

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Д. О. Дьомін

ТЕХНОЛОГІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

Навчальний посібник
для магістрів денної та заочної форми навчання
за спеціальністю
G10 Металургія

затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»
протокол № 1 від 19.02.2026

Харків
2026

УДК 669:621.74:681.5
ДЗО

Рецензенти:

В. Ю. Селівьорстов, доктор технічних наук, професор, Український державний університет науки і технологій;

О. М. Хорошилов, доктор технічних наук, професор, Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна.

Автор: Дьомін Дмитро Олександрович, доктор технічних наук, професор

ДЗО Технології та автоматизація металургійного виробництва / Д. О. Дьомін. – Харків: ТОВ «ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП», 2026. – 198 с. <https://doi.org/10.62067/978-617-8242-11-4>

DOI: 10.62067/978-617-8242-11-4
ISBN 978-617-8242-11-4

Розглянуті технологічні процеси та схеми автоматизації процесів плавки первинної та вторинної металургії, зокрема: доменна плавка, мартенівська плавка, конвертерна плавка, ваграночна плавка, електродугова плавка, індукційна плавка, дуплекс-процеси плавки. Представлено математичний апарат для дослідження металургійних процесів. Призначено для студентів другого рівня вищої освіти за спеціальністю G10 Металургія денної та заочної форм навчання, а також може бути корисним аспірантам, що готують дисертації за спеціальністю G10 Металургія.
Іл. 68. Табл. 29. Бібліогр.: 17 назв.

ISBN 978-617-8242-11-4

УДК 669:621.74:681.5

Ця книга містить інформацію, отриману з достовірних і високоповажних джерел. Було докладено розумних зусиль для публікації достовірних даних та інформації, але автор і видавець не можуть взяти на себе відповідальність за достовірність усіх матеріалів або за наслідки їхнього використання. Автори та видавці намагалися відстежити власників авторських прав на всі матеріали, відтворені в цій публікації, і приносять вибачення власникам авторських прав, якщо дозвіл на публікацію в такому вигляді не був отриманий. Якщо якийсь матеріал не був визнаний захищеним авторським правом, будь ласка, напишіть нам і повідомте про це, щоб ми могли виправити це в будь-якому майбутньому перевиданні. Видавець, автори та редактори можуть з упевненістю стверджувати, що поради та інформація, наведені в цій книзі, є правдивими і точними на дату публікації. Ані видавець, ані автори, ані редактори не дають жодних гарантій, явних чи неявних, щодо матеріалів, які містяться в цій книзі, або за будь-які помилки чи упущення, які могли бути допущені. Повідомлення про торгові марки: Назви продуктів або компаній можуть бути торговельними марками або зареєстрованими торговельними марками і використовуються лише для ідентифікації та пояснення без наміру порушити права на них.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	1
ВСТУП	2
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОМЕННІЙ ПЛАВКИ	3
1.1. Сутність та продукти технологічного процесу доменної плавки	3
1.2. Фізико-хімічні процеси, що протікають в доменній печі	8
1.3. Напрямки інтенсифікації доменної плавки	12
1.4. Контрольовані параметри доменної плавки та засоби автоматизації	14
1.5. Принцип дії систем завантаження печі	26
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПЛАВКИ В МАРТЕНІВСЬКИХ ПЕЧАХ	30
2.1. Сутність технологічного процесу мартенівської плавки	30
2.2. Принцип дії системи перекидання клапанів	32
2.3. Автоматизація мартенівської плавки	34
2.4. Управління тепловою потужністю мартенівської печі	37
2.5. Схема керування тепловим режимом двованної печі	39
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ	42
3.1. Сутність киснево-конвертерного процесу	42
3.2. Визначення сумарної кількості кисню в конвертерному процесі задля забезпечення заданого хімічного складу сталі	43
3.3. Схема автоматизації конвертерного процесу	44
РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАВКИ У ВАГРАНЦІ	49
4.1. Технологія плавки та конструкції вагранок	49

4.2. Діаграми зв'язків параметрів плавки в вагранці та керуючі фактори процесу.....	58
4.3. Схема автоматизації плавки в вагранці.....	67

**РОЗДІЛ 5. ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ
ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЛАВКИ.....**

.....	69
5.1. Технологія електродугової плавки.....	69
5.2. Технологічні схеми електродугової плавки.....	75
5.3. Схема автоматизації електродугової плавки.....	81

**РОЗДІЛ 6. ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ
ПЛАВКИ В ІНДУКЦІЙНИХ ПЕЧАХ.....**

.....	91
6.1. Технологія плавки в індукційних тигельних печах.....	91
6.2. Технологічні схеми індукційної плавки.....	99
6.3. Схема автоматизації плавки в індукційних тигельних печах.....	105

**РОЗДІЛ 7. ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ
ДУПЛЕКС-ПРОЦЕСІВ ПЛАВКИ.....**

.....	109
7.1. Технологічна схема дуплекс-процесу «вагранка – дугова електропіч».....	109
7.2. Технологічна схема та автоматизація дуплекс-процесу «вагранка – індукційна піч».....	110
7.3. Технологічна схема дуплекс-процесу «вагранка – трьохванний копильник» та «вагранка – мала сталеплавильна установка / кисневий конвертер».....	113

**РОЗДІЛ 8. МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ В ДОСЛІДЖЕННІ
МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ.....**

.....	116
8.1. Методи експериментально-промислових досліджень в аудиті технологічних процесів металургійного виробництва.....	116
8.2. Математичне моделювання технологічних процесів.....	136
8.3. Оптимізація технологічних процесів.....	159

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	182
-------------------------------	------------

СПИСОК ТАБЛИЦЬ




1.1	Технологічні параметри доменної плавки.....	6
1.2	Технологічні прийоми інтенсифікації доменної плавки та очікувані ефекти	13
1.3	Контрольовані параметри доменного процесу та засоби контролю	23
1.4	Параметри доменного процесу, що регулюються.....	25
2.1	Автоматично контрольовані параметри мартенівської печі ...	35
4.1	Контрольовані параметри та технічні засоби автоматизації технологічного процесу плавки в вагранці	68
5.1	Контрольовані параметри та технічні засоби автоматизації плавки в електродуговій печі	88
6.1	Контрольовані параметри та технічні засоби автоматизації плавки в індукційній печі	105
8.1	Приклад розрахунку статистичних характеристик щодо вибірки виробничих даних вимірювання твердості чавуну	118
8.2	Чисельні значення межі критичної області, що застосовується для перевірки гіпотези про рівність середньоарифметичного значення заданому значенню параметра	126
8.3	Чисельні значення межі критичної області, що застосовується для перевірки гіпотези про рівність дисперсій параметра, розрахованих за двома вибірками даних	127
8.4	Вибірка № 1 виробничих даних щодо визначення розмірів виливку.....	130
8.5	Вибірка № 2 виробничих даних щодо визначення розмірів виливку.....	132
8.6	Критичні значення ($t_{кр}$) розподілу Стьюдента	135
8.7	Результати обмірів розміру виливка	135
8.8	Результати хімічного аналізу плавок вуглецевої сталі	149
8.9	Перерахунок натуральних значень керуючих факторів у нормовані.....	150

8.10	Приклад плану експерименту для $k = 4$	151
8.11	Таблиця плану експерименту.....	152
8.12	Варіанти представлення поліному	153
8.13	Результати розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії за даними табл. 8.11 для серії експериментів 1	154
8.14	Результати розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії за даними табл. 8.11 для серії експериментів 2	155
8.15	Результати розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії по даних табл. 8.11 для серії експериментів 3.....	156
8.16	ОЦКП для двох незалежних змінних.....	157
8.17	Конструктивні параметри тигля.....	163
8.18	Технологічні режими лиття	164
8.19	Результати процедури Бокса-Уїлсона для експериментальної оптимізації тиску в ресивері.....	164
8.20	Результати процедури Бокса-Уїлсона для експериментальної оптимізації тривалості заповнення кристалізатора.....	165
8.21	План промислових експериментів та їх результати	172

СПИСОК РИСУНКІВ

1.1	Схема доменного процесу (використана частина графічного зображення з Вікіпедії). Зони печі: I – горн; II – заплечики; III – розпар; IV – шахта; V – колошник; 1 – льотка для випуску чавуну; 2 – льотка для випуску шлаку; 3 – фурми; 4 – система газовідведення; 5 – засипний апарат....	4
1.2	Двоконусний засипний апарат: 1 – великий конус; 2 – малий конус; 3 – наповнюючий клапан великого конусу	4
1.3	Схема зв'язків в системі C–O ₂ –CO–CO ₂	8
1.4	Контур функціональної схеми автоматизації доменної плавки	14
1.5	Контур функціональної схеми автоматизації роботи повітрянагрівачів	15
1.6	Схема системи автоматичного розподілу дуття по фурмах....	16
1.7	Схема до звужувального пристрою: <i>a</i> – нормальна діафрагма; <i>b</i> – нормальне сопло Вентурі; <i>v</i> – нормальна труба Вентурі; <i>W</i> _{1,2} – швидкість потоку рідини; <i>F</i> _{1,2} – площа потоку; <i>ρ</i> ₁ – щільність рідини; <i>P</i> ' _{1,2} – тиск рідини у трубопроводі до звуження потоку та у його найвужчому місці; ΔP – перепад тиску	17
1.8	Схема диференціального манометру	18
1.9	Конструкція диференціального манометру	19
1.10	Схема управління температурою гарячого дуття при різних режимах роботи повітрянагрівачів: 1 – регулятор температури; 2 – клапан змішувальний; 3 – клапан; 4 – клапан гарячого дуття; 5 – клапан холодного дуття; 6 – відокремлювальні клапани газу та горілки; 7 – клапан димовий	21
1.11	Схема клапанів в засипному апараті: 1 – газовідводи в системі очищення колошникового газу; 2 – газопроводи очищеного газу; 3 – привод вирівнювального наповнюючого клапану; 4 – привод вирівнювального атмосферного клапану; 5 – свічі; 6, 9 – клапани; 7 – малий конус; 8 – великий конус	27

2.1	Схема мартенівської печі: <i>L</i> – довжина поду; <i>a</i> – товщина поду; <i>h</i> – глибина ванни; <i>H</i> – висота насадок.....	31
2.2	Схема системи перекидання.....	33
2.3	Схема автоматизації мартенівської плавки.....	35
2.4	Схема керування тепловим режимом двованної печі: <i>I</i> – фурми для продувки; <i>II</i> – зводові горілки; <i>III</i> – шлаковики; <i>IV</i> – шибери відсічки; <i>V</i> – перекидні пристрої; <i>VI</i> – котел-утилізатор.....	40
3.1	Схема автоматизації конвертерної плавки.....	44
3.2	Схема автоматизації теплового режиму міксеру для витримки рідкого чавуну.....	46
3.3	Функціональна схема автоматизації процесу неперервної розливки сталі: 1 – сталерозливальний ківш; 2 – проміжний ківш; 3 – кристалізатор; 4 – вода на охолодження кристалізатора; 5 – вода на вторинне охолодження; 6 – вода на секції вторинного охолодження; 7 – технологічне мастило в кристалізатор; 8 – тягнуча кліть; 9 – газорізка; 10 – рольганг.....	47
4.1	Приклад конструкції вагранки без копильника.....	50
4.2	Приклад конструкції вагранки з копильником.....	51
4.3	Приклад системи охолодження вагранки з водоохолоджуваним опорним кільцем: 1 – водяна рубашка; 2 – водоохолоджуване опорне кільце; 3 – повітряна коробка; 4 – фурма; 5 – розпорка; 6 – повітряна засувка; 7 – глазок; 8 – люк для видалення шламу. Водоохолоджуване опорне кільце: 1 – кожух вагранки; 2 – кільце; 3 – косинка; 4 – планка; 5 – труби для підводу та відводу води; 6 – монтажні зварні шви.....	52
4.4	Приклад системи охолодження вагранки з водяним охолодженням кожуха шахти та фурм, що працює на нагрітому повітрі: 1 – газовідбірні канали; 2 – подіна; 3 – фурми; 4 – кільцеві труби системи охолодження.....	53
4.5	Шари матеріалів, що завантажуються у вагранку, та розподіл температури по висоті печі: 1 – холоста колоша; 2 – металева колоша; 3 – паливна колоша.....	54
4.6	Діаграма зв'язків у ваграночному процесі.....	59

4.7	Прямі та зворотні структурні зв'язки між параметрами процесу плавки:  – рівень керуючих параметрів;  – рівень внутрішніх параметрів;  – рівень параметрів, що відображають показники якості, верхні індекси 1, 2, 3 у визначенні змінних відносяться до чавуну, шлаку та газу відповідно.....	60
4.8	Спрощена схема управління процесом ваграночної плавки: 1 – вагранка; 2 – іскрогасник; 3 – фурменний пояс; 4 – мокрий очисник; 5 – рекуператор радіаційний; 6 – рекуператор конвективний; 7 – димосос; 8 – вентилятор; 9 – копильник	62
4.9	Схема вагранки з рекуператором підігріву повітря: 1 – водяна рубашка; 2 – підвід холодної води; 3 – відвід зливної води; 4 – підвід повітря, нагрітого до 400°C; 5 – конвективна частина рекуператора; 6 – радіаційна частина рекуператора; 7 – отвори для кріплення горілок.....	63
4.10	Блок-схема частини системи керування завантаженням, що включає регулювання температурного режиму та продуктивності вагранки шляхом подачі робочої паливної та металевої колош: 1 – бункер із коксом; 2 – бункер із металевою шихтою; 3 – виконавчий механізм системи завантаження металевої колоші; 4 – виконавчий механізм системи завантаження робочої паливної колоші	65
4.11	Елемент системи керування шиберами бункерних заслінок	66
4.12	Схема автоматизації плавки в вагранці.....	67
5.1	Електродугова піч	70
5.2	Схема встановлення електродугової печі.....	76
5.3	Трипозиційна карусельна установка з дуговими електропечами: I – піч на позиції підігріву шихти газовими пальниками; II – піч на позиції плавки; III – піч на позиції доведення та видачі сплаву; 1 – стенд для підігріву шихти; 2 – відсмоктування димових газів з печей; 3 – пічний плавильний трансформатор; 4 – пульт управління; 5 – трансформатор для доведення сплаву (малої потужності); 6 – гідроприводна станція; 7 – привід каруселі; 8 – поворотний стіл	77

- 5.4 Схема двованної дугової печі: *a* – схема процесу;
b – компонування..... 78
- 5.5 Планування плавильного прольоту сталеливарного цеху середнього, великого та важкого лиття: 1 – стенд для набору зводів; 2 – дугова сталеплавильна електропіч ДСП-25; 3 – дугова сталеплавильна електропіч ДСП-12; 4 – стенд для сушіння ковшів; 5 – установка для вибивання зводів електропечей; 6 – мостовий електричний кран середнього режиму роботи; 7 – установка для варки смоли; 8 – піч для випалу руди та феросплавів; 9 – установка для зберігання добавок; 10 – мостовий електричний кран важкого режиму роботи, $Q = 50/10$ т, кабіна з кондиціонуванням повітря; 11 – машина для завантаження в електропечі сипучих матеріалів та скачування шлаку; 12 – кошики для шихти; 13 – мульдозавантажувальна машина; I – пульт управління; II – місце зберігання вогнетривів; III – комора; IV – ремонтно-механічна майстерня..... 79
- 5.6 Схема заливальної ділянки системи «електродугова піч – ливарний конвеєр»: I – електропічний трансформатор; II – електропіч; III – заливальна ділянка системи «піч – ливарний конвеєр»; IV – двопозиційний заливальний автомат; 1 – гідроциліндр повороту зводу печі; 2 – електропривод механізму вертикального переміщення електродів; 3 – гідроциліндр відведення електродотримачів; 4 – електропривод затвора бункера з шихтовими матеріалами; 5 – гідроциліндр переміщення робочих дверей; 6 – гідроциліндри нахилу печі; 7 – електропривід механізму переключення ступенів напруги трансформатора; 8 – електропривод повороту заливального двопозиційного автомата; 9 – гідроциліндр повороту заливального ковша..... 80
- 5.7 Робоча діаграма електродугової печі 82
- 5.8 Етапи плавки в електродуговій печі, по яких формується управління процесом: *a* – початковий етап плавки, потужність, що підводиться – P_I ; *b* – етап плавки, коли в шихті прорізани колодязі і дуга закрита з усіх боків шихтою, потужність, що підводиться максимальна – P_{II} ; *в* – етап плавки,

	коли вся шихта розплавлена і дуга знов відкрита, потужність, що підводиться, мінімальна, – P_{III} ; ε – графік потужності 83
5.9	Схема автоматичного регулювання електричного режиму для однієї фази 84
5.10	Функціональна схема однієї фази регулятора потужності на тиристорах 85
6.1	Схема індукційної плавки чавуну та графіки потужності, що підводиться по етапах плавки 92
6.2	Установка індукційної печі тигельної 100
6.3	Плавильне відділення чавуноливарного цеху з індукційними печами тигельними: 1 – індукційні тигельні печі; 2 – насосні станції гідроприводів; 3 – установки для завантаження печей; 4 – візок; 5 – змішувачі для футерувальних мас; 6 – стенди для підігріву та сушіння ковшів; 7 – система витяжки від стендів; 8 – пульт управління шихтовкою; 9 – установка дозування феросплавів 101
6.4	Розріз плавильного відділення чавуноливарного цеху з тигельними індукційними печами 102
6.5	Установка індукційної каналної печі: 1 – канална піч; 2 – конденсатори; 3 – контрольно-вимірювальні прилади; 4 – трансформатор; 5 – гідравлічна станція нахилу печі; 6 – система водяного охолодження 104
6.6	Схема автоматизації індукційної плавки 105
6.7	Схема регулювання температурного режиму індукційної плавки: 1 – регулятор теплового режиму; 2 – блок завдання уставки регулятора електричного режиму; 3 – регулятор електричного режиму; 4 – прилад вимірювання температури; 5 – датчик температури металу; 6 – датчик температури футеровки; u_1 – завдання директивного графіка електричного режиму плавки; u_2 – завдання директивного графіка температурного режиму плавки; u_3 – завдання гранично допустимої температури футеровки 108
7.1	Схема дуплекс-процесу «вагранка – дугова електропіч»: 1 – роздавальна система завантаження шихти; 2 – скіповий підйомник; 3 – вагранка; 4 – міксер; 7 – ливарний конвеєр; 8 – ділянка заливки 109

