

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО  
ВИРОБНИЦТВА

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**  
**до випускної атестаційної роботи бакалавра**  
**зі спеціальності 136 – Металургія**  
**за освітньо-професійною програмою – Металургія**

**Тема роботи: «Обґрунтування вибору феросплавів для рафінування  
низьковуглецевих сталей еа установці піч-ківш»**

Виконав:  
студент групи МТ-22-2 \_\_\_\_\_ Лехман Д.Р.

Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_ Кассім Д.О.

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ Кассім Д.О.

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Савельєв С.Г.

Кривий  
Ріг 2026 р.

Я, студент, Лехман Дмитро Романович, підтверджую, що дана робота є моєю власною письмовою роботою, оформленою з дотриманням цінностей та принципів етики і академічної доброчесності відповідно до Кодексу академічної доброчесності Криворізького Національного Університету. Я не використовував жодних джерел, крім процитованих, на які надано посилання в роботі.

---

*Дата*

---

*Підпис*

# КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет:** гірничо-металургійний

**Кафедра** металургії чорних металів і ливарного виробництва

**Освітньо-кваліфікаційний рівень:** бакалавр

**Спеціальність:** 136 Металургія

**Затверджую**

Зав. кафедрою \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## **ЗАВДАННЯ**

**на випускню кваліфікаційну роботу студента**

**Лехмана Дмитра Романовича**

- 1. Тема роботи:** Обґрунтування вибору феросплавів для рафінування низьковуглецевих сталей на установці піч-ківш
- 2. керівник роботи:** к.т.н., доцент Кассім Дар'я Олександрівна  
затверджено наказом по КНУ від « 24 » 02 2020 р. № 252сy
- 3. Строк подання роботи студентом** « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 р.
- 4. Вихідні дані до роботи** Тип стану – многоклітьовий безперервний стан. Матеріал заготовки – сталь конструкційна вуглецева. Початкові розміри заготовки – 100×20 мм. Кількість проходів прокатки – 5. Температура нагріву заготовки перед прокаткою – 1150-1200 °С.
- 5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)**

Тип виробництва – конвертерне виробництво сталі з позапічною обробкою. Об'єктом дослідження є процес рафінування низьковуглецевої сталі на установці піч-ківш (LF). Місткість ковша становить 100 т. Початкова температура сталі перед обробкою складає 1580–1620 °С, а кінцева температура після обробки – 1600–1650 °С. Хімічний склад сталі характеризується наступним вмістом основних елементів: вуглець (С) – 0,05–0,10 %, марганець (Mn) – 0,40–0,70 %, кремній (Si) – 0,05–0,25 %. Для позапічної обробки та рафінування сталі використовуються феросплави, зокрема феросиліцій (FeSi), феромарганець (FeMn) та алюміній. Основною метою обробки є розкислення сталі, коригування її хімічного складу, зниження вмісту неметалевих включень, а також забезпечення необхідних механічних та технологічних властивостей готового металу.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розділ 1	доц. Кассім Д.О.		
Розділ 2	доц. Кассім Д.О.		
Розділ 3	доц. Кассім Д.О.		
Розділ 4	доц. Кассім Д.О.		

## 7. Календарний план

№ з/п	Етапи роботи	Термін виконання
1	Літературний огляд сучасних технологій рафінування сталі	
2	Аналіз наукових джерел та виробничого досвіду застосування установки піч-ківш	
3	Дослідження процесів розкислення та рафінування низьковуглецевих сталей	
4	Розрахунок витрат феросплавів при обробці сталі	
5	Аналіз отриманих результатів та технологічні рекомендації	
6	Виконання графічної частини дипломної роботи	
7	Підготовка та захист випускної кваліфікаційної роботи	

Дата видачі завдання: «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 р.

Студент \_\_\_\_\_ Лехман Д.Р.

Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_ Кассім Д.О.

## РЕФЕРАТ

**Кваліфікаційна робота складається з:** вступу, умовних позначень та скорочень, 2-х розділів, висновків, переліку посилань на літературу та додатків.

**Робота виконана в обсязі:** 65 сторінок, 4 рисунків, 11 таблиць, 7 формул, 2 графік та 17 літературних джерел.

Одним із найбільш ефективних агрегатів для позапічної обробки сталі є установка піч-ківш, яка дозволяє здійснювати доведення температури металу, коригування та модифікування його хімічного складу, а також очищення сталі від шкідливих домішок і неметалевих включень.

У роботі проаналізовано сучасні технології рафінування низьковуглецевих сталей, розглянуто конструкцію та принцип роботи установки піч-ківш, досліджено роль феросплавів у процесах позапічної обробки сталі УПК.

**Мета кваліфікаційної роботи:** дослідити процес рафінування низьковуглецевих сталей на установці піч-ківш та визначити раціональні витрати феросплавів для забезпечення необхідної якості металу.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВА СТАЛЬ, РАФІНУВАННЯ, ПОЗАПІЧНА ОБРОБКА, ПІЧ-КІВШ, ФЕРОСПЛАВИ, РОЗКИСЛЕННЯ СТАЛІ, ХІМІЧНИЙ СКЛАД, МЕТАЛУРГІЯ.

## УМОВНІ ПОЗНАЧКИ ТА СКОРОЧЕННЯ

ДСТУ – Державний стандарт України;

ГОСТ – міждержавний стандарт;

ВКРБ – випускна кваліфікаційна робота бакалавра;

LF – установка піч-ківш (Ladle Furnace);

ТП – технологічний процес;

ППО – позапічна обробка сталі;

FeSi – феросиліцій;

FeMn – феромарганець;

Al – алюміній;

C – вуглець;

Mn – марганець;

Si – кремній;

S – сірка;

P – фосфор;

T – температура металу;

$\tau$  – тривалість технологічного процесу;

НВ – неметалеві включення;

ХС – хімічний склад сталі.

## ЗМІСТ

Реферат	5
Умовні позначки та скорочення	6
Вступ	9
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ РАФІНУВАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ</b>	11
1.1 Вимоги до хімічного складу та якості низьковуглецевих сталей	11
1.2 Основні домішки у сталі та їх вплив на властивості металу	14
1.3 Методи позапічної обробки сталі у сучасній металургії	17
1.4 Особливості рафінування сталі на установці піч-ківш	21
<b>РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА УСТАНОВКИ ПІЧ-КІВШ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ СТАЛІ</b>	27
2.1 Конструкція та принцип роботи установки піч-ківш	27
2.2 Основне технологічне обладнання установки	29
2.3 Технологічні режими обробки сталі	33
2.4 Використання трайб-апарата для введення феросплавів	37
<b>РОЗДІЛ 3. ФЕРОСПЛАВИ ТА ЇХ РОЛЬ У РАФІНУВАННІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ</b>	42
3.1 Класифікація та основні властивості феросплавів	42
3.2 Характеристика феросплавів при позапічній обробці сталі	45
3.3 Вплив феросплавів на процес розкислення та рафінування сталі	49
<b>РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФЕРОСПЛАВІВ ТА РОЗРАХУНОК ЇХ ВИТРАТ ПРИ ОБРОБЦІ СТАЛІ НА УСТАНОВЦІ ПІЧ-КІВШ</b>	52
4.1 Вихідні дані для проведення розрахунків	52
4.2 Розрахунок витрат феросиліцію для розкислення та коригування вмісту кремнію	53

КНУ.РБ.136.26.113с-06.3				
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ док-м</i>	<i>Підпис</i>	
<i>Розроб</i>		Лехман Д.Р.		Зміст
<i>Перевір.</i>		Кассім Д.О.		
<i>Н. Контич</i>		Кассім Д.О.		МТ-22-2
<i>Затверд.</i>		Савельєв С.Г.		

4.3 Розрахунок витрат ферромарганцю для доведення вмісту марганцю	55
Розрахунок витрат алюмінію для глибокого розкислення сталі	56
4.5 Аналіз результатів розрахунку та технологічні рекомендації	57
ВИСНОВОК	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60
	62

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.3	Анк.
Змн.	Анк.	№ док.им.	Підпис	Лист		2

## ВСТУП

Сучасний розвиток чорної металургії характеризується постійним зростанням вимог до якості сталевих продукцій, стабільності, точності її хімічного складу та експлуатаційних властивостей. Особливо високі вимоги висуваються до низьковуглецевих сталей, які широко застосовуються у будівництві, в оборонній промисловості машинобудуванні, виробництві труб, металоконструкцій, листового прокату та інших галузях промисловості.

Властивості таких сталей значною мірою визначаються не лише ефективністю обробки рідкої сталі перед видачею на розливу, але й умовами виплавки. Отже, з цим важливого значення набувають процеси позапічної обробки та рафінування сталі, спрямовані на зниження вмісту шкідливих домішок, неметалевих включень, нормалізацію і стабілізацію хімічного складу сталі.

Для таких процесів як позапічна обробка сталі існує як раз установка піч ківш, яка є доволі поширеним агрегатом у металургійних підприємствах.

Використання цього обладнання дозволяє здійснювати доведення температури сталі, інтенсивне перемішування металу газами, коригування хімічного складу сталі, а також проведення процесів розкислення та рафінування.

Завдяки цим факторам забезпечується підвищення якості сталі, зменшення кількості неметалевих включень та шкідливих домішок, а також покращення механічних, конструкційних і технологічних властивостей готової продукції.

Одну з ключових ролей у процесах позапічної обробки відіграють феросплави, які застосовуються для розкислення та легування сталі. Поширеними серед них є феросиліцій, феромарганець та алюміній.

Додавання цих матеріалів у рідкий метал дозволяє ефективно зв'язувати

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.В		
Змін	Арк	№ докум	Підпис	Лист			
Розроб		Лехман Д.Р.			Лист	Арк	Активний
Поправки		Кассім Д.О.				9	2
Н. Контр		Кассім Д.О.			ВСТУП		
Затверд		Савельєв С.Г.					
					МТ-22-2		

розчинений у сталі кисень, коригувати вміст основних хімічних елементів та сприяти очищенню металу від шкідливих домішок, та від неметалічних включень.

Раціональний вибір феросплавів і визначення їх оптимальних витрат є важливою умовою підвищення ефективності технологічного процесу та зниження витрат матеріальних ресурсів у сталеплавильному виробництві.

**Актуальність теми** кваліфікаційної роботи зумовлена необхідністю удосконалення технології рафінування низьковуглецевих сталей на установці піч-ківш, підвищення ефективності використання феросплавів та забезпечення стабільної якості металу. Оптимізація процесів позапічної обробки дозволяє знизити вміст шкідливих домішок, покращити структуру сталі та забезпечити необхідні експлуатаційні властивості металопродукції.

**Метою кваліфікаційної роботи** є дослідження процесу рафінування низьковуглецевих сталей на установці піч-ківш та визначення раціональних витрат феросплавів для розкислення і коригування хімічного складу сталі.

**Об'єктом дослідження** є процес позапічної обробки низьковуглецевих сталей.

**Предметом дослідження** є використання феросплавів у процесах рафінування та розкислення сталі на установці піч-ківш.

Практичне значення роботи полягає у визначенні раціональних витрат феросплавів при позапічній обробці сталі, що сприяє підвищенню якості металу, покращенню його технологічних властивостей та підвищенню ефективності сталеплавильного виробництва.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.В	Арк
Змн.	Арк	№ док.м.	Підпис	Дат.		2

# 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ РАФІНУВАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

## 1.1 Вимоги до хімічного складу та якості низьковуглецевих сталей

Низьковуглецеві сталі є однією з найбільш поширених груп конструкційних матеріалів у сучасному металургійному виробництві. Їх широке застосування у машинобудуванні, будівництві, трубній промисловості, виробництві листового прокату та металоконструкцій зумовлене поєднанням достатніх міцних характеристик з високою пластичністю, доброю зварюваністю та високою технологічністю при гарячій і холодній обробці тиском.[3]

Формування необхідних механічних і технологічних властивостей таких сталей значною мірою визначається їх хімічним складом, рівнем чистоти за неметалевими включеннями та вмістом розчинених газів. Тому при виробництві низьковуглецевих сталей висуваються жорсткі вимоги до вмісту основних і домішкових елементів, а також до ступеня рафінування металу.

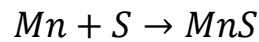
До низьковуглецевих відносять сталі, у яких масова частка вуглецю зазвичай не перевищує 0,10 %. У ряді марок конструкційних сталей цей показник знаходиться у межах 0,02–0,08 %. Зниження вмісту вуглецю забезпечує підвищення пластичності та в'язкості металу, покращує його зварюваність і знижує схильність до утворення тріщин при термічній та механічній обробці. Водночас надмірне зменшення концентрації вуглецю може призводити до зниження міцності металу, тому під час виробництва необхідно забезпечити оптимальний баланс між міцністю та пластичністю сталі.[3]

Окрім вуглецю, на властивості низьковуглецевих сталей істотно впливають марганець і кремній, які вводяться до складу металу як технологічні добавки. Марганець є одним із найважливіших елементів у конструкційних сталях. Його вміст у низьковуглецевих сталях зазвичай знаходиться у межах 0,35–0,70 %.

Важливою функцією марганцю є його здатність зв'язувати сірку з

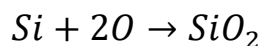
					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ						
Змн	Арк	№ докум	Підпис	Лам	<b>АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ РАФІНУВАННЯ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ</b>			Лім.	Арк.	Акривів	
Розроб		Лехман Д.Р.								1.1	1.6
Технік		Кассім Д.О.						<b>МТ-22-2</b>			
Н. Конин		Кассім Д.О.									
Затверд		Савельєв С.Г.									

