десульфурації чавуну з вдуванням різних реагент-десульфураторів представлена на рис. 1.4 [11].

Магній є найбільш дорогим з застосовуваних промисловістю десульфураторів. Застосування магнію дозволяє знижувати вміст сірки в чавуні до 0,005 %. При цьому витрати десульфураторів мінімальні. Пил і ковшеві шлаки не вимагають спеціальних способів очищення і переробки. Головним недоліком десульфурації чавуну магнієм є необхідність значного недоливу подаються на обробку чавуновозних ковшів.

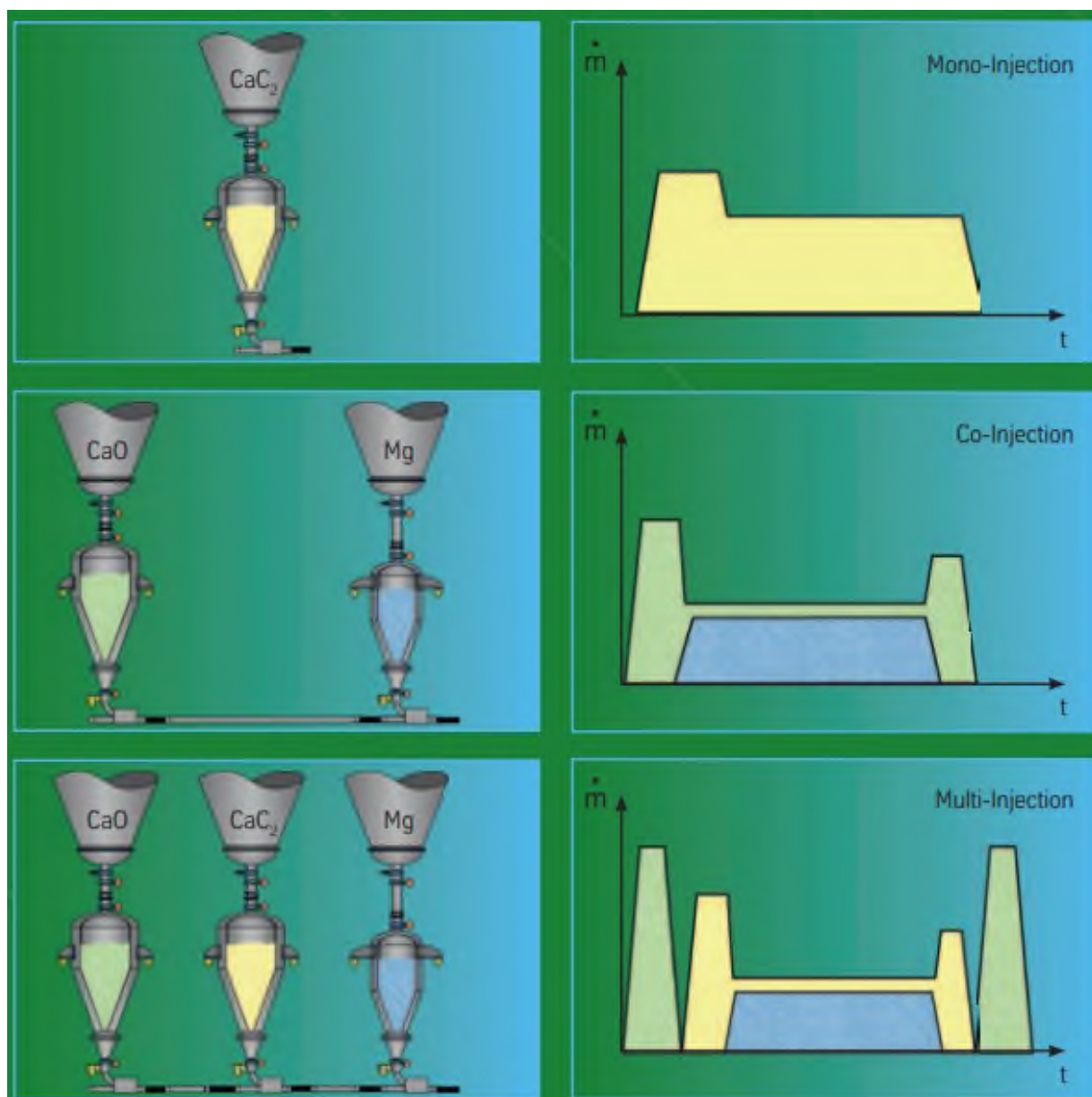


Рисунок 1.2 – Схема моноінжекції, соінжекції та мультиінжекції різних реагент-десульфураторів при обробці гарячого металу [8]

Слід зазначити, що сучасна технологія десульфурації чавуну магнієм характеризується наступними ознаками [12]:

- можливістю обробки чавуну в ковшах різного типу (залівальних, доменних, міксерних, ливарних та інших) місткістю 0,3–420 т чавуну, що мають вільний простір над розплавом в межах 0,25–0,5 м;
- зниженням вмісту сірки в чавуні до 0,001–0,003 %;
- застосуванням первинного, вторинного магнію і сплавів магнію в

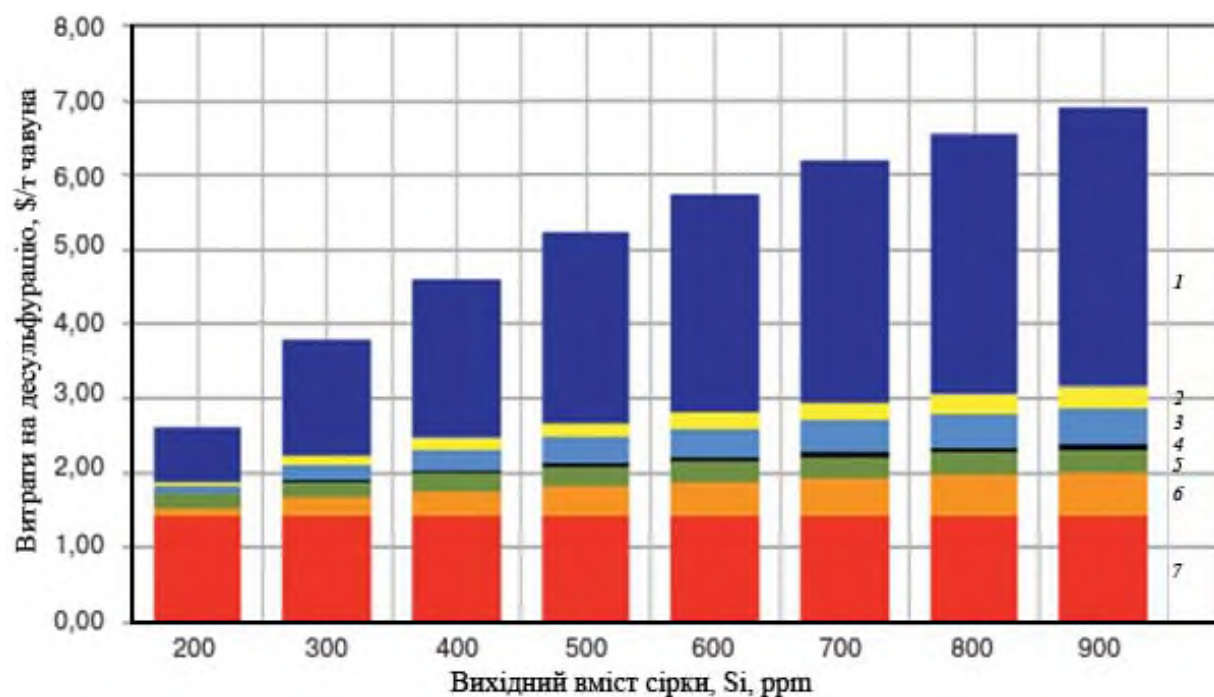
диспергованому вигляді (гранулах, зернах з розміром частинок 0,5–1,4 мм) без добавок, що пасивують;

– застосуванням різних типів газів-носіїв (природного газу або аргону) при концентрації магнію в газі не менше  $12 \text{ кг/м}^3$ ;

– регульованою інтенсивністю введення магнієвого реагенту в розплав із витратою газу-носія  $30\text{--}40 \text{ м}^3/\text{год}$ . (при використанні фурм з випарними камерами);

– підвищенням за необхідності сульфідної місткості ковшових шлаків коригувальною добавкою (близько  $200 \text{ кг/т}$  шлаку) фракціонованого вапна (фракції 2–10 мм) або відходів його виробництва;

– введенням магнію в чавун на максимальну глибину фурмами з випарними камерами або без них, але із забезпеченням умов досить повного засвоєння чавуном магнію;



1 – реагент-десульфуратор; 2 – фурма; 3 – технічне обслуговування та витрати на газ-носії (азот); 4 – теплові втрати; 5 – обробка шлаками; 6 – втрати зі шлаком; 7 – втрати заліза

Рисунок 1.3 – Структура виробничих витрат на десульфурацію чавуну (при кінцевому вмісті сірки  $S_i=140 \text{ ppm}$ ) [9]

Таблиця 1.2 – Реагент-десульфуратори для позадоменної десульфурзації чавуну [10]

№ п/п	Гранульований магній та магнієвмісні суміші	Інші види сумішей
1	Шматки магнію зі спеціальними ізоляційними обмазками, що вміщують глину, рідке скло, оксиди.	Суміш з обпаленого вапна (90%), плавикового шпату (5%) та нафтяного коксу (5%).
2	Гранульований магній в струмені природного газу.	Шлаки позапічної обробки сталі.
3	Суміш вапно-магній.	Ціанамід кальцію.
4	Порошок магнію, покритий шаром, що складається з хлоридів натрію, калію, магнію, кальцію.	Вдування флюсів на основі вапняку.
5	Спосіб обробки чавуну введенням дроту, що вміщує в порошкоподібному стані магній та рідкоземельні метали.	Суміш на основі $\text{CaO}$ , $\text{CaC}_2$ , $\text{CaCO}_3$ . Сода $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .
6	Введення магнію сумісно з коксом.	Карбід кальцію $\text{CaC}_2$ .
7	Суміш магнію з карбідом кальцію або алюмінієм та глиноземом.	Вапно та вапняк.
8	Суміш гранул магнію з гранульованим основним шлаком.	Розкислення металу гранулами алюмінію.

– коригуванням складу газової атмосфери в ковші зі зниженням в ній вмісту кисню нижче 10 %;

– використанням фурм з різними типами футеровок, що забезпечують стійкість фурм у межах 60–2000 обробок (зокрема, залежно від умов експлуатації та обслуговування);

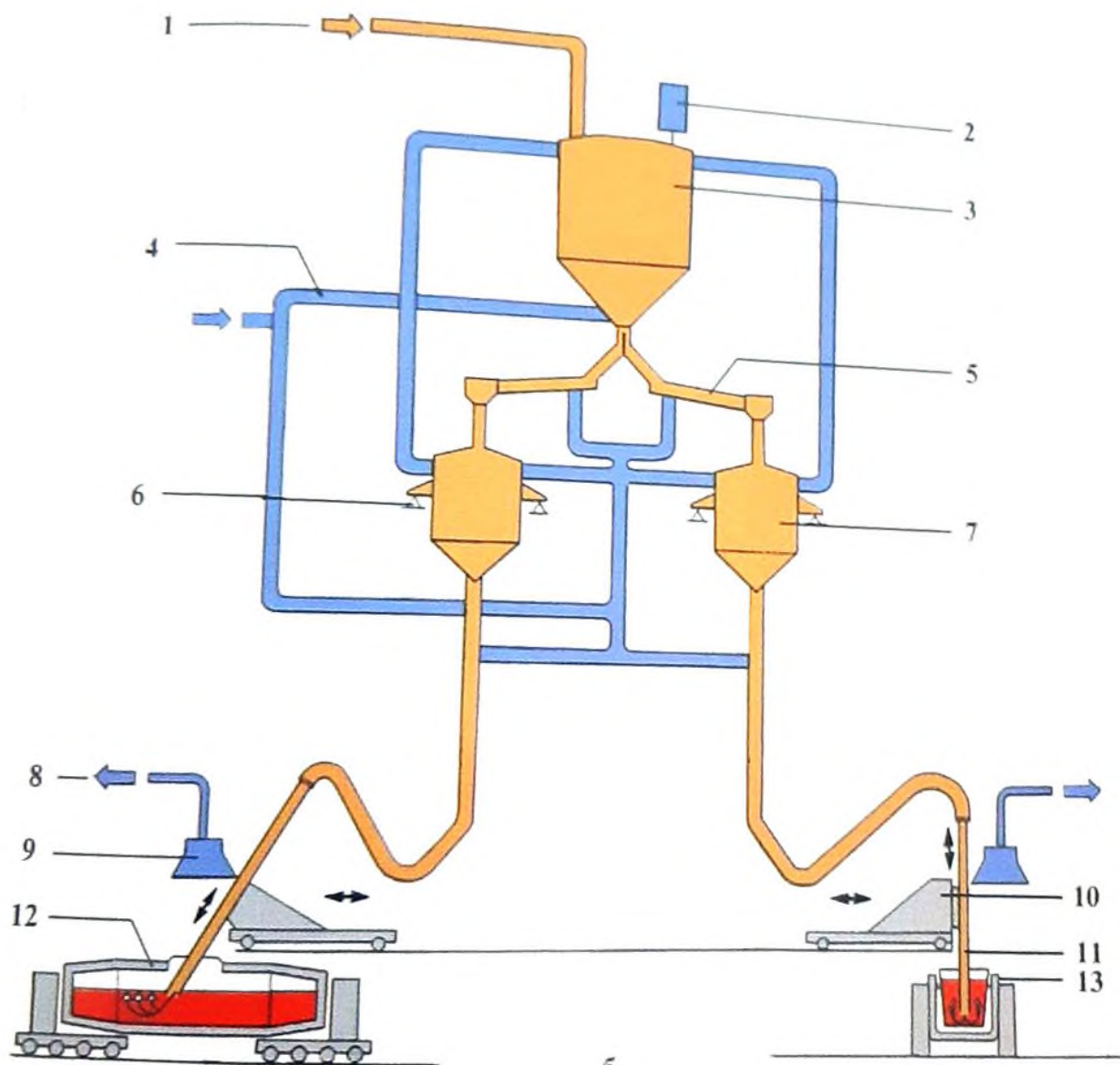
– пневмоінжекційним комплексом, що забезпечує плавне і регульоване дозування реагенту з похибкою менше 0,5 % від дози, що подається, і «миттєвою» інтенсивністю вдування, що відрізняється від заданої величини лише на 2 %;

– автоматизованою системою управління та контролю роботою обладнання та перебігом технологічного процесу;

– ступенем засвоєння магнію чавуном до 95 %;

– втратами температури чавуну  $\approx 10$  С/хв. обробки;

– втратами чавуну з додатково утворюються шлаками навколо 0,5 кг/т.



- 1 – подання реагент-десульфураторів; 2 – пиловий фільтр; 3 – бункер;  
 4 – стисле повітря; 5 – транспортний жолоб; 6 – зважуючий пристрій;  
 7 – розподільвач пиловидних матеріалів; 8 – пилоуловлювання;  
 9 – витяжний зонтик; 10 – візок фурми; 11 – фурма, що занурюється; 12 – ківш  
 сигароподібної форми; 13 – відкритий ківш

Рисунок 1.4 – Схема установки для десульфурації чавуну з вдуванням різних реагент-десульфураторів [11]

Вапно є найбільш дешевим реагентом, який доступний в практично



необмежених кількостях. Основними його недоліками при використанні в якості десульфурації чавуну є: високі витрати реагент-десульфуратора (до 15 кг/т чавуну); великі втрати чавуну зі шлаком, який видалається з ковша після обробки; великі втрати температури чавуну.

Кальцинована сода ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) також є порівняно дешевим реагентом. Після обробки чавуну содою шлаки мають малу в'язкість, в результаті чого втрати чавуну з ковшовим шлаком практично повністю відсутні. Карбід кальцію ( $\text{CaC}_2$ ) є ефективним десульфуратором чавуну, застосування якого дозволяє знижувати концентрацію сірки в металі до 0,005 % і менше [13]. При обробці содою в атмосферу виділяється значна кількість летких речовин (включаючи випарений  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Цей метод вимагає обов'язкової наявності стендів, обладнаних добре діючими газозуловлюючими пристроями [14].

### **1.3 Аналіз ефективності десульфурації металу**

Оцінка різних металургійних процесів на ефективність десульфурації представлена в табл. 1.3 [15].

В металургійних умовах зазвичай використовують наступні способи введення реагент-десульфуратора для десульфурації чавуну [13]:

- міксерна інжекція (глибоке вдування через фурму, футеровану вогнетривкими матеріалами, в сигароподібному чавунувозному ковші міксерного типу);
- ківшева інжекція (глибоке вдування через фурму, футеровану вогнетривкими матеріалами, в заливальному чавунувозному ковші);
- механічне перемішування (додавання реагент-десульфуратора з послідовним механічним перемішування).