7.2	Схема автоматизації дуплекс-процесу плавки «вагранка – індукційна піч»: I – вагранка; II – фурменний пояс; III – накопичувач; IV – жолоб; V – піч індукційна; VI – циклон; VII – рекуператор радіаційний; VIII – мокрий струбер; IX – повітряний змішувач; X – вимикач живлення; XI – симетруючий пристрій; XII – регулюючий трансформатор з перемикачем ступеней напруги; XIII – індуктор; XIV – батарея конденсаторна; XV – насос системи охолодження; XVI – реле блокування і сигналізації; XVII – джерело постійного струму для контролю стану тигля і ізоляції індуктора.....	111
7.3	Технологічна схема вагранки в дуплекс-процесі «вагранка – трьохванний копильник»: 1, 2, 3 – ванни.....	114
7.4	Технологічна схема дуплекс-процесу «вагранка з копильником – мала сталеплавильна установка»: 1 – вагранка; 2 – копильник; 3 – ванна для рафінування; 4 – кільцевий провід для подачі кисню у вагранку; 5 – трубка-сопло для подачі кисню у вагранку; 6 – висувна водоохолоджувана фурма для подачі кисню у рідку металеву ванну; 7 – холодильник; 8 – труба з зонтом для відводу газів	115
8.1	Вигляд кривої закону нормального розподілу: $M(u)$ – математичне очікування нормованої випадкової величини u ; $D(u)$ – дисперсія нормованої випадкової величини u	119
8.2	Ілюстрація загального принципу перевірки гіпотез: критичні області знаходяться зліва та справа від червоної вертикальної лінії.....	122
8.3	Приклад гістограми.....	123
8.4	Візуалізація перевірки гіпотези про нормальний закон розподілу	124
8.5	Вибір області планування експерименту	139
8.6	Результати моделювання	143
8.7	Стратегія крутого сходження: 1 – план експерименту для лінійної моделі; 2 – лінійне наближення градієнту; 3 – стаціонарна область.....	160

8.8 Система з двоступінчастим поданням повітря в процесі лиття під низьким тиском: 1 – ресивер; 2–5 – елементи пневматичної системи; 6 – піч; 7 – тигель; 8 – металопровід; 9 – форма; 10 – прилад для запису протитиску в формі та тиску в печі.....	163
8.9 Початковий симплекс	168
8.10 Переміщення симплексу у факторному просторі Секв-Сг-Сш	173
8.11 Реалізація процедури рідж-аналізу	175
8.12 Залежність $r = r(\lambda)$	176
8.13 Залежність $y = y(\lambda)$	177
8.14 Залежність $y = y(r)$	177
8.15 Множина субоптимальних рішень щодо визначення значень вхідних змінних, що задовольняють вимогам НВ = 180–250 (вхідні змінні задані у нормованому вигляді)	178
8.16 Номограма, що описує множину субоптимальних рішень для дослідженої області значень вхідних змінних у натуральному вигляді, що задовольняють вимоги НВ = 180–250	179
8.17 Поверхня відгуку, що описує розподіл значень твердості конструкційного чавуну в факторному просторі С – Секв (вхідні змінні в нормованому вигляді)	181

МЕТА РОЗДІЛІВ

РОЗДІЛ 1: ознайомитись з основами технології доменного виробництва та принципами автоматизації процесів плавки в доменних печах.

РОЗДІЛ 2: ознайомитись з основами технології плавки в мартенівських печах.

РОЗДІЛ 3: ознайомитись з основами плавки у конвертері, а також схемами автоматизації конвертерного процесу.

РОЗДІЛ 4: ознайомитись з основами плавки у вагранці, а також схемами автоматизації таких процесів.

РОЗДІЛ 5: ознайомитись з технологією та технологічними схемами плавки в електродугових печах та схемами автоматизації таких процесів.

РОЗДІЛ 6: ознайомитись з технологією та технологічними схемами плавки в індукційних печах та схемами автоматизації таких процесів.

РОЗДІЛ 7: ознайомитись з технологічними схемами дуплекс-процесів плавки та схемами автоматизації таких процесів.

РОЗДІЛ 8: ознайомитись з математичним апаратом, що використовується в дослідженні металургійних процесів задля їх технологічного аудиту, математичного моделювання та оптимізації процесів.

ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник призначений для студентів другого рівня вищої освіти за спеціальністю G10 Металургія денної та заочної форм навчання при вивченні дисциплін «Автоматизація металургійного виробництва», «Інноваційні основи металургії», в рамках курсового та дипломного проектування, а також аспірантів зі спеціальності G10 Металургія.

Особливістю даного посібника є мінімум теоретичних даних та акцент на практичній інформації, що потрібна для інженерів-металургів ливарного та металургійного виробництва. Відповідно до вимог таких виробництв знання студентів мають стосуватися перш за все розуміння основ технологічних процесів та схем автоматизації процесів плавки в різних печах, вхідних та вихідних параметрів цих процесів. Такі знання стануть в нагоді при управлінні процесами ливарного та металургійного виробництва задля забезпечення, перш за все, вимог якості готової продукції, продуктивності та мінімізації ресурсо- та енерговитрат виробництва.

Відповідно до цього, матеріали навчального посібника включають опис лише основних базових принципів технології та автоматизації процесів плавки. Знаючи ці основи, майбутні інженери зможуть розвивати далі металургійні процеси в своїй подальшій професійній діяльності з урахуванням сучасних досягнень в сфері комп'ютерно-інтегрованих систем, засобів автоматизації та впровадження штучного інтелекту.

Задля зручності користування навчальним матеріалом посилення на джерела літератури, які були використані, не наведені за текстом, а зведені в кінці посібника в загальну літературу. За сучасних можливостей з використанням відповідного програмного забезпечення ідентифікувати будь-яке джерело літератури не становить труднощі, тому будь-який користувач посібника в разі необхідності для подальшого поглиблення своїх знань зможе це зробити.

ВСТУП

Металургійне виробництво належить до базових промислових виробництв, без існування якого не можна уявити собі існування та розвиток промисловості країни. Основними процесами металургійного виробництва є процеси плавки, що дозволяють отримувати рідкі чорні та кольорові сплави для подальшого виготовлення виробів, що йдуть на потреби машинобудування, авіабудування, кораблебудування, будівництва тощо. Тобто, усі базові сфери економіки держави використовують продукцію металургійного виробництва.

Сучасні тренди розвитку важкої промисловості передбачають проєктування, створення та впровадження сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизації. Це потреба, яка обумовлена необхідністю забезпечення комплексу вимог до сучасного виробництва, серед яких: отримання продукції високої якості, зменшення енерго- та ресурсовитрат, висока продуктивність тощо. Для реалізації цього інженери металургійного виробництва мають досконало знати базові основи та принципи металургійних процесів, параметри цих процесів, фактори керування та принципові схеми автоматизації.

Зважаючи на необхідність для студентів мати під рукою необхідну базову інформацію щодо технологій та автоматизації металургійних процесів плавки, в даний навчальний посібник було включено виключно основні поняття, що стосуються цих процесів. Усвідомлення базових знань з технологій та автоматизації процесів плавки дасть майбутнім інженерам свободу професійної творчості, спрямованої на створення та впровадження сучасних металургійних систем та процесів.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

***Мета розділу:** ознайомитись з основами технології доменного виробництва та принципами автоматизації процесів плавки в доменних печах.*

Робочі питання:

1. Сутність та продукти технологічного процесу доменної плавки
2. Фізико-хімічні процеси, що протікають в доменній печі
3. Напрямки інтенсифікації доменної плавки
4. Контрольовані параметри доменної плавки та засоби автоматизації
5. Принцип дії систем завантаження печі

1.1. Сутність та продукти технологічного процесу доменної плавки

Доменний процес проводиться у доменних печах. Доменна піч – це піч шахтного типу, що працює за принципом протитечії: згори донизу рухаються холодні шихтові матеріали, а назустріч ним знизу підіймаються гарячі гази, що є продуктами згоряння коксу, який є паливом. Як шихтові матеріали у доменних печах використовують руду, агломерат, котуни, металодобавки, кокс і флюси. В якості останнього, як правило, використовується вапняк. У процесі плавки відбувається відновлення різних елементів, насамперед заліза, а кисень оксидів перетворюється на газ – CO та CO₂. В результаті доменного процесу виходять продукти плавки: чавун, шлак, колошниковий (доменний) газ та колошниковий пил.

На рис. 1.1 представлено схему доменного процесу.

Завантаження шихти в піч здійснюється скиповим підйомником чи конвеєром, що піднімає шихту на колошник, потім шихта надходить у приймальну воронку двоконусного засипного апарату (рис. 1.2).

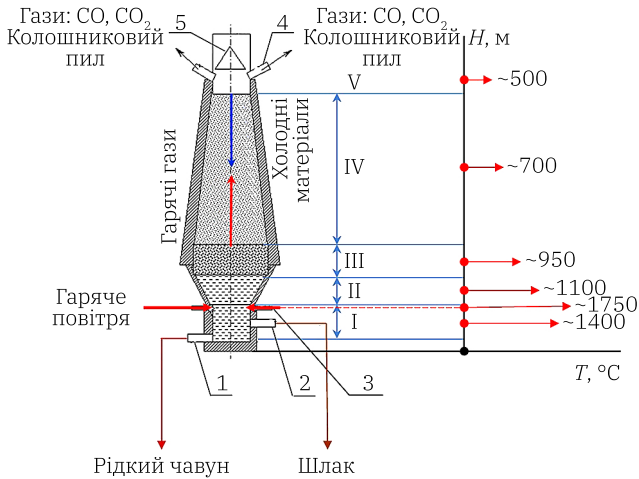


Рис. 1.1 – Схема доменного процесу (використана частина графічного зображення з Вікіпедії). Зони печі: I – горн; II – запличики; III – розпар; IV – шахта; V – колошник; 1 – льотка для випуску чавуну; 2 – льотка для випуску шлаку; 3 – фурми; 4 – система газовідведення; 5 – засипний апарат

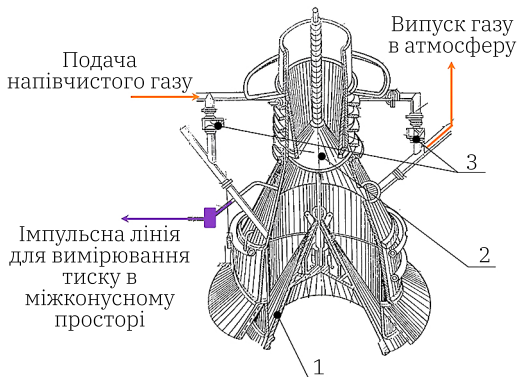


Рис. 1.2 – Двоконусний засипний апарат: 1 – великий конус; 2 – малий конус; 3 – наповнючий клапан великого конуса

Для розподілу шихти за перерізом колошника передбачений розподільник шихти, що обертається. Змінюючи характер завантаження шихти, керують перебігом доменної печі. Керування такого виду називають регулюванням зверху. Раціональний розподіл газу за перерізом доменної печі є однією з основних умов її економічної роботи та багато в чому визначається системою завантаження матеріалів.

Прийнято певні умовні позначення компонентів, що подаються: К – кокс; А – агломерат (або Р – руда); вертикальна стрілка ↓ – опускання великого конуса. Число, що стоїть після стрілки, вказує, за якого рівня шихти Н опускається великий конус (рівень засипання відлічують від нижньої кромки великого конуса в опущеному стані до поверхні шихти печі). Наприклад, позначення Р2К2 ↓ 1.75 м говорить про те, що на великий конус завантажують спочатку два скіпи руди, потім два скіпи коксу і після досягнення рівнем засипання позначки Н = 1.75 м відкривають великий конус (система завантаження типу рудою вперед). Системи подачі РКРК Н, КРКР Н називають змішаними; К2Р2 ↓ Н – коксом вперед; РК ↓ НРК ↓ Н – розщепленою і т. д. Більш поширені циклічні системи завантаження: $mP_2K_2 \downarrow nKР_2K \downarrow H$, де m і n – число подач у циклі (наприклад, $m : n = 6 : 1; 4 : 3; 2 : 5$ і т. д.).

При подачі типу рудою вперед рудна частина шихти зосереджується на периферії печі, що зумовлює зменшення температури газу, що залишає піч, і збільшення вмісту в ньому CO_2 , тобто використання теплової та хімічної енергії газів покращується. Найбільша навантаженість периферії рудними матеріалами виникає при подачах типу РК ↓ РК ↓ і РКРК ↓, але за таких систем завантаження добитися задовільного ходу печі не вдається, оскільки опір стовпа шихти збільшується настільки, що порушується рівний сход шихти. Тому зазначені системи можна застосовувати в комбінації з іншими, наприклад, РКРК ↓ і Р2К2 ↓ у співвідношенні 1 : 4, РК ↓ РК ↓ і Р2К2 ↓ у співвідношенні 1 : 10, 3 (КЗАЗ ↓) + 2 (КА2К ↓), 2 (КЗ ↓ АЗ ↓) + 3 (КА2К ↓), 3 (А2К2 ↓) + 2 (КА2К ↓) і т. д.

При зміні системи подачі змінюється форма кривої розподілу діоксиду вуглецю в газі за радіусом колошника. Ця крива має характерні точки: $\{CO_2\}_{\max}$, $\{CO_2\}_p$ – вміст CO_2 максимальний та на периферії відповідно, $\{CO_2\}_c$ – те ж, по осі печі. Тому ця крива є

параболою. Як параметр, що характеризує криву розподілу діоксиду вуглецю по радіусу печі, може бути використана величина

$$M = \frac{\{CO_2\}_{\max} - \{CO_2\}_p}{\{CO_2\}_{\max} - \{CO_2\}_c}.$$

Таким чином, критерій M є характеристикою вихідної величини – розподілу газів перерізу печі. Вхідною величиною є різні системи завантаження.

В табл. 1.1 представлено технологічні параметри доменної плавки.

Таблиця 1.1 – Технологічні параметри доменної плавки

Параметри технологічного процесу	Чисельний показник	Примітки
1	2	3
Об'єм повітря, що вдувається в піч, м ³ /хв	~2000–10000	Залежить від об'єму печі. Можуть додаватися також кисень, природний газ, пиловугільне паливо або інших добавок
Склад повітря, що вдувається в піч	Атмосферне повітря (містить 20.9% O ₂ , 75% N ₂ , пару води – 1.5%) або збагачене киснем повітря (до 30% O ₂)	
Температура нагріту повітря, що вдувається, °С	1100–1300	
Швидкість дуву повітря, м/с	~200	

Продовження Таблиці 1.1

1	2	3
Тиск, під яким вдувається повітря, МПа	~0.2–0.35	
Тиск колошникового газу при виході з печі, МПа	~0.13–0.145	
Час перебування газу в печі, с	~2–10	Менші значення відповідають периферії, більші – ближчі до осьової частини
Середня швидкість руху газу, м/с	~24–40	
Середня швидкість опускання шихти всередині печі, м/хв	~0.06	
Об'єм пари, що подається в міжконусний простір, т/год	~2.5–3.0	При наборі подачі шихти витрата пари сягає ~0.5 т/год, перед роботою великого конусу витрата сягає ~2.2–2.5 т/год
Фракція коксу та шихтових матеріалів, мм кокс окатки агломерат вапняк	~25–40 ~10–15 ~50–60 ~50–60	Шихта представляє собою грудковий матеріал різної форми
Вага матеріалів однієї подачі, т	> 20	Залежить від об'єму печі
Цикл подачі матеріалів, хв	~5–8	Здійснюється близько 8–12 подач на годину

1.2. Фізико-хімічні процеси, що протікають в доменній печі

Серед основних фізико-хімічних процесів в доменній печі виділяються наступні:

- горіння вуглецю коксу та реакцій окиснення та відновлення;
- видалення вологи з шихтових матеріалів;
- згоряння природного газу з утворенням монооксиду вуглецю і водню (якщо в піч додатково вдувається природний газ);
- відновлення заліза з рудних оксидів;
- утворення цементиту (Fe_3C);
- відновлення оксидів, що містяться в шихті;
- розклад вапняку;
- плавлення пустої породи і шлакоутворення.

Горіння вуглецю коксу та реакції окиснення та відновлення.

Горіння вуглецю коксу відбувається за рахунок кисню, що подається із повітрям, яке вдувається через фурми, за екзотермічною реакцією



Реакція (1.1) є реакцією горіння та розвивається переважно в області фурм. При віддаленні від них внаслідок взаємодії двоокису вуглецю з коксом починає розвиватися ендотермічна реакція відновлення



Загальна схема, що відображає зв'язки в системі $\text{C}-\text{O}_2-\text{CO}-\text{CO}_2$, має вигляд, представлений на рис. 1.3.

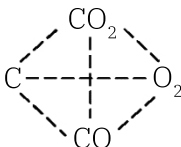


Рис. 1.3 – Схема зв'язків в системі $\text{C}-\text{O}_2-\text{CO}-\text{CO}_2$

Тому в такій системі можливі також наступні реакції:



Швидкість горіння вуглецю вимірюється його витратою в одиницю часу (v_c) та може бути приблизно визначено за формулою

$$v_c = \frac{\{O_2\} K \sqrt{\frac{4\omega D}{\pi d}}}{m \left(K + \sqrt{\frac{4\omega D}{\pi d}} \right)}, \quad (1.5)$$

де $\{O_2\}$ – концентрація кисню в ядрі газового потоку, %;

K – константа швидкості реакції горіння;

ω – приведена швидкість газового потоку, м/с;

d – розмір куска коксу, мм;

m – вагове відношення кисню до вуглецю в продуктах згоряння: при згорянні відповідно до реакції (1.1) $m = 32:12 = 2.67$, при згорянні відповідно до реакції (1.4) $m = 16:12 = 1.33$.