утворенням сульфідів марганцю:



Утворені сульфіди марганцю мають значно вищу температуру плавлення порівняно з сульфідами заліза, що зменшує небезпеку виникнення гарячої крихкості металу під час гарячої деформації.[3]

Кремній у сталеплавильному виробництві застосовується як один із найбільш ефективних розкислювачів. Його вміст у низьковуглецевих сталях зазвичай становить 0,05–0,25 %. Під час виплавки сталі кремній активно взаємодіє з розчиненим у металі киснем, утворюючи оксид кремнію:



Утворений оксид переходить у шлак або входить до складу неметалевих включень. Наявність невеликої кількості кремнію сприяє підвищенню міцності металу, проте його надмірна концентрація може призводити до зниження пластичності та погіршення технологічних властивостей сталі.[4]

До найбільш небажаних домішок у сталях належать сірка та фосфор, які негативно впливають на механічні властивості металу. Сірка спричиняє явище гарячої крихкості сталі, що проявляється у різкому зниженні пластичності при температурах гарячої деформації. Для зменшення негативного впливу сірки її вміст у конструкційних сталях зазвичай обмежується величиною 0,020–0,030 %.

Фосфор, у свою чергу, викликає холодну крихкість сталі. Підвищений вміст цього елемента призводить до зниження ударної в'язкості металу та підвищення його схильності до крихкого руйнування при низьких температурах. У зв'язку з цим концентрація фосфору у більшості низьковуглецевих конструкційних сталей не повинна перевищувати 0,020–0,030 %.[4]

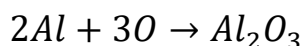
Важливим показником якості сталі є також вміст розчинених у металі газів — кисню, азоту та водню. Наявність цих елементів у сталі може призводити до утворення неметалевих включень, газових пор та інших дефектів структури металу.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.им.	Підпис	Лист		2

Особливо небезпечним є водень, який здатний викликати утворення внутрішніх тріщин у прокаті та сприяти появі так званих флокенів. У сучасному сталеплавильному виробництві вміст водню у сталі зазвичай обмежується рівнем  $(1,5-3,0) \cdot 10^{-4} \%$ . [4]

Кисень у рідкій сталі є джерелом утворення оксидних включень, які негативно впливають на механічні властивості металу.

Для зниження його концентрації застосовують процеси розкислення сталі. Найбільш поширеними розкислювачами є кремній, марганець та алюміній. При використанні алюмінію відбувається реакція:



Оксиди алюмінію характеризуються високою температурою плавлення і переходять у шлак або видаляються з металу у вигляді неметалевих включень.

Якість низьковуглецевих сталей значною мірою визначається також кількістю та характером неметалевих включень, до яких належать оксиди, сульфіди, силікати та інші сполуки.

Підвищений вміст таких включень призводить до зниження пластичності та втомної міцності металу, а також може бути причиною зародження тріщин під час експлуатації виробів.

Особливо небезпечними є великі оксидні включення, які порушують однорідність структури сталі.

У сучасному сталеплавильному виробництві зниження кількості неметалевих включень досягається шляхом застосування комплексних технологій рафінування металу.

До них належать використання основних шлаків з високою рафінувальною здатністю, продування металу інертними газами, вакуумна обробка, а також позапічна обробка сталі на спеціальних агрегатах.

Одним із найбільш ефективних агрегатів для доведення хімічного складу сталі та підвищення її чистоти є установка піч-ківш (LF). У процесі обробки на цьому агрегаті здійснюється коригування хімічного складу металу, проведення глибокого розкислення, інтенсивне перемішування сталі та

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Аук.
Змн.	Аук.	№ док.им.	Підпис.	Лам.		3

рафінування її від неметалевих включень.

Завдяки цьому забезпечується отримання металу з необхідними експлуатаційними властивостями та стабільною якістю

## 1.2 Основні домішки у сталі та їх вплив на властивості металу

Хімічний склад сталі формується у процесі виплавки та подальшої позапічної обробки рідкого металу.

Наявність цих компонентів визначає структурний стан металу, його механічні властивості, а також технологічні характеристики під час обробки тиском, зварювання та експлуатації виробів.

Домішки у сталі умовно поділяють на кілька груп:

- корисні елементи, що вводяться для регулювання властивостей (С, Mn, Si);
- шкідливі домішки, які необхідно максимально видаляти (S, P);
- газові домішки (O, H, N);
- неметалеві включення, що утворюються в процесі плавки.[3]

Вплив основних домішок на властивості сталі наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вплив основних домішок на властивості сталі

Елемент	Джерело потрапляння	Основний вплив на властивості сталі
Вуглець (C)	чавун, шихтові матеріали	підвищує міцність і твердість, знижує пластичність
Марганець (Mn)	феросплави, чавун	підвищує міцність, зв'язує сірку
Кремній (Si)	феросплави, розкислення	підвищує міцність, виконує роль розкислювача
Сірка (S)	чавун, кокс, шихта	викликає гарячу крихкість
Фосфор (P)	руда, чавун	спричиняє холодну крихкість
Кисень (O)	газова фаза, окиснення	утворює оксидні включення

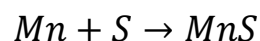
Азот (N)	повітря, газова атмосфера	спричиняє старіння сталі
Водень (H)	волога шихта, атмосфера	викликає флокени та внутрішні тріщини

Вуглець є одним із найважливіших елементів у сталях. Він визначає фазовий склад і мікроструктуру металу, а також значною мірою впливає на механічні властивості сталі. У системі Fe–C він може перебувати у вигляді твердого розчину у фериті та аустеніті або утворювати карбід заліза – цементит (Fe<sub>3</sub>C).[5]

Зі збільшенням вмісту вуглецю зростає частка перліту в структурі сталі, що призводить до підвищення міцності та твердості металу. Разом з тим підвищений вміст вуглецю негативно впливає на пластичність і ударну в'язкість сталі, а також погіршує її зварюваність. У зв'язку з цим у конструкційних низьковуглецевих сталях його концентрація обмежується невеликими значеннями.[5]

Марганець є важливим технологічним елементом у сталеплавильному виробництві. Він підвищує міцність сталі та покращує її прокатуваність. Крім того, марганець відіграє важливу роль у процесах десульфурації.

Сірка, що міститься у сталі, може утворювати сульфід заліза FeS, який має низьку температуру плавлення. Такий сульфід концентрується по межах зерен і викликає гарячу крихкість сталі. Присутність марганцю сприяє утворенню більш тугоплавкого сульфїду:



Утворені включення MnS рівномірно розподіляються у металі і значно меншою мірою погіршують його пластичність.

Кремній широко застосовується як розкислювач у процесі виплавки сталі. Він активно взаємодіє з киснем, розчиненим у рідкому металі, утворюючи оксид кремнію:  $Si + 2O = SiO_2$

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Анк.
Змн.	Анк.	№ док.м.	Підпис	Лист		5

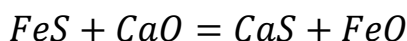
Оксиди кремнію переходять у шлак або утворюють неметалеві включення, які згодом видаляються з металу.

Невеликий вміст кремнію сприяє підвищенню міцності сталі завдяки твердорозчинному зміцненню фериту. Однак при підвищеному його вмісті може знижуватися пластичність металу.

Сірка є однією з найбільш небажаних домішок у сталі.

Вона утворює з залізом легкоплавкий сульфід FeS, який концентрується по межах зерен і може викликати утворення тріщин під час гарячої деформації металу.[3]

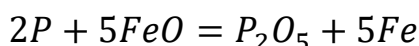
Основною реакцією десульфурації є взаємодія сульфиду заліза з основним шлаком, що містить оксид кальцію:



Ця реакція відбувається ефективніше при високій основності шлаку та низькому вмісті кисню в металі.

Фосфор належить до шкідливих домішок, які викликають холодну крихкість сталі. Він добре розчиняється у фериті та підвищує крихкість металу при низьких температурах.

Видалення фосфору відбувається в окиснювальних умовах за реакцією:



Оксид фосфору переходить у шлак і утворює фосфатні сполуки.

Кисень, азот і водень є небажаними газовими домішками у сталі.

Кисень сприяє утворенню оксидних включень, які погіршують механічні властивості металу. Азот може утворювати нітриди, що призводить до старіння сталі та зниження її пластичності.[3]

Водень є одним із найбільш небезпечних газів. Його присутність у сталі може викликати утворення внутрішніх тріщин та флокенів у прокаті.

Неметалеві включення утворюються у процесі плавки та рафінування сталі. Вони можуть мати різну природу та склад.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Анк
Змн	Анк	№ док.им	Підпис	Лист		6

Таблиця 1.2 – Класифікація неметалевих включень у сталі

Тип включень	Основний склад	Джерело утворення
Оксидні	$Al_2O_3, SiO_2$	реакції розкислення
Сульфідні	$MnS$	взаємодія Mn і S
Силікатні	$FeO \cdot SiO_2$	взаємодія металу і шлаку
Нітридні	$AlN, TiN$	взаємодія азоту з металами

Підвищена кількість неметалевих включень погіршує пластичність і знижує втомну міцність сталі.

Тому одним із головних завдань сучасного сталеплавильного виробництва є зниження їх вмісту шляхом застосування ефективних методів рафінування.

### 1.3 Методи позапічної обробки сталі у сучасній металургії

Сучасний рівень розвитку сталеплавильного виробництва характеризується переходом від традиційної схеми отримання сталі до багатостадійних технологічних процесів, у яких ключову роль відіграє позапічна обробка рідкого металу. Саме на цій стадії здійснюється остаточне формування хімічного складу сталі, регулювання її температурного стану та забезпечення необхідного рівня чистоти за вмістом газів і неметалевих включень.[4]

Необхідність застосування позапічної обробки обумовлена тим, що у конвертерах та електропечах процеси протікають в умовах інтенсивного окиснення, що ускладнює досягнення низького вмісту шкідливих домішок і газів. Крім того, значна турбулентність металеві ванни та короткий час перебування металу в агрегаті не дозволяють забезпечити повноцінне видалення неметалевих включень і точне доведення складу сталі. У зв'язку з цим функції рафінування, які раніше частково виконувалися у плавильному агрегаті, переносяться на стадію обробки сталі у ковші.[5]

Фізична сутність позапічної обробки полягає у створенні умов, за яких

рідкий метал переходить у стан, максимально наближений до термодинамічної рівноваги з шлаковою і газовою фазами. Це досягається за рахунок інтенсифікації масообмінних процесів, зниження парціального тиску газів, регулювання окиснювально-відновного потенціалу системи та формування шлаків заданого складу і основності.[5]

Одним із визначальних процесів, що протікають під час позапічної обробки, є розкислення сталі. Розчинений у металі кисень знаходиться у вигляді атомарного кисню і бере участь у рівноважних реакціях з елементами-розкислювачами. [4]

Ефективність видалення кисню визначається значенням вільної енергії утворення відповідних оксидів. Найбільш стійкими є оксиди алюмінію, що обумовлює широке використання алюмінію для глибокого розкислення сталі. При цьому в металі утворюються дрібнодисперсні включення  $Al_2O_3$ , які при недостатній інтенсивності перемішування можуть залишатися у металі та негативно впливати на його властивості. Тому процес розкислення нерозривно пов'язаний із подальшим видаленням продуктів реакції у шлак.[5]

Не менш важливим є процес дегазації сталі, який базується на зміні розчинності газів у рідкому металі залежно від зовнішнього тиску. Згідно із законом Сівертса, концентрація розчиненого газу пропорційна квадратному кореню з його парціального тиску над металом. Це означає, що при зниженні тиску над ванною, наприклад у вакуумних установках, відбувається інтенсивне виділення водню та азоту з металу. Одночасно з цим інтенсифікація перемішування сприяє підводу нових порцій металу до поверхні розділу фаз, що прискорює процес дегазації. В результаті досягається значне зниження вмісту водню, який є причиною утворення флокенів і внутрішніх дефектів металу.

Суттєву роль у позапічній обробці відіграє взаємодія металу зі шлаком. Шлак у цьому випадку виступає не лише як захисне покриття, що запобігає вторинному окисненню металу, але і як активна рафінуюча фаза. Основність шлаку, що визначається співвідношенням  $CaO/SiO_2$ , є одним із головних параметрів, які впливають на ефективність видалення сірки. Реакція

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Анк.
Змн.	Анк.	№ док.им.	Підпис	Лист		8

десульфурації протікає на межі поділу метал–шлак і залежить від концентрації сірки у металі, активності оксиду кальцію у шлаку та вмісту кисню. Чим нижчий вміст кисню у металі та вища основність шлаку, тим інтенсивніше протікає процес переходу сірки у шлакову фазу.[4]

Видалення фосфору, навпаки, вимагає окиснювальних умов і наявності у шлаку оксидів заліза.

Це створює певну суперечність між умовами дефосфорації і десульфурації, що зумовлює необхідність їх розділення на різні стадії технологічного процесу.

У сучасних умовах основна частина фосфору видаляється ще у конвертері, тоді як позапічна обробка спрямована переважно на десульфурацію і глибоке рафінування сталі.

Інтенсифікація масообміну між металом і шлаком досягається шляхом перемішування металевої ванни. Найбільш ефективним є продування аргонном через пористі вставки у днищі ковша. Під час підйому бульбашок газу відбувається захоплення і переміщення об'ємів металу, що призводить до вирівнювання температури і складу по всьому об'єму ванни. Одночасно з цим неметалеві включення, що мають меншу густину, спливають на поверхню і переходять у шлак.[5]

Особливу роль у позапічній обробці відіграє контроль і модифікація неметалевих включень. Включення, що утворюються в результаті розкислення, можуть змінювати свій склад і морфологію у процесі взаємодії зі шлаком і металом.

Наприклад, оксиди алюмінію можуть частково розчинятися у шлаку або перетворюватися на складні кальцієві алюмінати при введенні кальцію. Такі перетворення дозволяють знизити їх шкідливий вплив на властивості сталі, зокрема покращити її оброблюваність і зварюваність.