Позадоменну десульфурацію чавуну застосовують як з метою часткового зниження вмісту сірки, так і для глибокого знесірчування. У першому випадку десульфурації піддають великі маси чавуну, а у другому - тільки чавун, що використовується для виплавки особливо низькосірчастих сталей [16].

Таблиця 1.3 – Огляд впливу різних металургійних процесів на ефективність десульфурації [15]

Найменування процесу	Ефективність процесу	Кінцевий вміст сірки, %
Вакуумна дегазація (VD/VOD)	+/+	<0,001
Вакуумна циркуляція (RN/RH-RTB)	-/+	-/<0,001
Установка «піч-ківш» (LF)	+	<0,002
Установка перемішування аргонном	+	<0,002
Вдування порошку	+	<0,002
Обробка порошковим дротом	+	<0,002
CAS-OB (Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling – Oxygen Blowing)	-	-

Серед найбільш ефективних технологій позапічної десульфурації чавуну з застосуванням різних реагент-десульфураторів слід виділити (табл. 1.4):

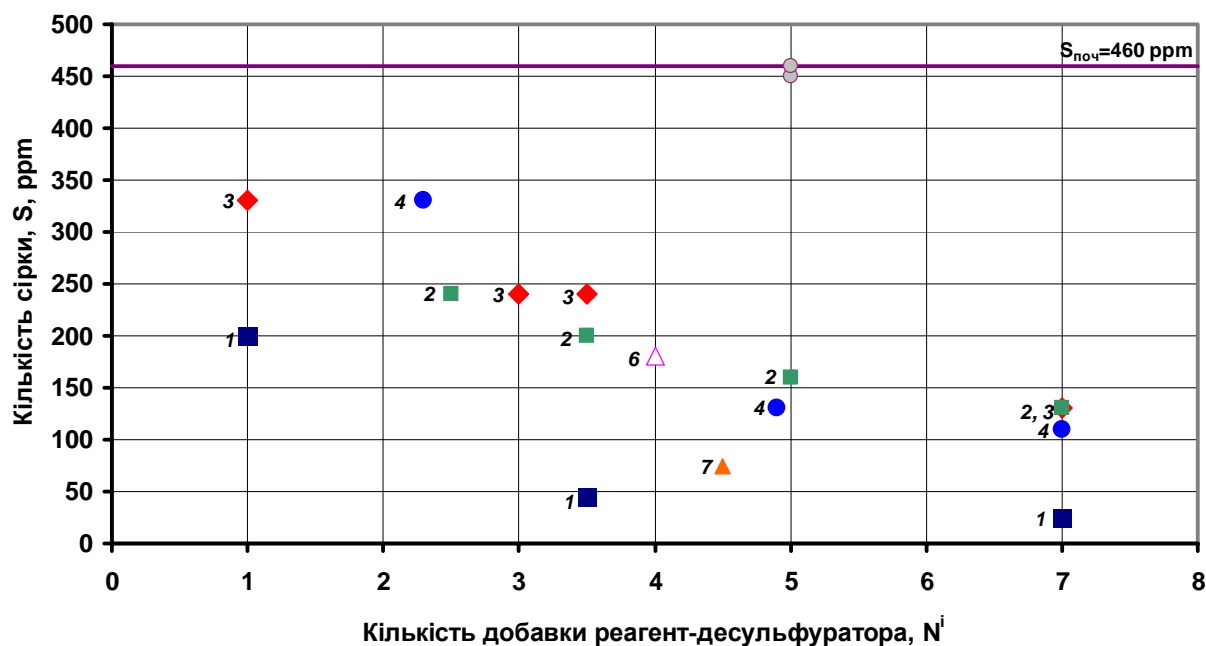
- інжекція суміші на основі магнію (ступінь десульфурації 95–99 %);
- інжекція сумішей на основі вапна та магнію (ступінь десульфурації 95–98 %);
- використання технології глибинного дугового відновлення (ступінь десульфурації 90–98 %);
- обробка екзотермічними брикетами (ступінь десульфурації 65–85 %) та інші [17].

Слід зауважити, що шведським науковцем [18] спростовано використання в якості реагент-десульфуратора оксиду цинку (ZnO), яке раніше було запропоновано у дослідженнях [19–21]. Експериментальні дослідження проводиться в печі опору при температурі до 1773 К.

Встановлено, що ZnO не затримується в доменному шлаку при відповідних потенціалах кисню і отже, не впливає на його здатність до видалення сірки (рис. 1.5).

На представленому рис. 1.5 додана кількість реагент-десульфуратора виражалася з співвідношення  $N^i = n_i/n_s$ , де  $n_i$  – додані молі реагент-

десульфуратора;  $n_s$  – початкові молі сірки в гарячому металі.



1 – флюїдизований CaO; 2 – промисловий CaO; 3 – порошок CaC<sub>2</sub>;  
4 – гранули Mg; 5 – ZnO; 6 – суміш промислового CaO та 10 % Mg; 7 – суміш промислового CaO та 20 % Mg

Рисунок 1.5 – Порівняння здатність видалення сірки при застосуванні різних видів реагент-десульфураторів [18]

На сучасних металургійних підприємствах для виробництва високосортної сталі застосовується позадоменна десульфуратія гарячого металу, яка передуює обробці в реакторі-конвертері. Так протягом багатьох років метод занурювальної фурми вважається найнадійнішим та економічним рішенням для цієї мети. Тому більшість металургійних підприємств у всьому світі застосовують саме його для цілеспрямованого зниження вмісту сірки в гарячому металі в заливних або передавальних ковшах. Так, безпосередньо інженірна компанія ThyssenKrupp Polysius (частина концерну ThyssenKrupp AG (Німеччина)) розробляє інжекційну технологію для даного методу: починаючи з десульфуратії гарячого металу в торпедоподібних

Таблиця 1.4 – Порівняльний аналіз сучасних технологій позапічної десульфурзації чавуну [17]

№ п/п	Технологія	Особливості технологічного процесу	Хімічний склад реагент-десульфуратора, %	Витрата реагент-десульфуратора, кг/т розплаву	Ступінь десульфурзації, %
1	Обробка твердими шлаковими сумішами	Вводять на поверхню розплаву при наповненні залитого ковша	CaO = 65–85; CaF <sub>2</sub> = 10–25; Al = 5–10	15–20	30–75
2	Обробка рідкими синтетичними шлаками	Вводять в рідкому стані в ківш перед його наповненням	CaO = 50–65; SiO <sub>2</sub> < 3; CaF <sub>2</sub> < 10; MgO = 3–5; FeO < 1; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 30–45;	10–50	60–80
3	Обробка Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Порошок Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> вдувають в об'єм рідкого розплаву через фурму в потоці газу-носія	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> = 100	5–10	80–90
4	Обробка порошкоподібною сумішшю, що містить вапно	Суміш подають на поверхню розплаву, який перемішується роторною мішалкою та інертним газом	CaO = 90; CaF <sub>2</sub> = 5; кокс = 5	5–10	60–80
5	Інжекція сумішей на основі вапна та магнію	Реагент інjektують в об'єм рідкого розплаву через фурму в потоці інертного газу-носія.	Mg = 30; CaO = 70	5–8	95–98
6	Інжекція сумішей на основі магнію	Гранульований магній, покритий солями натрію, інjektують в об'єм рідкого розплаву через фурму в потоці природного газу	Металевий магній = 100	0,3–0,5	95–99
7	Введення магнію в кусках	Куски магнію вводять у випарниках дзвоноподібної форми в об'єм рідкого розплаву	Металевий магній = 100	1,0–8,0	50–60
8	Технологія дугового глибинного відновлення	Активний реагент вводять у формі оксиду, який відновлюється безпосередньо в об'ємі розплаву за рахунок теплоти електричної дуги	Al = 15–25; MgO = 25–65; CaO = 25–50	1,5–3,0	90–98
9	Обробка магнієм, що відновлений за рахунок тепла суміжних хімічних реакцій у об'єм рідкого металевого розплаву	Із суміші, що містять оксиди магнію, оксиди кальцію, оксиди заліза та металевий алюміній, формують брикети, які вводять у ківш при наповненні	MgO = 10–20; CaO = 5–10; Al = 20–30; FeO = 40–65	1,5–2,0	65–85
10	Обробка порошковим дротом	Порошковий дріт, що містить активний реагент, вводять безпосередньо в об'єм розплаву за допомогою трайбапарата	Mg = 78; CaC <sub>2</sub> = 22	0,3–0,6	50–60

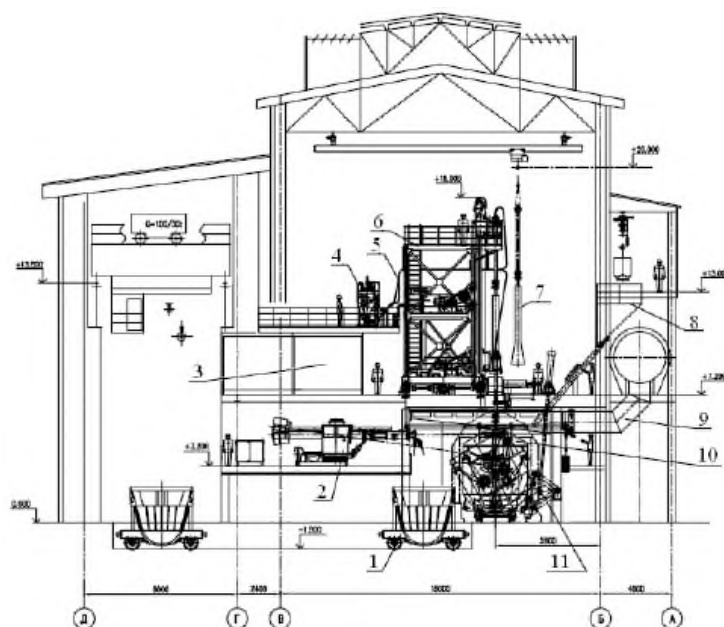
ковшах способом вдування карбїду кальцію та закінчуючи інноваційним методом мультиінжекції вапна, карбїду кальцію та магнію за допомогою найсучасніших інформаційно-керуючих технологій (рис. 1.2). До факторів, які ThyssenKrupp Polysius обов'язково враховує при складанні математичних моделей, відносяться вага, температура та результати аналізу гарячого металу, заданий вміст сірки, властивості доменного шлаку, а також час, що є для інжекції. Основною системою в ThyssenKrupp Polysius технології десульфурації є інжекційна установка MERPOL. В результаті, метод занурювальної фурми дозволяє надійно знизити вміст сірки в гарячому металі до менше 0,001 % [8].

#### **1.4 Основне устаткування для позадоменної десульфурації чавуну**

Сучасна схема відділення десульфурації чавуну гранульованим магнієм (ВДЧ) у чавунувозних ковшах приведена на рис. 1.6 [22].

Відділення десульфурації чавуну представляє собою трьохпрольтну будівлю, в якій розташовані проліт десульфурації і скачування шлаку, проліт заміни шлакових чаш, а також проліт бункерів і дозаторів з матеріалами для коригування складу ковшового шлаку. До складу прольоту десульфурації і скачування шлаку входять пристрої для введення в розплав двох робочих фурм, пристрої для вимірювання температури та відбору проб чавуну, модуль-дозатор гранульованого магнію, підйомна кришка ковша, кантувач ковша, машина скачування шлаку, візок переміщення шлакової чаші і витяжні бортові відсмоктувачі відходять газів. До цього прольоту примикає проліт заміни шлакових чаш, в якому встановлений мостовий кран вантажопідйомністю 100/30 т.

Гранульований магній вдувають в метал через фурми, що занурюються в розплав, в потоці газу, що транспортує (зазвичай використовують азот або повітря, значно рідше для вдування магнію в метал застосовують аргон або



1 – візок переміщення шлакової чаші; 2 – машина скачування шлаку; 3 – приміщення пульту управління; 4 – модуль-дозатор гранульованого магнію; 5 – трубопровід подачі магнію; 6 – пристрій для введення фурм в розплав; 7 – фурма; 8 – бункер шлакоутворюючих добавок; 9 – патрубок для відводу газів, що відходять; 10 – кришка ковшу; 11 – кантувач ковшу

Рисунок 1.6 – Схема відділення десульфурації чавуну гранульованим магнієм у чавунувозних ковшах [22]

природний газ).

Технологія десульфурації металу в чавуновозних ковшах (рис. 1.7) передбачає вдування гранульованого (зернистого) магнію в чавун без добавок через фурми з випарними камерами (рис. 1.8).



Рисунок 1.7 – Чавуновозний ківш [23]

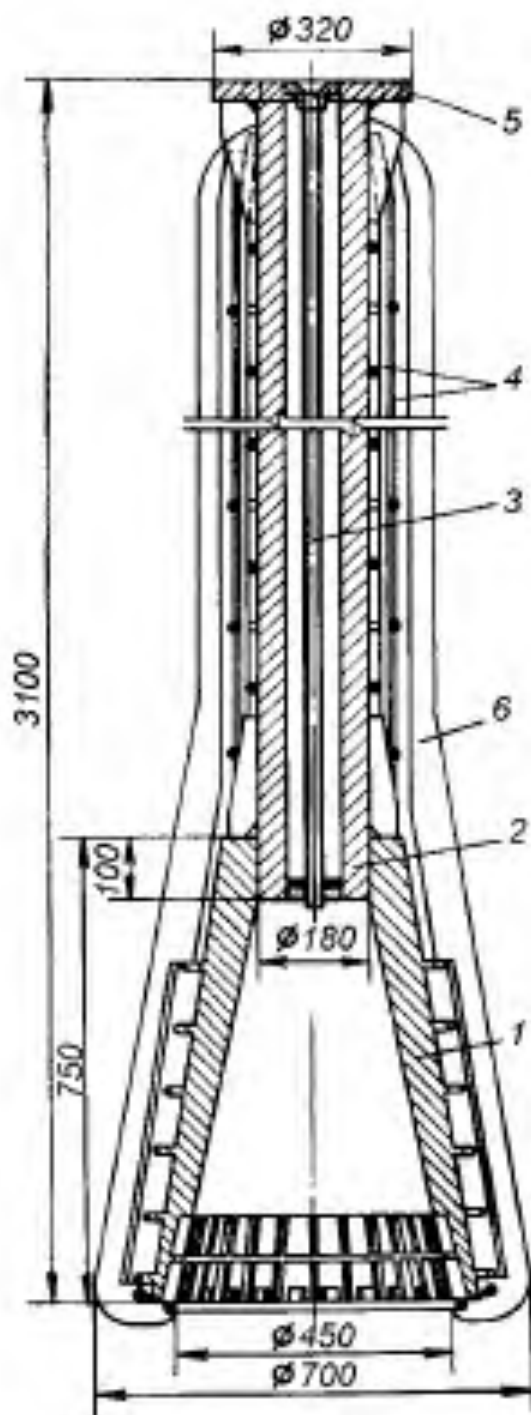
В якості добавок зазвичай використовують порошкоподібне флюїдизоване вапно у різному співвідношенні. Так на ВАТ «Северсталь» та ВАТ «Азовсталь» використовують продувку чавуну сумішшю гранульованого магнію і порошкоподібного флюїдизованого вапна (табл. 1.5) у співвідношенні 1: (3-5) через фурму з постійним перетином каналу.