Стан рівноваги реакцій (1.1)–(1.4) описується рівняннями:

$$\lg K_1 = \lg \frac{P_{CO_2}}{P_{O_2}} = \frac{20586}{T} + 0.044, \quad (1.6)$$

$$\lg K_2 = \lg \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} = -\frac{8916}{T} + 9.113, \quad (1.7)$$

$$\lg K_3 = \lg \frac{P_{CO}^2}{P_{O_2}} = \frac{11670}{T} + 9.156, \quad (1.8)$$

$$\lg K_4 = \lg \frac{P_{CO_2}^2}{P_{CO}^2 P_{O_2}} = \frac{29502}{T} + 9.069. \quad (1.9)$$

Видалення вологи з шихтових матеріалів.

Волога в шихтових матеріалах може бути гігроскопічною та гідратною. Перша починає випарюватися на колошнику за рахунок тепла газів, що виходять з печі. Температура цих газів сягає близько 150–350°C.

Друга видаляється за більш високих температур, тобто на нижчих горизонтах доменної печі.

Волога, що потрапляє з атмосферним повітрям, розкладається вуглецем коксу за реакцією



Чим вища вологість дуття, тим вище необхідно піднімати температуру дуття для компенсації тепла на ендотермічну реакцію розкладання води.

Згоряння природного газу.

Процес відбувається, якщо в піч додатково вдувається природний газ. Цей процес супроводжується збільшенням у горновому газі вмісту відновлювальних газів H_2 і CO . Але це призводить до дещо зниження у фурменній зоні температури, оскільки H_2O і CO , що утворюються при згорянні природного газу, надалі взаємодіють з вуглецем коксу з поглинанням тепла.

Відновлення заліза з рудних оксидів.

Рудна частина шихтових матеріалів являє собою оксиди заліза Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO . Ці оксиди взаємодіють в печі з відновлюваними середовищами, якими є окис вуглецю (CO) та вуглець коксу (C).

Перша відновлювана середа взаємодіє з рудним матеріалом в процесі проходження через нього, друга – при контакті руди з розпеченим коксом. Реакції відновлення мають вигляд:



Утворення цементиту (Fe_3C).

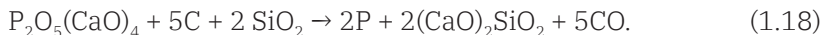
При контакті з оксидом вуглецю і коксом за високої температури залізо та у вигляді губчатої маси, яке утворилося при відновленні руди, насичується вуглецем з утворенням цементиту (Fe_3C):



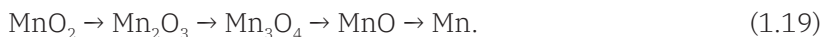
Це призводить до того, що температура плавлення заліза знижується, внаслідок чого воно швидко переходить у рідкий стан і краплями стікає в горн доменної печі. Цей процес супроводжується додатковим насиченням заліза вуглецем, тобто вміст вуглецю в сплаві збільшується.

Відновлення оксидів, що містяться в шихті.

В доменній печі відбувається відновлення оксидів кремнію, фосфору, марганцю, які містяться в шихті. Реакції відновлення кремнію та фосфору мають вигляд:



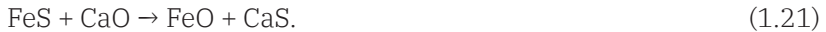
Оксид марганцю відновлюється відповідно до наступної схеми



Важливим процесом є процес десульфурації, продуктом якого є сульфід марганцю, який утворюється завдяки введенню марганцю. Сульфід марганцю є сполукою, яка не розчиняється в залізі і легко переходить у шлак



Ще одним механізмом десульфурації є взаємодія сульфїду заліза з продуктом розпаду вапняку



Продуктом цієї реакції є сульфід кальцію, який є нерозчинним в залізі та переходить у шлак.

Розклад вапняку.

Розклад вапняку відбувається за реакцією



Це ендотермічна реакція, яка розвивається на певних горизонтах доменної печі, починаючи з того горизонту, на якому досягається необхідна температура для початку реакції (1.22). Ця температура сягає близько 760°C. Процес завершується на горизонтах з температурою вищою за 1000°C. Вуглекислий газ CO_2 , що виділяється за таких температур, реагує з вуглицем коксу за реакцією (1.2).

Плавлення пустої породи і шлакоутворення.

Пуста порода і зола коксу складаються в основному з кремнезему (SiO_2) і глинозему (Al_2O_3), які мають високу температуру плавлення. При введенні вапняку, який відіграє роль флюсу, відбувається зниження температури плавлення і утворення рідкого шлаку. При цьому до досягнення рівня фурм зі шлаку встигають відновитися майже все залізо і значна частина марганцю.

Зола коксу переходить у шлак на горизонті фурм, що спричиняє підвищення об'єму шлаку та насичення його SiO_2 і Al_2O_3 . Шлак, що відтворюється, умовно поділяється на три види: первинний, проміжний, кінцевий. Кінцевий шлак випускається з печі та використовується для подальшої обробки з метою отримання нових продуктів, які використовуються, наприклад, у будівництві. Об'єм шлаку, що утворюється в процесі плавки, становить приблизно (0.3–1) т на 1 т чавуну.

1.3. Напрямки інтенсифікації доменної плавки

Інтенсифікація доменної плавки передбачає комплекс заходів, спрямованих на підвищення ефективності процесу, яка визначається якістю отриманого чавуну, ресурсо- та енерговитратами

на плавку. В табл. 1.2 наведено можливі фактори інтенсифікації, технологічні прийоми забезпечення їх впливу на процес та можливі результати використання цих прийомів.

Таблиця 1.2 – Технологічні прийоми інтенсифікації доменної плавки та очікувані ефекти

Фактор	Технологічні прийоми	Результати
Підвищення тиску газів у печі	Пережим струменя газу на газопроводі відведення доменного газу спеціальним дросельним пристроєм. Це приводить до підвищення тиску газу під колошником до величини 150–250 кПа	– збільшення продуктивності печі на 5–10%; – зниження витрати коксу на 2–5%; – зниження винесення пилу з газом на 35–50%; – зменшення перепаду тиску між низом і верхом печі та, відповідно, підйомної сили газів і їхнього об'єму, збільшуючи час їхнього перебування в печі
Збагачення повітряного дуття киснем	Насичення дуття киснем до 30–35%	– збільшення кількості спалюваного в горні коксу і швидкості пропалювання
Збагачення горнового газу відновниками CO і H ₂	Вдування одночасно з киснем природного газу	– пониження температури в горні; – зменшення витрати коксу на 5–15%; – підвищення продуктивності на 4–7%
Підвищення температури повітряного дуття	Підігрів дуття у повітрянагрівачах (1100–1200°C)	– зменшення витрати коксу і кількості шлаку в печі

1.4. Контрольовані параметри доменної плавки та засоби автоматизації

Контурне представлення функціональної схеми автоматизації доменного процесу наведено на рис. 1.4, а елементи функціональної схеми автоматизації роботи повітрянагрівачів наведені на рис. 1.5.

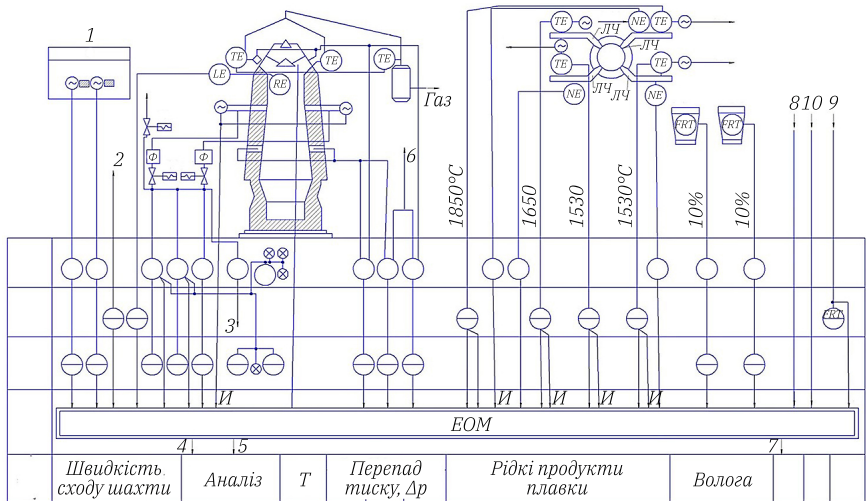


Рис. 1.4 – Контур функціональної схеми автоматизації доменної плавки

На доменній печі та її повітрянагрівачах здійснюють автоматичний контроль та регулювання ряду технологічних та тепло-технічних параметрів: тиску, температури, витрати, рівня, складу та ін. Більшість цих параметрів контролюють та регулюють за допомогою серійних контрольно-вимірювальних приладів, але деякі системи контролю та регулювання мають свої особливості.

Для контролю радіального розподілу газового потоку в стовпі шихти вимірюють температуру і склад газу по радіусу колошника, для чого застосовують газовідбірну трубу, що пересувається за допомогою лебідки.

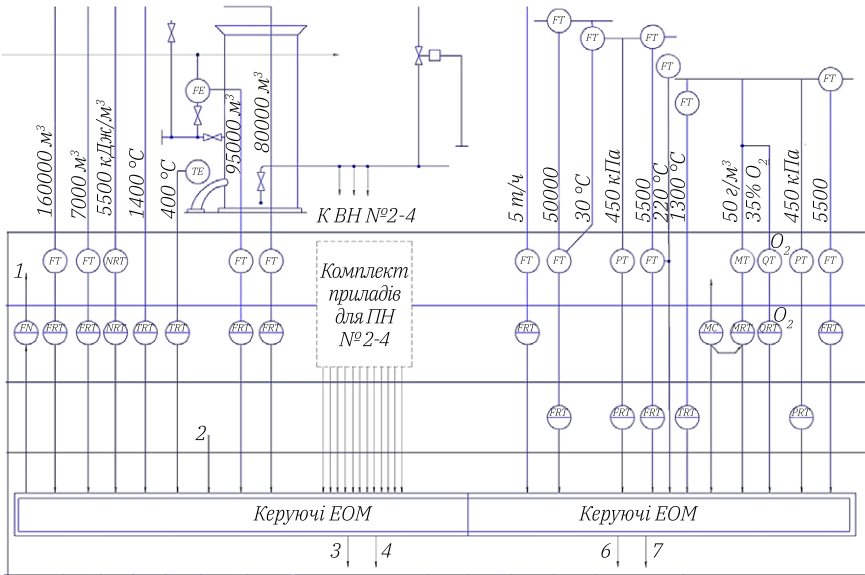


Рис. 1.5 – Контур функціональної схеми автоматизації роботи повітрянагрівачів

Це так званий комбінований зонд, за допомогою якого вимірюється вміст CO , CO_2 та H_2 в газі та температури газу та шихти. Водохолоджувані зонди періодично вводять у піч по чотирьох взаємно перпендикулярних радіусах поперечного перерізу шахти, на 1 м нижче захисних сегментів колошника. Вимірювання температури газу малоінерційною термопарою зазвичай поєднують з відбором проб для хімічного аналізу у восьми точках кожного радіуса. Цикл вимірювання температури та відбору проб становить 3 хв. Після закінчення циклу та повернення зонда у вихідне положення протягом 12 хв. проводиться послідовний аналіз проб газу на вміст CO , CO_2 та H_2 двома оптико-акустичними та термокондуктометричними газоаналізаторами. Якщо вимірюється лише температура газу, зонд рухається безупинно, і цикл вимірювання становить 1 хв. Температуру шихти вимірюють за допомогою зонда, в якому встановлено радіаційний пірومتر.

Для контролю теплового стану низу печі за допомогою термомпар занурення на чавунному та шлаковому жолобах вимірюють температуру чавуну та шлаку. Механізовані термомпари занурення мають дистанційне або автоматичне керування. Термоелектроди термомпари занурення виконані з тугоплавких металів ($W-Mo + 0,5\% Al$) і мають захисний наконечник із силікованого графіту (композиція SiC, C, Si). Робочий кінець термомпари витримує до 100 короткочасних (до 2 хв) вимірів чи 5 год тривалих вимірів.

Алгоритми керування тепловим станом печі зазвичай ґрунтуються на показаннях газоаналізаторів колошникового газу, тому ці показання мають бути максимально достовірними. У таких умовах потрібні автоматичний контроль та корекція показань газоаналізаторів.

Схему системи автоматичного розподілу дуття по фурмах доменної печі представлено на рис. 1.6.

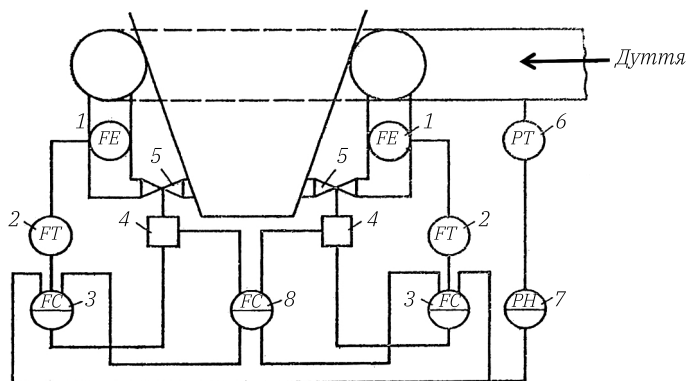


Рис. 1.6 – Схема системи автоматичного розподілу дуття по фурмах

Витрату дуття по фурмах вимірюють діафрагмами або іншими датчиками змінного перепаду. Зокрема, можуть бути використані звужувальні пристрої: нормальна діафрагма (рис. 1.7 а), нормальне сопло Вентурі (рис. 1.7 б), нормальна труба Вентурі (рис. 1.7 в). Найбільшу витрату тиску має діафрагма, найменшу – труба Вентурі.

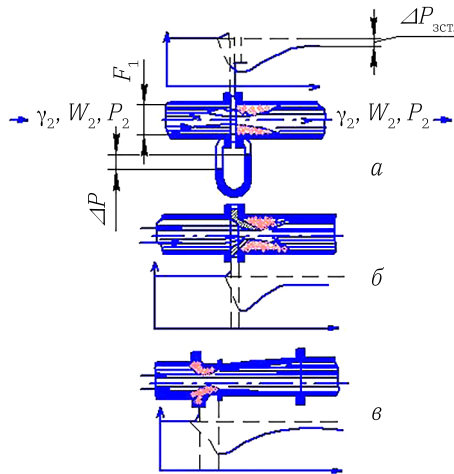


Рис. 1.7 – Схема до звукувального пристрою: *a* – нормальна діафрагма; *б* – нормальне сопло Вентурі; *в* – нормальна труба Вентурі; $W_{1,2}$ – швидкість потоку рідини; $F_{1,2}$ – площа потоку; ρ_1 – щільність рідини; $P'_{1,2}$ – тиск рідини у трубопроводі до звуження потоку та у його найвужчому місці; ΔP – перепад тиску

Ідея витратомірів, заснована на методі змінного перепаду тисків, полягає в наступному: при проходженні рідини через звужуючий пристрій її швидкість збільшується. Потенційна енергія потоку перетворюється на кінетичну і, отже, тиск рідини перед звужуючим пристроєм виявляється більшим, ніж у місці звуження струменя.

Перепад тисків на звужуючому пристрої вимірюється диференціальними манометрами найрізноманітніших конструкцій (U-образні, дзвонові, кільцеві, мембранні, сифонні). Для демонстрації принципу вимірювання на рис. 1.8 приведено схему диференціального манометра.

Вимірювальні сифони 8 і 10 з'єднані між собою за допомогою штока 9, прикріпленого до донця. Внутрішні порожнини сифонів заповнені спеціальною рідиною і герметично ущільнені. У ліву порожнину подається більший тиск, під дією якого лівий сифон стискається, рідина перетікає у правий сифон.

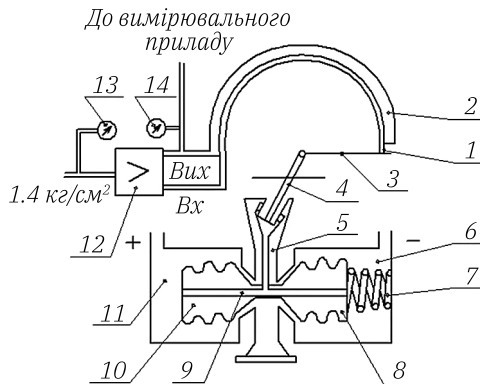


Рис. 1.8 – Схема диференціального манометру

При цьому переміщується шток 9 і через важіль 5 закручує торсійну трубку 4, вільний кінець якої повертає заслінку 3 пропорційно перепаду тисків в камерах диференціального манометра. При збільшенні перепаду тисків заслінка 3 наближається до пневматичного сопла 1, з якого безперервно виходить повітря. Зменшення зазору між соплом і заслінкою призводить до підвищення тиску в лінії сопла. Воно посилюється по потужності за допомогою підсилювача 12 і подається в трубку Бурдона, що охоплює канал сопла, і на вихід диференціального манометра, що підключається до вторинного приладу. Трубка Бурдона виконує роль жорсткого зворотного зв'язку, що забезпечує переміщення сопла на ту ж саму величину, що і заслінки.

Переміщується сопло внаслідок збільшення чи зменшення тиску у трубці Бурдона. Воно лінійно змінюється залежно від величини переміщення заслінки, забезпечуючи лінійну залежність між перепадом тисків на диференціальному манометрі і вихідним тиском стисненого повітря. З виходу датчика витрати – діафрагми в комплекті з дифманометром – стиснене повітря подається на пневматичний регулятор.