Необхідною умовою ефективної позапічної обробки є також точне регулювання температури металу. Втрати тепла під час транспортування і обробки можуть призводити до передчасного затвердіння металу або погіршення умов розливання. Тому у сучасних установках застосовуються

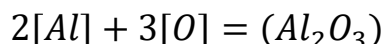
					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.им.	Підпис	Лам		9

системи електродугового підігріву, які дозволяють підтримувати температуру металу на заданому рівні та компенсувати теплові втрати.[5]

Важливою особливістю позапічної обробки є те, що перебіг основних рафінувальних процесів визначається не лише кінетичними факторами, але й термодинамічними умовами рівноваги системи «метал–шлак–газ».

Зокрема, ефективність розкислення та десульфурації сталі безпосередньо пов'язана зі зміною ізобарно-ізотермічного потенціалу (вільної енергії Гіббса) відповідних реакцій.

Для реакції розкислення алюмінієм:



зміна вільної енергії описується залежністю:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

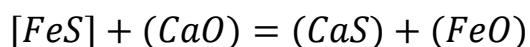
де  $K$  – константа рівноваги реакції,  $R$  – універсальна газова стала,  $T$  – абсолютна температура.

Низьке значення  $\Delta G^\circ$  (від'ємне і значне за модулем) свідчить про високу термодинамічну ймовірність утворення оксиду алюмінію, що пояснює ефективність алюмінію як розкислювача. При цьому рівноважна концентрація кисню у сталі визначається співвідношенням:

$$K = \frac{a_{Al_2O_3}}{a^2_{Al} \cdot a^3_{O}} \quad (1.1)$$

де  $a$  – активності відповідних компонентів.

Аналогічно, процес десульфурації може бути представлений реакцією:



Для якої константа рівноваги має вигляд:

$$K = \frac{a_{CaS} \cdot a_{FeO}}{a_{FeS} \cdot a_{CaO}}$$

З цього співвідношення випливає принципово важливий висновок: ефективність видалення сірки зростає при зменшенні активності  $FeO$  у шлаку, тобто при зниженні окисненості системи. Саме тому десульфурація найбільш інтенсивно протікає у відновлювальних умовах, характерних для стадії позапічної обробки.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Анк.
Змн.	Дрк.	№ док.им.	Підпис	Лам		10

Крім того, визначальним фактором є активність оксиду кальцію, яка залежить від складу шлаку і, перш за все, від його основності. Основність шлаку зазвичай характеризується відношенням:

$$B = \frac{CaO}{SiO_2}$$

Зі збільшенням цього параметра зростає здатність шлаку зв'язувати сірку у вигляді CaS. Це пояснюється тим, що при високій основності активність CaO наближається до одиниці, що зсуває рівновагу реакції десульфурації у правий бік.

Залежність ступеня десульфурації від основності шлаку має виражений нелінійний характер. При низьких значеннях  $B < 1,5$  процес видалення сірки протікає слабо, оскільки шлак містить значну кількість кремнезему, який знижує активність CaO. У діапазоні  $B = 2,0 - 3,0$  спостерігається різке підвищення ефективності десульфурації, що пов'язано зі зростанням частки вільного оксиду кальцію у шлаку. Подальше збільшення основності призводить до поступового насичення системи, і приріст ступеня десульфурації стає менш інтенсивним.

Графічно ця залежність може бути представлена у вигляді кривої, що має крутий підйом у середній області значень основності та вихід на плато при високих значеннях CaO/SiO<sub>2</sub>. Такий характер кривої відображає перехід від кінетично обмеженого режиму до області, близької до термодинамічної рівноваги.

Необхідно також враховувати, що поряд із основністю важливим фактором є вміст FeO у шлаку. Підвищення концентрації FeO призводить до зростання окиснювального потенціалу системи, що, відповідно до рівноважних співвідношень, зміщує реакцію десульфурації у зворотному напрямку. Таким чином, для досягнення високого ступеня рафінування сталі необхідно забезпечити комбінацію високої основності шлаку та низького вмісту оксидів заліза.

З урахуванням наведених термодинамічних закономірностей у сучасних технологіях позапічної обробки формуються шлаки спеціального складу, які забезпечують одночасно високу рафінуючу здатність і сприятливі умови для

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис.	Лист		11

видалення неметалевих включень.

Це дозволяє отримувати сталі з мінімальним вмістом сірки, що є особливо важливим для низьковуглецевих марок, призначених для

#### 1.4 Особливості рафінування сталі на установці піч-ківш

Установка типу піч-ківш рис 1.1 (LF, Ladle Furnace) є одним із основних агрегатів позапічної обробки сталі, який забезпечує комплексне рафінування рідкого металу після виплавки у конвертері або електродіалі. [16]

Використання LF-установок дозволяє здійснювати глибоке розкислення, десульфурацію, модифікацію неметалевих включень, точне доведення хімічного складу та температури металу перед розливанням. [16]

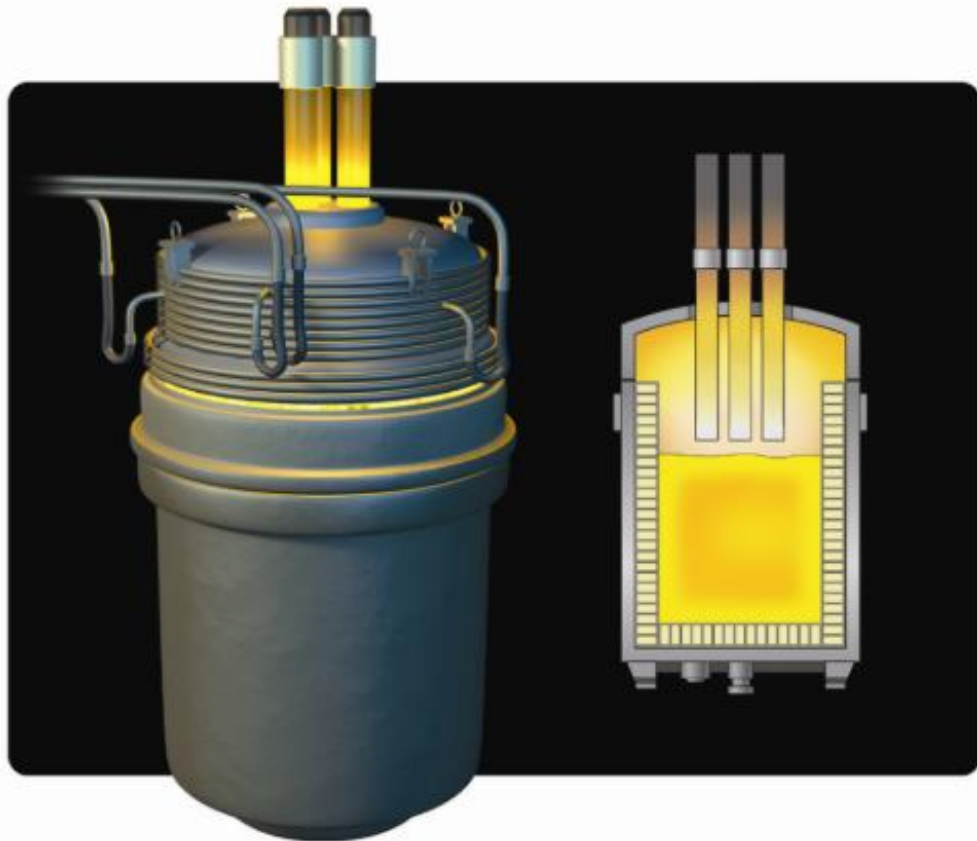


Рисунок 1.1 Установка типу піч-ківш

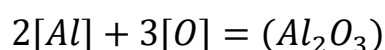
Принципова особливість рафінування на установці піч-ківш полягає у поєднанні трьох ключових факторів: наявності електродугового підігріву, інтенсивного перемішування металу інертним газом та взаємодії з рафінуючим шлаком заданого складу. [16]

Змн.	Арк.	№ док.	Підпис	Лам

Саме ця комбінація забезпечує створення умов, близьких до термодинамічної рівноваги, при одночасній високій швидкості масообмінних процесів.

Після випуску сталі з плавильного агрегату метал у ковші характеризується підвищеним вмістом кисню, наявністю оксидних включень і недостатньо стабільним температурним режимом.

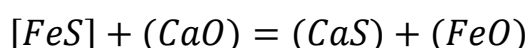
На установці LF здійснюється глибоке розкислення сталі, яке базується на введенні сильних розкислювачів, передусім алюмінію. Реакція:



Характеризується значним від'ємним значенням зміни вільної енергії, що забезпечує практично повне зв'язування розчиненого кисню. Разом з тим утворені оксиди алюмінію мають високу температуру плавлення і низьку змочуваність металом, що ускладнює їх видалення без належної організації перемішування.[4]

Інтенсивне продування аргоном через донні фурми або пористі вставки створює умови для циркуляції металу в об'ємі ковша. Потоки металу, що підіймаються разом із газовими бульбашками, сприяють укрупненню неметалевих включень за рахунок їх коагуляції та подальшому спливанню у шлакову фазу. Цей процес можна розглядати як аналог підйому легких частинок у рідині, де швидкість спливання визначається співвідношенням густини включення і металу, а також в'язкістю середовища.[4]

Ключову роль у рафінуванні сталі на установці піч-ківш відіграє шлак. На відміну від шлаків конвертерного процесу, LF-шлак формується цілеспрямовано і має високу основність та низький вміст оксидів заліза. Такий склад забезпечує сприятливі умови для десульфурзації сталі. Реакція переходу сірки у шлак:



Протікає найбільш інтенсивно за умов низького окиснювального потенціалу та високої активності CaO. Константа рівноваги цієї реакції визначається співвідношенням активностей компонентів і показує, що

зменшення активності FeO у шлаку призводить до зміщення рівноваги у бік утворення CaS.

Для кількісної оцінки ефективності десульфурації використовують коефіцієнт розподілу сірки між шлаком і металом:

$$LS = \frac{(S)}{[S]} \quad (1.2)$$

де (S) – вміст сірки у шлаку, [S] – вміст сірки у металі.

На установках LF значення LS може досягати 50–100 і більше, що свідчить про високу ефективність процесу. Це досягається за рахунок формування шлаків з основністю  $CaO/SiO_2 > 2,5$  та мінімальним вмістом FeO (менше 1–2 %).

Особливістю рафінування на LF є також можливість модифікації неметалевих включень. Введення кальційвмісних матеріалів (наприклад, дроту з кальцієм) призводить до перетворення твердих оксидів алюмінію у більш пластичні кальцієві алюмінати. Це змінює морфологію включень, знижує їх абразивну дію і покращує технологічні властивості сталі, зокрема її оброблюваність різанням і зварюваність.[16]

Електродуговий підігрів металу в ковші є ще однією важливою перевагою LF-установки. Він дозволяє компенсувати теплові втрати під час обробки та забезпечити необхідний температурний рівень перед розливанням. Стабільність температури є критичною умовою для протікання рафінувальних процесів, оскільки як термодинамічні, так і кінетичні параметри реакцій суттєво залежать від температури.[16]

Комплексна дія всіх зазначених факторів забезпечує отримання сталі з низьким вмістом кисню, сірки та неметалевих включень, а також з високою однорідністю хімічного складу.

Саме тому установки типу піч-ківш є невід'ємною частиною сучасних металургійних технологій, особливо при виробництві низьковуглецевих сталей підвищеної якості.

Практична реалізація процесів рафінування на установці піч-ківш

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Анк
Змн.	Анк.	№ док.им.	Підпис.	Лат		14

визначається не лише термодинамічними умовами, але й конкретними технологічними параметрами обробки, які забезпечують необхідну інтенсивність масообміну та стабільність процесу.

Температурний режим обробки сталі на установці LF зазвичай підтримується в межах 1550–1650 °С, залежно від марки сталі та умов подальшого розливання. При цьому температура металу на початку обробки, як правило, на 30–50 °С нижча за необхідну температуру розливання, що компенсується за рахунок електродугового підігріву. [4]

Потужність трансформаторів LF-установок може досягати 20–40 МВт, що дозволяє ефективно компенсувати теплові втрати і забезпечувати контроль температури з точністю до  $\pm 5$  °С.[4]

Інтенсивність перемішування металу визначається витратами інертного газу, який подається через донні продувні пристрої.

Для більшості промислових установок характерні витрати аргону у межах 0,5–2,5 м<sup>3</sup>/хв, причому на початкових стадіях обробки застосовуються підвищені витрати для інтенсифікації перемішування, а на завершальній стадії – знижені, з метою уникнення вторинного окиснення металу та захоплення шлаку.[4]

Тривалість обробки сталі на установці піч-ківш зазвичай становить 15–40 хвилин, залежно від необхідного ступеня рафінування, початкового складу металу та вимог до якості готової продукції. У цей період здійснюється повний комплекс операцій: розкислення, десульфурація, легування, модифікація включень та температурне доведення.

Особливе значення для ефективності рафінування має гідродинамічний режим перемішування металу у ковші. Рух рідкого металу під дією бульбашок аргону характеризується складною турбулентною структурою потоків, яка визначає швидкість масопереносу і, відповідно, інтенсивність хімічних реакцій.

Кількісна оцінка режиму руху здійснюється за допомогою критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad (1.3)$$

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Анк.
Змн.	Анк.	№ док.м.	Підпис	Лам.		15

де  $\rho$  – густина рідкої сталі,  $v$  – характерна швидкість руху потоку,  $L$  – характерний лінійний розмір,  $\mu$  – динамічна в'язкість металу.