Таблиця 1.5 – Хімічний склад флюїдизованого вапна

Металургійне підприємство	Масова частка компонентів, %				
	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	S	витрати при прокалюванні
ВАТ «Северсталь»	95,5	>3	>3	<0,05	<2
ВАТ «Азовсталь»	>94	-	<0,04	-	<8

Схема десульфурації чавуну гранульованим магнієм та скачування шлаку

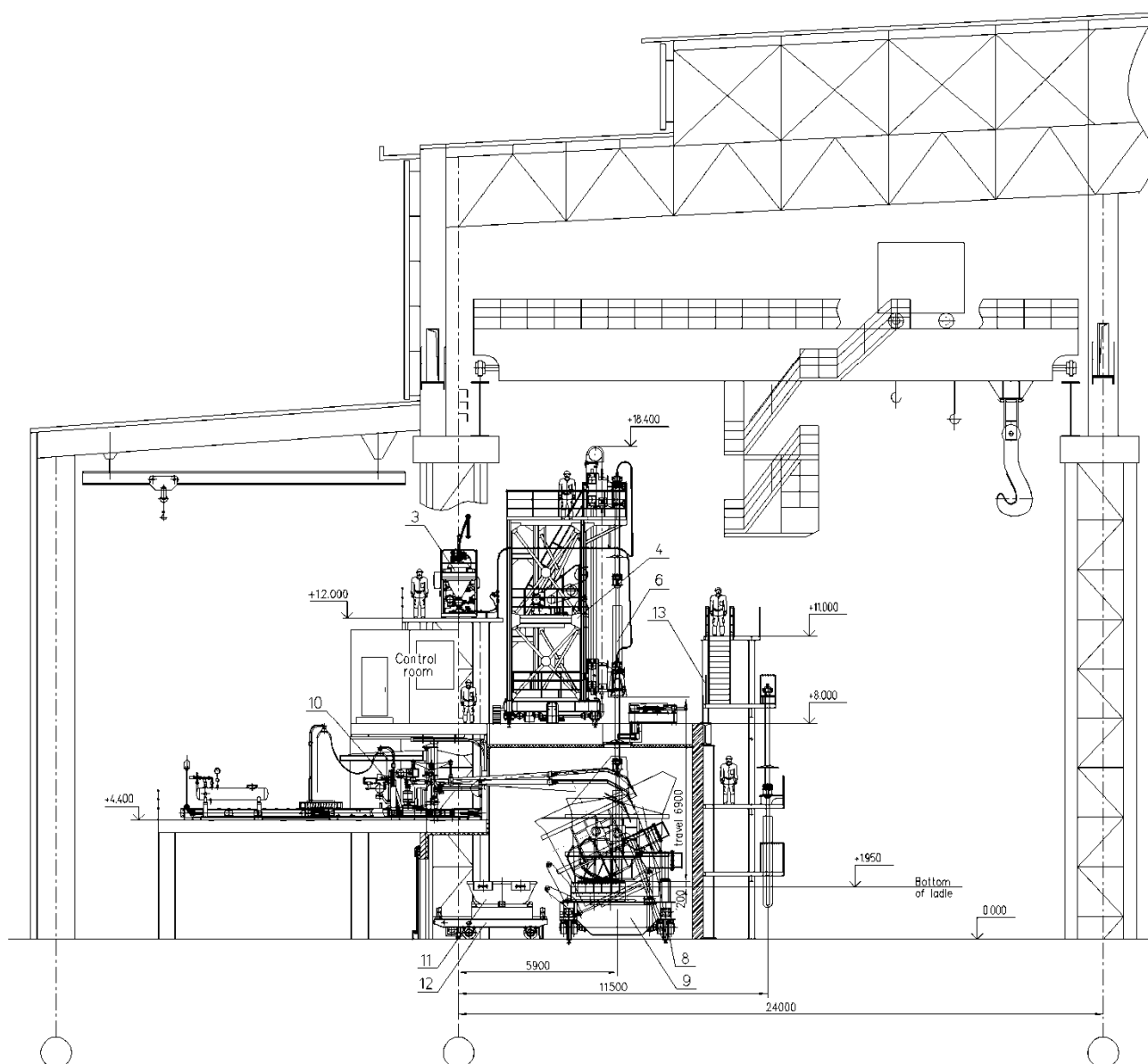
в 110-тонних заливальных ковшах киснево-конверторного цеху ВАТ «Азовсталь» приведена на рис. 1.9.



1 – лита випарна камера; 2 – труба, що тримає; 3 – канал; 4 – стальна арматура; 5 – фланець; 6 – вогнетривка обмазка

Рисунок 1.8 – Фурма з випарною камерою для обробки чавуну гранульованим магнієм без добавок [24]





1 – модуль-дозатор магнію; 2 – пристрій введення фурм в розплав з двома фурмами; 3 – фурма для вдування магнію; 4 – стэнд резервних фурм; 5 – чавуновозний візок з ковшем і кантователем; 6 – машина скачування шлаку; 7 – пульт управління; 8 – візок з шлакової чашею

Рисунок 1.9 – Схема десульфуратії чавуну гранульованим магнієм та скачування шлаку в 110-тонних заливальних ковшах киснево-конверторного цеху ВАТ «Азовсталь» [22]

Установка десульфуратії чавуну в ковші ємністю до 300 т (рис. 1.10 [25])

призначена для десульфурації рідкого чавуну шляхом подачі порошкоподібних реагентів у струмені газу носія.

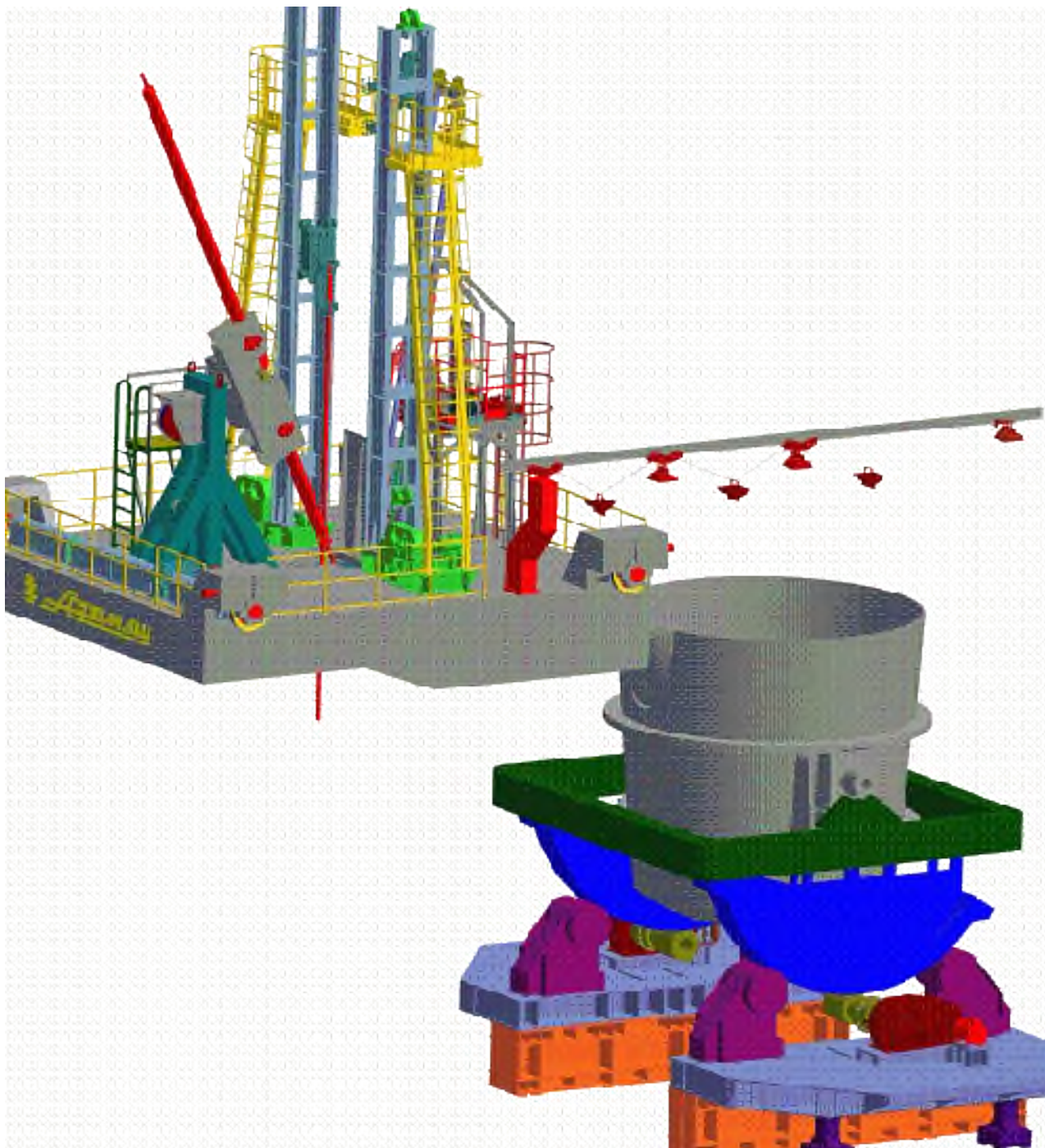


Рисунок 1.10 – Установка десульфурації чавуну в ковші ємністю до 300 т [25]

В цій установці використовується двохфурменна система вдування реагент-десульфуратора за технологією фірми ESM (США), що дозволяє

знизити час десульфурації приблизно на 45% порівняно з однофурменною системою, без втрати ефективності десульфурації магнієм і економити реагент-десульфуратори.

Основні вузли установки наступні. Стенд для нахилу чавуновозного ковша, пристрій переміщення продувної фурми, пристрій для виміру, температури та відбору проб, платформа пересувна фурменна, пристрій переміщення продувної фурми.

Стенд для нахилу чавуновозного ковша призначений для встановлення на нього чавуновозного ковша при продуванні та нахилі ковша для скачування шлаку. Стенд встановлюється на нульовій позначці. Для виконання процесу скачування шлаку стенд повертає ківш на кут, близький до кута початку зливу рідкого металу через носок ковша. Кут нахилу ковша, залежно від кількості чавуну в ньому, дорівнює 300 т – 12 град. і за 280 т – 19 град. Після завантаження частини шлаку ківш, при необхідності, додатково повертається на деякий кут, що забезпечує більш повне видалення шлаку.

Пристрій переміщення продувної фурми призначений для вертикального переміщення продувної фурми в ківш з метою подачі реагентів рідкий чавун.

Пристрій для вимірювання температури та відбору проб призначений для вимірювання температури та взяття проб чавуну в процесі десульфурації.

Платформа пересувна фурменна призначена для переміщення з неробочої зони в зону десульфурації встановлених на ній двох пристроїв переміщення продувної фурми та пристрою для вимірювання температури та відбору проб [25].

## **1.5 Висновки**

1. В умовах світових металургійних підприємств для ковшової десульфурації чавуну найбільш затребуваним можна вважати процес спільної інжекції магнію та вапна або карбїду кальцію (процес «Co-injection»). При цьому акцент робиться на технологічність процесу, вартості реагент-

десульфуратора та простоті використання.

2. Аналіз існуючих технологій позадоменної десульфуратії чавуну з застосуванням різних реагент-десульфураторів показав, що найбільш ефективними технологіями є: інжекція суміші на основі магнію (ступінь десульфуратії 95–99 %); інжекція сумішей на основі вапна та магнію (ступінь десульфуратії 95–98 %); обробка за технологією глибинного дугового відновлення (ступінь десульфуратії 90–98 %); обробка екзотермічними брикетами (ступінь десульфуратії 65–85 %).

3. Аналіз світових показників ступеня десульфуратії по металургійним переділам показав, що у доменній печі видаляється лише до 90 % сірки, на УДЧ від 70 до 95%, у сталеплавильному агрегаті (кисневому конвертері або електросталеплавильній печі) до 30% та позапічній обробці до 90%. Тому на сьогодні простежуються можливості отримання наднизького вмісту сірки в готовому металі ( $<0,005\% S$ ), використовуючи технологічні комплекси «УДЧ – сталеплавильний агрегат» та «УДЧ – сталеплавильний агрегат – УПК», які дозволяють забезпечувати оптимізацію витрат на виробництво сталі, розширювати сортамент дефіцитних марок сталей, знизити шкідливий на негативний вплив металургійного виробництва на навколишнє середовище.

4. Показано, що кінетика десульфуратії сталі залежить від вибору реагент-десульфуратора, хімічного складу шлаку, часу його витримки в ковші, ступеня окислення металу, умов перемішування сталі в ковші та додаткових технологічних операцій обробки металу.

## 2 ЗАКОРДОННИЙ ДОСВІД ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ ТА СТАЛІ

### 2.1 Аналіз технологічних аспектів десульфурації металу в умовах закордонних металургійних підприємств

Розглянемо розподіл сірки по переділах металургійного виробництва на прикладі АС «ЄВРАЗ Нижньотагільський металургійний комбінат» (табл. 2.1), на якому реалізований ванадієвий переділ – переробка ванадієвих чавунів на сталь. Авторами роботи [26] показано, що для отримання підсумкового вмісту сірки менше 0,005 % у сталі необхідний комплекс заходів, що включає обробку напівпродукту на установці десульфурації, виплавку в конвертері, обробку сталі на УПК і далі у вакууматорі.

Таблиця 2.1 – Розподіл сірки по етапам виробництва сталі виробництва в умовах АС «ЄВРАЗ Нижньотагільський металургійний комбінат» [26]

Етапи виробництва сталі	Вміст сірки в металі, % мас.			
	Без обробки на УДЧ		З обробкою на УДЧ	
	Без обробки на установці циркуляційного вакуумування	З обробкою на установці циркуляційного вакуумування	Без обробки на установці циркуляційного вакуумування	З обробкою на установці циркуляційного вакуумування
Доменний процес	0,0249			
Конвертерний процес 1	0,0244			
Десульфурація напівпродукту	-	-	0,0068	0,0068
Конвертерний процес 2	0,0196	0,0206	0,0083	0,0085
УПК (початок обробки)	0,0192	0,0196	0,0084	0,0086
УПК (кінець обробки)	0,012	0,0126	0,0046	0,0057
Циркуляційний вакууматор	-	0,008	0,0039	0,0057
МБЛЗ	0,012	0,008	0,0039	0,0057

Данні табл. 2.1 показали, що вміст сірки після обробки на УДЧ відповідає 0,0068 %, що недостатньо для виключення впливу шкідливої

домішки на службові властивості виробів. Мінімальний вміст сірки в металі досягає значень 0,0039 % тільки при повному комплексі обробки металу в агрегатах позапічної обробки сталі – УПК та циркуляційному вакууматорі. Отже як показали дослідження коефіцієнта розподілу сірки між металом і шлаком, незважаючи на низький кінцевий вміст сірки в металі, дана технологія має резерви в частині десульфурації, що досягається коригуванням складу шлаку УПК.

Підвищення ефективності роботи УПК при виробництві сталей з низьким вмістом сірки за рахунок додаткового обліку впливу параметрів процесу, що нечітко визначаються, розглянуто в роботі [1]. Автором розроблена технологія ведення плавки на УПК садкою 370 т, яка забезпечує дотримання максимально можливого ступеня десульфурації в заданих виробничих умовах. Результатами моделювання середовища Fuzzy Logic на основі створеної бази правил було розроблено режим проведення «глибокої» десульфурації в обмежених виробничих умовах, а також режим проведення «швидкої» десульфурації. Випробування запропонованих режимів було проведено на 20 плавках сталей 10Г2ФБ, 10Г2СБ та К60 (нормований вміст сірки 0,02 %) на УПК киснево-конвертерного цеху ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат». Обробка експериментальних даних показала, що похибка оцінки кінцевого вмісту сірки склала не більше 6 % (рис. 2.1). В одному випадку з двадцяти плавок спостерігалось підвищений вміст сірки кінці плавки (плавка № 8)  $S_k = 0,024$  %, що пояснювалось тривалістю обробки, що становить 14 хв. У чотирьох випадках спостерігалось досягнення особливо низького вмісту сірки (менше 0,005 %), що характеризує глибоку десульфурацію та говорить про можливість застосування моделі для розробки режимів плавки сталі з особливо низьким вмістом сірки.

В роботі [27] показано досвід виплавки киснево-конвертерної сталі з низьким вмістом сірки на прикладі порівняння плавки з використанням звичайного чавуну та чавуну після обробки на УДЧ. Автори стверджують, що в умовах киснево-конвертерного цеху ПАТ «Северсталь» можливо отримувати

будь-який заданий вміст сірки (аж до 0,001 %) при вихідному її вмісті до 0,1 % (табл. 2.2). Аналіз 82-х плавок з обробкою чавуну на УДЧ показав, що вміст сірки в сталі на повалці в середньому нижче на 0,003 %, а у готовій сталі – на 0,001 %. При цьому для різних марок сталей витрата ТШС для десульфурації на УДЧ була на нижче в 1,25–1,74 разів ніж для плавок на звичайному чавуні. Слід зазначити, що на всіх плавках з використанням установки десульфурації чавуну вміст сірки в готовій сталі не перевищував необхідну технічну документацією, а у дослідженнях без використання УДЧ на 5 % плавках вміст сірки був вище заданого на величину від 0,001 до 0,003 %.

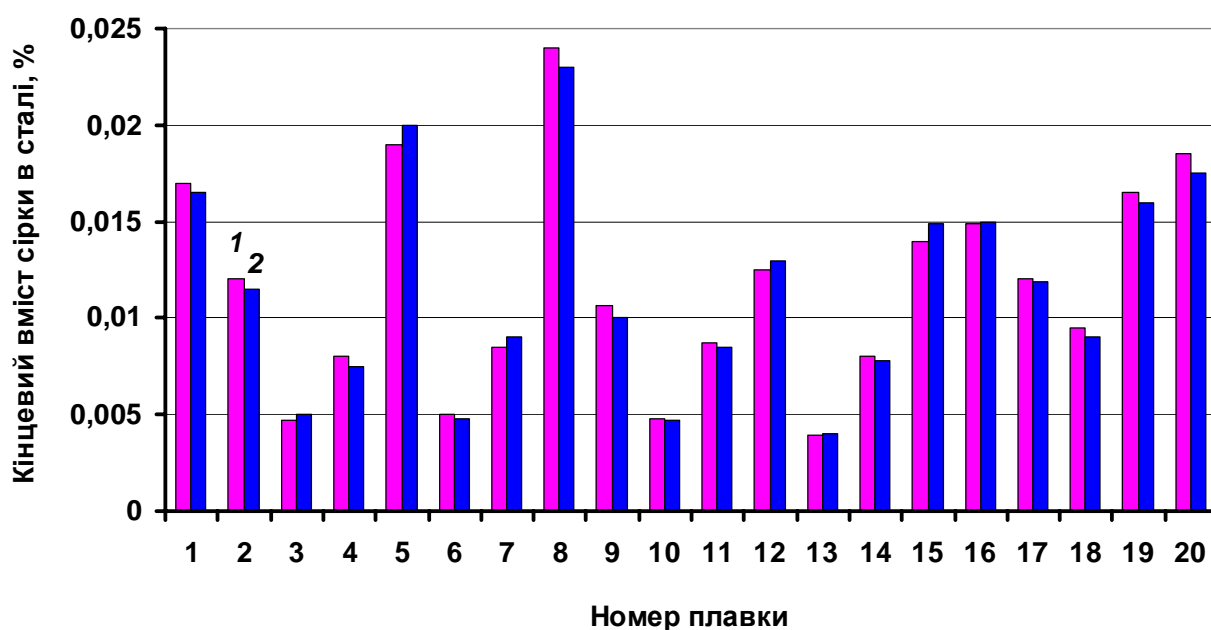


Рисунок 2.1 – Порівняння дослідного (1) та розрахункового (2) вмісту сірки в сталях 10Г2ФБ, 10Г2СБ, К60 (для умов УПК киснево-конвертерного цеху ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат») [1]

Слід зазначити, що в умовах киснево-конвертерного цеху ПАТ «Северсталь» для виплавки спеціальних, трубних, електротехнічних, конструкційних вуглецевих сталей, ІФ-сталей та сталей для суднобудування потреба в кількості чавуну на плавку приведена у табл. 2.3 [28].