Варіант конструкційного рішення щодо диференціального манометра наведено на рис. 1.9.

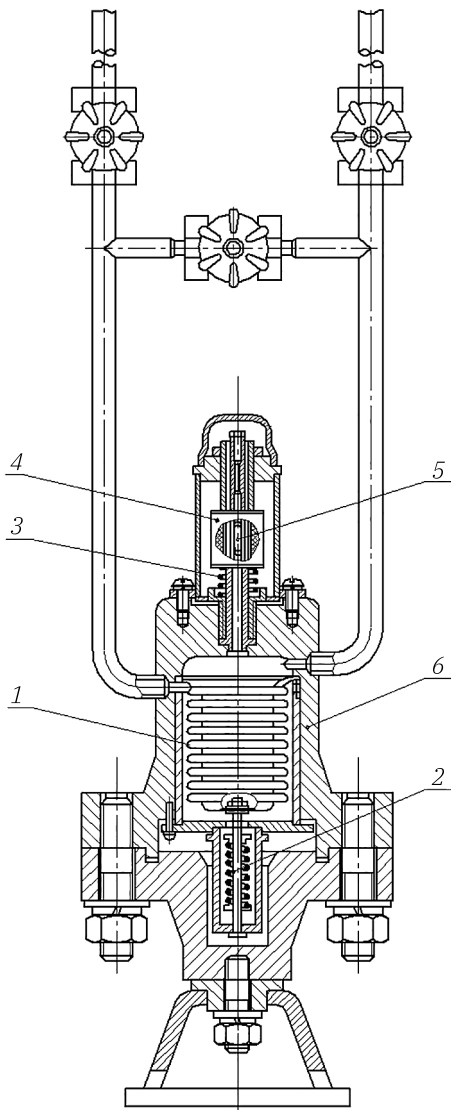


Рис. 1.9 – Конструкція диференціального манометру

Чутливим елементом приладу є сільфон 1, поміщений у середині корпусу 6. Зусилля, створюване сільфоном внаслідок різниці тисків, врівноважується пружиною 2, натяг якої регулюється гвинтом.

Переміщення дна сільфона передається пов'язаному з ним плунжеру 5 індукційного датчика 4. Плунжер рухається всередині немагнітної трубки 3, ізолюючої порожнину датчика, що знаходиться під тиском від зовнішніх його деталей.

Окрім диференціальних манометрів для вимірювання тиску та перепаду тиску використовуються мембранні та сільфонні вимірювальні пристрої. Мембранні вимірювальні пристрої застосовуються для вимірювання тисків, розріджень та різниці тисків неагресивних газів при температурі не вище 50°C. Сільфонні вимірювальні пристрої – це пристрої, в яких чутливим елементом є гармонікова мембрана – сільфон. Сільфонні вимірювальні пристрої служать для вимірювання тисків або перепаду тисків з верхніми межами тиску $(0,5-125) \times 10^5$ Па, а по перепаду 400–1000 мм рт. ст.

Витрату дуття регулюють дросельною заслінкою в фурменному рукаві. Регулятори витрати одержують завдання, пропорційні загальним витратам дуття на піч або тиску гарячого дуття. Додатковий коригуючий регулятор за положенням заслінки забезпечує мінімальний опір системи розподілу дуття.

Нагрівання повітрянагрівачів зазвичай здійснюється при постійній витраті газу, а температуру купола регулюють, змінюючи витрату повітря (шляхом розведення продуктів згоряння надмірною кількістю повітря). Дослідним шляхом на кожному повітрянагрівачі визначають ступінь відкриття регулюючого органу, подачу вентиляторного повітря, при якому досягається максимальна швидкість підйому температури купола при заданій витраті газу.

У такому режимі пальник повітрянагрівача працює на початку періоду нагрівання. Після досягнення температурою купола заданого значення регулятор нагрівання повітрянагрівача збільшує витрату повітря.

Схема управління температурою гарячого дуття при різних режимах роботи повітрянагрівачів представлена на рис. 1.10.

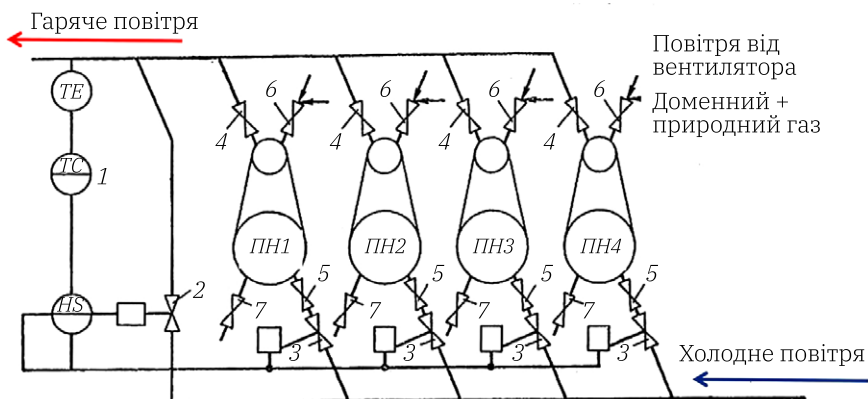


Рис. 1.10 – Схема управління температурою гарячого дуття при різних режимах роботи повітряонагрівачів:
 1 – регулятор температури; 2 – клапан змішувальний;
 3 – клапан; 4 – клапан гарячого дуття; 5 – клапан холодного дуття;
 6 – відокремлювальні клапани газу та горілки;
 7 – клапан димовий

У період нагрівання клапани гарячого 4 і холодного 5 дуття закриті, а димові клапани 7 і відокремлювальні клапани газу та горілки 6 відкриті. Змішаний (доменний + природний) газ та вентиляторне повітря надходять у пальник, перемішуються та потрапляють у шахту горіння, де газ займається. Продукти згоряння під куполом повертають у насадку і проходять через неї, потрапляючи потім у піднасадковий простір. Звідти продукти згоряння йдуть через димові клапани 7 в димову трубу.

У період охолодження димові та відокремлювальні клапани газу та пальника закриті, а клапани гарячого та холодного дуття відкриті. Холодне дуття надходить у піднасадковий простір, проходить насадку, нагрівається, повертається під куполом у шахту горіння, опускається і через клапан гарячого дуття потрапляє у повітропровід гарячого дуття.

Температура гарячого дуття, що надходить у піч, підтримується регулятором температури 1 шляхом змішування з холодним повітрям за допомогою змішувального клапана 2 або перерозподілом

дутьтя між повітрянагрівачами при попарно-паралельному режимі роботи за допомогою клапанів 3.

При послідовному режимі роботи один повітрянагрівач завжди знаходиться на дутті, а решта на нагріванні. Так, на рис. 1.10 повітрянагрівач ВН1 знаходиться на дутті (відкриті клапани 4 і 5), а повітрянагрівачі ВН2, ВН3 та ВН4 гріються (відкриті клапани 6 та 7).

При попарно-паралельному режимі два повітрянагрівачі завжди знаходяться на дутті і два – на нагріванні. Витрати повітря через повітрянагрівачі непостійні. Спочатку, коли повітрянагрівач включається на дуття, витрата повітря через нього мінімальна, а потім у міру охолодження попереднього повітрянагрівача дутьтя між ними перерозподіляється за допомогою клапанів 3 так, щоб підтримувати постійну температуру гарячого дутьтя. Як тільки витрата дутьтя через охолоджений повітрянагрівач зменшується до нуля, він відключається, ставиться на нагрівання і підключається наступний повітрянагрівач.

Далі цикл повторюється. Можливий такий попарно-паралельний режим, при якому температура гарячого дутьтя підтримується за допомогою змішувального клапана 2, а клапани 3 повністю відкриті.

При роботі з перекриттям (змішаний або комбінований режим) спочатку ставляться на дуття два повітрянагрівачі, потім повністю остиглий перемикається на нагрівання, а на дуття залишається один, гарячіший, повітрянагрівач. При достатньому охолодженні другого повітрянагрівача до нього паралельно підключається гарячий, третій, повітрянагрівач, і вони працюють спільно на дутті, поки другий повністю не охолоне і не відключиться. Після цього третій працює один, потім до нього паралельно підключається четвертий і т. д.

При режимі роботи з перекриттям температура гарячого дутьтя може підтримуватися за допомогою клапана змішувача 2 при відкритих клапанах 3 або за допомогою клапанів 3 при паралельній роботі і клапана 2 при послідовній роботі повітрянагрівачів на дутті.

Параметри, що контролюються, та засоби контролю наведені в табл. 1.3, а параметри, що регулюються, – в табл. 1.4.

Таблиця 1.3 – Контрольовані параметри доменного процесу та засоби контролю

Контрольований параметр	Призначення	Засоби контролю
1	2	3
Тиск холодного дуття та гарячого дуття в кільцевому повітропроводі; різниця тисків між кільцевим повітропроводом та шахтою печі, між кільцевим повітропроводом та колошником, між шахтою печі та колошником	Визначення опору стовпа шихти (підвисань), визначення зон з підвищеним опором газовому потоку (низ або верх печі); верхній перепад 0.038–0.040 МПа характерний тугого ходу печі; перепад 0.033–0.034 МПа близький до умов нормального ходу	Манометри та дифманометри (тиск дуття на 0.12–0.16 МПа більше тиску на колошнику; перепад тиску в нижній частині печі 65%, у верхній частині 35% від загального перепаду по висоті печі); відбір тиску в середній частині шахти можливий через штуцер у кожусі печі без виконання отвору у кладці
Тиск природного газу	Запобігання зниження тиску природного газу нижче тиску дуття та попадання горючих газів у газопровід	Манометр (тиск газу на 0.15–0.25 МПа більше тиску дуття)
Температура в фурменній зоні (1400–1800°C)	Оцінка теплового стану низу печі	Радіаційні пірметри або тепломіри повного випромінювання в комплекті з електронним потенціометром
Температура периферійних газів над рівнем засипання та під ним	Контроль розподілу газового потоку по секторах печі (кількість секторів відповідає числу фурм)	Термопари гр. ХА в кладці печі, багаточислові електронні потенціометри

Продовження Таблиці 1.3

1	2	3
Температура та склад газу за радіусом колошника	Контроль радіально-го розподілу газового потоку	Термопара гр. ХА або газозабірна труба, що рухаються лебідкою
Температура колошникового газу по 4-х газівідведення печі (150–400°C)	Контроль розподілу газового потоку по чотирьох секторах печі	Термопари гр. ХА в комплекті з багатоточковим потенціометром
Температура чавуну (1450–1550°C) і шлаку (1500–1600°C) на випуску	Контроль теплового стану низу печі	Термопари занурення на чавунному та шлаковому жолобах
Склад колошникового газу (16–20% CO ₂ , 23–27% CO; 8–12% H ₂)	Контроль розвитку процесів прямого та непрямого відновлення та використання хімічної енергії газів	Газоаналізатори оптико-акустичні на CO ₂ та CO та термокондуктометричний на H ₂ , відбір газу на аналіз – після пиловловлювача
Температура охолоджувальної води, різниця температур води на вході та виході системи охолодження	Контроль роботи системи охолодження, оцінка втрат тепла	Термометри опору у комплекті з електронними мостами; термістори
Температура кладки	Контроль стану кладки	Термопари гр. ХА, багатоточкові електронні потенціометри
Витрати та тиску охолоджувальної води, пари, стиснутого повітря	Контроль безперервності подачі, облікові ланцюги	Манометри та дифманометри в комплекті з діафрагмами

Таблиця 1.4 – Параметри доменного процесу, що регулюються

Вузол регулювання	Параметр, що регулюється	Прилади для контролю або спосіб контролю	Спосіб автоматичного регулювання
Холодне дуття	Витрата	Діафрагма, дифманометр, вторинний прилад	Зміна продуктивності повітрорудної машини
	Вміст кисню (21–27%)	Газоаналізатор на O ₂	Зміна кількості кисню, що всмоктується повітрорудною машиною разом із атмосферним повітрям
	Вологість (3–32 г/м ³)	Датчик вологості	Зміна кількості пари, що подається у дутті
Природний газ	Співвідношення витрат дуття та газу	Діафрагма, дифманометр, вторинний прилад	Зміна витрати газу при зміні витрати дуття
	Розподіл по фурмах	Діафрагми, дифманометри (за кількістю фурм)	Зміна ступеня відкриття регулюючих органів на газопроводах до фурм
Гаряче дуття	Розподіл по фурмах	Сопла, дифманометри (по кількості фурм)	Зміна ступеня відкриття регулюючих заслін у фурменних рукавах між кільцевим повітропроводом та фурмами
Колошниковий газ	Тиск	Манометр	Зміна положення однієї із заслінок дросельної групи, розташованої на газопроводі після скрубера високого тиску

1.5. Принцип дії систем завантаження печі

Засипний апарат доменної печі складається з двох конусів: великого та малого (рис. 1.2). При опусканні матеріалів з малого конуса до міжконусного простору потрапляє повітря. При певному співвідношенні газу та повітря утворюється вибухонебезпечна суміш. Для запобігання вибуху в міжконусний простір через клапан подають пару.

Перед опусканням великого конуса, використовуючи зрівняльні клапани, що працюють за заданою програмою, в простір міжконусний подають очищений від пилу в скрубєрі високого тиску доменний газ.

Перед опусканням малого конуса міжконусний простір через клапани з'єднується з атмосферою. При основному режимі роботи випускний клапан закривається тільки на період опускання великого конуса, і перед опусканням конуса великого відкривається наповнювальний клапан.

Заповнення міжконусного простору очищеним газом контролюють сигналізатори різниці тиску, які при допустимій різниці тиску подають дозвіл на маневрування конусами. Для підвищення надійності системи застосовують здвоєні сигналізатори різниці тиску, контакти яких включають послідовно (рис. 1.11). Таке ускладнення обумовлено можливістю вигину штанг конусів, якщо маневрування конусами проводити при великій різниці тисків з різних боків конусів.

Для розподілу шихти в конструкції системи завантаження передбачений розподільник шихти, що обертається (ОРШ). Він розподіляє шихтові матеріали по колу колошника. Програма роботи ОРШ передбачає зміну кута повороту станції ОРШ після кожної подачі. Якщо ОРШ має шість станцій, кут між якими складає 60° , то при надходженні першої подачі повороту ОРШ не відбувається, при другій подачі ОРШ після кожного скіпу повертається на 60° , при третій – на 120° , потім на 180° , а потім повертається в зворотний бік на 120° і 60° .

Після шести подач цикл повторюється. На деяких доменних печах ОРШ має 12 чи 24 станції. Для контролю роботи ОРШ на станціях використовують сельсини.

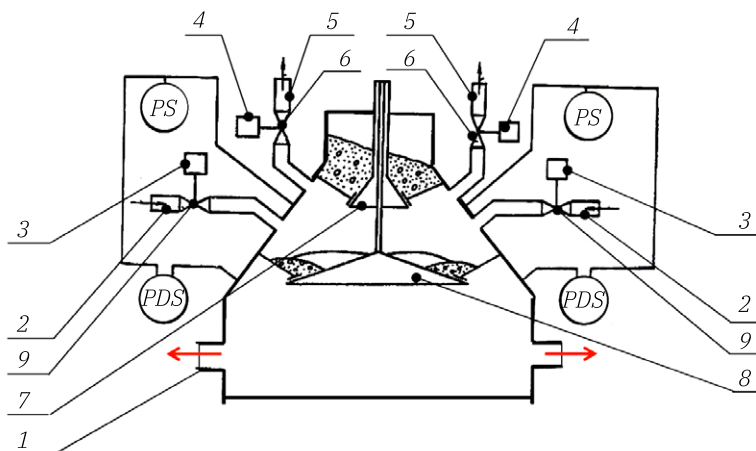


Рис. 1.11 – Схема клапанів в засипному апараті: 1 – газівідводи в системі очищення колошникового газу; 2 – газопроводи очищеного газу; 3 – привод вирівнювального наповнюючого клапану; 4 – привод вирівнювального атмосферного клапану; 5 – свічі; 6, 9 – клапани; 7 – малий конус; 8 – великий конус

Рівномірний розподіл газів може бути порушений в окремих секторах поперечного перерізу печі через утворення каналів або ущільнень. У районі каналу температура газів більш висока, вміст CO_2 в них дещо менший; у районі ущільнення спостерігаються протилежні явища. Контролюючи температуру та склад газів у секторах перерізу колошника, можна своєчасно виявити виникнення каналів та ущільнень. Зазвичай число контрольованих секторів дорівнює числу станцій ОРШ. Для усунення каналів у сектор завантажують руду (агломерат), а для розпушування ущільнень у секторі завантажують кокс. У таких випадках програма роботи ОРШ змінюється.

Зміна роботи ОРШ окремо для правого та лівого скіпів може відбуватися в автоматичному режимі. Для цього здійснюється контроль температури периферійних газів під станціями ОРШ, використовуючи термопари в шахті печі та, відповідно, змінюючи програму обертання ОРШ.

Для автоматичного вимірювання рівня засипу у двох точках діаметром колошника використовують механічні контактні зони, що приводяться в рух лебідками, частота обертання яких контролюється сельсинами.

Дозвіл на відкриття великого конуса дається ланцюгом автоматичного керування замиканням контактів схеми керування.

Механізми завантаження об'єднані в єдину систему автоматичного керування програмними, робочими та запобіжними блокуваннями. Передбачено можливість ручного керування та аварійний захист механізмів від перевантажень. Основними апаратами системи завантаження є командоконтролер програми (ККП) і командоконтролер циклів подач (ККЦ) – кулачкові командо-апарати з двома паралельними барабанами з кулачковими дисками. Кулачки ККП та ККЦ розмикають та замикають контакти ланцюгів управління, що дають дозвіл на включення відповідного механізму завантаження. ККП встановлює черговість завантаження скіпів, а ККЦ – чергування подач у циклі завантаження. Таким чином, командоконтролери програми та циклів дозволяють встановлювати програму (черговість) роботи механізмів завантаження.