Для умов LF-установки значення критерію Рейнольдса досягає величин порядку  $10^4$ – $10^6$ , що відповідає розвиненому турбулентному режиму течії. У таких умовах відбувається інтенсивне перемішування металу, руйнування дифузійних шарів на межі фаз і значне прискорення масообмінних процесів.

Фізично це можна уявити як процес, при якому бульбашки аргону, підіймаючись у товщі металу, захоплюють за собою потоки рідини, формуючи циркуляційні контури. У центральній частині ковша виникає висхідний потік, тоді як поблизу стінок формується низхідний рух металу. Така циркуляція забезпечує багаторазове перемішування об'єму ванни і сприяє вирівнюванню температури та хімічного складу.

З гідродинамічної точки зору, процес видалення неметалевих включень можна розглядати як суму двох механізмів: підйому частинок під дією різниці густин (за законом Стокса) та їх переносу турбулентними потоками. Турбулентність значно підвищує ймовірність зіткнення включень, що призводить до їх укрупнення (коагуляції) і подальшого спливання у шлак.[4]

Інтенсивність масообміну між металом і шлаком також визначається товщиною прикордонного дифузійного шару, яка різко зменшується у турбулентному режимі. Це означає, що швидкість процесів десульфурації і розкислення в умовах LF значною мірою контролюється саме гідродинамікою системи.[4]

Таким чином, ефективність рафінування сталі на установці піч-ківш визначається узгодженням поєднанням термодинамічних умов (активності компонентів, основність шлаку, окиснювальний потенціал) та гідродинамічних факторів (інтенсивність перемішування, турбулентність потоків). Оптимізація цих параметрів дозволяє досягти високого ступеня очищення сталі від домішок і неметалевих включень, що є визначальним фактором при виробництві низьковуглецевих сталей підвищеної якості.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.АТ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.им.	Підпис	Лам		16

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКА УСТАНОВКИ ПІЧ-КІВШ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

### 2.1 Конструкція та принцип роботи установки піч-ківш

Установка піч-ківш (LF) призначена для обробки рідкої сталі у сталерозливному ковші з можливістю її підігріву, перемішування та коригування складу. Конструктивно агрегат являє собою стаціонарний комплекс обладнання, що включає механічні, електричні та газові системи, об'єднані в єдину технологічну схему, що зображено на рис. 2.1.

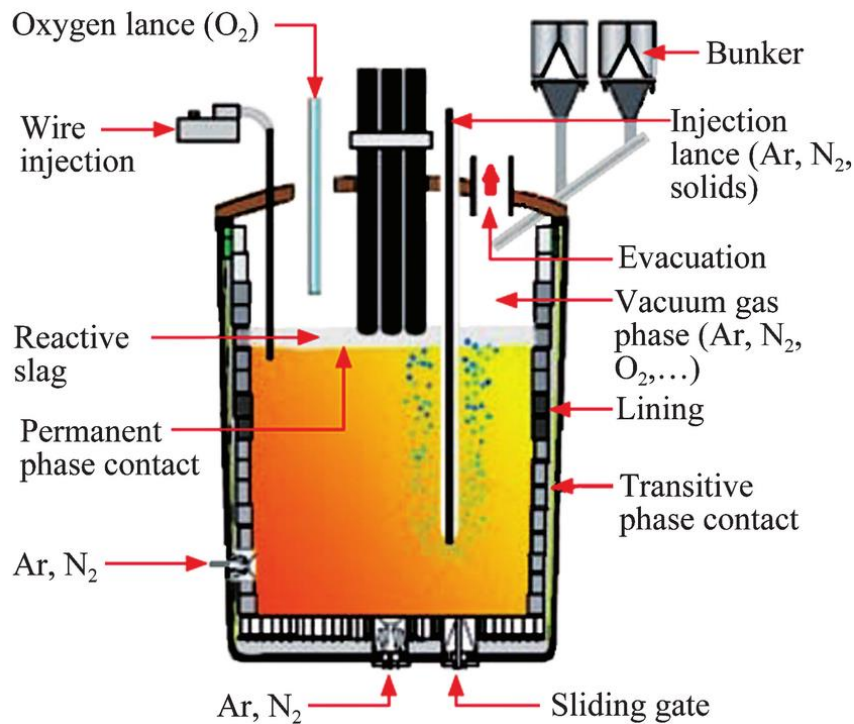


Рисунок 2.1 Технологічна схема установки піч-ківш

Основним елементом установки є сталерозливний ківш, який виконує функцію робочої ємності для металу.

Ківш має сталевий корпус циліндричної або зрізано-конічної форми та оснащений вогнетривкою футерівкою. Конструкція футерівки передбачає

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР					
Змн	Арк	№ докум	Підпис	Дат	<b>ХАРАКТЕРИСТИКА УСТАНОВКИ ПІЧ-КІВШ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ СТАЛІ</b>					
Розроб		Лехман Д.Р.						Лім	Арк	Акршиів
Перевір		Кассім Д.О.							27	16
Н. Конструктор		Кассім Д.О.						<b>МТ-22-2</b>		
Замовник		Савельев С.Г.								

наявність робочого шару, перехідного шару та теплоізоляції. Товщина футерівки в зоні металу та шлаку відрізняється, причому найбільш навантажені ділянки (шлаковий пояс і днище) підсилюються матеріалами підвищеної зносостійкості.

У днищі ковша розташовані газопроникні елементи — продувні пробки або фурми. Вони підключені до системи подачі інертного газу (аргону) через трубопроводи з регулюючою арматурою.

Конструкція цих елементів забезпечує рівномірний вихід газу та запобігає їх закупорюванню продуктами взаємодії металу і шлаку.

Ківш встановлюється на візок або стаціонарну платформу - сталевоз, що забезпечує його позиціонування під електродною системою. Платформа розрахована на значні статичні та динамічні навантаження, пов'язані з масою металу (до 100–300 т) та впливом перемішування.[12]

Електрична частина установки включає трансформатор, струмопідвідні шини та електродотримачі. Електродна система складається з трьох графітових електродів, які розташовані симетрично відносно осі ковша. Кожен електрод закріплений у механізмі підйому і опускання, що дозволяє регулювати міжелектродний простір і стабілізувати режим горіння дуги.[12]

Над ковшем розміщується кришка, називається свод, яка виконується з металевої конструкції з водяним охолодженням. Вона має отвори для електродів та технологічні вікна для подачі матеріалів, можливості зробити замір температури на набору проб, і контролю процесу. Конструкція кришки спрямована на зменшення теплових втрат і обмеження доступу повітря до металу.

Система подачі матеріалів включає бункери для феросплавів, дозуючі пристрої та механізми введення добавок. Взагалом ця система пов'язується конвеєрами для сипучих матеріалів. У сучасних установках широко застосовується обладнання для введення порошкового дроту, яке забезпечує подачу матеріалу з заданою швидкістю та глибиною занурення, таке обладнання має назву трайб-апарат.[2]

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Лист		2

Контрольно-вимірювальна система LF забезпечує вимірювання температури металу, контроль електричних параметрів дуги, витрат газу та положення електродів. Температура визначається занурювальними термопарами, а положення електродів регулюється автоматичною системою, що підтримує стабільну довжину дуги.

Принцип роботи установки полягає у поєднанні трьох основних впливів на метал: електричного нагріву, газового перемішування та механічного переміщення потоків у ванні. [12]

Після встановлення ковша на позицію і опускання кришки вмикається електродна система, яка створює електричну дугу.

Одночасно подається інертний газ через днище ковша. Газ, проходячи через метал, створює циркуляційні потоки, які забезпечують перемішування ванни.

У результаті цього відбувається вирівнювання температури та складу по всьому об'єму металу. Регулювання витрат газу дозволяє змінювати інтенсивність перемішування залежно від технологічних вимог.

Робота установки здійснюється у циклічному режимі: ківш із металом встановлюється під електроди, виконується обробка, після чого він транспортується до наступного етапу — розливання або вакуумної обробки.

Взаємодія всіх систем установки забезпечує стабільність технологічного процесу та можливість точного керування параметрами обробки.

## 2.2 Основне технологічне обладнання установки

Ефективність роботи установки піч-ківш визначається не лише загальною компоновкою агрегату, а й характеристиками окремих елементів технологічного обладнання, які забезпечують реалізацію процесів нагріву, перемішування, дозування матеріалів і контролю параметрів обробки. Кожен із цих елементів виконує чітко визначену функцію і розраховується з урахуванням специфіки роботи в умовах високотемпературної металургійної ванни. [1]

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.им.	Підпис	Лам		3

Ключовим енергетичним вузлом установки є пічний трансформатор, який призначений для перетворення електричної енергії мережі у параметри, необхідні для стабільного горіння електричної дуги. [2]

Потужність трансформаторів установок LF, як правило, знаходиться в межах 16–40 МВА, при цьому вторинна напруга регулюється ступінчасто у діапазоні 80–200 В. Конструкція трансформатора передбачає можливість оперативної зміни напруги, що дозволяє адаптувати режим нагріву залежно від температурного стану металу.[2]

Струмopідвідна система включає гнучкі водоохолоджувані кабелі, струмопроводи та електродотримачі. Особливістю цієї системи є необхідність забезпечення мінімальних електричних втрат при високих значеннях струму (до 30–60 кА). [2]

Електродотримачі виконуються з мідних сплавів із водяним охолодженням, що дозволяє знизити теплове навантаження та підвищити їх ресурс.

Система регулювання положення електродів є одним із найбільш відповідальних елементів обладнання. Вона працює у автоматичному режимі та забезпечує підтримання стабільної довжини дуги шляхом зміни положення електродів залежно від струму і напруги. Як правило, застосовуються електрогідравлічні або електромеханічні приводи з високою швидкістю, що дозволяє компенсувати коливання дуги в реальному часі.[1]

*Таблиця 2.1 – Основні технічні параметри установки піч-ківш*

Показник	Одиниця виміру	Значення
Місткість ковша	т	150-300
Температура металу на обробці	°С	1550–1650
Потужність трансформатора	МВА	16–40
Вторинна напруга	В	80–200
Сила струму	кА	20–60
Кількість електродів	шт	3
Діаметр електродів	мм	350–600
Витрати аргону	м <sup>3</sup> /хв	0,5–2,5
Тиск аргону	МПа	0,6–1,2
Тривалість обробки	хв	15–40

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР	Авк.
Змн.	Авк.	№ док.им.	Підпис	Лам		
						4

Товщина шлакового шару	мм	100–200
Глибина металевої ванни	мм	1500–3000
Кількість продувних блоків	шт	1–3
Швидкість подачі порошкового дроту	м/с	0,5–5
Точність регулювання температури	°С	±5

Важливу роль у роботі LF відіграє система подачі інертного газу. Вона включає джерело аргону, редукційні вузли, витратоміри та трубопроводи, що підводять газ до донних продувних елементів. [1]

Регулювання витрат газу здійснюється у широкому діапазоні, що дозволяє змінювати інтенсивність перемішування металу. Конструкція системи повинна забезпечувати стабільність подачі газу і виключати можливість підсосу повітря.

Донні продувні пристрої є критичним елементом обладнання, оскільки саме через них реалізується газове перемішування. Вони виготовляються з вогнетривких матеріалів із контрольованою пористістю. Основною вимогою до них є забезпечення рівномірного розподілу газу у вигляді дрібнодисперсних бульбашок. Зменшення розміру бульбашок сприяє збільшенню площі контакту газ–метал і підвищує ефективність перемішування.[1]

*Таблиця 2.2 – Основне технологічне обладнання установки піч-ківш*

Найменування обладнання	Призначення	Основні характеристики
Пічний трансформатор	Живлення електричної дуги	Потужність 16–40 МВА, ступінчасте регулювання напруги
Електродна система	Створення електричної дуги	3 графітові електроди діаметром 350–600 мм
Механізм переміщення електродів	Регулювання довжини дуги	Електрогідравлічний або електромеханічний привід
Струмopідвідна система	Передача струму до електродів	Водоохолоджувані кабелі та струмопроводи
Сталерозливний ківш	Робоча ємність для металу	Місткість 100–300 т, футерівка MgO-C
Донні продувні блоки	Подача інертного	Пористі вставки, 1–3 шт

	газу	
Система подачі аргону	Газове перемішування	Витрати 0,5–2,5 м <sup>3</sup> /хв
Кришка печі-ковша	Зменшення теплових втрат	Водоохолоджувальна конструкція
Система подачі феросплавів	Легування сталі	Бункери, вагові дозатори
Установка подачі порошкового дроту	Введення активних елементів	Швидкість 0,5–5 м/с
Контрольно-вимірювальна система	Контроль параметрів	Термопари, датчики струму, витратоміри
Система водяного охолодження	Захист обладнання	Замкнений контур охолодження
Платформа або візок ковша	Переміщення ковша	Розрахунок на навантаження до 300 т

Система введення легувальних і рафінувальних матеріалів включає декілька підсистем, що працюють незалежно. Для кускових матеріалів застосовуються бункерні пристрої з ваговими дозаторами, які забезпечують точність подачі у межах  $\pm 1-2\%$ . Для порошкоподібних матеріалів використовується обладнання для інжекції або введення у вигляді порошкового дроту. Останній варіант дозволяє подавати матеріал безпосередньо у глибокі шари металу, що значно підвищує коефіцієнт його засвоєння.[1]

Особливістю сучасних установок LF є наявність механізмів подачі порошкового дроту з регульованою швидкістю (0,5–5 м/с), що дає змогу точно дозувати такі активні елементи, як кальцій або магній. Конструкція цих механізмів передбачає синхронізацію швидкості подачі з режимом перемішування, що дозволяє уникнути передчасного спливання матеріалу.[1]

Система формування і обробки шлаку також входить до складу технологічного обладнання. Вона включає засоби подачі шлакоутворюючих матеріалів (вапно, плавиковий шпат, алюмінатні добавки) та інструменти для механічного впливу на шлак (наприклад, шлакові граблі). Важливим аспектом є забезпечення необхідної текучості шлаку, що досягається за рахунок контролю його температури та складу.[1]

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР	Анк
Змн.	Анк.	№ док.им.	Підпис	Лист		6

Контрольно-вимірювальне обладнання LF забезпечує отримання інформації про стан процесу в реальному часі. До його складу входять:

- системи вимірювання температури (занурювальні термометри);
- пристрої відбору проб металу і шлаку;
- датчики електричних параметрів;
- витратоміри газу.