Значний інтерес представляють дослідження можливості видалення сірки

в кислих індукційних печах при виплавці чавунів для виливки піддонів та утеплювачів. Так в умовах ливарного цеху АТ «ЄВРАЗ Об'єднаний Західно-Сибірський металургійний комбінат» на печах ІЛТ-10М стає можливим зниження вмісту сірки в чавуні з 0,09–0,17 % до прийнятного на практиці рівня 0,015-0,040 %. Авторами показано, що найбільший вплив на ступінь десульфурації чавуну має основність шлаку та ступінь заповнення тигля. Це пояснюється тим, що із зменшенням заповнення тигля зростає питома потужність перемішування і це призводить до підвищення швидкості циркуляції шлакометалевої емульсії, що забезпечує підвищення ступеня десульфурації металу. Так швидкість десульфурації чавуну зі збільшенням потужності перемішування з 200–300 до 850–900 кВт/т зростає на порядок – з 0,0005–0,00072 до 0,0084–0,0096 %/хв. [29].

Таблиця 2.2 – Порівняння плавок з використанням звичайного чавуну та чавуну після обробки на УДЧ в умовах ПАТ «Северсталь» [27]

Марка сталі	Вид плавки	Кількість плавок, шт.	Вміст сірки у чавуні, %	Вміст сірки на повалці, %	Витрата ТШС, кг/т	Вміст сірки в сталі, %
Х65	На звичайному чавуні	41	0,0150	0,0100	2830	0,0046
	З чавуном після УДЧ	20	0,0040	0,0076	2940	0,0041
22ГЮ	На звичайному чавуні	39	0,0180	0,0130	2500	0,0073
	З чавуном після УДЧ	9	0,0040	0,0110	2000	0,0073
08Ю	На звичайному чавуні	96	0,0180	0,0170	730	0,0170
	З чавуном після УДЧ	31	0,0045	0,0110	494	0,0110
ІФ	На звичайному чавуні	18	0,0180	0,0100	550	0,0090
	З чавуном після УДЧ	22	0,0050	0,0063	316	0,0070



Також мають місце і дослідження десульфурації чавуну в основних індукційних печах. Найбільша ступінь десульфурації чавуна. На підставі запропонованої технології, присадки шлакоутворюючих і співвідношенні компонентів, отримували рідкорухливий відновний розкислений шлак високої основності та активності, який перемішуючи індуктивними потоками рідкого розплаву створював сприятливі умови для глибокої десульфурації вже перших, а потім подальших порцій металу, що утворився, при цьому пов'язували сірку в міцні сполуки та запобігли процесу її ресульфурації. В залежності від зміни хімічного складу чавуну за основними елементами ступінь десульфурації складав від 55 до 95 % [30].

Таблиця 2.3 – Потреба в чавуні при виплавці різних груп марок сталей в умовах киснево-конвертерного цеху ПАТ «Северсталь» [28]

Вміст сірки в чавуні, %	Сортамент марок сталей	Вміст сірки в чавуні, %	Частка в сортаменті сталей, що виплавляються у цеху, %	Кількість чавуну, т/рік при витраті рідкого чавуну 0,8 т/т
0,002	Спеціальні сталі	0,002	1,0	72250
0,003–0,005	ІФ-сталі	0,005	1,2	86700
	Трубні сталі	0,005	2,0	144500
	Сталі для суднобудування	0,005	16,0	216750
	Всього		19,2	447950
0,006–0,010	Конструкційні вуглецеві сталі типу 08Ю	0,010	25,0	1806250
	Електротехнічні сталі	0,010	2,0	144500
	Всього		27,0	1950750
0,011–0,020	Конструкційні вуглецеві типу 08пс	0,020	23,8	1719550
	Рядові та низьколеговані сталі	0,020	29,0	2095250
	Всього		52,8	3814800
Всього			100,0	6285750

В умовах киснево-конвертерного цеху ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат» впроваджена технологія виплавки трубної ультронизькосірчастої сталі марки DNV SAWL 485 FD (0,0015 % S) [31].

Десульфурація металу в умовах ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат» проводилася в кілька етапів:

- перший – ковшова обробка чавуну на УДЧ вдуванням суміші з флюїдизованого вапна і магнію в потоці азоту;
- другий – ковшова обробка напівпродукту в процесі його випуску з конвертера твердою шлакоутворюючою сумішшю;
- третій – ковшова обробка сталі на УПК в дві стадії: обробка під «білим» шлаком та вдування флюїдизованого вапна в потоці аргону.

Після освоєння технології ковшевої десульфурації чавуну при середньому відношенні маси флюїдизованого вапна до маси магнію 4,4 вдалося отримувати кінцевий вміст сірки на рівні 0,003 % та ступінь десульфурації чавуну – 85 % (табл. 2.4).

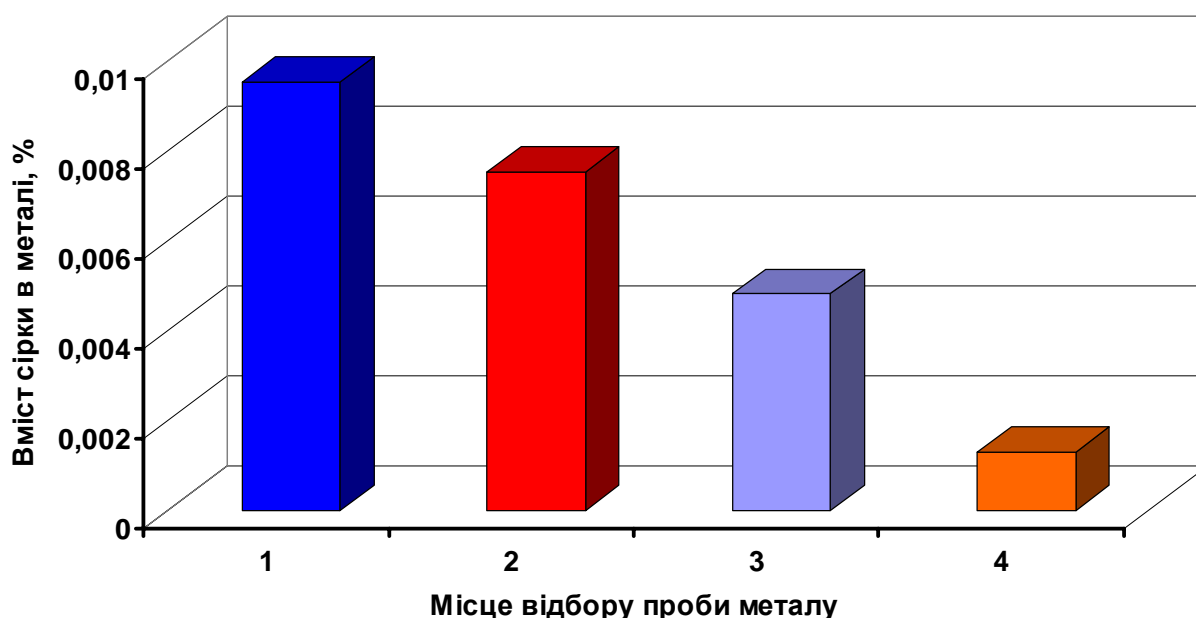
Таблиця 2.4 – Результати обробки чавуну на УДЧ на протязі 15 місяців при виробництві сталі марки SAWL 485 FD [31]

Технічний параметр	Значення
Кількість ковшів чавуну, шт.	539
Тривалість продувки, хв.	11,1
Тривалість обробки, хв.	31,8
Середня витрата флюїдизованого вапна, кг/т	1,76
Середня витрата магнію, кг/т	0,40
Зниження температури чавуну, °С	6,0
Середній вміст сірки до обробки, %	0,002
Середній вміст сірки після обробки, %	0,003
Середня ступінь десульфурації чавуну, %	85,0

Ступінь десульфурації металу на другому етапі дуже нестабільна через недостатньо надійної відсічення конвертерного шлаку і в середньому становить 24 %.

Автором виявлена залежність між ступенем десульфурації металу та

відношенням маси кускового вапна до маси плавикового шпату на першій стадії обробки сталі на УПК, при цьому для найбільш ефективного видалення сірки рекомендується мати дане відношення в інтервалі 1,9–2,4. Також визначена залежність ступеня десульфурації металу від інтенсивності вдування флюїдизованого вапна в потоці аргону для другої стадії обробки сталі на УПК, при цьому для інтенсифікації видалення сірки рекомендується вдувати флюїдизоване вапно з інтенсивністю 14–15 кг/(м<sup>3</sup>·хв).

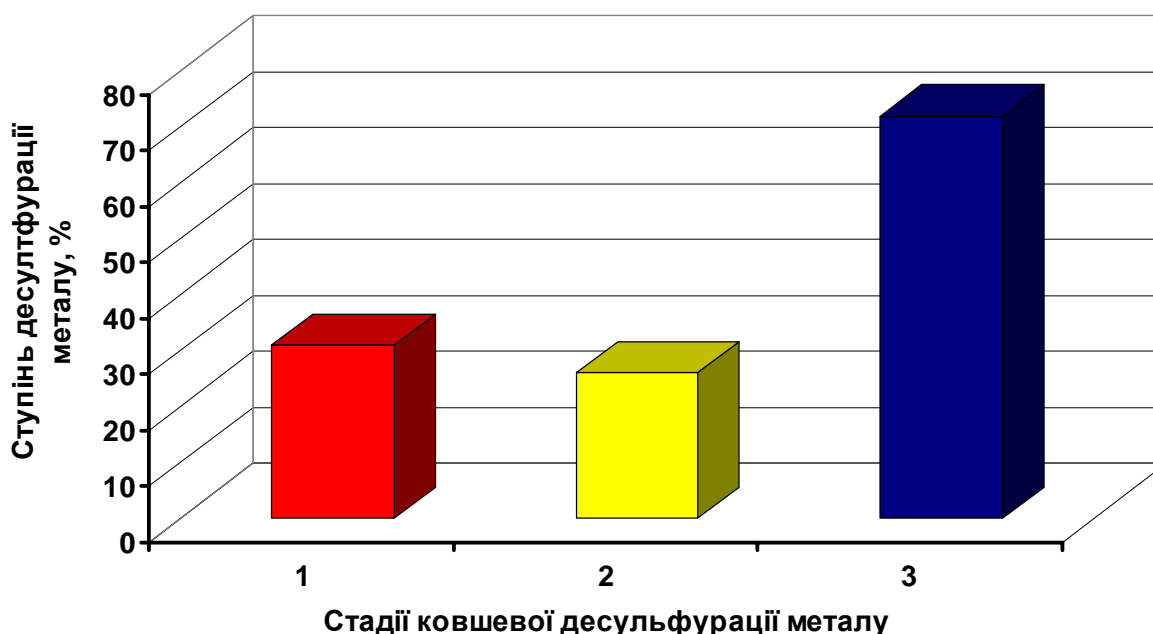


1 – у кисневому конвертері перед випуском; 2 – у сталерозливному ковші на УПК до початку обробки; 3 – у сталерозливному ковші на УПК перед вдуванням вапна; 4 – у проміжному ковші машини безперервного лиття заготовок

Рисунок 2.2 – Усереднені дані про вміст сірки в металі на різних етапах виробництва сталі марки DNV SAWL 485 FD [31]

В дослідженнях встановлена зростаюча залежність коефіцієнта розподілу сірки від питомої витрати флюїдизованого вапна на УПК, згідно з якою при рекомендованій витраті флюїдизованого вапна від 2,2 до 2,8 кг/т підсумковий коефіцієнт розподілу сірки збільшується з 220 до 275.

Загальна ступінь ковшової десульфурзації металу 539 плавок при виплавці сталі марки DNV SAWL 485 FD склала 83 %. Інформація про середній вміст сірки на різних етапах виробництва сталі марки DNV SAWL 485 FD представлена на рис. 2.2. Ступень десульфурзації металу на різних стадіях ковшової обробки представлено на рис. 2.3.



1 – ТШС на випуску; 2 – УПК «білий» шлак; 3 – УПК флюїдизоване вапно

Рисунок 2.3 – Ступень десульфурзації металу на різних стадіях ковшової обробки [31]

Авторами роботи [32] розроблено спосіб десульфурзації сталі (зокрема високовуглецевої сталі марки С80D (згідно з ISO 16120:2017)) в умовах ВАТ «Молдавський металургійний завод», що дозволяє забезпечити зниження вмісту сірки в готовому прокаті до 0,002–0,003 %. Частково сірку видаляють під час випуску металу з сталеплавильного агрегату, а досягнення заданого ступеня десульфурзації сталі забезпечує регламентоване введення плавикового шпату, переважно в процесі позапічної обробки (табл. 2.5).

Запропонований технологічний спосіб підвищує якісні показники металу за рахунок регламентованого введення відповідних реагентів (плавикового

шпату та вапна). Встановлено, що додаткове введення в сталь силікокальцієвого дроту в кінці позапічної обробки дозволяє знизити вміст сірки до 0,002 %. Запропонований у роботі спосіб глибокої десульфурації сталі дозволяє підвищити якісні показники бунтового прокату: наднизький вміст сірки виключає розвиток тріщин в процесі гарячої деформації литої заготовки (явище червоноломкості), знижує загальний вміст в сталі неметалевих включень оксидного типу і, як наслідок, підвищує технологічну пластичність бунтового прокату при подальшій холодній пластичній деформації волочінням.

Таблиця 2.5 – Норми витрати плавикового шпату та вапна для десульфурації високовуглецевої сталі в умовах ВАТ «Молдавський металургійний завод» [32]

Норми витрати реагент-десульфуратора	Технологічний етап металургійного циклу		Всього
	на випуску з ДСП	при обробці на УПК	
CaF <sub>2</sub> , кг/т	1,18	3,55	4,73
CaO, кг/т	3,47	6,64	10,11
Відношення CaF <sub>2</sub> /CaO, %	0,34	0,53	0,47

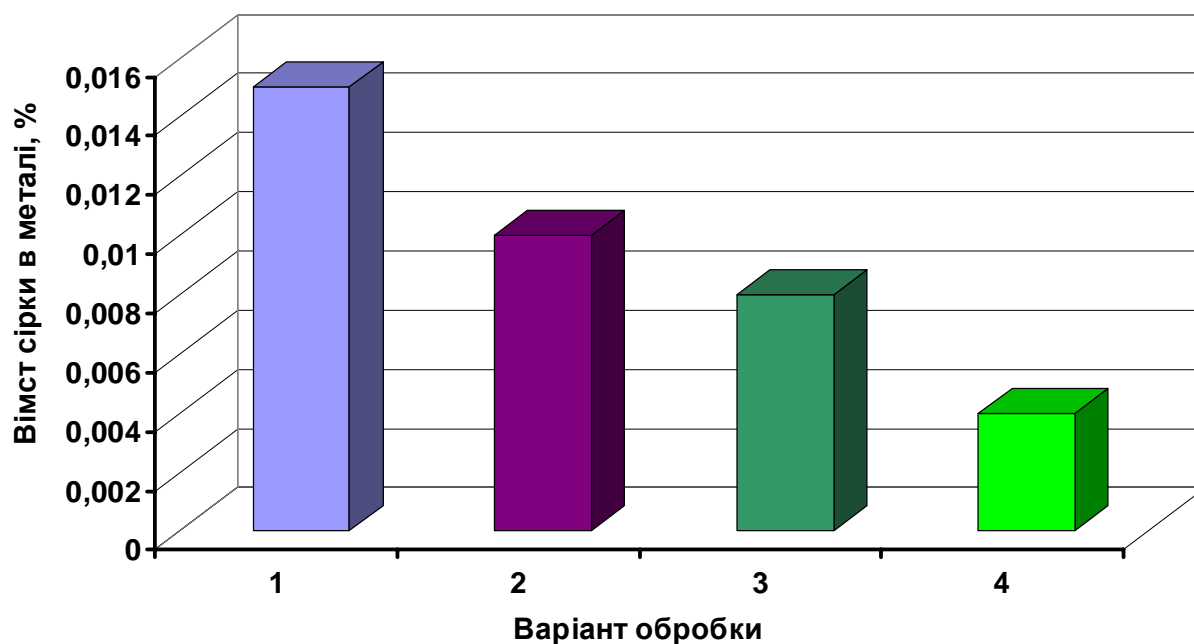
У дослідженнях [33] процес десульфурації сталі марки 20ГЛ при використанні ТШС (табл. 2.6) проводили в умовах АТ «Ташкентський механічний завод» в індукційній тигельній печі місткістю 6 т зі зменшенням висоти меніска дзеркала ванни за рахунок підвищення рівня металу. Для підвищення експлуатаційної надійності, поліпшення механічних властивостей та модифікування неметалевих включень сталь в ковші обробляли алюмінієм, силікокальцієм та рідкоземельними металами (РЗМ). РЗМ додавали у вигляді лігатури (50 % Се, 25 % La, 15 % Nd, 5 % Pr, 3 % Fe, 2 % інші РЗМ) в кількості 0,1 % від маси металу.