У свою чергу, механізми завантаження пов'язані один з іншим робочим блокуванням, що дозволяє включення приводів тільки в певній послідовності відповідно до виробничого процесу: кожен наступний механізм включається в роботу, якщо попередній виконав свою операцію або знаходиться в заданому положенні і якщо є дозвіл від ККП. Робоче блокування здійснюється кінцевими та колійними вимикачами.

Зокрема, колійний вимикач скіпового витягу замикає свої контакти в ланцюзі котушки контактора двигуна затвора коксової вагової воронки, якщо скіп досяг крайнього нижнього положення. Великий конус відкривається тільки після закриття малого конуса, відкриття зрівняльних клапанів і підйому зондів рівнеміру.

У системі завантаження передбачені також запобіжні та аварійні блокування, що запобігають неправильній або несвоєчасній роботі механізмів або їх поломці.

На деяких доменних печах застосовують автоматизовану транспортерну систему подачі шихти, що складається з двох

однакових комплексів механізмів з правого та лівого боку скіпового витягу. У кожному комплексі є:

- бункери для агломерату, що подають агломерат на пластинчастий конвеєр, забезпечені вібраційними живильниками;
- бункера добавок з живильниками та ваговими воронками, що подають добавки на стрічковий конвеєр;
- вагової воронки для агломерату.

Механізми завантаження коксу служать для виконання операцій відсіву дрібниці, зважування коксу і завантаження їх у скіп. Набір коксу здійснюється системою дистанційного керування.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПЛАВКИ В МАРТЕНІВСЬКИХ ПЕЧАХ

***Мета розділу:** ознайомитись з основами технології плавки в мартенівських печах.*

Робочі питання:

1. Сутність технологічного процесу мартенівської плавки
2. Принцип дії системи перекидання клапанів
3. Автоматизація мартенівської плавки
4. Управління тепловою потужністю мартенівської печі
5. Схема керування тепловим режимом двованної печі

2.1. Сутність технологічного процесу мартенівської плавки

Мартенівська піч призначена для виплавки сталі і конструктивно представляє собою піч із взаємно зв'язаними теплообмінними елементами. Тобто це плавильний комплекс, що включає в себе плавильний простір та регенератори (рис. 2.1).

Основними технологічними операціями мартенівської плавки є:

- дозування та завалка шихти;
- заливка рідкого чавуну;
- операції спалення палива;
- введення технологічних та легуючих присадок;
- формування та видалення з печі шлаку.

Операції спалення палива мають за мету забезпечення таких параметрів факелу, які необхідні для кожного етапу технологічного процесу: заправка, завалка сипучих – вапняка та руди, прогрів сипучих, завалка сталевого лому, прогрів, заливка рідкого чавуну, плавлення, доводка, чисте кипіння, легування в печі, випуск сталі. Це досягається варіюванням наступних факторів впливу: витрата повітря, газу, мазуту, кисню, розрідження в борові, інших факторів теплового та окислювального режимів роботи печі.

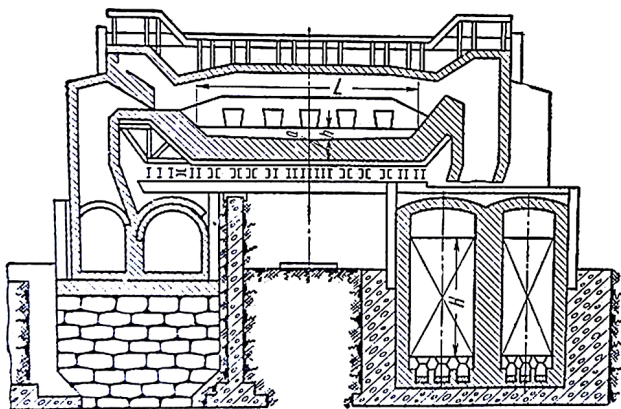


Рис. 2.1 – Схема мартенівської печі: L – довжина поду; a – товщина поду; h – глибина ванни; H – висота насадок

Окрім названих основних технологічних операцій важливу роль у виробничому процесі відіграють допоміжні операції з обслуговування печей, як то: транспорт шихтових, доводчих, запрабочних та інших матеріалів, підготовка чавуновозних та сталерозливних ковшей, жолобів, виливниць тощо.

Параметри мартенівського процесу поділяються на наступні:

- технологічні;
- теплотехнічні;
- допоміжні.

Технологічні параметри – це параметри, які впливають на хід та інтенсивність фізико-хімічних процесів масоперенесення, що протікають в рідкій металевій ванні та в шлаку з урахуванням взаємодії цих фаз між собою, а також взаємодії їх з матеріалом кладки поду та газовою фазою.

Теплотехнічні параметри – це параметри, які визначають швидкість та щільність потоків теплоперенесення в просторі печі над ванною, а також в кладці поду під ванною та кладці загального робочого простору печі. До цих параметрів відносяться також параметри процесів генерації тепла з хімічної енергії палива та за рахунок окислення домішок.

Допоміжні параметри – це параметри, від яких залежать продуктивність печі та її експлуатаційні показники, зокрема заправка поду, завалка та прогрів сипучих матеріалів, зачинення випускного отвору, завалка та прогрів скрапу, заливка рідкого чавуну, плавлення, доводка до заданої температури та вмісту хімічних елементів, відкриття випускного отвору, відбір проб сплаву та шлаку на аналіз по ходу плавки, вимірювання температури сплаву.

Недоліком мартенівських печей є їх висока інерційність та нестационарність усіх процесів тепло- та масоперенесення. Багато параметрів процесу не підлягають безпосередньому вимірюванню, що значно ускладнює процеси керування. Відповідно, надто складно отримувати якісну сталь.

Для усунення деяких недоліків мартенівських печей застосовуються рішення з інтенсифікації процесів, що призводять до вдосконалення не лише технології, але й конструкції печей. Так, використання кисню для інтенсифікації спалювання палива дає можливість скоротити час рафінування сталі, що, своєю чергою, забезпечує можливість підвищення коефіцієнта використання тепла та продуктивності печі. Завдяки цьому виключається підігрів повітря в повітряних регенераторах, що трансформує існуючу класичну конструкцію мартенівської печі в двованну піч. Робочий простір в такій печі поділено на дві ванни, поєднані між собою каналом для проходу газів, що формуються в процесі плавки та мають бути відведені. Таким чином, період дефіциту тепла в одній ванні синхронізується з періодом утворення надлишкового тепла в іншій. Це дозволяє досягти максимальної утилізації тепла та підвищення теплової потужності печі.

Серед можливих шляхів інтенсифікації процесу та підвищення його коефіцієнта корисної дії є використання котлів-утилізаторів, завдяки яким можливе використання тепла газів, що відходять з печі.

2.2. Принцип дії системи перекидання клапанів

Плавка керується завдяки системі перекидання (рис. 2.2). Переключення регенераторів та реверсування факелу здійснюється

за допомогою шиберів та клапанів (газового та димового), що приводяться у дію приводом газового (на рис. 2.2 показано синім кольором) та димового (на рис. 2.2 показано червоним кольором) клапанів відповідно.

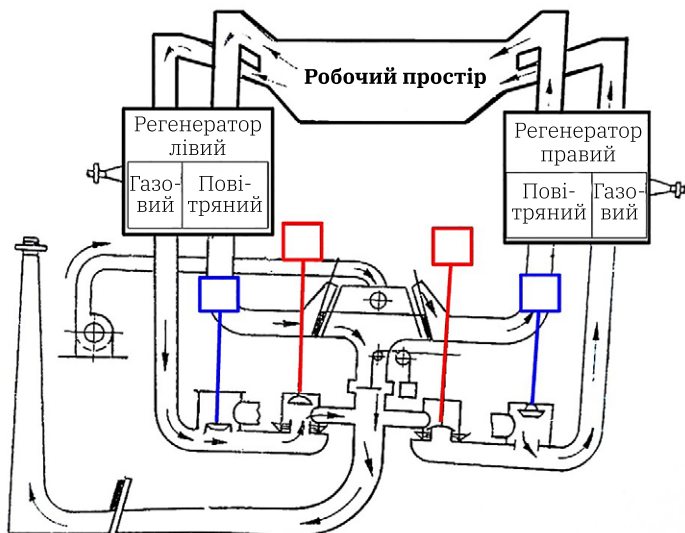


Рис. 2.2 – Схема системи перекидання

Послідовність роботи клапанів відбувається відповідно до наступних принципів. Коли температура насадок лівої пари регенераторів підвищується до заданої температури, а температура насадок правої пари регенераторів зменшується, змінюється напрям потоків палива, повітря та продуктів згоряння. Для прикладу, спочатку закривається димовий клапан на лінії лівого блоку регенераторів та відкривається газовий клапан на цій лінії.

Далі переключаються шибери на загальній лінії, що поєднують повітряні регенератори, лівий повітряний регенератор підключається до повітропроводу, а правий – до димової труби чи котла-утилізатора. Через певну витримку часу, необхідного для повного

видалення повітря з димоходу, включається привод шибера на загальній лінії. При цьому закривається газовий клапан на лінії правого блоку регенераторів і відкривається димовий клапан на цій же лінії.

Загальний час роботи приводів складає близько 40 с, а загальний час перекидання клапанів – близько 50 с.

Таким чином, при виплавці сталі в мартенівських печах відбувається випалювання з чавуну кремнію, марганцю, фосфору, сірки і вуглецю. Великі мартенівські печі працюють у скрап-рудному процесі, при якому металева частина шихти складається з 50–60% рідкого чавуну і 50–40% залізного брухту. Джерелами кисню для окислення чавуну служать:

- технічний кисень, застосований для продувки ванни через спеціальні зводові фурми;
- залізна руда;
- кисень атмосфери печі, що надходить у ванну через шлак.

2.3. Автоматизація мартенівської плавки

З точки зору автоматизації мартенівська піч і процес мартенівської плавки мають наступні особливості:

- періодичність дії, тобто, процес циклічно повторюється від завалки до випуску плавки;
- живлення теплом (теплова потужність) і температура різних частин печі змінюється по ходу плавки від плавки до плавки по ходу кампанії печі;
- фізико-хімічні процеси, що протікають в печі, дуже складні, йдуть з поглинанням і виділенням тепла і виділенням горючих газів (CO_2) з ванни;
- режим роботи печі схильний до різких збурень, пов'язаних з періодичним реверсуванням факела;
- відсутність багатьох датчиків, необхідних для автоматичного керування мартенівською плавкою (датчики складу металу, шлаку та ін.).

Функціональна схема автоматизації мартенівської плавки представлена на рис. 2.3.

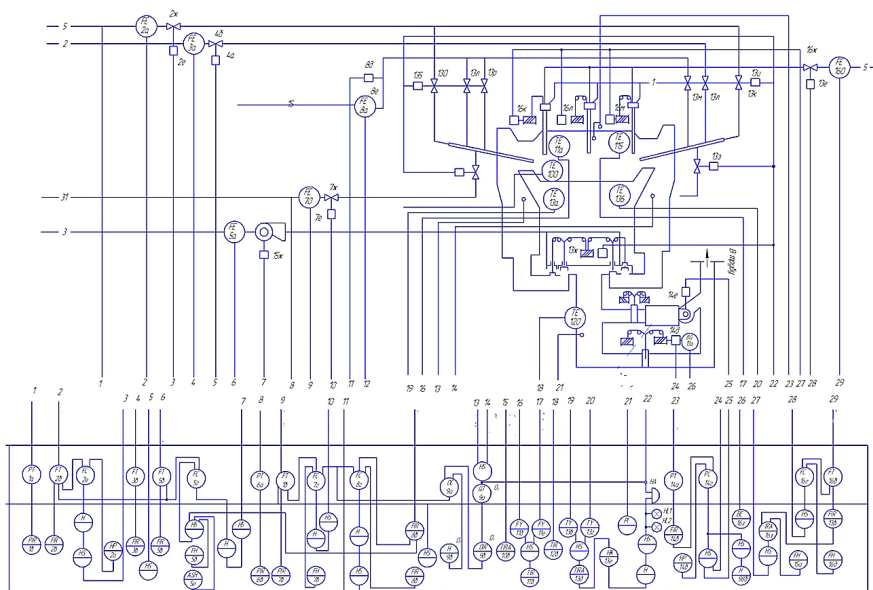


Рис. 2.3 – Схема автоматизації мартенівської плавки

Автоматично контрольовані параметри мартенівської плавки наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Автоматично контрольовані параметри мартенівської печі

Параметр	Засіб контролю	Межа вимірювання
1	2	3
Температура склепіння робочого простору	Радіаційний пірометр, шомпольний термозонд	1400–1800°C
Температура верху насадок регенератора	Радіаційний пірометр	1000–1400°C

Продовження Таблиці 2.1

1	2	3
Температура рідкого металу	Термопара занурення, термопара безперервної дії	1500–1750°C
Температура в загальній борівій	Термопара хромель-алюмелієва	400–700°C
Витрати газу, мазуту, кисню, вентиляторного повітря	Термопара звуження у трубопроводах та дифманометрах	залежить від розмірів печі та інших конструкційних та технологічних факторів
Тиск під склепінням робочого простору	Дзвоновий дифрамометр	30–60 Па
Розрідження в загальному борівій	Тягометр	400–1000 Па
Вміст кисню в продуктах горіння	Газоаналізатор	до 5%

Температура кладки робочого простору вимірюється радіаційними пірометрами, встановленими в водоохолоджуючій арматурі та спрямованими на звід через амбразуру в задній стінці. Більш точні значення температури кладки дозволяють отримувати шомпольні термозондами, принцип дії яких полягає в наступному. Через водоохолоджувану фурму в зводі в робочий простір періодично за допомогою пневмоциліндра вводиться водоохолоджуваний циліндричний шомпол, кінець якого є чутливим елементом – власне термозондом 1. Заміри робляться один раз в 1–2 хв, тривалість перебування шомпола в печі складає близько 30 с. В стінці термозонду виникає перепад температур. Вимірювання здійснюються батареями термопар, поміщених в отворах на різній глибині по товщині стінки печі. Вимірювана різниця температур характеризує тепловий потік, величина якого залежить від температури навколишньої ділянки кладки.

Аналіз продуктів згоряння проводиться за допомогою автоматичних газоаналізаторів або аналізатора надлишкового кисню. Проба газу відбирається з вертикального каналу газопаровим ежектором і після очищення надходить в чутливий елемент аналізатора, поміщений в електропіч з температурою 500°C. Продукти згоряння і додаткові компоненти O₂ і H₂ приймають температуру печі і надходять у вимірвальну камеру, по осі якої розташована диференціальна термопара 7. Її ділянка між спаями 8 і 9 зроблена з платини і є каталізатором. Спай 8 розігрівається, якщо в продуктах згоряння присутній надмірний кисень. ЕРС термопари пропорційна коефіцієнту витрати повітря у продуктах згоряння.

Автоматичні системи управління тепловим режимом мартенівської печі включають чотири локальних вузла:

- управління тепловою потужністю;
- управління спаленням палива;
- регулювання тиска під зводом робочого простору;
- автоматичного перекидання клапанів.

2.4. Управління тепловою потужністю мартенівської печі

Способи управління тепловою потужністю мартенівської печі можна розділити на дві групи: статичне програмне і динамічне управління.

При статичному програмному управлінні на підставі попередніх досліджень розробляють теплову інструкцію, в якій задані теплова потужність та витрати різних видів палива для кожного періоду плавки. На підставі інструкції сталевар встановлює завдання окремим регуляторам витрати палива, коригуючи їх на підставі власного досвіду. Функцію управління виконує сталевар, а локальні системи автоматики тільки підтримують задані витрати палива.

Статичне управління не може повною мірою задовольняти вимоги забезпечення економічної роботи печей за умов інтенсифікації процесів плавки шляхом подачі кисню в факел і в ванну. При збільшенні інтенсивності продувки ванни киснем і скороченні періодів заливки–прогріву шихти підвищуються коливання

температури зводу від 1300–1400°C до 1800–1900°C. Так само значні коливання вмісту кисню і горючих компонентів у продуктах згоряння. Зазначена нестаціонарність теплового процесу зумовила застосування динамічного управління, що використовує поточну інформацію і надає керуючі впливи по ходу плавки.

До динамічних систем управління тепловою потужністю можна віднести системи управління обмежуючим факторам, в яких тепла потужність підтримується на максимальному рівні до тих пір, поки хоча б один з обмежуючих факторів (температура зводу, температура насадок, вміст O_2 в продуктах згоряння і т. д.) не вийде за допустимі значення. В разі виникнення такої події тепла потужність починає дискретно або безперервно знижуватися до тих пір, поки параметр не увійде в допустимі межі.

Завдання регулювання горіння в мартенівській печі – повне спалювання палива всіх видів, включаючи і CO, з ванни, в межах робочого простору печі.

Контролювати якість спалювання палива можна за аналізом продуктів згоряння на O_2 або використовуючи газоаналізатор. При проектуванні схем регулювання горіння можна рекомендувати використовувати регулювання горіння за співвідношенням палива всіх видів і носіїв кисню та схему регулювання з корекцією за аналізом продуктів згоряння.

Керуючими параметрами є витрати палива – природного газу і мазуту, керованими – витрата вентиляторного повітря, незалежними – витрата кисню, що подається в факел, та стисненого повітря. Завдання регулятора співвідношення встановлює сталевар, використовуючи для цього дистанційний датчик.

Регулювання тиску з корекцією за аналізом продуктів згоряння забезпечує більш повне спалювання палива, дозволяє врахувати те, що виділяється з ванни. В цьому випадку застосовують спеціальний коригуючий регулятор, що замінює датчик співвідношення. Співвідношення задається автоматично в залежності від відхилення вмісту кисню в продуктах згоряння від заданого. Корекцію можна вводити також за показаннями газоаналізатора.

Регулювання тиску.