Зібрана інформація обробляється автоматизованою системою керування, яка дозволяє оператору контролювати процес і вносити необхідні корективи.

Окрему групу обладнання становлять системи охолодження. Водяне охолодження застосовується для електродотримачів, кришки, струмопроводів та окремих елементів конструкції. Це необхідно для запобігання перегріву та забезпечення стабільної роботи агрегату протягом тривалого часу.[1]

Таким чином, основне технологічне обладнання установки піч-ківш являє собою комплекс взаємопов'язаних систем, кожна з яких впливає на загальну ефективність процесу обробки сталі.

### 2.3 Технологічні режими обробки сталі

Технологічний процес обробки сталі на установці піч-ківш визначається необхідністю забезпечення заданого хімічного складу, температури та ступеня очищення металу перед розливанням.

Режими обробки формуються з урахуванням початкового стану металу після виплавки, вимог до марки сталі та тривалості технологічного циклу.

Таблиця 2.3 – Технологічні режими обробки сталі на LF за етапами

Етап обробки	Температура, °C	Витрати Ar, м <sup>3</sup> /хв	Потужність дуги	Тривалість, хв	Технологічна мета
Встановлення ковша, початкове переміщення	1520–1560	1,5–2,5	мінімальна / викл.	2–5	Вирівнювання температури і складу
Формування шлаку	1500–1580	1,2–2,0	середня	5–10	Створення рафінуючого шлаку

Інтенсивний нагрів	1550–1620	1,5–2,0	максимальн а	5–15	Компенсація теплових втрат
Легування	1580–1620	1,0–1,5	середня	5–10	Доведення складу
Розкислення	1580–1600	0,8–1,2	середня	3–8	Зниження вмісту кисню
Доведення параметрів	1600–1650	0,5–0,8	низька	5–10	Стабілізація складу і температури
Підготовка до розливання	1600–1650	0,3–0,5	вимкнено	2–5	Мінімізація турбулентнос ті

Обробка сталі на LF здійснюється у вигляді послідовності взаємопов'язаних операцій, кожна з яких проводиться у певному режимі та спрямована на досягнення конкретного технологічного результату.[15]

Після випуску сталі з агрегату первинного плавлення ківш встановлюється на позицію LF.

Початкова температура металу зазвичай становить 1520–1580 °С, що є недостатнім для розливання, тому одним із перших етапів є її коригування. Одразу після встановлення ковша вмикається система продування аргоном з витратами 1,5–2,5 м<sup>3</sup>/хв, що забезпечує інтенсивне перемішування металу і вирівнювання температури по об'єму.[2]

На початковій стадії обробки здійснюється формування шлакового покриву. Для цього вводяться шлакоутворюючі матеріали — вапно, алюмінатні добавки, іноді плавиковий шпат. Метою є створення рідкого шлаку з високою основністю і низькою окисненістю. Температура шлаку в цей період підтримується на рівні не нижче 1500 °С, що забезпечує його необхідну текучість.[2]

Після формування шлаку вмикається електричний підігрів. Потужність дуги встановлюється на рівні, близькому до максимального, що дозволяє швидко підняти температуру металу до 1580–1620 °С. [2]

Тривалість інтенсивного нагріву становить 5–15 хвилин залежно від

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР	Арк
Змн.	Арк.	№ док.им.	Підпис	Дат		8

теплових втрат і початкової температури.

У цей період витрати аргону залишаються підвищеними для забезпечення рівномірного нагріву.

Паралельно з підігрівом виконується коригування хімічного складу сталі. Введення феросплавів здійснюється у кілька прийомів з урахуванням їх розчинності та можливих втрат. Для підвищення ефективності засвоєння легуючих елементів витрати аргону підтримуються на рівні 1,0–1,5 м<sup>3</sup>/хв, що забезпечує достатнє перемішування без надмірного спінювання шлаку.[15]

На наступному етапі проводиться глибоке розкислення металу. Для цього застосовуються алюміній, кремній або комплексні розкислювачі.

Режим продування газом у цей період дещо знижують (0,8–1,2 м<sup>3</sup>/хв) з метою запобігання інтенсивному окисненню розкислювачів. Тривалість стадії становить 3–8 хвилин.

Після стабілізації складу і температури здійснюється доведення металу до заданих параметрів. Температура наприкінці обробки зазвичай встановлюється на рівні 1600–1650 °С, що враховує теплові втрати під час транспортування і розливання.

Витрати аргону на завершальній стадії знижуються до 0,5–0,8 м<sup>3</sup>/хв, що дозволяє зменшити турбулентність і уникнути захоплення шлаку у метал.

Загальна тривалість обробки сталі на LF становить 20–40 хвилин, при цьому структура циклу може змінюватися залежно від конкретних умов виробництва. Важливим аспектом є узгодження режимів нагріву і перемішування, оскільки надмірна інтенсифікація одного з процесів може негативно вплинути на інші.[2]

Контроль технологічного процесу здійснюється на всіх етапах обробки. Температура металу вимірюється кілька разів за цикл, а хімічний склад коригується на основі результатів експрес-аналізу. Регулювання електричних параметрів і витрат газу виконується автоматично з урахуванням заданих технологічних режимів.[2]

Особливістю технології LF є можливість гнучкого керування процесом у режимі реального часу. Зміна витрат аргону, потужності дуги або кількості

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.им.	Підпис	Дат.		9

введених добавок дозволяє оперативно впливати на стан металу. Це забезпечує високу точність доведення сталі і стабільність отриманих результатів.

У зв'язку з цим ключовим параметром режиму є інтенсивність перемішування, яка визначає товщину дифузійного шару на межі «метал–шлак». При високій турбулентності товщина цього шару зменшується до величин порядку  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  м, що призводить до різкого зростання коефіцієнта масопереносу.[12]

З іншого боку, тепловий режим LF формується як баланс між підведенням енергії дугою і тепловими втратами через футерівку, шлак та випромінювання.

У спрощеному вигляді тепловий баланс можна представити як:

$$Q_{\text{дуги}} = Q_{\text{втрати}} + Q_{\text{нагрів металу}} + Q_{\text{реакцій}}$$

де найбільш змінною складовою є саме  $Q_{\text{втрати}}$ , яка залежить від тривалості обробки і стану футерівки.

Таким чином, оптимальний режим LF — це компроміс між:

- достатньою турбулентністю (для масопереносу);
- обмеженням втрат тепла;
- стабільністю шлакового покриву.

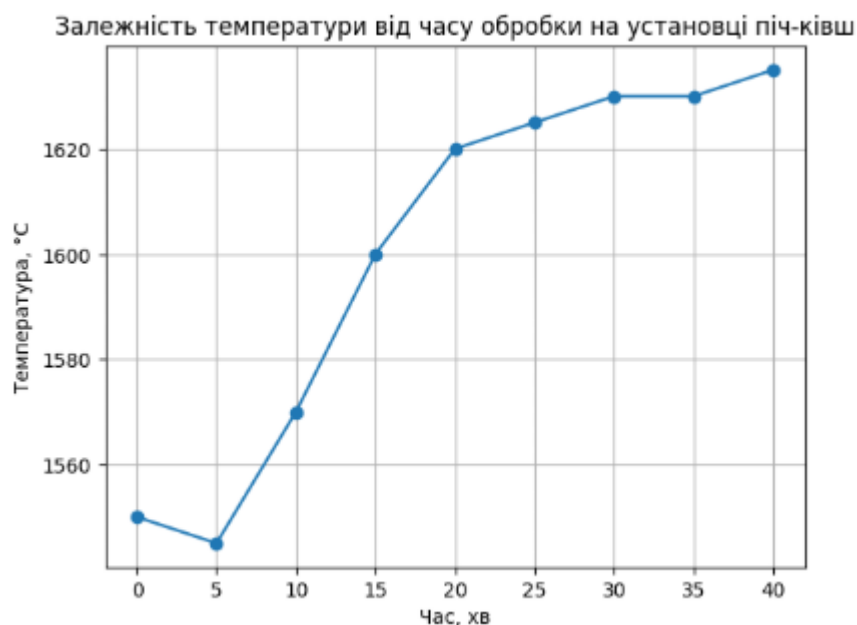


Рисунок 2.2 – Залежність температури металу від часу обробки на установці піч-ківш

Графік зміни температури металу у процесі обробки на установці піч-ківш має характерний нелінійний характер і відображає послідовність технологічних стадій процесу.

На початковому етапі (0–5 хв) спостерігається незначне зниження температури, що зумовлено тепловими втратами металу після випуску з плавильного агрегату та контактом із футерівкою ковша.

У період 5–20 хв відбувається інтенсивний нагрів металу за рахунок дії електричної дуги. Швидкість підвищення температури на цій ділянці досягає 3–6 °С/хв і визначається потужністю трансформатора та умовами теплопередачі через шлаковий шар.

На ділянці 20–30 хв крива набуває пологого характеру, що відповідає стадії стабілізації температури. У цей період основна частина підведеної енергії витрачається на компенсацію теплових втрат і забезпечення умов для проведення технологічних операцій (легування, доведення складу).

Заключний етап (30–40 хв) характеризується підтриманням температури на заданому рівні з незначними коливаннями. Це пов'язано з необхідністю забезпечення оптимального теплового стану металу перед розливанням з урахуванням подальших втрат температури.

Характер кривої визначається співвідношенням потужності дугового нагріву, інтенсивності перемішування металу та теплових втрат через футерівку і шлак.

Технологічні режими обробки сталі на установці піч-ківш визначаються не лише послідовністю операцій, а й співвідношенням швидкостей теплових і масообмінних процесів.

У промислових умовах ефективність обробки обмежується, як правило, не термодинамічною можливістю протікання реакцій, а швидкістю підведення реагуючих компонентів до міжфазної поверхні.

## 2.4 Використання трайб-апарата для введення феросплавів

У сучасній технології позапічної обробки сталі особливе значення має ефективність засвоєння легуючих та рафінуючих елементів.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис.	Дат.		11

Традиційні способи введення феросплавів у ківш характеризуються значними втратами, зумовленими окисненням, випаровуванням та переходом елементів у шлак. У зв'язку з цим широкого застосування набули системи глибинного введення добавок за допомогою трайб-апаратів.[1]

Трайб-апарат являє собою механізм подачі порошкового дроту, всередині якого містяться феросплави або активні реагенти. Введення здійснюється безпосередньо у металеву ванну на задану глибину, що принципово змінює умови взаємодії добавок із розплавом.[1]

Ключовою перевагою такого способу є перенесення зони реакції з поверхні металу в його об'єм.

Це дозволяє різко знизити вплив окиснювальної атмосфери і шлаку, а також забезпечити більш сприятливі умови для розчинення елементів.

Швидкість кожної з цих стадій визначає загальну ефективність процесу. Особливо важливим є момент вивільнення реагенту, який повинен відбуватися на достатній глибині, щоб уникнути його спливання і втрат.

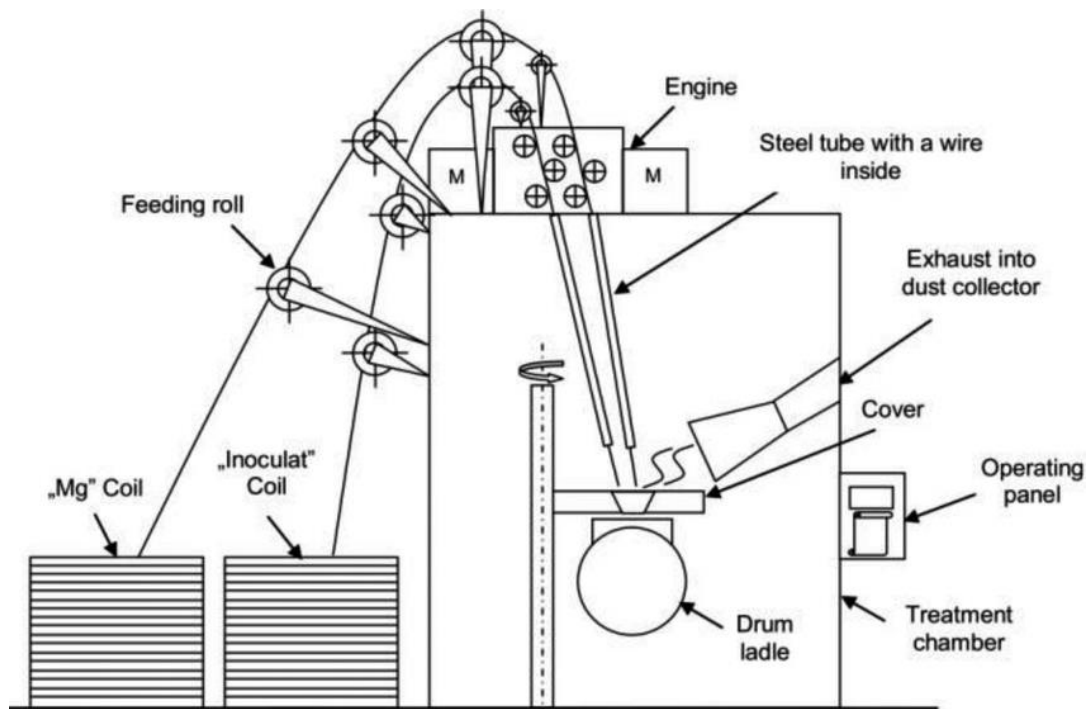


Рисунок 2.3 Схема введення порошкового дроту у розплав сталі за допомогою трайб-апарата

Схема введення порошкового дроту ілюструє принцип роботи трайб-апарата, який забезпечує транспортування реагенту безпосередньо у глибину

металевої ванни. Дріт подається з котушки через систему роликів та напрямну трубку у розплав сталі, де відбувається його поступове плавлення.[15]

Після занурення у метал оболонка дроту розплавляється, що призводить до вивільнення порошкового наповнювача.