Як видно з рис. 2.4, залежно від режиму обробки розплаву вміст сірки у металі знижувався від вихідних значень ( $[S]_{\text{поч}}$ ) 0,015 % до 0,008–0,004 %. За час обробки металу в ковші вміст сірки знижувався на 0,011–0,007 %, що

відповідає ступеню десульфурації  $(\Delta[S]/[S]_{\text{поч}}) \cdot 100 = 46,7-73,3$  %. Вміст загального кисню в металі, отриманий за варіантом обробки №4, у 4,5 рази менше, ніж при використанні технології за варіантом обробки №1 (традиційної для цього підприємства).

Таблиця 2.6 – Хімічний склад ТШС для обробки сталі 20ГЛ в умовах АТ «Ташкентський механічний завод» [33]

№ шлаку	Вміст у шлаку, % (мас.)				
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	CaF <sub>2</sub>
1	50	50	-	-	-
2	60	23	9	8	-
3	62	25	-	8	5



1 – присадка 0,1 % Al; 2 – перша присадка 0,1 % Al, а друга 0,1 % СК30; 3 – перша присадка 0,1 % Al, а друга 0,1 % РЗМ; 4 – перша присадка 0,1 % Al, друга 0,1 % СК30, а третя 0,1 % РЗМ

Рисунок 2.4 – Вміст сірки в металі при різних варіантах рафінування сталі 20ГЛ [33]

Тобто дослідно-промислові опробування процесу десульфурації сталі 20ГЛ в індукційній тигельній печі показали, що при обробці ТШС та

модифікуванні сталі РЗМ ступінь десульфурації складав 50–90 % з досягненням вмісту сірки 0,004–0,015 %, а при обробці ТШС ступінь десульфурації складала 45–60 % з досягненням вмісту сірки 0,014–0,017 %.

У роботі [34] для умовх ВАТ «Білоруський металургійний завод» для десульфурації арматурної сталі з вмістом сірки  $<0,025$  %, попередньо виплавленій в дуговій сталеплавильній печі, запропоновано інжектування порошкоподібних матеріалів через установку «Velko» при позапічній обробці сталі.

Авторами показано, що питома витрата порошкоподібного матеріалу («TURBO-KALK» ( $\approx 90$  % CaO) та ІРС-2 (30–80 % CaO, 1–2 % SiO<sub>2</sub>, 10–40 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1–2 % MgO, 6–30 % CaF<sub>2</sub>,  $\leq 3$  % C,  $\leq 1$  % S,  $\leq 1,5$  % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,  $\leq 3$  % FeO,  $\leq 2$  % MnO,  $\leq 10$  % K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)) в кількості 1,95 кг/т підвищує ступінь десульфурації на 32,2 %. Параметри десульфурації сталі на УПК приведено в табл. 2.7.

Застосування інжекційної технології рекомендується після наведення високоосновного шлаку ( $B=3,0-3,5$ ) з кінцевим етапом введення силікокальцієвого дроту. При більшій середній тривалості обробки (на 6,3–6,7 % більше, ніж порівняльних) досягнута швидкість десульфурації сталі на дослідних плавках при поверхневому вдуванні суміші «TURBO-KALK» – 4,2 ррт/хв., при поверхневому вдуванні суміші ІРС-2 – 4,5 ррт/хв., при поглибленому вдуванні суміші ІРС-2 – 5,5 ррт/хв.

У дослідженнях [9] наголошено, що використання комплексу доменна піч → УДЧ → кисневий конвертер → УПК є ключем до успішного управління високим вмістом сірки в металургійному виробництві, при якому ступінь десульфурації досягає 95% (табл. 2.8).

Зокрема, авторами показано закономірності процесу десульфурації під час виплавки киснево-конвертерної сталі в умовах Іскендерунського металургійного комбінату (İsdemir, Туреччина) (табл. 2.9). В кисневому конвертері вміст сірки контролюється до мінімуму в 20 ррт.

Таблиця 2.7 – Параметри десульфурації сталі на УПК в умовах ВАТ «Білоруський металургійний завод» [34]

Режим продування	Середній вміст сірки у пробі, % мас.					Швидкість десульфурації, ppm/хв	Ступінь десульфурації**, %			
	11	51	31	32	92		11-51	51-32	32-92	11-92*
Поверхнєве продування сумішшю «TURBO-KALK»	0,0525	0,0473	0,0453	0,0256	0,0163	$\frac{4,2}{3,9}$	6,4	21,1	29,1	59,3
Поверхнєве продування сумішшю ІРС-2	0,052	0,049	0,045	0,038	0,025	$\frac{4,5}{3,9}$	5,5	21,8	19,6	51,9
Поглиблене продування сумішшю ІРС-2	0,053	0,047	0,043	0,034	0,023	$\frac{5,5}{5,1}$	10,6	28,0	30,1	55,0
Порівняльний режим (без продування)*	0,049	0,045	0,042	0,036	0,029	$\frac{3,8}{3,8}$	8,4	18,6	19,2	40,2

**Примітка:** \* В якості порівняння використовували масив у 500 плавок.

\*\* У чисельнику – середня на УПК, у знаменнику – середня за час позапічної обробки.

Таблиця 2.8 – Оцінка ступеня десульфурації гарячого металу в різних металургійних агрегатах [9]

Найменування агрегату, в якому відбувається десульфурація	Ступінь десульфурації в умовах металургійних підприємств, %	
	Середній світовий показник	Іскендерунський металургійний комбінат
Доменна піч	80-90	65
УДЧ	70-95	85
Кисневий конвертер без попередньої УДЧ	20-30	60
Кисневий конвертер з попередньою УДЧ	-	-9 (біля 20 ppm)
Установка «піч-ківш»	30-90	42



Таблиця 2.9 – Технологічні показники десульфурації гарячого металу в умовах Іскендерунського металургійного комбінату [9]

Технологічний показник	Значення
Число стендів для обробки, шт.	3
Металургійний реактор (об'єкт)	відкритий ківш (завантажувальний)
Кількість гарячого металу, т	180
Висота ковша над рівнем металу, мм	400
Температура гарячого металу, °С	1350
Початковий вміст сірки, ppm	1,5
Кінцевий вміст сірки, ppm	70 % ≤100, 30 % ≤500
Реагент для десульфурації:	
магній	Mg97
карбід кальцію	КА70С
оксид кальцію	власного виробництва
газ-носії	азот
Реагент для десульфурації після спільного вдування:	
магній	Mg97
оксид кальцію	власного виробництва
газ-носії	азот
Продуктивність :	
добова, т/добу	11
річна, млн т/рік	4

Таким чином, аналіз світових показників ступеня десульфурації по металургійним переділам [35] показав, що у доменній печі видаляється лише до 90 % сірки, на УДЧ від 70 до 95%, у сталеплавильному агрегаті (кисневому конвертері або електросталеплавильній печі) до 30% та позапічній обробці до 90%.

Тому на сьогодні простежуються можливості отримання наднизького вмісту сірки в готовому металі (<0,005 % S), використовуючи технологічні комплекси «УДЧ – сталеплавильний агрегат» та «УДЧ – сталеплавильний агрегат – УПК», які дозволяють забезпечувати оптимізацію витрат на виробництво сталі, розширювати сортамент дефіцитних марок сталей, знизити шкідливий на негативний вплив металургійного виробництва на навколишнє середовище.

## 2.2 Висновки

1. Розглянуто закордонний досвід десульфурації металу на прикладі металургійних підприємств Російської Федерації (зокрема, АС «ЄВРАЗ Нижньотагільський металургійний комбінат», ПАТ «Северсталь», ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат»), Молдови (зокрема, ВАТ «Молдавський металургійний завод», Узбекистан (зокрема, АТ «Ташкентський механічний завод»), Білорусії (зокрема, ВАТ «Білоруський металургійний завод») та Туреччини (зокрема, Іскендерунського металургійного комбінату (İsdemir)).

### 3 УКРАЇНСЬКИЙ ДОСВІД ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ ТА СТАЛІ

#### 3.1 Аналіз технологічних аспектів десульфурації металу в умовах українських металургійних підприємств

Одним із шляхів інтенсифікації процесу десульфурації сталі на установці «під-ківш» є збільшення кратності шлаку. Однак при збільшенні кількості рафінувального шлаку зростають витрати матеріалів на його формування, а також витрати електроенергії на нагрів та розплавлення шлакоутворюючих матеріалів. Підібравши оптимальний хімічний склад рафінувальні шлаку та глибоко розкислив метал, можна значною мірою підвищити коефіцієнт розподілу сірки між металом і шлаком, тобто провести більш глибоку десульфурацію. Так в умовах ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь»» є можливість забезпечити стабільну десульфурацію металу в УПК за допомогою високоосновного розкисленого шлаку (табл. 3.1) [36].

Таблиця 3.1 – Хімічний склад ковшових шлаків в умовах ПрАТ «МК «Азовсталь»» [36]

Момент відбору проби	Вміст у шлаку, %					Основність
	CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO+MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	
До обробки на УПК	47	14	3,6	23	5	3,9
Після обробки на УПК	47	12	0,7	27	6	4,4

Для вивчення кінетики процесу десульфурації авторами роботи [37] були проведені промислові дослідження в киснево-конвертерному цеху ПрАТ «МК «Азовсталь»» при виплавці сталі 17Г1СУ в 350-тонних конвертерах за різними варіантами обробки металу в сталерозливних ковшах. Всього було проведено 1456 плавок: 460 – при обробці СШ, 271 – при обробці твердою ТШС, 630 – при використанні спільно СШ та ТШС, а також 94 – без обробки СШ та ТШС. При обробці сталі в ковші використовували синтетичний шлак складу: 47–52 % CaO; 32–39 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3–7 % SiO<sub>2</sub>, 10–14 % MgO, до 1,5 % MnO

+ FeO, 4–6 % TiO<sub>2</sub>, до 0,035 % S та тверду шлакоутворюючу суміш (фракції до 5 мм), що складається з 76–78 % вапна (до 0,05 % S) та 22–24 % плавикового шпату (до 0,1 % S). Порівняльний аналіз ефективності десульфурації різних варіантів в зіставленні з варіантом, коли метал нічим не оброблявся, показав, що кількість вилученої з металу сірки при обробці його твердою шлакоутворюючою сумішшю, синтетичним шлаком, спільно шлаком і сумішшю зростає в 1,36; 2,1 і 2,46 рази відповідно. Методом кореляційного аналізу виявлено, що питома кількість вилученої сірки при застосуванні ТШС в 14 разів вище, ніж при застосуванні СШ (при їх роздільному застосуванні).

Значний інтерес представляють дослідження десульфурації металу в технологічному комплексі «Установка десульфурації чавуну – конвертер» [38]. Аналіз виконано з використанням даних по 145 плавках поточного виробництва, проведеним в киснево-конвертерних цехах з конвертерами ємністю 130 та 140 т, що працюють за технологією з комбінованою продувкою при вдування кисню зверху і подачею нейтрального газу через донні дутьєві пристрої. Основні технологічні показники киснево-конвертерної плавки приведено у табл. 3.2.

Авторами показано, що в умовах роботи з використанням знесірченого чавуну в металі на випуску з конвертера вміст сірки може виявитися вище, ніж в вихідному чавуні, що пов'язано з надходженням сірки в конвертерну ванну з іншими шихтовими матеріалами. Тому в умовах технологічного комплексу «УДЧ – конвертер» при виробництві низькосірчистих сталей головним завданням є збереження досягнутого на УДЧ вмісту сірки шляхом видалення шлаку після позапічної обробки, спеціального відбору та скорочення кількості металевих брухту.

Практична оцінка можливостей десульфурації металу в технологічного комплексу «УДЧ – конвертер – установка «під-ківш»» для забезпечення отримання низькосернистої (менше 0,01 % сірки) сталі представлена авторами роботи [39]. Дослідження виконано на основі аналізу 41-ї плавки кисневого конвертера ємністю 100 т з комбінованою продувкою. Авторами показано, що

виплавка сталі з вмістом сірки  $\leq 0,01$  % може бути здійснена з використанням глибоко знесірченого чавуну ( $< 0,005$  % сірки) без ковшового шлаку і низькосірчистого металевого брухту, або знесірчених до рівня  $0,01$  % сірки чавуну та подальшої обробки сталі на УПК.

Таблиця 3.2 – Технологічні показники технологічного комплексу «УДЧ – конвертер» [38]

	Технологічний показник	Значення	
		min	max
1	Маса рідкого чавуну, кг	71550	83350
2	Маса металевого брухту, кг	20200	28940
3	Маса твердого чавуну, кг	10000	17000
4	Маса окотишів, кг	211	1900
5	Витрата руди, кг	–	3068
6	Витрата вапна, кг	3604	15865
7	Витрата $O_2$ , м <sup>3</sup> /плавку	4552	5655
8	Температура чавуну, °С	1250	1370
9	Температура металу на одній повалці, °С	1570	1746
10	Температура металу на випуску, °С	1582	1680
11	Маса рідкої сталі, кг	87099	94901

Для умов киснево-конвертерному цеху ПрАТ «МК «Азовсталь»» розроблена технологія отримання сталі з масовою часткою сірки  $0,003$ – $0,005$  %, із застосуванням порошкових дротів з різними наповнювачами. Дана технологія включає в себе наступні операції [40]:

- десульфурація чавуну в заливальних ковшах магнійвмісними порошковими проволочками;
- витримка чавуну в ковші не менше 15 хв. і повне скачування шлаку;
- повне відсічення конвертерного шлаку;
- наведення в ковші шлаку з ТШС на основі  $CaO$ ,  $CaF_2$  та  $Al_2O_3$ ;
- обробка металу на установці доведення сталі в ковші силікокальцієвим порошковим дротом з витратою  $1,3$ – $1,5$  кг/т силікокальцію (зокрема, марок СК-25, СК-30) і продування сталі аргоном не менше 15 хв.;
- остаточне модифікування сталі в проміжному ковші машини

безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) порошковим дротом по ходу розливки з витратою 0,2–0,5 кг/т силікокальцію.

Для умов ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Дзержинського» розроблена методика вибору оптимального складу шлаку-десульфуратора в умовах обробки напівпродукту трубних марок сталі (09Г2С, 20ТР, 45ТР та ОС, LF2) на УКП [41]. У дослідженнях визначено граничні умови параметрів шлаку, а також співвідношення  $\text{CaO}/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$  та  $\text{FeO}+\text{MnO}$ , що визначають його сіркопоглинальну здатність і забезпечують виплавку якісного за вмістом сірки металу трубних марок сталі.

Оцінка процесу десульфурації металу на 60-ти та 100-ти тонних УПК в умовах ВАТ «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод» та ТОВ «Електросталь» приведена у роботі [42].

Розроблена технологія десульфурації металу на УПК з спільним використанням ТШС (56,5–59,73 %  $\text{CaO}$ , 24,93–25,81 %  $\text{SiO}_2$ , 8,1–9,38 %  $\text{MgO}$ , 3,89–5,99 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0,32–0,5 %  $\text{MnO}$ , 1,87–2,01 %  $\text{Fe}_{\text{ag}}$ , 0,17–0,2 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , 0,12–0,15 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  та 0,22–0,29 %  $\text{S}$ ) і силікокальцієвого дроту марки СК30 (вводили у кількості 0,1–0,13 % від маси металу) дозволяє отримувати вміст сірки в сталі менше 0,01 %. Дані промислово-дослідних плавок підтверджують гіпотезу адитивного впливу «дифузного» та «осадового» механізмів на процес десульфурації. При цьому частка «дифузійного» механізму становить 70–80 %, а «осадового» – 20–30 %.

### 3.2 Висновки

1. Розглянуто український досвід десульфурації металу на прикладі ПрАТ «МК «Азовсталь»», ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Дзержинського», ВАТ «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод» та ТОВ «Електросталь».