Тиск в робочому просторі мартенівської печі регулюють таким чином, щоб на рівні гляделок робочих вікон надлишковий тиск

дорівнював нулю. При цьому під зводом печі тиск становить 30–60 Па. Тиск регулюють шиббером, встановленим в загальному боріві перед димовою трубою, або направляючим апаратом димососа котла-утилізатора.

Автоматичне перекидання клапанів.

Система автоматичного перекидання клапанів у мартенівській печі служить для обертання насадок регенераторів, дозволяє зменшити час між перекиданнями клапанів та може формуватися різними способами. Найбільш простою системою автоматичного перекидання клапанів є перекидання за часом з використанням моторного реле часу. Завдання встановлює сталевар окремо для кожної сторони печі і змінює вручну по ходу плавки. Така система не гарантує від перегріву насадки і не забезпечує оптимальної тривалості між перекиданнями.

Більш поширена і така, що краще відповідає пред'явленим вимогам, є система перекидання за різницею температур верху насадок з контролем за часом. Щоб уникнути зміни частоти перекидання при випадкових короткочасних коливаннях температури насадки, систему блокують з реле часу, яке не пропускає командний сигнал до закінчення встановленого на реле мінімального значення часу.

Застосовується також перекидання клапанів за допомогою інтегрального реле часу, яке являє собою моторне реле часу з частотою обертання двигуна пропорційної температурі гріючої насадки. Перекидання клапанів відбувається після кожного півоберта вихідного валу реле, при цьому інтервал між перекиданнями обернено пропорційний середній температурі насадки за період нагріву.

2.5. Схема керування тепловим режимом двованної печі

Двованна піч складається з двох робочих просторів – двох ванн, в одному з яких виконується продувка металу киснем, у другому – завалка і прогрів твердої шихти. Виникаючий при продувці металу газ CO з першої ванни надходить до другої, допалюється там і віддає тепло холодній шихті. Двованна піч є кисневою піччю,

тому доопалювання CO і спалення додаткового палива виконуються в технічному кисні. Додатковим паливом служить природний газ, який подається на стаціонарні горілки і іноді на рухомі фурми. Двованні печі не мають регенераторів.

Функціональна схема керування тепловим режимом двованної печі наведена на рис. 2.4. На цій схемі показані локальні системи регулювання для правої ванни, але системи є аналогічними й для лівої ванни.

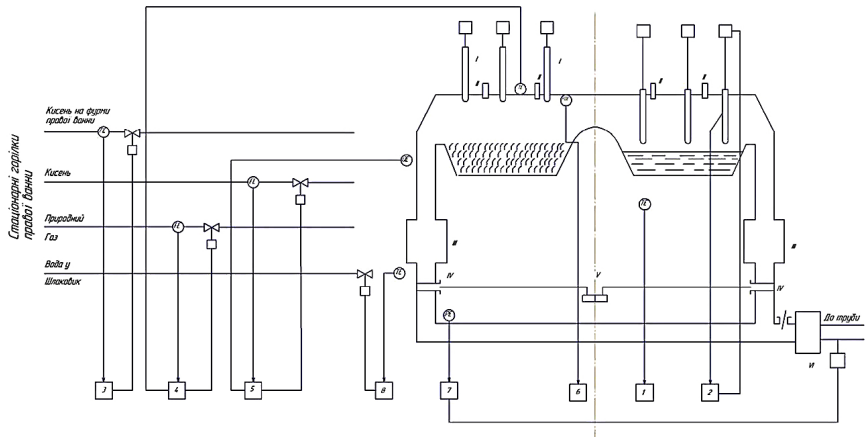


Рис. 2.4 – Схема керування тепловим режимом двованної печі:

I – фурми для продувки; *II* – зводові горілки; *III* – шлаковики; *IV* – шибери відсічки; *V* – перекидні пристрої; *VI* – котел-утилізатор

Група приладів *1* дає інформацію про стан рідкої ванни – температури металу, окисненості металу, вмісту вуглецю.

Прилади та регулятори *2* призначені для регулювання положення фурм для продувки відносно межі шлак–метал.

Регулятор *3* підтримує заданий сталеваром потік кисню на фурми для продувки. Іноді кисень через підняті фурми подають і до холодної ванни, тоді регулятор *3* підтримує задану витрату кисню і при роботі ванни на завалці і прогріві. До комплекту приборів *3* може входити суматор, визначаючий кількість поданого до ванни

кисню з моменту початку продувки, згідно якого є можливість оцінити час зупинки продувки.

Найбільш важлива для мартенівської печі задача керування тепловою потужністю у двованній печі має допоміжне значення. У продувочній ванні теплова потужність зазвичай дорівнює нулю за рахунок подачі палива, тому що тепла, виникаючого при частковому доопаленні CO, достатньо для підтримки високої температури робочого простору. У холодній ванні тепла від доопалення CO може бути недостатньо, і тоді через вільні горілки і форми подається паливо, кількість якого стабілізується регулятором 4.

Завдання регулятора встановлює сталевар. При використанні автоматизованої системи регулятор 4 підтримує задану температуру зводу у «холодній» ванні, вимірюваної шомпольним термозондом.

Регулятор 5 підтримує задану витрату кисню через стаціонарні горілки у кількості, достатньої для спалювання природного газу і доопалення CO, який надійшов з ванни, що продувається. Регулятор 5 підтримує у продуктах згоряння заданий коефіцієнт витрати кисню, вимірюваний аналізатором надлишкового кисню.

Прилади 6 виконують контроль тиску у робочому просторі, а прилади 7 – регулювання розрідження перед котлом-утилізатором за допомогою направляючого апарату димососа. Іноді передбачається пряме регулювання тиску під зводом «холодної» ванни.

Регулятор 8 обмежує температуру продуктів згоряння перед котлом-утилізатором для захисту останнього шляхом подачі води у шлаковик.

Двованна піч не має автоматичної системи перекидання клапанів. Перекидання клапанів виконується один раз на плавку і виконується за командою сталевара перекидними пристроями V.

РОЗДІЛ 3 ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

Мета розділу: *ознайомитись з основами плавки у конвертері, а також схемами автоматизації конвертерного процесу.*

Робочі питання:

1. *Сутність киснево-конвертерного процесу*
2. *Визначення сумарної кількості кисню в конвертерному процесі за для забезпечення заданого хімічного складу сталі*
3. *Схема автоматизації конвертерного процесу, теплового режиму міксеру для витримки рідкого чавуну та процесу неперервної розливки сталі*

3.1. Сутність киснево-конвертерного процесу

Сутність киснево-конвертерного процесу полягає в тому, що завдяки продуванню розплаву чавуну через кисневі фурми відбувається вигоряння з чавуну вуглецю, кремнію, марганцю, сірки, фосфору. Це відбувається внаслідок інтенсивних екзотермічних реакцій, продуктом яких є газова фаза, що складається переважно з диоксиду та оксиду вуглецю. Кисень для цих реакцій підводиться до розплаву згори через сопла водоохолоджуваної форми.

При екзотермічних окислювальних реакціях виділяється більше тепла, ніж треба для нагріву сталі до температури випуску, тому в технологічному процесі конвертерної плавки використовують охолоджувачі, якими можуть бути сталевий лом або залізна руда.

Конвертерний процес відноситься до тих металургійних процесів, особливістю яких є значна швидкість перебігу фізико-хімічних процесів. Це є перевагою даної технології, бо вона може забезпечити високу продуктивність виплавки сталі, але створює певні труднощі з точки зору управління процесом. Це пов'язано з тим, що швидкість вигорання вуглецю настільки велика, що 1 хвилина продувки відповідає переходу до сталі іншої марки, та до моменту припинення продування температура металу має бути в заданих

межах. Температура або окисність металу визначається за допомогою зондів, якими береться проба для експрес-аналізатора. За результатами роботи зонду визначається час припинення продування, уточняється кількість охолоджувальних або екзотермічних добавок і приймаються заходи, що забезпечують отримання сталі заданого складу і температури.

3.2. Визначення сумарної кількості кисню в конвертерному процесі задля забезпечення заданого хімічного складу сталі

Шукану кількість кисню в конвертерному процесі задля забезпечення заданого хімічного складу сталі можна отримати, наприклад, за рівнянням

$$V_{O_2} = \frac{100}{K} M_{ci} \left(9.33 [C]_0 + 8 [Si]_0 + 2.04 [Mn]_0 + 9.03 [P]_0 + 2 \Delta Fe \right) - (M_s - M_{ss}) \times (9.33 [C] + 2.04 [Mn] + 9.03 [P]) - M_o \left(2.1 [Fe_2O_3] + 1.55 [FeO] \right) + L,$$

де прийняті наступні позначення:

K – чистота кисню;

M_{ci} – маса чавуну;

M_s – маса готової сталі;

M_{ss} – маса лому;

M_o – маса руди;

$[C]_0$ – вміст в чавуні вуглецю;

$[Si]_0$ – вміст в чавуні кремнію;

$[Mn]_0$ – вміст в чавуні марганцю;

$[P]_0$ – вміст в чавуні фосфору;

ΔFe – кількість заліза, що окислився за плавку, віднесене до маси чавуну;

$[C]$ – вміст в сталі вуглецю;

$[Mn]$ – вміст в сталі марганцю;

$[P]$ – вміст в сталі фосфору;

$[Fe_2O_3]$ – вміст оксиду заліза (III) в руді;

$[FeO]$ – вміст оксиду заліза (II) в руді;

L – величина, що враховує витрату кисню на окислення заліза, допалювання CO в CO_2 . Вона може бути знайдена за рівнянням регресії, отриманим за даними статичної обробки плавок поточного виробництва.

3.3. Схема автоматизації конвертерного процесу

Схема автоматизації конвертерного процесу представлена на рис. 3.1.

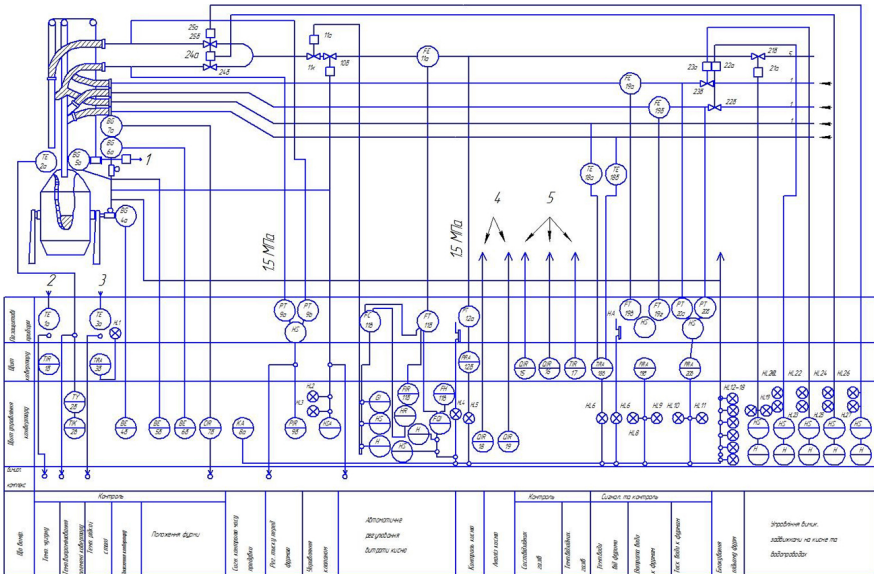


Рис. 3.1 – Схема автоматизації конвертерної плавки

Для управління процесом використовують локальні системи керування – без застосування ЕОМ автоматичне регулювання

зводиться до підтримки заданої витрати кисню, регулювання положення кисневої фурми і тиску в кесоні на виході з конвертера, якщо це конвертер без допалювання.

У схемі автоматизованої системи застосовується суматор, що дає інформацію про кількість кисню, що поступив у конвертер, з початку продування. Ця інформація використовується для визначення моменту припинення продування. Передбачено також автоматичне облаштування забезпечення безпеки – воно дає команду на припинення подання кисню і витягання фурми з конвертера при падінні тиску кисню, падінні тиску при витраті охолоджуваної фурми води, а також при збільшенні температури води при сливі з фурми вище певного рівня. Таке збільшення може свідчити про прогар фурми.

Повна автоматизація конвертерного процесу неможлива без застосування ЕОМ поза межами АСУ ТП. У АСУ ТП конвертерного виробництва сталі можна розглядати два основні принципи керування: статичне і динамічне. Статичне полягає у виборі на підставі використання статичних моделей процесу деяких разових початкових або інтегральних керівних дій або реалізацій їх у процесі плавки. До початкових керівних дій можливо віднести витрати лому, чавуну, руди, вапна. До інтегральних керівних дій відносять сумарну кількість кисню, яку необхідно подати в конвертер для випалювання усіх домішок і отримання потрібного вмісту вуглецю в металі. Статичне керування використовується в усіх АСУ ТП для розрахунку шихтовки плавки.

Динамічне керування полягає у реалізації деяких керуючих дій на підставі динамічної інформації, що надходить в часі по ходу плавки. Такими діями є витрата кисню, висота кисневих фурм, кількість і тривалість присадки сипких матеріалів. Динамічну інформацію отримують, як правило, для непрямих параметрів процесу: кількості, температури і складу конвертерних газів, швидкості вигорання вуглецю, що визначається за складом конвертерних газів, шуму конвертера, а також випромінювання полум'я над горловиною конвертера у конвертерах з допалюванням. Динамічне керування будується так, щоб добитися певного характеру цієї інформації, наприклад, заданої кривої виміру швидкості вигорання вуглецю або температури конвертерних газів по ходу плавки. Динамічне керування може будуватися на інформації про фактичний

склад і температуру металу, визначувані за допомогою водоохолоджуваних занурених зондів, що опускаються в конвертер два або один раз у кінці продування. За допомогою зондів визначається температура або окисність металу і береться проба для експрес-аналізатора. За результатами роботи зонду визначається час припинення продування, уточнюється кількість охолоджувальних або екзотермічних добавок і приймаються заходи, що забезпечують отримання сталі заданого складу і температури.

На рис. 3.2 представлена схема автоматизації теплового режиму міксеру для витримки рідкого чавуну, що подається для переробки на сталь до конвертера.

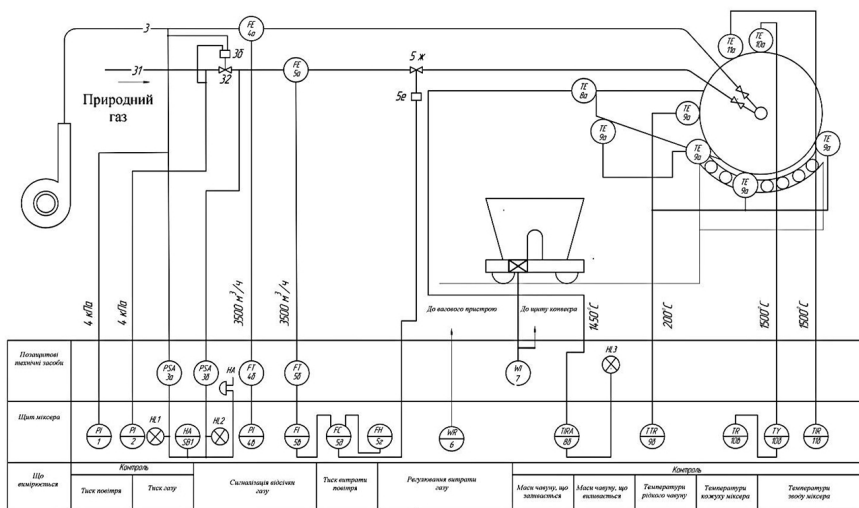


Рис. 3.2 – Схема автоматизації теплового режиму міксеру для витримки рідкого чавуну

Автоматизація теплового режиму міксеру передбачає контроль:

- витрати та тиску природного газу та повітря;
- температури рідкого чавуну, кожуха міксеру та зводу міксеру.

Регулюють лише задану витрату природного газу. Значення контрольованих та регульованих параметрів вказані на схемі.

Загалом автоматизація в міксерному відділенні цеху зводиться до наступного:

- автоматичного зважування та обліку чавуну, що надходить з доменного цеху і подається в мартенівську піч або конвертер;
- визначення складу чавуну, що зливається з міксера;
- вимірювання температури чавуну при зливі з міксера (для конвертерних цехів);
- автоматизації теплового режиму міксера.

Сталь з конвертера передається споживачу – або для заливання ливарних форм, або для неперервної розливки. На рис. 3.3 для прикладу представлена функціональна схема автоматизації процесу неперервної розливки сталі.

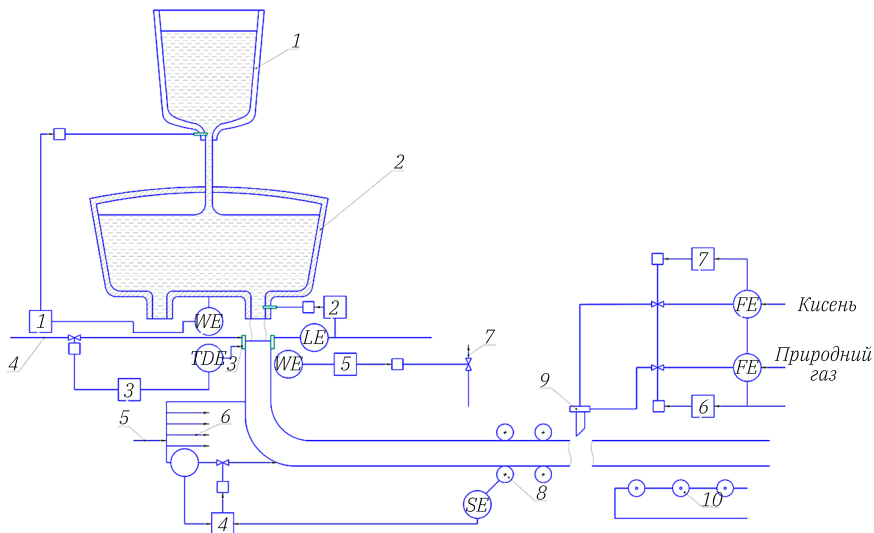


Рис. 3.3 – Функціональна схема автоматизації процесу неперервної розливки сталі: 1 – сталерозливальний ківш; 2 – проміжний ківш; 3 – кристалізатор; 4 – вода на охолодження кристалізатора; 5 – вода на вторинне охолодження; 6 – вода на секції вторинного охолодження; 7 – технологічне мастило в кристалізатор; 8 – тягнуча кліть; 9 – газорізка; 10 – рольганг

Газокисневі пальники для різання зливка на мірні довжини переміщуються зі швидкістю, що дорівнює швидкості руху зливка. Точне дотримання мірної довжини забезпечується спеціальною апаратурою, що складається з датчика імпульсів, встановленого на валу редуктора тягнучої кліті, і лічильника імпульсів. По досягненні заданого значення довжини зливка видається сигнал на початок різання. В такий спосіб формуються готові злитки мірної довжини.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАВКИ У ВАГРАНЦІ

Мета розділу: ознайомитись з основами плавки у вагранці, а також схемами автоматизації таких процесів.