Подальше розчинення реагенту супроводжується його інтенсивним перемішуванням за рахунок газової продувки, що забезпечує рівномірний розподіл у об'ємі металу.[15]

Конструкція прямої трубки забезпечує стабілізацію траєкторії руху дроту та його введення у нижні шари розплаву, що є принципово важливим для підвищення коефіцієнта засвоєння елементів. [15]

Глибина введення визначається швидкістю подачі дроту, температурою металу та гідродинамічними умовами у ковші.

Оптимальна швидкість подачі дроту знаходиться в межах 1–5 м/с і вибирається таким чином, щоб забезпечити занурення реагенту на глибину не менше 1/2 висоти металевої ванни. При надто малій швидкості відбувається передчасне плавлення оболонки і втрата ефективності введення. При надмірній швидкості можливе механічне пошкодження обладнання або нестабільність процесу.[15]

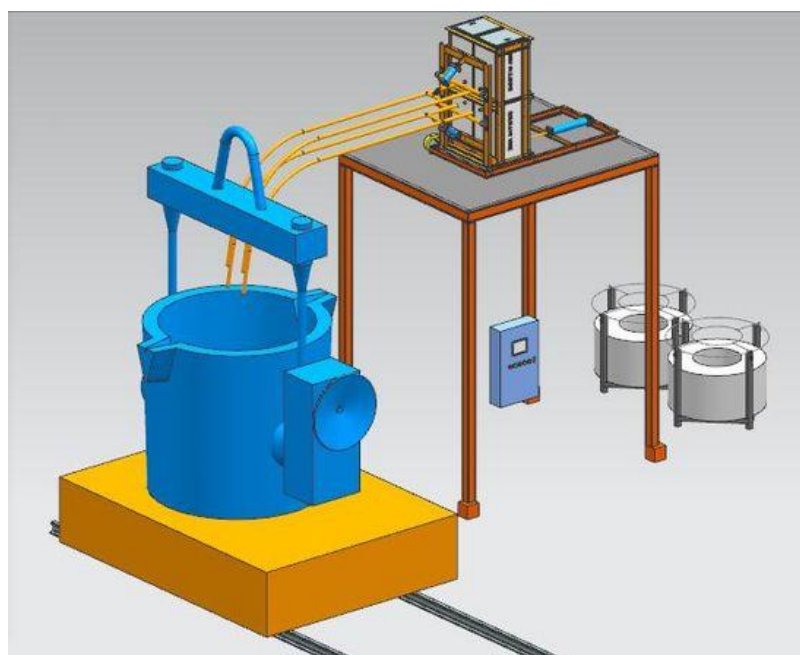


Рисунок 2.4 Трайб-апарат

Трайб-апарат для введення порошкового дроту являє собою механізовану систему, що забезпечує контрольовану подачу дроту у розплав сталі.

Основними елементами установки є:

- бункер або котушка з порошковим дротом;
- приводні ролики подачі;
- напрямна труба (канал введення);
- механізм регулювання швидкості подачі;
- система автоматичного керування.

Подача дроту здійснюється через напрямну трубку безпосередньо у металеву ванну під кутом, що забезпечує максимальну глибину проникнення. Швидкість подачі регулюється в широкому діапазоні, що дозволяє адаптувати режим введення до конкретних умов плавки.[1]

Важливим параметром є також діаметр дроту (зазвичай 9–16 мм), який визначає масу введеного реагенту за одиницю часу та глибину проникнення. Зі збільшенням діаметра зростає інерційність процесу, але підвищується стабільність введення. З точки зору масопереносу використання трайб-апарата дозволяє значно підвищити коефіцієнт засвоєння елементів.

Якщо при поверхневому введенні він може становити 40–70 %, то при використанні порошкового дроту досягає 80–95 %, що особливо важливо для дорогих легуючих елементів.

Особливу роль трайб-апарат відіграє при модифікуванні неметалевих включень, зокрема при введенні кальцію. У цьому випадку відбувається зміна морфології включень (перехід від витягнутих сульфідів до глобулярних форм), що суттєво покращує пластичні властивості сталі.

Ефективність процесу введення значною мірою залежить від гідродинаміки розплаву. Продування аргоном створює циркуляційні потоки, які забезпечують рівномірний розподіл введених елементів. При цьому важливо узгоджувати швидкість подачі дроту з інтенсивністю перемішування: недостатня турбулентність призводить до локальних концентрацій, а надмірна — до винесення реагенту у шлак.[1]

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР	Анк
Змн	Анк	№ док.им	Підпис	Лам		14

З технологічної точки зору процес введення феросплавів за допомогою трайб-апарата здійснюється, як правило, на завершальних стадіях обробки сталі. Це дозволяє мінімізувати повторне окиснення елементів і забезпечити максимальну точність доведення хімічного складу.

Ефективність введення феросплавів та модифікаторів у розплав оцінюється коефіцієнтом засвоєння, який характеризує частку елемента, що перейшла у метал і не втрачена внаслідок окиснення, випаровування або переходу в шлак.

Коефіцієнт засвоєння визначається за залежністю:

$$\eta = \frac{m_{\text{засвоєного}}}{m_{\text{введеного}}} \cdot 100\%$$

(2.1)

де:  $m_{\text{засвоєного}}$  — маса елемента, що фактично перейшла у метал, кг;  
 $m_{\text{введеного}}$  — маса введеного елемента, кг.

Значення коефіцієнта засвоєння є інтегральною характеристикою процесу і залежить від температури металу, окиснювального потенціалу шлаку, глибини введення реагенту та інтенсивності перемішування.

*Таблиця 2.4 – Ефективність засвоєння елементів при різних способах введення*

Елемент	Спосіб введення	Коефіцієнт засвоєння, %	Основні втрати
Al	На поверхню	40–60	Окиснення, шлак
Al	Порошковий дріт	75–90	Часткове окиснення
Ca	На поверхню	10–30	Інтенсивне випаровування
Ca	Порошковий дріт	60–85	Випаровування, реакції з S та O
Si	На поверхню	60–80	Окиснення
Si	Порошковий дріт	80–95	Мінімальні
Ti	На поверхню	30–50	Окиснення
Ti	Порошковий дріт	70–90	Часткове окиснення

Підвищення коефіцієнта засвоєння при використанні трайб-апарата пояснюється зміною механізму взаємодії реагенту з розплавом. У випадку поверхневого введення процес визначається умовами міжфазної взаємодії «метал–шлак–газ», де переважають окиснювальні реакції.

При введенні порошкового дроту зона реакції переноситься в об'єм металу, де парціальний тиск кисню значно нижчий. Це призводить до зміщення рівноваги реакцій у бік розчинення елементів.

Таким чином, використання трайб-апарата є одним із найбільш ефективних способів керування хімічним складом і структурою сталі в умовах позапічної обробки.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ХР	Арк
Змн.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Лист		16

### 3.ФЕРОСПЛАВИ ТА ЇХ РОЛЬ У РАФІНУВАННІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

#### 3.1 Класифікація та основні властивості феросплавів

Феросплави у сучасній металургії низьковуглецевих сталей виконують функцію не лише джерела легуючих елементів, але й активних реагентів, що визначають перебіг процесів розкислення, десульфурації та модифікування неметалевих включень. [3]

Їх застосування у позапічній обробці, зокрема на установках типу пічківш, обумовлене необхідністю забезпечення високої чистоти металу та точного регулювання його складу.

Таблиця 3.1 – Основні феросплави та їх технологічне призначення

Найменування феросплаву	Основний елемент	Вміст елемента, %	Основне призначення	Особливості використання
Феросиліцій (FeSi)	Si	45–75	Розкислення	Висока спорідненість до O
Феромарганець (FeMn)	Mn	70–80	Розкислення, десульфурація	Знижує вміст S
Фероалюміній	Al	20–50	Глибоке розкислення	Висока реакційна здатність
Ферохром (FeCr)	Cr	60–70	Легування	Підвищує корозійну стійкість
Феронікель (FeNi)	Ni	20–40	Легування	Підвищує пластичність
Феротитан (FeTi)	Ti	20–40	Мікролегування	Утворює карбіди і нітриди

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ФР		
ЗМН	Арк	№ докум	Підпис	Лам	ФЕРОСПЛАВИ ТА ЇХ РОЛЬ У РАФІНУВАННІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ		
Розроб		Лехман Д.Р.					
Правлін		Кассім Д.О.				43	1.1
Н. Контр		Кассім Д.О.			МТ-22-2		
Замквнд		Савельев С.Г.					

Фероніобій (FeNb)	Nb	60– 70	Мікролегування	Подрібнення зерна
Кальційвмісні сплави (CaSi)	Ca	20– 30	Модифікування включень	Вводиться дротом

Наведені у таблиці феросплави відрізняються не лише вмістом основного елемента, але й характером їх взаємодії з рідким металом і шлаковою фазою.

У реальних умовах позапічної обробки їх ефективність визначається не стільки хімічним складом, скільки умовами введення та станом металевої ванни.

Суттєвий вплив на засвоєння феросплавів має окиснювальний потенціал шлаку. При підвищеному вмісті оксидів заліза і марганцю частина введених елементів витрачається на відновлення шлакової фази, що призводить до зниження ефективності легування.

У таких умовах навіть високоякісні феросплави можуть мати низький коефіцієнт засвоєння.

Важливим фактором є також температура металу. З підвищенням температури зростає швидкість розчинення феросплавів, однак одночасно посилюються процеси випаровування і окиснення активних елементів. Це особливо характерно для кальцію та алюмінію, для яких існує вузький інтервал температур, у якому досягається максимальна ефективність використання.

Не менш суттєвим є вплив гідродинамічних умов у ковші. Інтенсивне перемішування металу сприяє прискоренню дифузійних процесів і вирівнюванню концентрацій, проте при надмірній турбулентності можливе захоплення шлаку та повторне окиснення металу. Таким чином, оптимізація режимів продування аргоном є необхідною умовою ефективного використання феросплавів.[7]

Особливу роль відіграє спосіб введення добавок. При традиційному засипанні феросплавів на поверхню металу значна їх частина взаємодіє зі шлаком, що знижує ступінь засвоєння.

дозволяє перенести зону реакції у об'єм металу та зменшити втрати активних елементів.

З технологічної точки зору доцільно розглядати феросплави як багатокомпонентні системи, взаємодія яких з розплавом визначається термодинамічною активністю елементів та кінетикою їх розчинення.

Основним критерієм ефективності феросплаву є не його номінальний склад, а ступінь засвоєння активного елемента в умовах конкретного технологічного процесу.

У виробництві низьковуглецевих сталей феросплави умовно поділяються за функціональним призначенням на розкислювальні, легуючі та модифікуючі. Такий поділ відображає їх роль у формуванні структури і властивостей металу.

Розкислювальні феросплави застосовуються для зниження активності розчиненого кисню. Ефективність їх дії визначається величиною зміни вільної енергії реакцій окиснення. Для елементів з високою спорідненістю до кисню (Al, Si) характерні значні від'ємні значення  $\Delta G$ , що забезпечує практично повне зв'язування кисню у вигляді оксидів. Однак у реальних умовах ефективність процесу обмежується кінетикою — швидкістю підведення елемента до реакційної зони та видалення продуктів реакції у шлак.[7]

Легуючі феросплави (ферохром, феронікель, феротитан, фероніобій) вводяться для формування заданих механічних і експлуатаційних властивостей сталі. Їх особливістю є необхідність точного дозування та високого ступеня засвоєння, оскільки навіть незначні відхилення у вмісті елементів можуть суттєво впливати на фазовий склад і структуру металу.[3]

Наприклад, титан і ніобій утворюють карбонітриди, що обмежують ріст зерна, тоді як хром стабілізує феритну або мартенситну структуру залежно від концентрації.

Модифікуючі феросплави, насамперед кальційвмісні, використовуються для цілеспрямованої зміни складу та морфології неметалевих включень. Введення кальцію забезпечує перехід тугоплавких оксидів алюмінію у рідкі або

пластичні кальцієві алюмінати, що покращує оброблюваність сталі та знижує схильність до утворення дефектів.[3]

З погляду фізичних властивостей феросплавів вирішальне значення мають температура плавлення, густина та швидкість розчинення у рідкому металі. Феросплави з температурою плавлення, значно вищою за температуру сталі, розчиняються повільно і можуть частково переходити у шлак.

Густина визначає характер руху частинок у розплаві: важкі сплави занурюються вглиб металу, тоді як легкі мають тенденцію до спливання, що знижує ефективність їх використання.

Окрему роль відіграє окиснюваність елементів. Такі елементи, як кальцій та алюміній, характеризуються високою хімічною активністю і при поверхневому введенні значною мірою втрачаються. Це обумовлює необхідність застосування спеціальних способів введення, зокрема порошкового дроту, що забезпечує доставку реагенту у глибину металевої ванни.

В умовах позапічної обробки ефективність використання феросплавів визначається сукупністю факторів: температурою металу, складом шлаку, інтенсивністю перемішування та способом введення. Саме тому одна й та сама добавка може демонструвати різну ефективність у різних технологічних умовах.