## 4 АНАЛІТИЧНО-РОЗРАХУНКОВА ОБРОБКА ПОКАЗНИКІВ ДЕСУЛЬФУРАЦІЇ ЧАВУНУ

### 4.1 Аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при застосуванні різних реагент-десульфураторів

У роботі приведено аналітично-розрахункову обробку відомих експериментальних та розрахункових даних залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки при застосуванні реагент-десульфураторів на основі магнію, зокрема, гранульованого магнію (з вмістом  $> 98,9\%$  Mg та гранулами у сферичній формі діаметром 0,5–1,6 мм); пасивованого магнію у шматках (фракції до 3 мм); порошкового магнієвого дроту; суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна (з вмістом  $> 94\%$  CaO,  $< 0,04\%$  S та розміром частинок до 100 мкм).

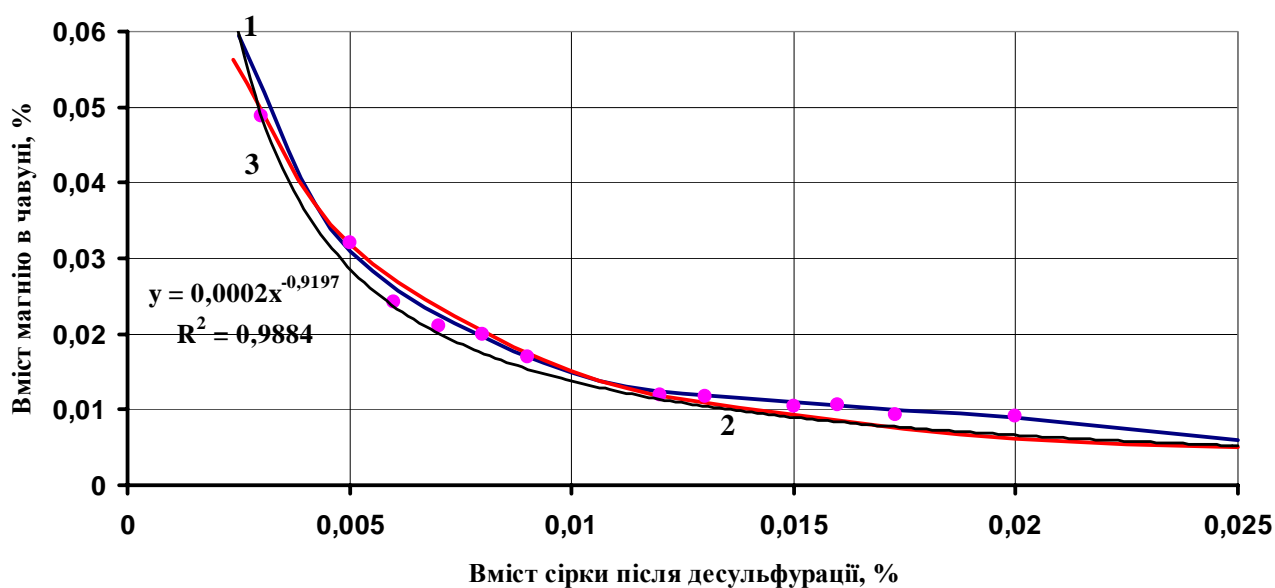
Експериментальні (фактичні) данні вмісту сірки після десульфурації при застосуванні реагент-десульфураторів на основі магнію були взяті з досліджень роботи [43], в якій запропоновано методологію вибору найбільш раціонального процесу рафінування чавуну, що враховує як найбільш високу величину ступеня засвоєння магнію, так і вміст сірки після десульфурації ([S]) та вміст магнію в чавуні ([Mg]) після завершення процесу обробки (рафінування) чавуну у ковші.

Отримані результати дослідження по відношенню фактичних та розрахункових рівноважних значень [S] та [Mg] поділилися на три групи:

– технічні процеси вдування чистого магнію (без додавання різноманітних добавок) в струмені різних інжекційних газів, для яких характерна висока ступінь засвоєння магнію (від 85 % до 97 %), практична відповідність розрахункових та практичних значень [S] та [Mg] в інтервалі вмісту сірки 0,002–0,025 % (рис. 4.1, крива 1);

– процеси вдування порошкових магнієвмісних сумішей та варіанти

технології вдування гранульованого магнію, коли забезпечується глибока десульфурація чавуну ( $< 0,004 \% S$ ) та фактичні значення  $[Mg]$  нижче рівноважних (рис. 4.2, крива 1);



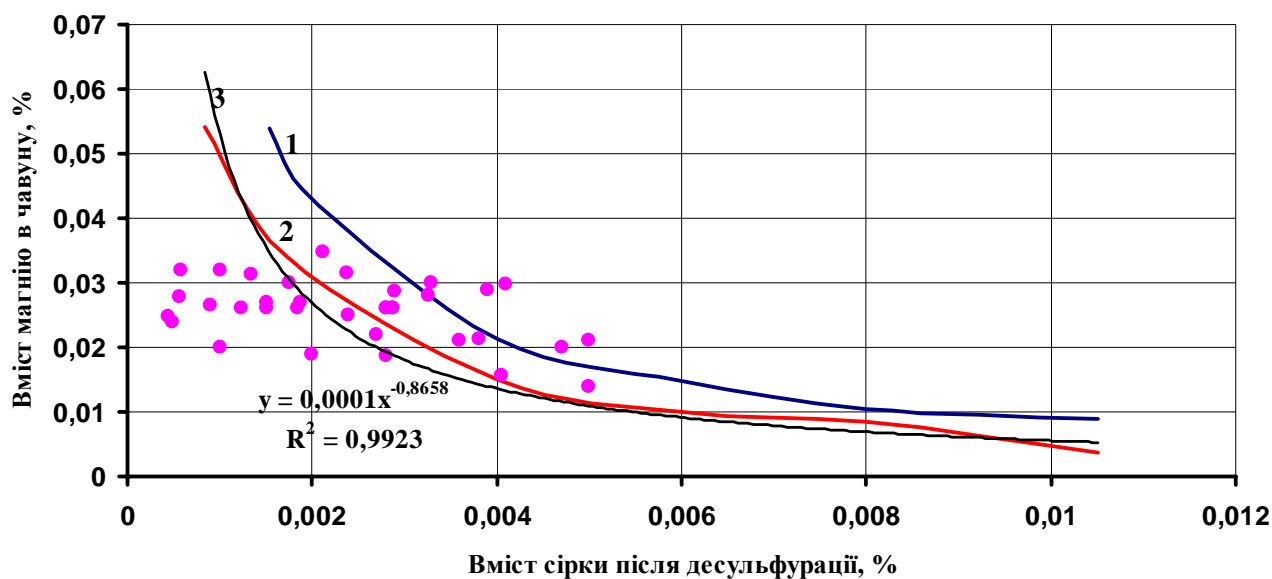
– експериментальні данні роботи [43]; 1 – рівноважні розрахункові данні роботи [43]; 2 – аналітично-розрахункова модель; 3 – лінія тренду кривої 2

Рисунок 4.1 – Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну в 100 тонних доменних ковшах при обробці гранульованим магнієм через фурму з випарником на виході ( $T_{\text{чавуну}} = 1410^{\circ}C$ )

– технологічна схема рафінування чавуну може мати недостатньо стійкий характер, так як при визначних несприятливих умовах можливо протікання процесів ресульфурації за рахунок приближення системи  $[Mg] - [S]$  до рівноважної, що обумовлює необхідність введення визначних меж в умовах промислової реалізації цих процесів десульфурації чавуну; перевищення фактичних значень  $[Mg]$  після десульфурації (рис. 4.3, крива 1 та рис. 4.5, крива 1) над рівноважними розрахунковими, тобто здійснення цих процесів – процеси обробки чавуну магнієвими композиціями у шматках, порошковим магнієвим дротом та порошковими магнієвими сумішами, для яких характерна невисока ступінь засвоєння магнію (22–47 %) та супроводжується



необхідністю більшого насичення чавуну магнієм, більшою його питомою витратою та, відповідно, більшими матеріальними витратами.



· – експериментальні данні роботи [43]; 1 – рівноважні розрахункові данні роботи [23]; 2 – аналітично-розрахункова модель; 3 – лінія тренду кривої 2

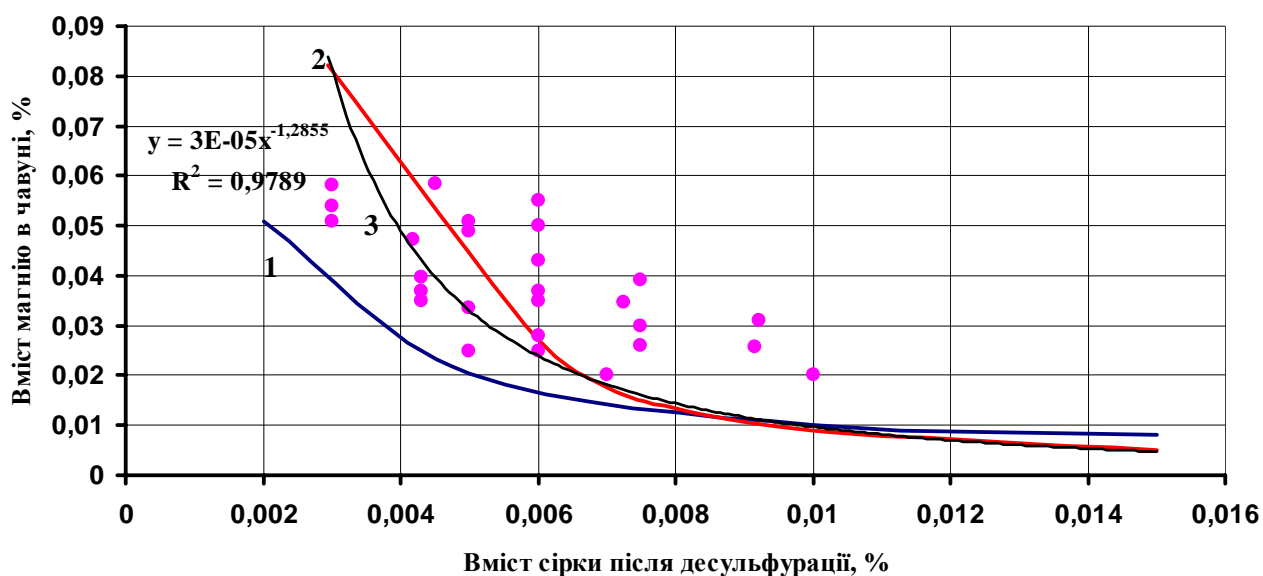
Рисунок 4.2 – Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну в 300-тонних заливальних ковшах при обробці гранульованим магнієм ( $T_{\text{чавуну}} = 1350^{\circ}\text{C}$ ) (супер-глибока десульфурація чавуну)

Обробку запропонованих нами аналітичних залежностей проводили кореляційно-регресійним методом в програмі Excel з оцінкою коефіцієнту детермінації  $R^2$  за допомогою статичної регресії згідно рівняння  $y = ax^b$ . Величина достовірності апроксимації відображала близькість значення лінії тренду до фактичних даних.

Запропонована нами у роботі аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації в 100-тонних доменних ковшах при застосуванні в якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію показала можливість досягнення значення вмісту сірки після десульфурації чавуну до 0,003 % (рис. 4.1, крива 2), що в 1,14–1,25 рази нижче рівноважних розрахункових даних роботи [43]. Отримана аналітично-

розрахункова модель описує на 98,84 % лінію статечної регресії (рис. 4.1, крива 3).

При обробці гранульованим магнієм чавуну в 300-тонних заливальних ковшах аналітично-розрахункова обробка показала, що вміст сірки після десульфурації чавуну досягає значень менше 0,002 % (рис. 4.2), що вказує на супер-глибоку десульфурацію ( $< 0,004$  % S) та в 1,1–1,6 рази нижче рівноважних розрахункових даних роботи [23]. Так, наприклад, при 0,02 % Mn в чавуні значення розрахункового вмісту сірки після десульфурації дорівнює 0,0035 % (рис. 4.2, крива 1), а згідно аналітично-розрахунковій моделі вміст сірки досягає 0,0045 % (рис. 4.2, крива 2). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 99,232 % лінію статечної регресії (рис. 4.2, крива 3).



· – експериментальні данні роботи [43]; 1 – рівноважні розрахункові данні роботи [23]; 2 – аналітично-розрахункова модель; 3 – лінія тренду кривої 2

Рисунок 4.3 – Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при обробці пасивованим магнієм у шматках ( $T_{\text{чавуну}} = 1350$  °C)

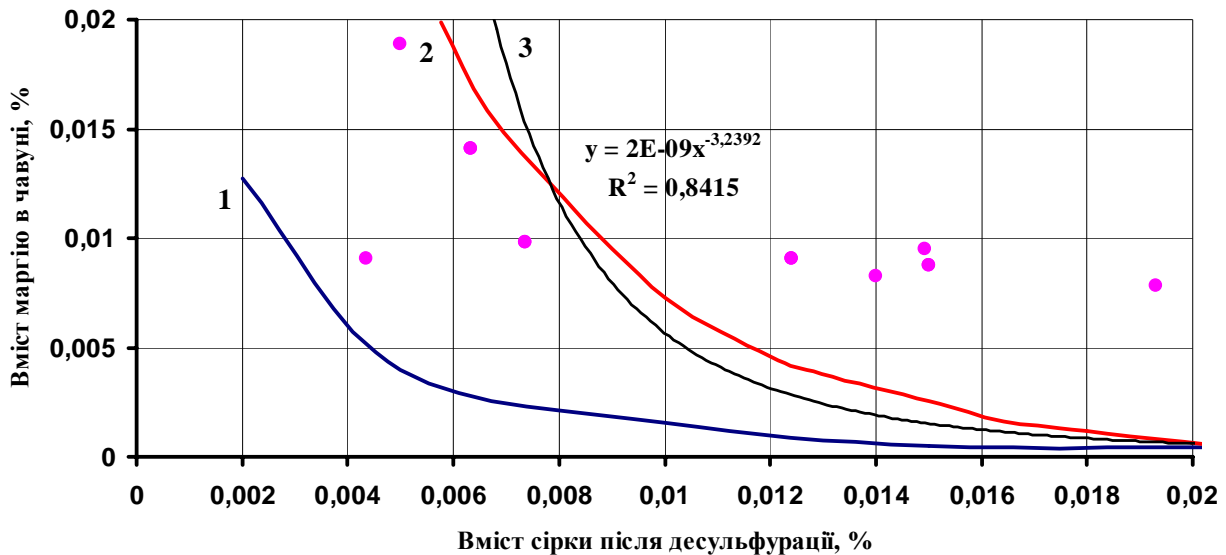
Аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-

десульфуратора пасивованого магнію у шматках показала, що запропонована аналітично-розрахункова модель знаходиться вище рівноважних розрахункових даних роботи [43] (рис. 4.3, криві 1 та 2) та описує на 97,89 % лінію статечної регресії (рис. 4.3, крива 3).

При застосуванні обробки порошковим магнієвим дротом запропонована аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну показала на досягнення вмісту сірки в чавуні до 0,003%, що свідчить про процес супер глибокої десульфурації чавуну. Отримана аналітично-розрахункова модель знаходиться вище рівноважних розрахункових даних роботи [43] (рис. 4.4, криві 1 та 2) та описує на 84,15 % лінію статечної регресії (рис. 4.4, крива 3).

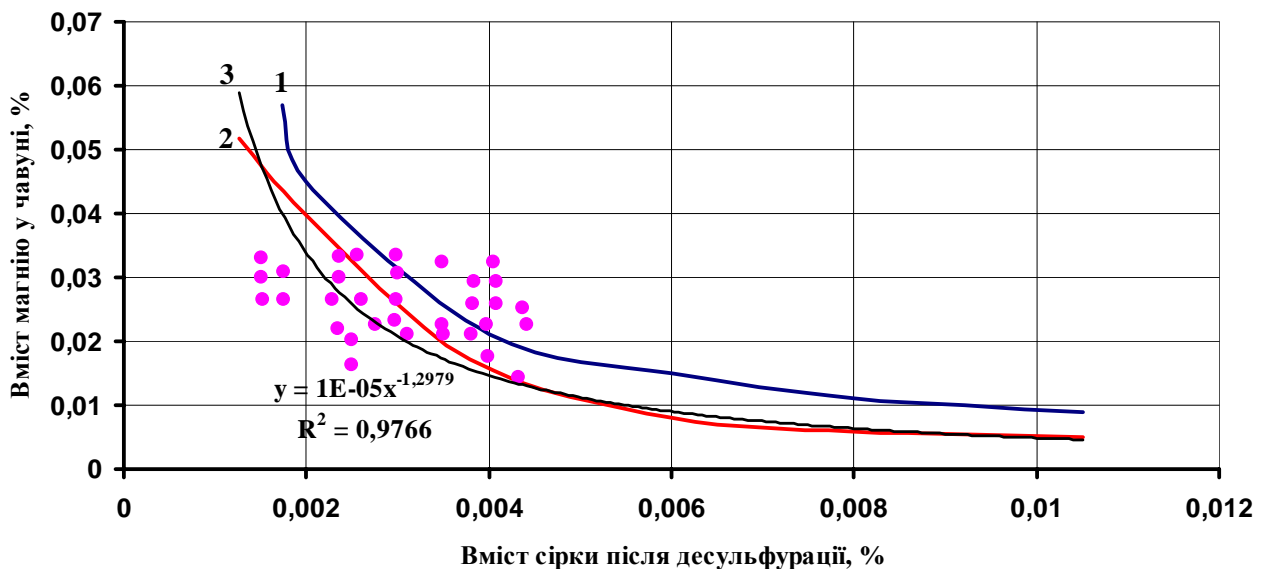
Аналітично-розрахункова обробка залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-десульфуратора сумішшю гранулованого магнію та флюїдизованого вапна показала можливість зниження вмісту сірки після десульфурації в 1,1–1,3 рази нижче рівноважних розрахункових даних роботи [43]. Так, наприклад, при 0,02 % Mn в чавуні значення розрахункового вмісту сірки після десульфурації дорівнює 0,0039 % (рис. 4.5, крива 1), а згідно аналітично-розрахунковій моделі вміст сірки досягає 0,0035 % (рис. 4.5, крива 2). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 97,89 % лінію статечної регресії (рис. 4.5, крива 3).