Робочі питання:

1. Технологія плавки та конструкції вагранок
2. Діаграми зв'язків параметрів плавки в вагранці та керуючі фактори процесу
3. Схема автоматизації плавки в вагранці

4.1. Технологія плавки та конструкції вагранок

Вагранка – це піч, що працює за принципом протитоку: знизу догори підіймаються гарячі гази, що формуються внаслідок горіння палива, яким переважно є кокс, а назустріч згори опускаються металеві шихтові матеріали. Внаслідок теплообміну відбувається забирання тепла гарячих газів шихтою, їх прогрів та плавлення, та охолодження гарячих газів та викид їх з печі. Розплав, що сформувався, стікає через шар коксу, насичується вуглецем та, таким чином, формується чавун.

Найбільшого поширення набули вагранки двох типів:

- вагранка без копильника (рис. 4.1);
- вагранка з копильником (рис. 4.2).

Найбільш теплонавантажений пояс вагранки підлягає охолодженню завдяки різним системам водяного охолодження. Деякі з них представлені на рис. 4.3, 4.4.

Реакція горіння палива відбувається внаслідок подачі кисню в складі повітря, що вдувається в фурми вагранки. Для інтенсифікації процесу використовують підігрів повітря, що вдувається в фурми, та насичення повітря додатковим киснем. Зокрема, при продувці киснем чавуну в процесі ваграночної плавки забезпечується інтенсифікація процесу та більш вигідні умови для видалення сірки в разі використання основної футеровки.

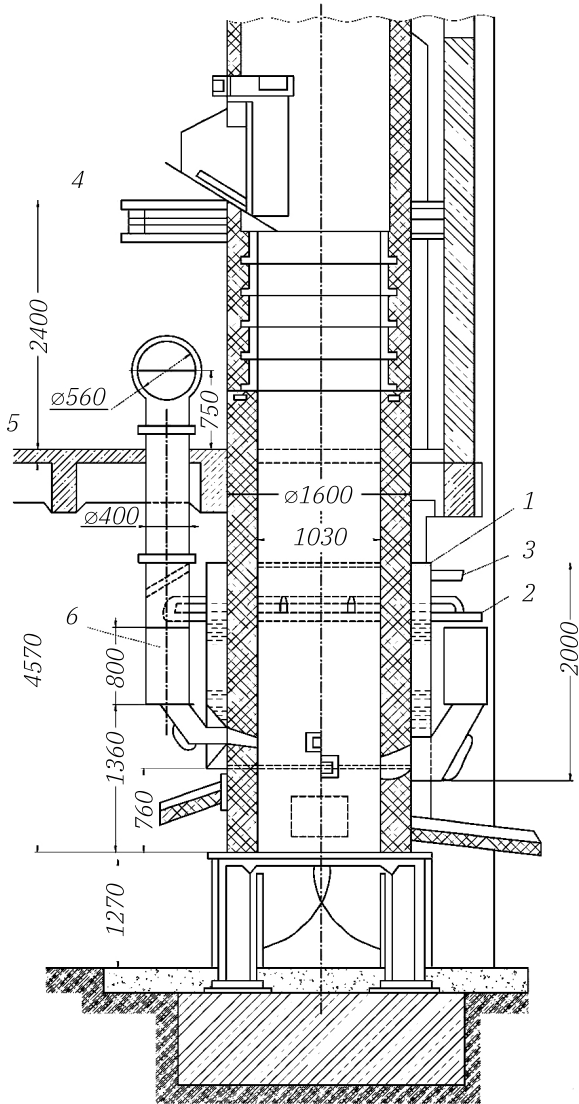


Рис. 4.1 – Приклад конструкції вагранки без копильника

Цьому сприяють підвищена температура, малий вміст окису заліза в металі та шлаку, висока основність та рідкорухливість шлаку. Копильник, в який додається кисень, стає агрегатом, в якому протікають процеси окислення домішок чавуну. Завдяки екзотермічному ефекту відбувається підігрів розплаву, забезпечуючи дотримання вимог щодо перегріву.

Гази після очищення відправляються на утилізацію, та їх тепло повертається або в процес на підігрів повітря, що вдувається в піч, або на опалення приміщень.

На рис. 4.5 представлено шари матеріалів, що завантажуються у вагранку, та розподіл температури по висоті печі.

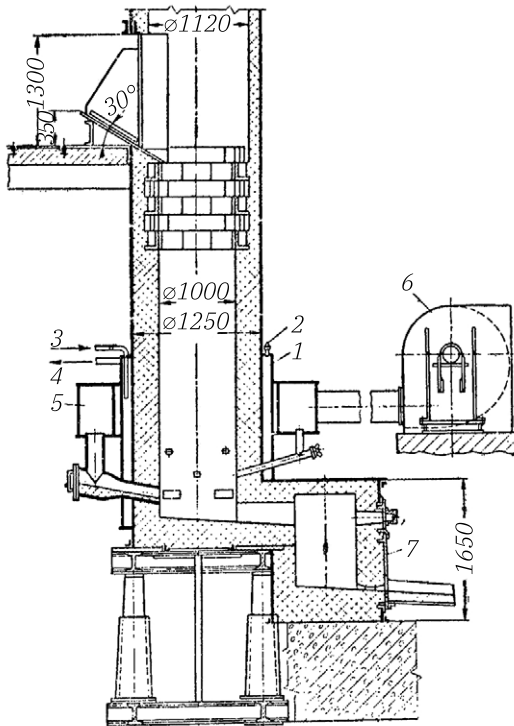


Рис. 4.2 – Приклад конструкції вагранки з копильником

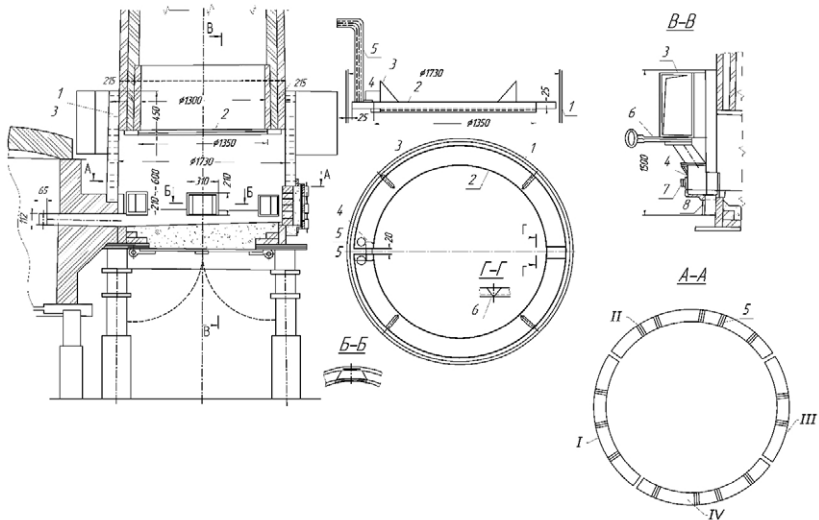


Рис. 4.3 – Приклад системи охолодження вагранки з водоохолоджуванім опорним кільцем: 1 – водяна рубашка; 2 – водоохолоджуване опорне кільце; 3 – повітряна коробка; 4 – фурма; 5 – розпорка; 6 – повітряна засувка; 7 – глазок; 8 – люк для видалення шламу. Водоохолоджуване опорне кільце: 1 – кожух вагранки; 2 – кільце; 3 – косинка; 4 – планка; 5 – труби для підводу та відводу води; 6 – монтажні зварні шви

На рис. 4.5 прийняті такі позначення:

H – рівень горизонту по висоті вагранки;

h – поточна координата по висоті вагранки;

h_{sh} – горизонт по висоті вагранки, що відповідає положенню верхнього рівня холостої колоши;

h_{shmax} – максимальний горизонт по висоті вагранки, що відповідає максимальному положенню верхнього рівня холостої колоши;

h_{shmin} – мінімальний горизонт по висоті вагранки, що відповідає мініимальному положенню верхнього рівня холостої колоши;

Δh^+ – позитивне відхилення верхнього рівня холостої колоши по горизонту,

Δh^- – негативне відхилення верхнього рівня холостої колоши по горизонту;

T – температура в вагранці;

T_{iron} – температура чавуну при випуску з вагранки.

Температурний профіль у зоні горіння та плавлення має вигляд параболи. Відповідно від параболи має і температурний профіль по висоті холостої колоши.

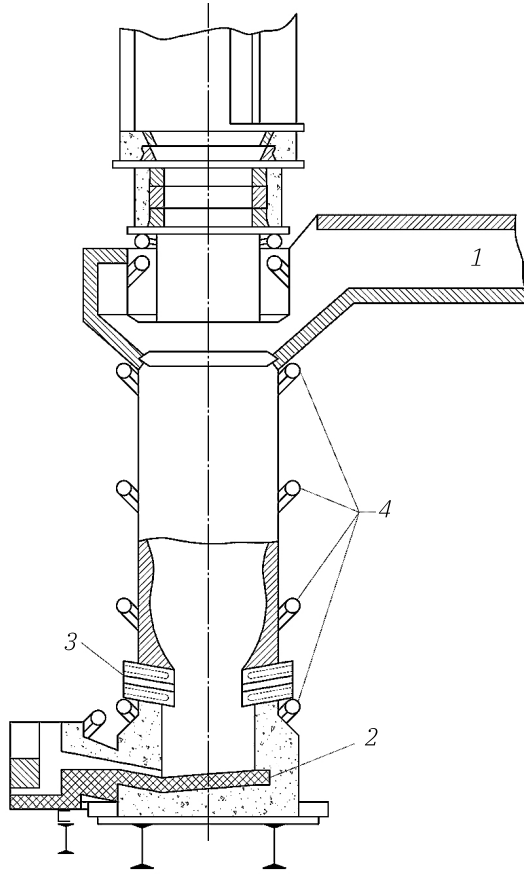


Рис. 4.4 – Приклад системи охолодження вагранки з водяним охолодженням кожуха шахти та фурм, що працює на нагрітому повітрі: 1 – газовідбірні канали; 2 – подіна; 3 – фурми; 4 – кільцеві труби системи охолодження

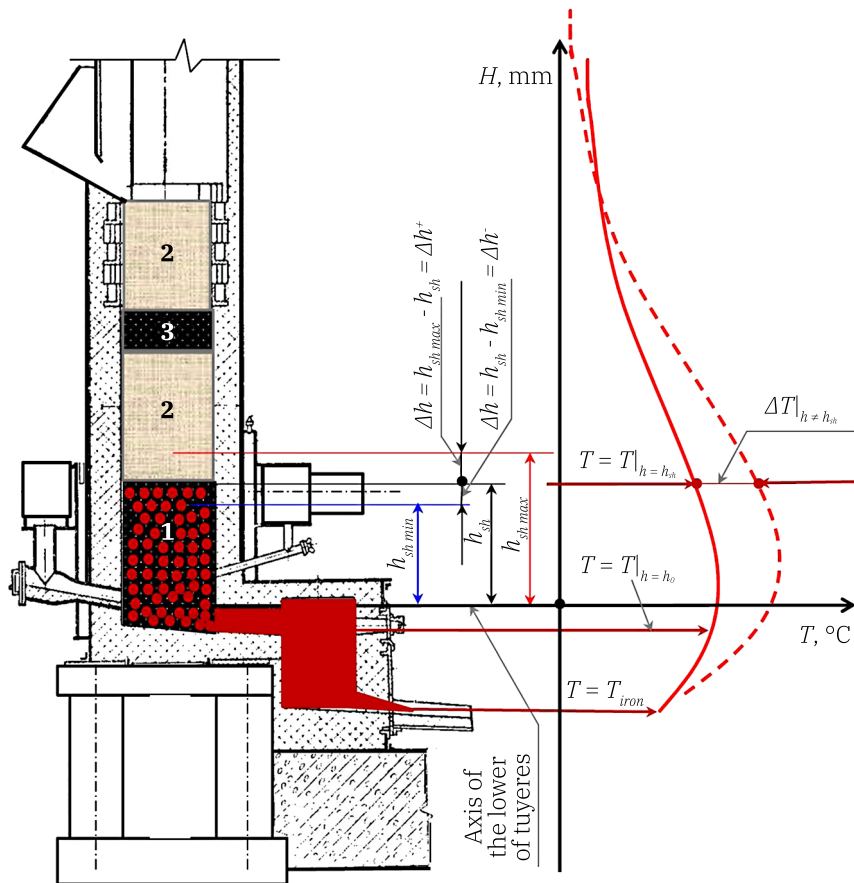


Рис. 4.5 – Шари матеріалів, що завантажуються у вагранку, та розподіл температури по висоті печі: 1 – холоста колоша; 2 – металева колоша; 3 – паливна колоша

Плавка здійснюється після підготовки вагранки до роботи та розпалювання холостої колоші. Процес розпалювання проводиться протягом 2–3 годин. Висота холостої колоші заміряється мірним прутком. Після розгоряння коксу проводиться продування холостої колоші протягом 2–3 хв, попередньо заклавши робоче вікно.

Після продування перевіряється рівень холостої колоші, і у разі, якщо він нижче заданого, що становить 1250 мм, додається кокс. Завантаження коксу здійснюється скіповим підйомником.

Завантаження вагранки здійснюється скіповим підйомником. На холосту колошу завалюється вапняк у кількості 12 кг з метою ошлакування перших порцій коксової золи. Потім проводиться пошарове завантаження матеріалів у наступній послідовності: металева колоша (500 кг), коксова колоша (53–58 кг), флюс (16–17 кг). Флюс завантажується в бункер вагового візка безпосередньо на паливну колошу, яка вважається робочою. Щоб уникнути зіткнення вапняку з футеровкою вагранки, його завантажують у центральну частину бункера.

Компоненти металевої шихти завантажуються в наступному порядку:

- чавун у чушках;
- брухт чавунний;
- відходи власного виробництва;
- брухт сталевий.

Феросиліцій завантажується на верх металевої колоші.

Описана процедура завантаження вважається регламентованою та відповідною до нормального режиму роботи вагранки.

Після завантаження шихти до рівня вікна завалки і необхідної витримки її для природного прогріву перших металевих колош протягом 15–20 хв вагранка готова до плавки. Для початку плавки виконуються такі операції:

- відкриваються одна або дві фурмові глядалки, щоб уникнути вибуху при включенні дуття;
- включається дуття, подача його регулюється шиберами на повітропроводі (тиск має становити 580–630 мм вод. ст.);
- у разі перших порцій металу в копильнику металева льотка зашпаровується формувальним складом.

У процесі плавки чавун з вагранки безперервно надходить у копильник, з якого метал видається в роздавальні ковші заданої ємності.

Після кожного випуску чавуну із копильника металева льотка закривається глиняною пробкою. Приблизно через 15–20 хв після пуску дуття шлакова льотка для спуску шлаку закривається

і відкривається в процесі плавки в міру необхідності. Попередньо включається подача води на жолоб, яким шлак і вода направляються в приймальну яму. При дотику шлаку до води відбувається його грануляція. Гранульований шлак із приймальної ями періодично видаляється грейфером. При кожному відкриванні шлакової льотки дуття тимчасово вимикається.

Розплавлений шлак, спускаючись по стінках шахти, зустрічає біля фурм холодне повітря, охолоджується, густіє і осідає на шматках коксу біля фурм. Таким чином відбувається намерзання шлаку, що призводить до зменшення живого перерізу фурм, якими повітря потрапляє в шахту вагранки. Витрата повітря може зменшитися на 30–40%, що призводить до зниження продуктивності вагранки і температури чавуну.

Зашлаковані фурми чистяться через оглядові вікна за допомогою лому, короткими ударами проштовхуючи зашлакований кокс і нарости всередину вагранки. Для більш швидкого усунення зашлакування через вікна завалки засипається плавиковий шпат в центр шахти в кількості до 5–6 кг.

Управління процесом ваграночної плавки здійснюється з метою забезпечення заданих показників процесу – змінних станів, якими є температура та хімічний склад чавуну. У процесі управління вирішуються такі завдання:

- усунення зависання шихти;
- недопущення холодного ходу вагранки;
- недопущення вимушених зупинок;
- недопущення місцевого розігріву кожуха;
- недопущення прориву чавуну через під.

Усунення зависання шихти.

Зависання ліквідується ломом, вводячи його у шихту через завалочне вікно. Якщо зависання швидко усунути не вдається, припиняється подача дуття. Велике зависання шихти призводить до вигорання холостої колоші, тому після усунення зависання у вагранку завантажується додаткова паливна колоша (коксове переисипання) в об'ємі до 2–3 робочих коксових колош.

Холодний перебіг вагранки.

Головною причиною холодного ходу вагранки є занижена висота холостої колоші та її неякісний розпал перед завалкою шихти.