Таким чином, ефективність використання феросплавів у процесах рафінування низьковуглецевих сталей визначається комплексом взаємопов'язаних факторів: термодинамічними властивостями елементів, температурними умовами, складом шлаку та інтенсивністю перемішування. Рациональне поєднання цих параметрів дозволяє забезпечити високий ступінь засвоєння елементів і досягти необхідних показників якості сталі.

### **3.2 Характеристика феросплавів при позапічній обробці сталі**

В умовах позапічної обробки сталі феросплави працюють у специфічному термодинамічному та гідродинамічному середовищі, яке суттєво відрізняється від умов первинного плавлення. Наявність синтетичного шлаку,

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ФР	Анк.
Змн.	Анк.	№ док.им.	Підпис	Дат.		4

інтенсивне перемішування аргоном і можливість глибинного введення реагентів формують особливі вимоги до їх складу, фізичних властивостей та способу введення.[7]

Характерною особливістю використання феросплавів на установці пічків є те, що процеси їх засвоєння переважно протікають у системі з низьким окиснювальним потенціалом.

Це дозволяє значно підвищити ефективність використання активних елементів, однак водночас підвищує вимоги до точності дозування і стабільності технологічного режиму.[7]

Однією з ключових характеристик феросплавів у цих умовах є їх здатність до швидкого розчинення у рідкому металі. Процес розчинення визначається тепловим станом ванни, розміром частинок або діаметром дроту, а також інтенсивністю перемішування.

У випадку недостатньої швидкості розчинення частина феросплаву може переходити у шлак або не встигати повністю засвоюватися до моменту розливання. Особливе значення має взаємодія феросплавів із шлаковою фазою. Навіть при низькому вмісті оксидів у шлаку можливе часткове окиснення введених елементів, особливо тих, що мають високу хімічну активність.

У зв'язку з цим для позапічної обробки застосовують шлаки з підвищеною основністю і мінімальним вмістом FeO, що знижує втрати легуючих компонентів. Для феросплавів, що містять елементи з високою пружністю пари визначальним фактором є спосіб введення.

При традиційному засипанні на поверхню такі елементи практично не засвоюються через інтенсивне випаровування. У зв'язку з цим їх застосування можливе лише за умови глибинного введення у вигляді порошкового дроту, що забезпечує локалізацію реакції у об'ємі металу.

Важливою характеристикою феросплавів у процесах позапічної обробки є також їх вплив на неметалеві включення. Умови LF дозволяють не тільки видаляти включення, але й керувати їх складом і морфологією. Наприклад, введення кальційвмісних феросплавів сприяє утворенню легкоплавких аномілітів, що покращує їх видалення у шлак та зменшує негативний вплив на

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ФР	Анк
В						5
Змн.	Анк.	№ док.им.	Підпис	Лам		



CaSi	Ca	Порошковий дріт	Випаровування при поверхневому введенні	Модифікування включень
------	----	-----------------	---	------------------------

Після наведених характеристик феросплавів у умовах позапічної обробки доцільно відзначити, що їх поведінка у розплаві визначається не лише індивідуальними властивостями, але й взаємодією з усією системою «метал–шлак–газ».

Одним із визначальних факторів є співвідношення швидкостей процесів розчинення феросплаву та його можливих втрат. У випадку, коли швидкість розчинення є нижчою за швидкість окиснення або випаровування, ефективність використання елемента різко знижується. Це особливо характерно для активних компонентів, таких як алюміній, титан і кальцій, для яких навіть короточасний контакт із окиснювальним середовищем призводить до значних втрат.

Умови позапічної обробки дозволяють цілеспрямовано впливати на це співвідношення. Зниження вмісту оксидів у шлаку, підвищення його основності та використання інертної атмосфери створюють передумови для переважання процесів розчинення над процесами окиснення.

Суттєвим є також вплив гідродинаміки розплаву. Інтенсивність перемішування визначає товщину дифузійного шару на межі фаз і, відповідно, швидкість масопереносу. При оптимальних витратах аргону забезпечується рівномірний розподіл введених елементів у всьому об'ємі металу. Водночас надмірна турбулентність може призводити до вторинного окиснення та захоплення шлакових частинок, що негативно впливає на якість сталі.[14]

Особливістю використання феросплавів на завершальних стадіях обробки є необхідність врахування так званого «залишкового часу» — інтервалу між введенням добавки та початком розливання. Для елементів, що беруть участь у повільних дифузійних процесах недостатній залишковий час може призвести до їх неповного засвоєння або нерівномірного розподілу у

металі.[7]

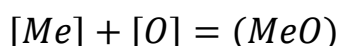
					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ФР	Анк.
Змн.	Анк.	№ док.м.	Підпис	Лам		8

У практиці роботи установок піч-ківш це враховується шляхом зміни послідовності введення феросплавів. Спочатку вводяться компоненти, що потребують тривалого часу на розчинення, а на завершальних етапах — високореакційні елементи, які швидко взаємодіють із розплавом, але схильні до втрат. Таким чином, характеристика феросплавів у процесах позапічної обробки повинна розглядатися у взаємозв'язку з параметрами технологічного режиму. Лише комплексний підхід, що враховує термодинамічні умови, кінетику процесів і гідродинаміку розплаву, дозволяє забезпечити високий ступінь засвоєння елементів і стабільність якості сталі.

### 3.3 Вплив феросплавів на процес розкислення та рафінування сталі

Процеси розкислення та рафінування сталі у сучасній металургії є взаємопов'язаними стадіями, ефективність яких значною мірою визначається вибором феросплавів та умовами їх введення. У системі «метал–шлак» феросплави виступають як джерело активних елементів, що змінюють хімічний стан розплаву та спрямовують перебіг фізико-хімічних реакцій у потрібному напрямку.[8]

Розкислення сталі полягає у зниженні активності розчиненого кисню шляхом його зв'язування у вигляді оксидів. Введення феросплавів, що містять елементи з високою спорідненістю до кисню, призводить до протікання реакцій типу:



де Me — елемент-розкислювач.

Термодинамічна можливість цих реакцій визначається величиною зміни вільної енергії. Найбільш ефективними розкислювачами є алюміній і кремній, для яких характерні значні від'ємні значення  $\Delta G$  у діапазоні температур сталеплавильного процесу. Проте в умовах позапічної обробки вирішальне значення має не лише термодинаміка, а й кінетика процесу.[8]

При введенні феросплавів у розплав спочатку відбувається їх нагрівання і плавлення, після чого елемент дифундує у металеву фазу. Реакція з киснем протікає на межі фаз або в об'ємі металу, залежно від способу введення.

При поверхневому введенні зона реакції зміщується до межі «метал–шлак», що				Анк
КНУ.РБ.136.26.113с-06.ФР				
Змн.	Анк.	№ док.	Підпис	Лат
				9

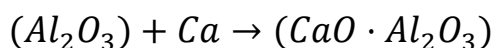
підвищує ймовірність вторинного окиснення. У випадку глибинного введення (через трайб-апарат) реакції протікають у об'ємі металу, що суттєво підвищує ефективність розкислення.[8]

Важливим наслідком розкислення є утворення неметалевих включень. Характер цих включень визначається видом феросплаву. Наприклад, при використанні алюмінію формуються тугоплавкі оксиди  $Al_2O_3$ , які мають високу температуру плавлення і схильність до агрегації. Це може ускладнювати їх видалення у шлак і негативно впливати на якість сталі.[17]

Застосування кремнію або марганцю призводить до утворення більш легкоплавких оксидів, однак ефективність розкислення у цьому випадку є нижчою. У практиці часто використовують комбіноване розкислення, при якому поєднуються переваги різних елементів.[17]

Процес рафінування сталі включає не лише видалення кисню, але й зниження вмісту сірки та неметалевих включень. Феросплави відіграють у цьому процесі опосередковану, але важливу роль. Зокрема, введення марганцю сприяє зв'язуванню сірки у вигляді  $MnS$ , що зменшує її активність у металі.

Особливе місце займають кальційвмісні феросплави, які використовуються для модифікування неметалевих включень. Введення кальцію призводить до реакцій типу:



У результаті утворюються легкоплавкі включення, які мають сферичну форму і краще видаляються у шлак. Це сприяє підвищенню пластичності сталі та зниженню схильності до утворення дефектів.

Ефективність рафінування значною мірою залежить від узгодженості дії феросплавів і шлакової фази. При високій основності шлаку і низькому вмісті оксидів заліза створюються умови для переходу продуктів реакцій у шлак. У протилежному випадку можливе накопичення включень у металі.[17]



Графік 3.1 Залежність вмісту розчиненого кисню від часу розкиснення сталі

Графік зміни вмісту розчиненого кисню у сталі в процесі розкислення має нелінійний спадний характер. На початковому етапі (0–5 хв) спостерігається різке зниження концентрації кисню, що обумовлено інтенсивною взаємодією активних елементів феросплавів (Al, Si) з розчиненим киснем.

На наступній ділянці (5–15 хв) швидкість розкислення зменшується, що пояснюється зниженням концентрації кисню та переходом процесу у дифузійно-контрольовану область. У цей період значну роль відіграє інтенсивність перемішування металу.

На завершальному етапі (15–30 хв) спостерігається вихід на асимптоту, що відповідає досягненню рівноважного вмісту кисню. Подальше зниження концентрації можливе лише за рахунок покращення умов видалення неметалевих включень у шлак.

*Таблиця 3.3 – Вплив основних феросплавів на процеси розкислення та рафінування сталі*

Феросплав	Основний елемент	Вплив на розкислення	Вплив на включення	Вплив на рафінування
FeSi	Si	Середній	Утворення силікатів	Часткове очищення
FeMn	Mn	Слабкий–	Утворення MnS	Десульфуратія
Змн.	Анк.	№ док.им.	Підпис.	Лат.

		середній		
FeAl	Al	Високий	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (тугоплавкі)	Обмежене
FeTi	Ti	Середній	Карбіди, нітриди	Мікролегування
FeNb	Nb	Незначний	Карбонітриди	Подрібнення зерна
CaSi	Ca	Непрямий	Модифікація включень	Інтенсивне очищення

Таким чином, феросплави у процесах розкислення та рафінування виконують комплексну функцію: вони знижують вміст кисню, впливають на склад і морфологію неметалевих включень, а також сприяють видаленню шкідливих домішок. Ефективність їх дії визначається не лише хімічним складом, але й умовами введення, складом шлаку та гідродинамікою розплаву.

						КНУ.РБ.136.26.113с-06.ФР	Арк
Змн	Арк	№ докум	Підпис	Лист			11

## 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФЕРОСПЛАВІВ ТА РОЗРАХУНОК ЇХ ВИТРАТ ПРИ ОБРОБЦІ СТАЛІ НА УСТАНОВЦІ ПІЧ-КІВШ

### 4.1 Вихідні дані для проведення розрахунків

Для обґрунтування вибору феросплавів та визначення їх витрат при обробці сталі на установці піч-ківш необхідно задати вихідні технологічні параметри процесу, які відображають реальні умови позапічної обробки.[13]

У якості об'єкта розрахунку приймається плавка низьковуглецевої сталі, обробка якої здійснюється на установці типу LF із застосуванням продування аргоном та введення феросплавів у кусковому вигляді і у вигляді порошкового дроту.

Маса металу в ковші приймається на рівні промислових значень і становить:

$$M = 120\text{т}$$

Температура металу після випуску з конвертера становить:

$$T_0 = 1580^\circ\text{C}$$

Кінцева температура перед розливанням:

$$T_k = 1620^\circ\text{C}$$

Хімічний склад сталі до обробки характеризується підвищеним вмістом розчиненого кисню та недостатнім рівнем легуючих елементів, що потребує проведення розкислення і коригування складу.

*Таблиця 4.1 – Вихідний та заданий хімічний склад сталі*

Елемент	Вміст до обробки, %	Заданий вміст, %
C	0,06	0,05–0,07
Si	0,05	0,20–0,30
Mn	0,30	0,50–0,70
S	0,020	≤0,010
P	0,015	≤0,015
O	0,080	≤0,010

Вміст кисню у вихідному металі є підвищеним, що обумовлює

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ОВ			
Змн.	Арк.	№ док.им.	Підпис	Дат.	<b>ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФЕРОСПЛАВІВ ТА РОЗРАХУНОК ЇХ ВИТРАТ ПРИ ОБРОБЦІ СТАЛІ НА УСТАНОВЦІ ПІЧ-КІВШ</b>	Літ.	Арк.	Акронімів
Розроб.		Лехман Д.Р.				54	8	
Перевір.		Касіім Д.О.				MT-22-2		
Н. Коншия		Касіім Д.О.						
Замверд		Савельєв С.Г.						

необхідність проведення інтенсивного розкислення із застосуванням

к

р Вміст сірки перевищує допустимі значення для низьковуглецевих еталей, тому передбачається проведення десульфурації за рахунок формування основного шлаку та введення марганцевмісних і кальційвмісних добавок.

н *Таблиця 4.2 – Характеристика застосовуваних феросплавів*

іФеросплав	Вміст основного елемента, %	Коефіцієнт засвоєння, %
FeSi	65	80–85
FeMn	75	85–90
FeAl	98	60–70
CaSi (дріт)	Ca – 30	20–40

а Для проведення розрахунків також приймаються значення коефіцієнтів засвоєння елементів, які враховують втрати на окиснення, випаровування та перехід у шлак.

л Ці коефіцієнти є узагальненими і відповідають умовам позапічної обробки на установках піч-ківш.

м Витрати феросплавів визначаються на основі матеріального балансу елементів з урахуванням необхідного приросту їх вмісту у сталі та коефіцієнтів засвоєння.

і Загальна формула для розрахунку витрати феросплаву має вигляд:

$$m = \frac{(C_k - C_0) \cdot M}{\eta \cdot w}$$

р(4.1)

м де  $m$  — маса феросплаву, кг;  $C_k, C_0$  — кінцевий і початковий вміст елемента, %;  $M$  — маса металу, кг;  $\eta$  — коефіцієнт засвоєння;  $w$  — масова частка елемента у феросплаві.