Таким чином, порівняльний аналіз вмісту магнію в чавуні при застосуванні різних технологій позадоменної десульфурації чавуну (рис. 4.1–4.5) показав, що найбільші значення вмісту магнію в чавуні спостерігаються при обробці пасивованим магнієм у шматках (0,05 % за рівноважними розрахунковими даними (рис. 4.3, крива 1) та 0,082 % згідно запропонованої аналітично-розрахункової моделі (рис. 4.3, крива 2)), а найменші при обробці порошковим магнієвим дротом (0,001 % за рівноважними розрахунковими даними (рис. 4.4, крива 1) та 0,0015 % згідно запропонованої аналітично-розрахункової моделі (рис. 4.4, крива 2)).



· – експериментальні данні роботи [43]; 1 – рівноважні розрахункові данні роботи [43]; 2 – аналітично-розрахункова модель; 3 – лінія тренду кривої 2

Рисунок 4.4 – Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при обробці порошковим магнієвим дротом ( $T_{\text{чавуну}}=1260^{\circ}\text{C}$ )



· – експериментальні данні роботи [43]; 1 – рівноважні розрахункові данні роботи [43]; 2 – аналітично-розрахункова модель; 3 – лінія тренду кривої 2

Рисунок 4.5 – Залежність вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при обробці сумішшю гранульованого магнію та флюїдизованого вапна ( $T_{\text{чавуну}}=1330^{\circ}\text{C}$ )

Таким чином, запропонована в роботі [44] аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні різних реагент-десульфураторів показала можливість досягти вмісту сірки після десульфурації чавуну до 0,003 %.

#### **4.2 Аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні різних реагент-десульфураторів**

Ефективність результатів видалення сірки з розплаву визначається наступними показниками: концентрацією сірки в розплаві; швидкістю процесу десульфурації; коефіцієнтом розподілу сірки між шлаком і металом; ступенем десульфурації, ступенем використання реагент-десульфуратору на десульфурацію чавуну.

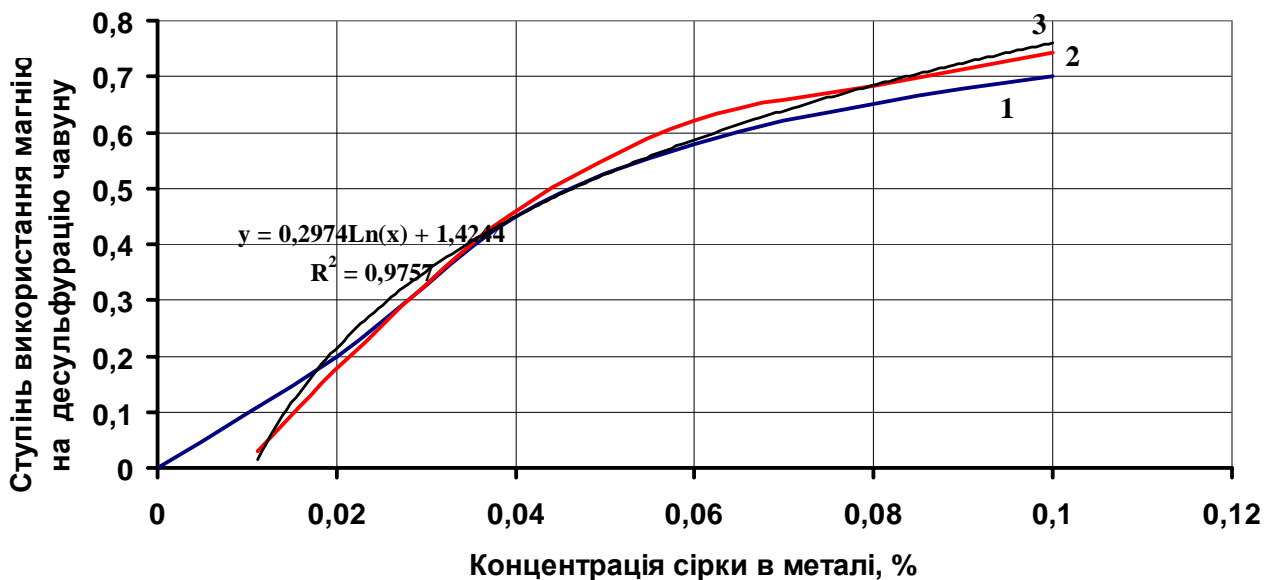
У роботі приведено аналітично-розрахункову обробку відомих експериментальних та розрахункових даних залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуна від концентрації сірки при застосуванні в якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію та суміші гранульованого магнію й флюїдизованого вапна.

Обробку аналітичних залежностей проводили кореляційно - регресійним методом в програмі Excel з оцінкою коефіцієнту детермінації  $R^2$  за допомогою логарифмічної регресії. Величина достовірності апроксимації відображала близькість значення лінії тренду до фактичних даних.

У роботах [45, 46] проаналізовано результати промислових досліджень десульфурації передільного та природно-легованого чавуна з використання у якості реагент-десульфуратора гранульованого магнію. Аналіз теоретичних, лабораторних та промислових досліджень десульфурації чавуну магнієм показав, що змінення розчинності магнію у чавуні не має суттєвого впливу на ефективність десульфурації металу, при цьому при інжектуванні

гранульованого магнію у чавун з використанням в якості газа-носія аргону або азоту підвищення ефективності використання десульфуратора може бути досягнуте в результаті зниження концентрації магнію у транспортувальному газі [45].

Результати залежності ступеня використання магнію на десульфурацію природно-легованого хромонікелевого чавуна (електропічного феронікелю ТОВ «Побузький феронікелевий комбінат» (1,9–3,0 % С; 1,2–2,2 % Cr; 1,6–6,6 % Si; 3,9–6,0 % Ni; 0,2–0,4 % Co; 0,09–0,14 % P; 0,2–0,3 % Mn; 0,024–0,119 % S)) в 30-тонних заливальних ковшах при обробці гранульованим магнієм, який вводили в метал через фурму з випарною камерою з одночасною незалежною подачею в неї азоту [45, 46], описують модель «Logarithmic-X» (рис. 4.6, крива 1).



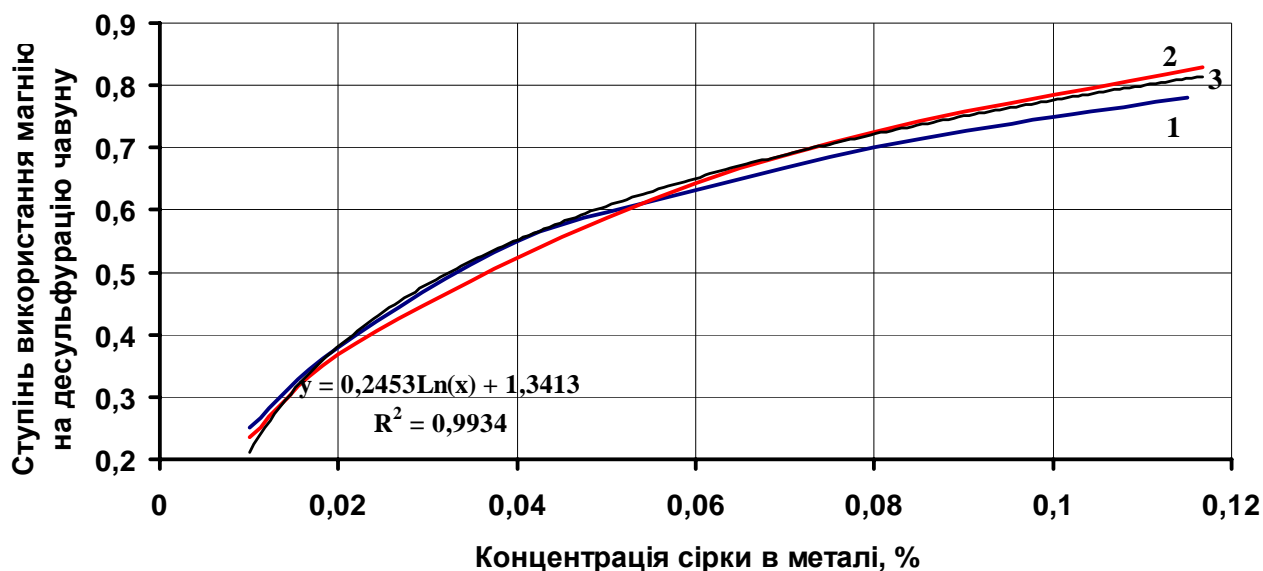
1 – дослідження работ [45, 46]; 2 – запропонована аналітично-розрахункова модель; 3 – лінія тренду кривої 2

Рисунок 4.6 – Залежність ступеня використання магнію на десульфурацію природно-легованого чавуну при застосуванні гранульованого магнію від концентрації сірки в металі

Запропонована аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня

використання магнію на десульфурацію чавуну від концентрації сірки в металі показала можливість досягнення значення ступеня використання магнію в межах до 0,74 (рис. 4.6, крива 2). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 97,57 % лінію логарифмічної регресії (рис. 4.6, крива 3).

Результати обробки переробного чавуна з вдуванням повітря в випарну камеру та без нього показано на рис. 4.7, крива 1. Автори роботи [45] стверджують, що при більш високих значеннях вмісту сірки середні значення ступеня використання магнію при вдуванні повітря у випарну камеру та без нього практично не відрізняються, тобто обробка чавуну сумішшю пара магнію та азоту не лише не погіршувала ефективність використання десульфулятора, але і дозволяла компенсувати окислення частини магнію киснем повітря.



б

1 – дослідження работ [45, 46]; 2 – запропонована аналітично-розрахункова модель; 3 – лінія тренду кривої 2

Рисунок 4.7 – Залежність ступеня використання магнію на десульфурацію переробного чавуну при застосуванні гранульованого магнію від вмісту сірки в металі

Запропонована аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня використання магнію на десульфурацію чавуна від концентрації сірки показала можливість досягнення значення ступеня використання магнію в межах до 0,83 (рис. 4.7, крива 2). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 99,34 % лінію логарифмічної регресії (рис. 4.7, крива 3).

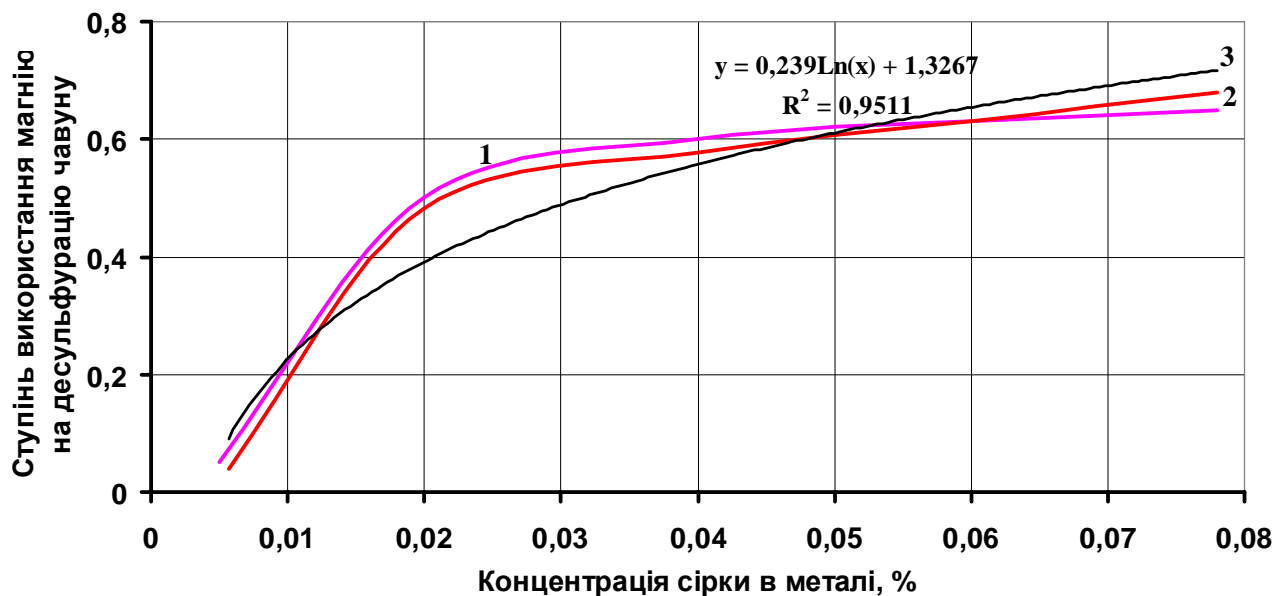
Для умов киснево-конвертерного цеху ВАТ «Алчевський металургійний комбінат» при продувці чавуна в 300-тонном заливальному ковші в потоці аргону сумішшю гранульованого магнію марки МГП-99 (згідно з ТУ 1714-004-43055164-2004) фракції 200–1000 мкм та порошкоподібного вапна ( $\geq 94$  % CaO та  $\leq 0,04$  % S) (згідно з ТУ У 26.5-00193714-042-2001) фракції менше 100 мкм, флюїдизованого силіконовим маслом у процесі помелу, в роботах [47, 48] показано, що при глибокій десульфурації чавуну з вихідним вмістом сірки 0,020–0,030 % вапно, що вдувається спільно з магнієм в метал, не має суттєвого впливу на результати обробки.

Представлена у роботі [48] залежність ступеня використання магнію на десульфурації чавуну при вдуванні суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна від концентрації сірки в металі описує модель «S-curve» (рис. 4.8, крива 1).

Запропонована аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну від концентрації сірки в металі показала можливість досягнення значення ступеня використання магнію в межах до 0,68 (рис. 4.8, крива 2). Отримана аналітично-розрахункова модель описує на 95,11 % лінію логарифмічної регресії (рис. 4.8, крива 3).

Таким чином, запропонована в роботі [50] аналітично-розрахункова обробка залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні різних реагент-десульфураторів показала на можливість досягти вмісту сірки після десульфурації до 0,005 %.





1 – промислові дослідження роботи [48] (в умовах ВАТ «Алчевський металургійний комбінат»); 2 – запропонована аналітично-розрахункова модель [49]; 3 – лінія тренду кривої 2

Рисунок 4.8 – Залежність ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну в 300-т заливальних ковшах при вдуванні суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна від концентрації сірки в металі

### 4.3 Висновки

1. На основі відомих експериментальних (фактичних) та розрахункових даних запропоновано аналітично-розрахункову обробку залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуна при застосуванні різних реагент-десульфураторів на основі магнію (гранульованого магнію, пасивованого магнію у шматках, порошкового магнієвого дроту, суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна). Запропонована аналітично-розрахункова модель показала на можливості досягнення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну до 0,003%.

2. На основі відомих експериментальних та розрахункових даних запропоновано аналітично-розрахункову обробку залежності ступеня

використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні різних реагент-десульфураторів та показано, що:

– при аналізі залежності ступеня використання магнію на десульфурацію природно-легованого хромонікелевого чавуну в 30-тонних заливальних ковшах при обробці гранульованим магнієм отримана аналітично-розрахункова модель описує на 97,57 % лінію логарифмічної регресії та дозволяє досягти значення ступеня використання магнію в межах до 0,74;

– при аналізі залежності ступеня використання магнію на десульфурацію переробного чавуну з вдуванням повітря в випарну камеру та без нього отримана аналітично-розрахункова модель описує на 99,34 % лінію логарифмічної регресії та дозволяє досягти значення ступеня використання магнію в межах до 0,83;

– при аналізі залежності ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну в 300-т заливальних ковшах при вдуванні суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна отримана аналітично-розрахункова модель описує на 95,11 % лінію логарифмічної регресії та дозволяє досягти значення ступеня використання магнію в межах до 0,68.