н

#### 4.2 Розрахунок витрат феросиліцію для розкислення та коригування вмісту кремнію

х

Визначення витрат феросиліцію проводиться на основі матеріального балансу кремнію з урахуванням необхідного підвищення його вмісту у сталі та коефіцієнта засвоєння.

е

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ОВ	Анк
р						2
Змн.	Анк.	№ док.	Підпис	Лам		

о

М

а

$$M = 120\text{т} = 120000\text{кг}$$

с

Початковий вміст кремнію:

а

$$C_{Si}^0 = 0,05\%$$

м

Кінцевий вміст кремнію:

е

$$C_{Si}^k = 0,25\%$$

т

Вміст кремнію у феросиліції:

а

л

$$w_{Si} = 65\% = 0,65$$

Коефіцієнт засвоєння:

$$\eta = 0,82$$

Визначення необхідного приросту кремнію.

$$\Delta C_{Si} = C_{Si}^k - C_{Si}^0$$

(4.2)

$$\Delta C_{Si} = 0,25 - 0,05 = 0,20\%$$

Розрахунок маси кремнію, що повинна засвоїтись металом.

$$m_{Si}^{\text{засв}} = \frac{\Delta C_{Si} \cdot M}{100}$$

(4.3)

$$m_{Si}^{\text{засв}} = \frac{0,20 \cdot 120000}{100} = 240\text{кг}$$

З урахуванням коефіцієнта засвоєння

Фактична кількість кремнію, яку потрібно ввести:

$$m_{Si}^{\text{ББ}} = \frac{m_{Si}^{\text{засв}}}{\eta}$$

(4.4)

$$m_{Si}^{\text{ББ}} = \frac{240}{0,82} = 292,68\text{кг}$$

Розрахунок витрати феросиліцію:

$$m_{Si}^{\text{Fe}} = \frac{m_{Si}^{\text{ББ}}}{w_{Si}}$$

(4.5)

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.0В	Анк
Змн.	Анк	№ док.им.	Підпис	Лам		3

$$m_{Si}^{Fe} = \frac{292,68}{0,65} = 450,28 \text{ кг}$$

Витрата феросиліцію для забезпечення необхідного рівня кремнію та проведення розкислення становить:

$$m_{FeSi} \approx 450 \text{ кг}$$

Отримане значення витрати феросиліцію відповідає умовам позапічної обробки сталі на установці піч-ківш і враховує втрати кремнію на окиснення та взаємодію зі шлаком.

Застосування феросиліцію у розрахованій кількості забезпечує досягнення заданого вмісту кремнію в металі та створює передумови для ефективного протікання процесу розкислення.

#### 4.3 Розрахунок витрат ферромарганцю для доведення вмісту марганцю

Розрахунок витрат ферромарганцю виконується на основі матеріального балансу марганцю з урахуванням заданого підвищення його вмісту у сталі та коефіцієнта засвоєння в умовах позапічної обробки.

Початковий вміст марганцю:

$$C_{Mn}^0 = 0,30\%$$

Кінцевий вміст марганцю:

$$C_{Mn}^k = 0,60\%$$

Вміст марганцю у ферромарганці:

$$w_{Mn} = 75\% = 0,75$$

Коефіцієнт засвоєння:

$$\eta = 0,88$$

Визначення необхідного приросту марганцю:

$$\Delta C_{Mn} = 0,60 - 0,30 = 0,30\%$$

Розрахунок маси марганцю, що повинна засвоїтись металом:

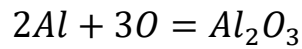
$$m_{Mn}^{\text{засв}} = \frac{0,30 \cdot 120000}{100} = 360 \text{ кг}$$

З урахуванням коефіцієнта засвоєння:

$$m_{Mn}^{\text{вв}} = \frac{360}{0,88} = 409,09 \text{ кг}$$

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.0В	Дрк.
ЗМН	Дрк.	№ док.м.	Підпис.	Лам.		4





Молярні маси: Al=27, O=16.

З реакції:

$$2 \cdot 27 = 54 \text{ кг Al реагує з } 3 \cdot 16 = 48 \text{ кг O}$$

Визначаємо витрату алюмінію на 1 кг кисню:

$$\frac{54}{48} = 1,125 \text{ кг Al / кг O}$$

Маса алюмінію, що повинна засвоїтись:

$$m_{Al}^{\text{засв}} = 84 \cdot 1,125 = 94,5 \text{ кг}$$

З урахуванням коефіцієнта засвоєння:

$$m_{Al}^{\text{вв}} = \frac{94,5}{0,65} = 145,38 \text{ кг}$$

Розрахунок витрати алюмінію:

$$m_{FeAl} = 0,98145,38 = 148,35 \text{ кг}$$

Отримане значення витрати алюмінію враховує стехіометричні співвідношення реакції розкислення та втрати елемента у процесі взаємодії з киснем і шлаком.

Порівняно з кремнієм і марганцем, алюміній характеризується більшою ефективністю як розкислювач, що обумовлено його високою хімічною спорідненістю до кисню. Водночас значні втрати алюмінію при введенні знижують коефіцієнт його засвоєння, що потребує точного дозування.

#### **4.5 Аналіз результатів розрахунку та технологічні рекомендації**

Отримані у попередніх підрозділах результати розрахунку витрат феросплавів дозволяють оцінити особливості формування хімічного складу сталі в умовах позапічної обробки та встановити взаємозв'язок між витратами матеріалів і технологічними параметрами процесу.

Звертає на себе увагу, що найбільша частка у сумарному споживанні припадає на ферромарганець.

Це пов'язано не лише з необхідністю підвищення вмісту марганцю у металі, але й з тим, що даний елемент бере участь у зв'язуванні сірки, знижуючи її активність у розплаві. Таким чином, його роль виходить за межі

Витрати феросиліцію знаходяться на близькому рівні, що пояснюється подвійним функціональним призначенням кремнію.

З одного боку, він використовується для доведення хімічного складу, а з іншого — бере участь у первинному розкисленні металу. При цьому частина кремнію витрачається на взаємодію зі шлаком, що безпосередньо впливає на його фактичний коефіцієнт засвоєння.

Найменша витрата характерна для алюмінію, однак саме цей елемент забезпечує досягнення необхідного рівня чистоти металу за вмістом кисню. Така ситуація пояснюється високою спорідненістю алюмінію до кисню, внаслідок чого навіть невеликі його кількості здатні істотно змінити стан системи. [13] Разом з тим, значні втрати алюмінію при введенні обумовлюють необхідність його точного дозування та вибору раціонального способу подачі.

Порівняльний аналіз показує, що визначальним фактором, який впливає на витрати феросплавів, є не лише необхідний приріст вмісту елементів, а й умови їх засвоєння. Втрати на окиснення, перехід у шлак і випаровування суттєво коригують розрахункові значення і повинні враховуватись при організації технологічного процесу.[13]

З практичної точки зору доцільним є диференційований підхід до введення феросплавів. Матеріали, що характеризуються відносно стабільною поведінкою у розплаві, можуть подаватися на початкових стадіях обробки. Натомість елементи з високою хімічною активністю доцільно вводити безпосередньо перед завершенням процесу, коли окиснювальний потенціал системи мінімальний.

Окремо слід відзначити вплив шлакового режиму. Підтримання високої основності та обмеження вмісту оксидів заліза створює сприятливі умови для засвоєння феросплавів і переходу продуктів реакцій у шлак. У протилежному

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ОВ	Арк.
О						7
Змн.	Арк.	№ док.им.	Підпис	Дат.		

випадку ефективність використання легуючих елементів знижується, що призводить до їх перевитрати.[13]

Інтенсивність перемішування металу також потребує оптимізації. Недостатнє перемішування уповільнює процеси масопереносу, тоді як надмірне може викликати вторинне окиснення за рахунок залучення шлакової фази. Тому вибір режиму продування аргоном має здійснюватися з урахуванням стадії обробки та характеру введених добавок.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ОВ	Арк
Змн	Арк	№ докum	Підпис	Лист		8

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження процесів рафінування низьковуглецевих сталей в умовах позапічної обробки на установці типу піч-ківш. На основі аналізу сучасного стану металургійного виробництва встановлено, що забезпечення стабільної якості сталі, зниження вмісту шкідливих домішок та неметалевих включень, а також точне регулювання хімічного складу є ключовими чинниками підвищення конкурентоспроможності металопродукції.

У першому розділі розглянуто вимоги до хімічного складу та якості низьковуглецевих сталей, а також проаналізовано вплив основних домішок і газів на властивості металу. Показано, що навіть незначні відхилення у вмісті сірки, фосфору, кисню та водню можуть суттєво погіршувати експлуатаційні характеристики сталі. Обґрунтовано необхідність застосування ефективних методів позапічної обробки для досягнення високого рівня чистоти металу.

У другому розділі детально досліджено конструкцію, принцип роботи та технологічні можливості установки піч-ківш. Встановлено, що поєднання електродугового підігріву, інтенсивного перемішування металу інертним газом і використання рафінуючих шлаків створює оптимальні умови для протікання масообмінних і хімічних процесів. Це дозволяє забезпечити вирівнювання температури та складу металу, а також інтенсифікувати процеси розкислення і десульфурації. У третьому розділі розглянуто класифікацію та властивості феросплавів, а також їх роль у процесах рафінування сталі. Встановлено, що феросиліцій, феромарганець та алюміній є ефективними матеріалами для розкислення та коригування хімічного складу сталі. Їх використання забезпечує зв'язування розчиненого кисню, зниження вмісту неметалевих включень і покращення структури металу.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ВИ		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ док.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Лист</i>	<b>ВИСНОВКИ</b>		
<i>Розроб.</i>		Лехман Д.Р.					
<i>Перевір.</i>		Кассім Д.О.			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акривіть</i>
						62	2
<i>Н. Контр.</i>		Кассім Д.О.			МТ-22-2		
<i>Затверд.</i>		Савельєв С.Г.					

У четвертому розділі виконано розрахунок витрат феросплавів для обробки низьковуглецевої сталі на установці піч-ківш. На основі вихідних даних визначено необхідну кількість феросиліцію, феромарганцю та алюмінію для досягнення заданого хімічного складу сталі.

Проведений аналіз показав, що раціональний підбір і дозування феросплавів дозволяє не лише забезпечити необхідні показники якості металу, але й знизити матеріальні витрати у виробництві.

У результаті виконаної роботи підтверджено, що використання установки піч-ківш є ефективним засобом підвищення якості низьковуглецевих сталей. Оптимізація параметрів обробки, раціональний вибір складу шлаку та витрат феросплавів дозволяють досягти високого ступеня рафінування металу, знизити вміст шкідливих домішок і забезпечити стабільність хімічного складу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при розробці та вдосконаленні технологій позапічної обробки сталі на металургійних підприємствах, що сприятиме підвищенню ефективності виробництва та якості готової продукції.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.ВИ	Арк.
Змн	Арк	№ докум	Підпис	Лист		2

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Губін Г. В., Кассім Д. О. Сучасні технології виробництва сталі : навч. посіб. – Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2020. – 310 с.
2. Туркевич В. М. Позапічна обробка сталі : навч. посіб. – Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2018. – 290 с.
3. Воронов В. І., Козлов О. В. Металургія сталі : підручник. – Дніпро : НМетАУ, 2017. – 512 с.
4. Фролов Ю. А., Ємельянов В. С. Теорія та технологія сталеплавильних процесів : навч. посіб. – Київ : Вища школа, 2015. – 384 с.
5. Бабенко О. І. Основи металургії чорних металів : навч. посіб. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 280 с.
6. Сірик М. М. Технологія виробництва сталі : навч. посіб. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. – 300 с.
7. Кравченко О. В. Процеси рафінування сталі : навч. посіб. – Дніпро : НМетАУ, 2019. – 250 с.
8. Шевченко О. П. Позапічна обробка металів : навч. посіб. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – 270 с.
9. ДСТУ 2651:2005. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки. – Київ : Держспоживстандарт України, 2006. – 14 с.
10. ДСТУ EN 10025-2:2019. Вироби гарячекатані з конструкційних сталей. Частина 2. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 60 с.
11. ДСТУ ISO 14284:2008. Сталь і чавун. Відбирання та підготовка зразків для визначення хімічного складу. – Київ : Держспоживстандарт України, 2009. – 20 с.
12. Кузьменко В. В. Металургійні процеси та агрегати : навч. посіб. – Київ : Центр учбової літератури, 2018. – 320 с.

					КНУ.РБ.136.26.113с-06.СВ					
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дат.</i>	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>					
<i>Розроб.</i>		Лехман Д.Р.						<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акронім</i>
<i>Перевір.</i>		Кассім Д.О.							64	2
<i>Н. Контр.</i>		Кассім Д.О.						МТ-22-2		
<i>Затверд.</i>		Савельєв С.Г.								

13. Fruehan R. J. The Making, Shaping and Treating of Steel. – 11th ed. – Pittsburgh: AISE Steel Foundation, 1998. – 1420 p.
14. Turkdogan E. T. Fundamentals of Steelmaking. – London: The Institute of Materials, 1996. – 331 p.
15. Secondary Steelmaking / ed. by G. A. Irons. – Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 2000. – 450 p.
16. Zhang L., Thomas B. G. State of the Art in the Control of Inclusions during Steel Ingot Casting // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2003. – Vol. 34. – P. 685–705.
17. Mills K. C. The Estimation of Slag Properties. – London: The Institute of Materials, 1993. – 350 p.

					KHУ.РБ.136.26.113с-06.СВ	<i>Арк.</i>
<i>ЗМН.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Лам</i>		2