3. Подальший розвиток досліджень полягає в пошуку методів збільшення ступеня десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-десульфуратора для позадоменної десульфурації натрій- та кальцієвмісних матеріалів, зокрема, карбонату натрію, карбиду кальцію та ціанаміду кальцію.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В умовах світових металургійних підприємств для ковшової десульфурзації чавуну найбільш затребуваним можна вважати процес спільної інжекції магнію та вапна або карбиду кальцію (процес «Co-injection»). При цьому акцент робиться на технологічність процесу, вартість реагент-десульфуратора та простоту використання.

2. Аналіз існуючих технологій позадоменної десульфурзації чавуну з застосуванням різних реагент-десульфураторів показав, що найбільш ефективними технологіями є: інжекція суміші на основі магнію (ступінь десульфурзації 95–99 %); інжекція сумішей на основі вапна та магнію (ступінь десульфурзації 95–98 %); обробка за технологією глибинного дугового відновлення (ступінь десульфурзації 90–98 %); обробка екзотермічними брикетами (ступінь десульфурзації 65–85 %).

3. Аналіз світових показників ступеня десульфурзації по металургійним переділам показав, що у доменній печі видаляється лише до 90 % сірки, на УДЧ від 70 до 95%, у сталеплавильному агрегаті (кисневому конвертері або електросталеплавильній печі) до 30% та позапічній обробці до 90 %. Тому на сьогодні простежуються можливості отримання наднизького вмісту сірки в готовому металі ( $<0,005\% S$ ), використовуючи технологічні комплекси «УДЧ – сталеплавильний агрегат» та «УДЧ – сталеплавильний агрегат – УПК», які дозволяють забезпечувати оптимізацію витрат на виробництво сталі, розширювати сортамент дефіцитних марок сталей, знизити шкідливий на негативний вплив металургійного виробництва на навколишнє середовище.

4. Показано, що кінетика десульфурзації сталі залежить від вибору реагент-десульфуратора, хімічного складу шлаку, часу його витримки в ковші, ступеня окислення металу, умов перемішування сталі в ковші та додаткових технологічних операцій обробки металу.

5. Розглянуто закордонний досвід десульфурзації металу на прикладі металургійних підприємств Російської Федерації (зокрема, АС «ЄВРАЗ

Нижньотагільський металургійний комбінат», ПАТ «Северсталь», ПАТ «Магнітогорський металургійний комбінат»), Молдови (зокрема, ВАТ «Молдавський металургійний завод», Узбекистан (зокрема, АТ «Ташкентський механічний завод»), Білорусії (зокрема, ВАТ «Білоруський металургійний завод») та Туреччини (зокрема, Іскендерунського металургійного комбінату (İsdemir)).

6. Розглянуто український досвід десульфурації металу на прикладі ПрАТ «МК «Азовсталь»», ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Дзержинського», ВАТ «Інтерпайп Нижньодніпровський трубопрокатний завод» та ТОВ «Електросталь».

7. На основі відомих експериментальних (фактичних) та розрахункових даних запропоновано аналітично-розрахункову обробку залежності вмісту магнію в чавуні від вмісту сірки після десульфурації чавуну при застосуванні різних реагент-десульфураторів на основі магнію (гранульованого магнію, пасивованого магнію у шматках, порошкового магнієвого дроту, суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна). Запропонована аналітично-розрахункова модель показала на можливості досягнення вмісту сірки після позадоменної десульфурації чавуну до 0,003 %.

9. На основі відомих експериментальних та розрахункових даних запропоновано аналітично-розрахункову обробку залежності ступеня використання магнію на десульфурації чавуну від концентрації сірки в металі при застосуванні різних реагент-десульфураторів та показано, що:

– при аналізі залежності ступеня використання магнію на десульфурацію природно-легованого хромонікелевого чавуну в 30-тонних заливальних ковшах при обробці гранульованим магнієм отримана аналітично-розрахункова модель описує на 97,57 % лінію логарифмічної регресії та дозволяє досягти значення ступеня використання магнію в межах до 0,74;

– при аналізі залежності ступеня використання магнію на десульфурацію переробного чавуну з вдуванням повітря в випарну камеру та без нього отримана аналітично-розрахункова модель описує на 99,34 % лінію

логарифмічної регресії та дозволяє досягти значення ступеня використання магнію в межах до 0,83;

– при аналізі залежності ступеня використання магнію на десульфурацію чавуну в 300-т заливальних ковшах при вдуванні суміші гранульованого магнію та флюїдизованого вапна отримана аналітично- розрахункова модель описує на 95,11 % лінію логарифмічної регресії та дозволяє досягти значення ступеня використання магнію в межах до 0,68.

10. Подальший розвиток досліджень полягає в пошуку методів збільшення ступеня десульфурації чавуну при застосуванні в якості реагент-десульфуратора для позадоменної десульфурації натрій- та кальцієвмісних матеріалів, зокрема, карбонату натрію, карбїду кальцію та ціанамїду кальцію.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лемешко М. А. Разработка рациональных режимов десульфурации стали в агрегате ковш-печь с использованием моделей нечеткой логики : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.06 / ФГБОУ ВПО Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2012. 128 с.
2. Вергун А. С., Шевченко А. Ф., Кисляков В. Г., Корченко В. П. Технические особенности выплавки низкосернистой стали с использованием обессеренного магнием чугуна. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. 2008. Вип. 18. С. 85–90.
3. Воденнікова О. С., Головков П. В. Сучасний досвід десульфурзації сталі. *Науково-технічний журнал «Матеріалознавство та обробка металів»*. 2021. № 4(100). С. 33–44. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2021.04.033>
4. Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ–конвертер» / А. С. Вергун, В. Г. Кисляков, В. Ф. Поляков и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. 2007. Вип. 14. С. 112–119.
5. Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ–конвертер–КП» / А. С. Вергун, В. Г. Кисляков, В. Ф. Поляков и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. 2007. Вип. 15. С. 99–110.
6. Schrama Frank, Hattum Guido van, Berg Bart van den. The leading not metal desulfurization methods: a comparison between KR, MMI and Co-injection. *Technical contribution to the 46<sup>o</sup> Seminário de Aciaria – Internacional* (August 17th–21st, 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brazil). 2015. pp. 323–332. DOI: <https://doi.org/10.5151/1982-9345-26624>
7. Schrama Frank Nicolaas Hermanus, Beunder Elisabeth Maria, Berg Bart Van den, Boom Rob. Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2017. Vol 44. No 5. pp. 333–343. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1303914>

8. Инжекционная технология для металлургических предприятий.  
URL: <http://docplayer.com/75412085-Inzhekcionnaya-tehnologiya-dlya-metallurgicheskikh-predpriyatiy.html> (дата звернення: 10.02.2022).
9. Buğra Şener, Rainer Hüsken, Jürgen Cappel. Desulfurization Strategies in Oxygen Steelmaking. *Association for Iron & Steel Technology* (April 2013). 2013.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/289440578\\_Desulphurization\\_strategies\\_in\\_oxygen\\_steelmaking](https://www.researchgate.net/publication/289440578_Desulphurization_strategies_in_oxygen_steelmaking)
10. Потапова М. В., Ишмуратов Р. А., Насыров Т. М. Современные технологии внедоменной десульфурации чугуна. *Теория и технология металлургического производства*. 2014. №1(14). С. 26–27.
11. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали : учебник для вузов. Москва : Мир, АСТ, 2003. 528 с.
12. Шевченко А. Ф., Двоскин Б. В., Ткач Н. Т. Создание современных комплексов внепечной десульфурации чугуна гранулированным магнием. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/21074/11-Shevchenko.pdf?sequence=1> (дата звернення: 13.01.2022).
13. Робей Р., Уайтхед М. Внедоменная обработка чугуна с учётом конкретных производственных условий. *МРТ. Металлургическое производство и технологии металлургических процессов*. 2014. №1(2014). С. 16–24.
14. Сігарьов Є. М. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Позаагрегатна обробка розплавів» освітньо-професійної програми підготовки магістрів за напрямом 136 Металургія. Кам'янське : ДДТУ. 2016. 42 с.
15. Stolte G. *Secondary Metallurgy : Fundamentals, Processes, Applications*. Woodhead Publishing : Limited. 2002. 216 p.
16. Внедоменная обработка чугуна. URL: <http://pereosnastka.ru/articles/vnedomennaya-obrabotka-chuguna> (дата звернення: 10.02.2022).
17. Позапічна десульфуріяція рідкого чавуну в контексті завдань

вітчизняної металургії / Л. С. Молчанов, К. Г. Нізяєв, Б. М. Бойченко та ін. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2013. № 2. С. 38–41.

18. Lindström David. A Study on Desulfurization of Hot Metal Using Different Agents : Doctoral thesis. School of Industrial Engineering and Management. Department of Materials Science and Engineering Royal Institute of Technology. SE-100 44 Stockholm. 2014. 43 p.

19. Kumar R. V., Liu J. Research for Using Iron & Steelmaking Zinc Laden Dust to Desulphurize Hot Metal. *Steel research international*. 2010. Vol. 81. No. 10. pp. 847–851. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201000175>

20. Kumar R. V., Liu J. Opportunity for using steelmaking/EAF of BOF laden dust to desulfurise hot metal. *2nd International Slag Valorisation Symposium Leuven*. 2011. pp. 287–298.

21. Kumar R.V., Tailoka F. On the possibility of utilizing zinc oxide for desulphurising hot metal. *Waste Processing & Recycling in Mineral Metallurgical Industries : Conf. of Metallurgists, Canadian Inst. Of Metals. Waste Processing V ed. by Sr. Rao et al.* 2004. pp. 667–674.

22. Способы внедоменной десульфурации чугуна, применяемые на металлургических предприятиях Украины. URL: <https://uas.su/books/srmp/22/razdel22.php> (дата звернення: 10.05.2022).

23. Разливка жидких продуктов доменной плавки по ковшам. URL: [https://studme.org/405012/tehnika/razlivka\\_zhidkih\\_produktoy\\_domennoy\\_plavki\\_kovsham](https://studme.org/405012/tehnika/razlivka_zhidkih_produktoy_domennoy_plavki_kovsham) (дата звернення: 10.05.2022).

24. Комплексные технологии внепечной обработки чугуна и стали. URL: [http://steelcast.ru/iron\\_and\\_steel\\_treatment\\_technologies](http://steelcast.ru/iron_and_steel_treatment_technologies) (дата звернення: 10.05.2022).

25. Установка десульфурации чугуна в ковше. URL: <https://www.azovmash.com/ru/catalog/239> (дата звернення: 10.05.2022).

---

26. Распределение серы по переделам металлургического производства АО «ЕВРАЗ НТМК» / М. В. Савельев, А. С. Ткачев, О. Ю. Шешуков и др. *Промышленное производство и металлургия : материалы междунар. научн.-*



техн. конф. (г. Нижний Тагил, 18–19 июня 2020г.). Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2020. С. 259–265.

27. Чумаков С. М., Зинченко С. Д. Комплексная технология получения низкосернистой стали в ККЦ ОАО «Северсталь». *Труды 5-го Конгресса сталеплавильщиков* (г. Москва, 7–10 октября 1996 г.). Москва, 1999.

28. Основные направления развития конвертерного производства ОАО «Северсталь» / А. А. Степанов и др. *Металлург.* 2005. № 10. С. 43–54.

29. О технологии удаления серы в кислых индукционных печах / Д. А. Лубяной, С. А. Фомкин, А. В. Чёрная металлургия. *Бюллетень научно-технической и экономической информации.* 2019. Т75. №6. С. 689–694. DOI: <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-6-689-694>

30. Федьков А. В., Федьков В. А., Лунёв В. В. Десульфурация чугуна в индукционных печах с основной футеровкой. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* 2009. № 2. С. 154–155.

31. Ушаков С. Н. Разработка технологии производства трубной ультранизкосернистой стали в современном кислородно-конвертерном цехе : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : 05.16.02 / Ушаков Сергей Николаевич; ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Магнитогорск, 2020. 17 с.

32. Парусов Э. В., Сычков А. Б., Сагура Л. В., Чуйко И. Н. Обеспечение сверхнизкого содержания серы при внепечной обработке стали. *Наукові праці ВНТУ.* 2017. № 1. С. 1–6.

33. Турсунов Н. К., Семин А. Е., Санокулов Э. А. Исследование процессов дефосфорации и десульфурации при выплавке стали 20ГЛ в индукционной тигельной печи с дальнейшей обработкой в ковше с использованием редкоземельных металлов. *Чёрные металлы.* 2017. №1. С. 33–40.

34. Пивцаев В. Е., Дьяченко В. И., Проскурин В. А. Десульфурация стали с использованием инжекционной установки «Velko». *Литьё и металлургия.* 2008. №1(45). С. 15–22.

35. Воденнікова О. С., Воденнікова Л. В. Десульфурация сталі: сучасні технології, тенденції та перспективи. *Метал та лиття України*. 2022. № 1(328). С. 42–53.

36. Тарасюк Л. И., Костыря И. Н. К вопросу десульфурации низкокремнистых марок стали на агрегате «ковш-печь». *Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах* : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. (г. Мариуполь, 9–11 сентября 2015 г.). Мариуполь : ПГТУ, 2015. Т 1. С. 100–110.

37. Эффективность десульфурации при применении различных вариантов внепечной обработки стали / П. А. Плохих и др. *Метал та лиття України*. 2020. №1(28). С. 42–47.

38. Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ–конвертер» / А. С. Вергун и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. 2007. Вип. 14. С. 112–119.

39. Десульфурация металла в технологическом комплексе «УДЧ–конвертер–КП» / А. С. Вергун и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. 2007. Вип. 15. С. 99–110.

40. Харлашин П. С., Бакланский В. М., Рассказова Е. Г. Внедоменная десульфурация чугуна. *Университетская наука-2012* : в 3 т. : тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. (г. Мариуполь, 24–27 апреля 2012 г.). Мариуполь : ПГТУ, 2012. Т. 1. С. 97–100.

41. К вопросу выбора оптимального состава шлака-десульфуратора трубных марок стали / Д. Н. Тогобицкая и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : сб. научн. тр. 2014. Вип. 28. С. 170–178.

42. Журавлёва С. В., Паниотов Ю. С., Мамешин В. С. Оценка процесса десульфурации металла на АКП по бивариантному механизму. *Металл и литъє України*. 2015. №2(261). С. 8–11.

43. Рациональный процесс ковшевой десульфурации чугуна реагентами на основе магния / А. Ф. Шевченко, Б. В. Двоскин, А. С. Вергун и др. *Спеціальна металургія : вчера, сьогодні, завтра* : материалы междунар.научн.-

техн. конф. (г. Киев, 8-9 октября 2002г.). Київ : Політехніка, 2002. С. 337–343.

44. Воденнікова О. С., Воденнікова Л. В., Скідін І. Е., Саїтгареев Л. Н., Головков П. В. Позадоменна десульфуріяція чавуну: вибір раціональної технології та аналітично-розрахункова обробка показників десульфуріяції. *Вісник Криворізького національного університету* : збірник наукових праць. 2021. № 53. С. 57–63. DOI: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-57-64

45. Зборщик А. М., Харлашин П. С., Косолап Н. В. Пути повышения эффективности использования магния для внедоменной десульфурации чугуна. *Вісник Приазовського державного технічного університету* : збірник наукових праць. 2014. Вип. 28. С. 7–17.

46. Зборщик А.М. Влияние условий растворения магния в чугуне на эффективность десульфурации металла. *Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах* : материалы VIII Международной научно-технической конференции (г. Мариуполь, 7–9 сентября 2010 г.). Мариуполь : ПГТУ, 2010. С. 102–107.

47. Зборщик А.М. Эффективность использования флюидизированной извести для десульфурации чугуна в 300-т заливочных ковшах / А.М. Зборщик, С.В. Куберский, Г.Я. Довгалюк, В.Н. Беломеря // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Металургія. 2011. Вип. 13 (194). С. 53–60.

48. Десульфуріяція чугуна в кислородно-конвертерном цехе ОАО «Алчевський металургічний комбінат» / А. М. Зборщик, С. В. Куберський, Г. Я. Довгалюк и др. *Металл и литье Украины*. 2010. № 7. С. 9–12.

49 Грибоводов С. С., Аналітично-розрахункова обробка показників позадоменної десульфуріяції С.С. Грибоводов, О.С. Воденнікова, Л.В. Воденнікова. *Молоді вчені 2019 - від теорії до практики* : збірник матеріалів X Міжнародної конференції молодих вчених. Секція 1 «Металургія, машинобудування, металообробка» (м. Дніпро, 7 березня 2019 р.). Дніпро : НМетАУ, ІнІФН, 2019. С. 20–23.

50. Воденнікова О. С., Воденнікова Л. В., Бабошко Д. Ю., Головков П. В. Позадоменна десульфурація чавуну : теоретичні основи, сучасні технології та аналітично-розрахункова обробка показників десульфурації. *Вісник Криворізького національного університету* : збірник наукових праць. 2021. № 53. С. 28–35. DOI: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-28-35