Для усунення холодного ходу у вагранку завантажується робоча коксова колоша (коксове пересипання) об'ємом 2–3 робочих коксових колош.

Вимушені зупинки.

Причинами таких зупинок може бути зупинка ливарного конвеєра або аварія обладнання. В цьому випадку для припинення роботи вагранки припиняється подача дуття, випускається весь чавун і шлак, фурми закриваються, льотки зашпаровуються свіжою формувальною сумішшю, щоб запобігти підсмоктуванню повітря і зупинити горіння коксу.

Місцевий розігрів кожуха.

Місцеве розігрівання кожуха візуально визначається через місцеве його почервоніння. Розігрів відбувається внаслідок вигорання або руйнування футеровки в зоні високих температур, що призводить до того, що розпечені гази або безпосередньо чавун і шлак стикаються з металевим кожухом. Щоб уникнути пропалу кожуха, на розігріте місце спрямовують струмінь води до тих пір, поки місце розігріву не потемніє. Після цього робота вагранки продовжується, оскільки чавун, що проник до кожуха, твердне і стає захистом від подальшого пошкодження.

Прорив чавуну через під.

Проникнення чавуну в стик подини з футеровкою виникає внаслідок слабкого набивання або набивання сухою формувальною землею. У такому разі на перегріте місце, що визначається візуально за його почервонінням, спрямовують струмінь води.

Якщо прорив чавуну відбувається через днище, дуття припиняється і випускається чавун. У отвір, що утворився внаслідок прориву, вдавлюється глина, і зовні наноситься додатковий шар глини, що підтримується металевою плиткою і підпіркою, що підпирається.

Час закінчення плавки визначається залежно від потреби в рідкому металі та кількості невивпавленого металу, що знаходиться у вагранці. Після завантаження останньої колоші кількість повітря, що подається, підтримується постійною, для чого шибер на повітропроводі поступово закривається.

Про повне проплавлення шихти свідчить припинення стікання крапель чавуну біля фурм. Якщо це відбувається, то дуття зупиняють, шибер закривається повністю, а фурмові глядалки відкриваються,

щоб уникнути вибуху. З копильника випускається весь метал, і, відкриваючи дверцята копильника, випускається шлак.

У процесі ваграночної плавки контролю підлягають такі технологічні параметри:

- тиск повітря;
- температура рідкого металу;
- хімічний склад і механічні властивості чавуну, що виплавляється.

Параметри та засоби вимірювання тиску повітря.

Повітря, що подається у вагранку вентилятором, повинно бути під тиском вище атмосферного, щоб подолати опір стовпа шихтових матеріалів. Надлишковий тиск має бути 600–650 мм вод. ст. Для вимірювання тиску дуття у фурменній коробці служить U-подібний рідинний манометр.

Контроль температури рідкого металу.

Вимірювання температури рідкого металу проводиться на жолобі вагранки та при заливанні у форми оптичним пірометром випромінювання. Температура чавуну на жолобі вагранки має становити $\geq 1340^{\circ}\text{C}$.

Контроль хімічного складу чавуну, що виплавляється.

Контроль здійснюється експрес-лабораторією. Заливка першої проби на повний хімічний аналіз проводиться при 3–4-му випуску металу з копильника. Наступні проби відбираються через кожні 2 години роботи. Відбір проб на контроль вмісту Si проводиться через кожні 30 хв.

Контроль механічних властивостей чавуну, що виплавляється.

Контроль проводиться центральною заводською лабораторією з проб на повний хімічний аналіз.

Описані чисельні показники по завантаженню вагранки відносяться до найбільш типових вагранок продуктивністю 6 т/год.

4.2. Діаграми зв'язків параметрів плавки в вагранці та керуючі фактори процесу

Діаграму зв'язків у ваграночному процесі представлено на рис. 4.6.

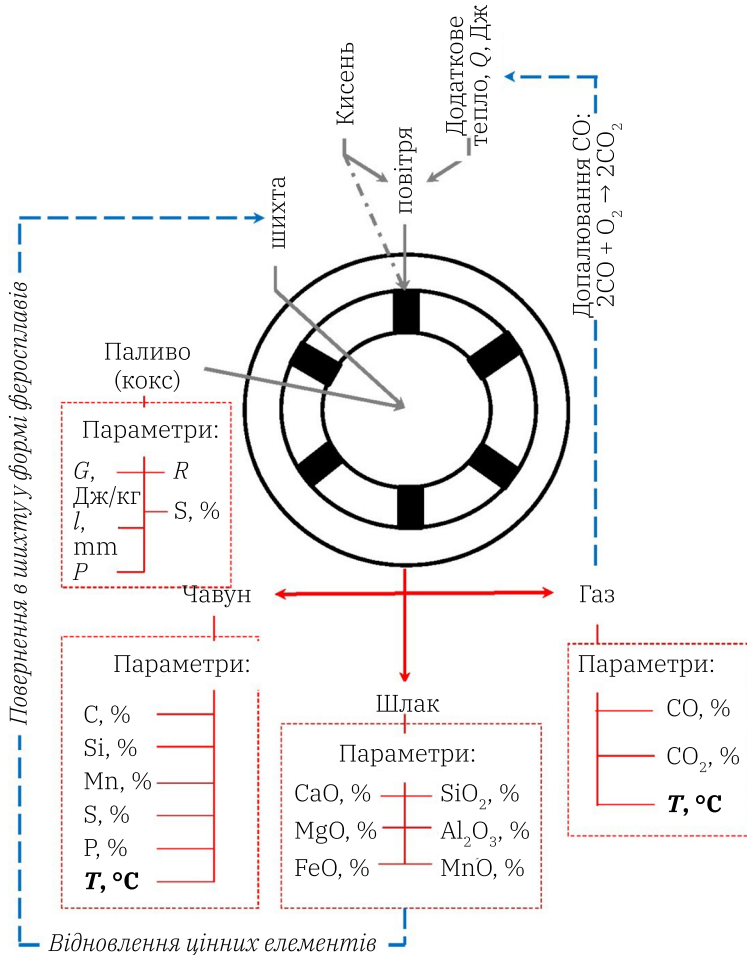


Рис. 4.6 – Діаграма зв'язків у ваграночному процесі

Діаграма дозволяє сформуванати прямі та зворотні структурні зв'язки між параметрами, що можуть бути використані в управлінні процесом плавки (рис. 4.7).

На рис. 4.7 прийняті наступні позначення:

q_{coke} – кількість коксу;

Q – додаткове тепло, що подається з повітрям;

V – об'єм повітря, що подається через фурми;

O_2 – кількість кисню в повітрі, що подається через фурми;

$T_{burning}$ – температура горіння палива;

T_{air} – температура повітря, що подається через фурми;

$T_{cast iron}$ – температура рідкого чавуну.

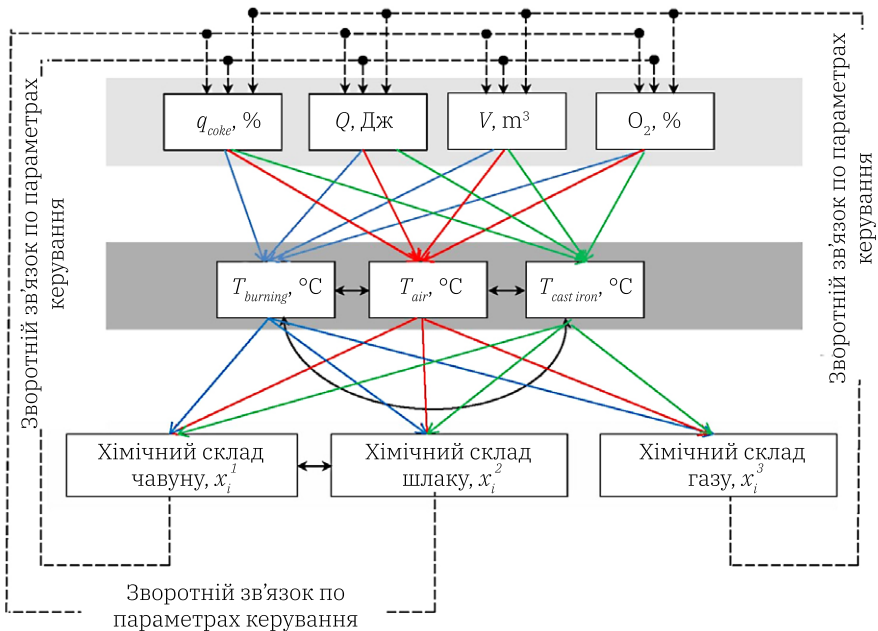


Рис. 4.7 – Прямі та зворотні структурні зв'язки між параметрами процесу плавки:

– рівень керуючих параметрів;
 – рівень внутрішніх параметрів;
 – рівень параметрів, що відображають показники якості, верхні індекси 1, 2, 3 у визначенні змінних відносяться до чавуну, шлаку та газу відповідно

Як свідчать структурні зв'язки, наведені на рис. 4.6, в загальному вигляді будь-який з параметрів, що відображають показники якості процесу плавки, є функцією керуючих параметрів, які, в свою чергу, впливають на внутрішні параметри системи через керуючу дію.

Процес керування через дію керуючих параметрів забезпечується фізико-хімічними процесами, що протікають в печі. Основною реакцією є горіння вуглецю коксу



Але за високих температур в зоні горіння та плавлення, внаслідок постійного контакту коксу з газовою фазою, починає розвиватися реакція відновлення:



константа рівноваги якої визначається за рівнянням

$$K_p = \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2} a_C} = \exp\left(-\frac{\Delta G^0}{RT}\right), \quad (4.3)$$

де p_{CO} , p_{CO_2} – парціальний тиск CO та CO_2 відповідно, $a_C = 1$, ΔG^0 – зміна енергії Гібса, Дж.

Кисневий потенціал в цій системі за присутності вуглецю визначається формулою

$$\Delta\mu_{O_2} = \Delta G_1^0 + 2RT \ln \frac{p_{CO_2}}{p_{CO}}, \quad (4.4)$$

де $\frac{p_{CO_2}}{p_{CO}}$ – відношення рівноважних парціальних тисків CO_2 та CO

за реакцією газифікації вуглецю $2CO + O_2 = 2CO_2$.

Відповідно до ходу цих процесів відбувається формування показників плавки. Якщо верхній рівень холостої колоши падає до $h_{sh \min}$ чи підіймається до $h_{sh \max}$, то це призводить до зміщення температурного профілю (рис. 4.5). Утворюється різниця

температур $\Delta T|_{h=h_{sh}}$ на тому горизонті вагранки, який відповідав номінальному положенню верхнього рівня холостої колоши (на рис. 4.5 ця різниця, так само як і положення зміщеного температурного профілю, показано умовно). Вибране управління має повернути температурний профіль до заданого положення шляхом комбінованого впливу на температурний режим зміною кількості коксу холостої колоши (V_c) і зміною витрати повітря, що вдувається (Q).

Як перший керуючий вплив (u_1) обирається керування завантаженням паливної колоши. Як другий керуючий вплив (u_2) обирається керування положенням заслінки на трубопроводі, що подає повітря в фурменну коробку (рис. 4.8).

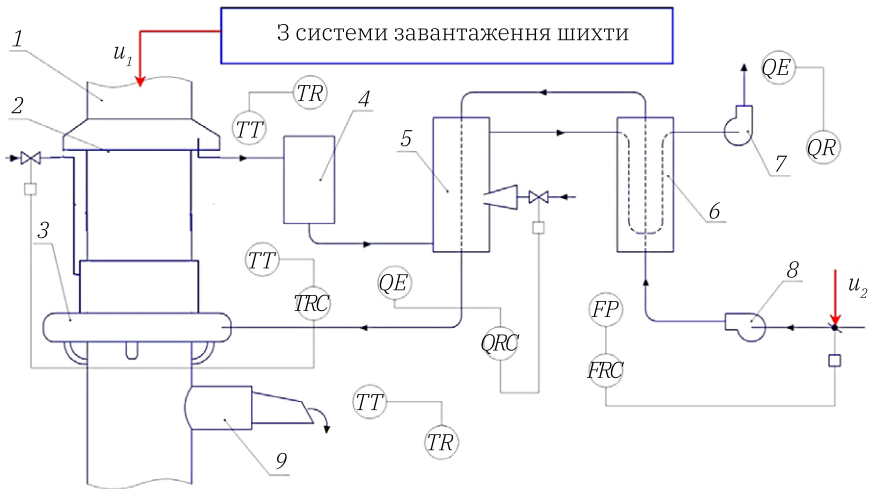


Рис. 4.8 – Спрощена схема управління процесом ваграночної плавки:

- 1 – вагранка; 2 – іскрогасник; 3 – фурменний пояс;
- 4 – мокрий очисник; 5 – рекуператор радіаційний;
- 6 – рекуператор конвективний; 7 – димосос; 8 – вентилятор;
- 9 – копильник

Схема вагранки з рекуператором підігріву повітря представлена на рис. 4.9.

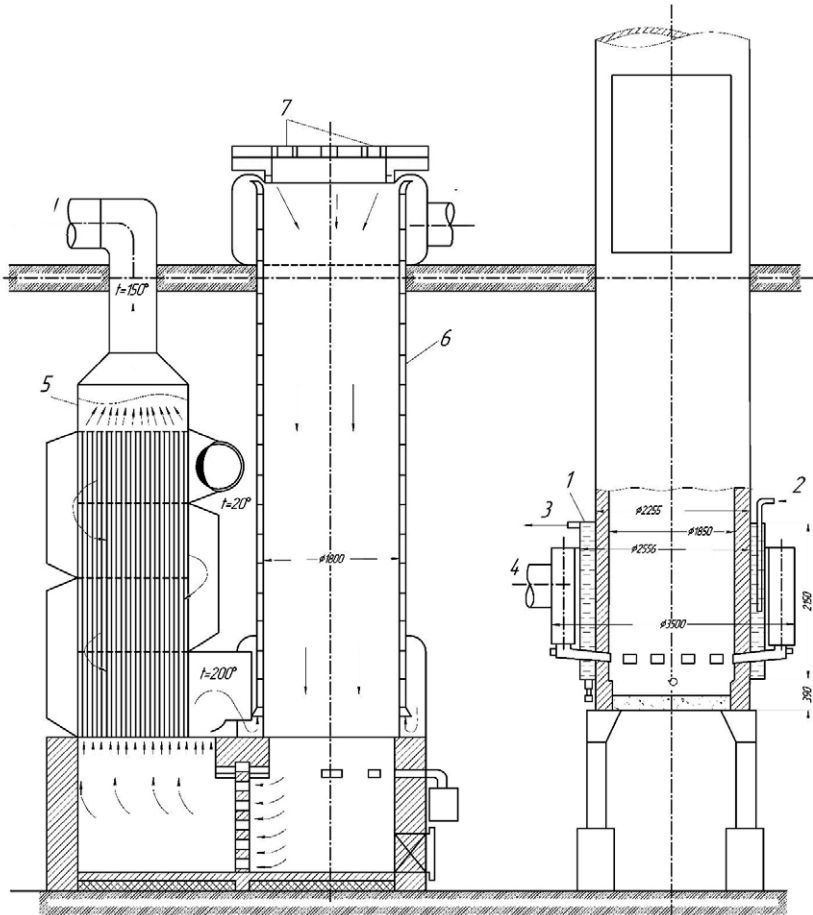


Рис. 4.9 – Схема вагранки з рекуператором підігріву повітря:
1 – водяна рубашка; 2 – підвід холодної води; 3 – відвід зливної
води; 4 – підвід повітря, нагрітого до 400°C ; 5 – конвективна
частина рекуператора; 6 – радіаційна частина рекуператора;
7 – отвори для кріплення горілок

Залежність температури чавуну від об'єму холостої колоши і від об'єму повітря, що вдувається, має нелінійний вигляд. Це зумовлено тим, що підвищення температури за рахунок збільшення об'єму повітря, що вдувається, лімітовано як фізико-хімічними процесами в зоні горіння, так і аеродинамічним опором, зокрема з боку стовпа шихти у вагранці.

Якщо за інформативний параметр використовувати температуру чавуну на жолобі при видачі з вагранки, то факт зміни положення верхнього рівня холостої колоші визначається з наступної умови (рис. 4.5):

$$\begin{aligned} \text{IF } T_{iron} \Big|_{t=t_i} < [T_{iron}] \text{ and } P \Big|_{t=t_i} > [P] \text{ then } \Delta h = h_{sh} - h_{sh \min} = \Delta h^-, \\ \text{IF } T_{iron} \Big|_{t=t_i} > [T_{iron}] \text{ and } P \Big|_{t=t_i} < [P] \text{ then } \Delta h = h_{sh \max} - h_{sh} = \Delta h^+, \end{aligned} \quad (4.5)$$

де $[T_{iron}]$ – фактична температура чавуну, що визначається для заданого положення верхнього рівня холостої колоші, $[P]$ – фактична продуктивність вагранки, що визначається для заданого положення верхнього рівня холостої колоші, Δh – відхилення положення верхнього рівня холостої колоші (рис. 4.5).

Враховуючи, що температура чавуну залежить від температури коксу в холостій колоші, умова (4.5) може бути використана для визначення положення верхнього рівня холостої колоші на основі вимірювання температури у робочому просторі вагранки, зокрема по висоті холостої колоші. У цьому випадку інформативним параметром про фактичне положення верхнього рівня холостої колоши є значення температури на горизонті $h = h_{sh}$. Відхилення за температурою ΔT на цьому горизонті сигналізує про необхідність завантаження паливної колоші необхідного об'єму. Відповідна умова має вигляд:

$$\text{IF } \Delta T \Big|_{h \neq h_{sh}} \neq 0 \text{ and } P \neq [P] \text{ then } \Delta h \neq 0. \quad (4.6)$$

Умови (4.5) та (4.6) дозволяють регулювати температурний режим та продуктивність вагранки шляхом керування завантаженням паливної та металевої колош. Відповідні схемні рішення представлені на рис. 4.10, 4.11.

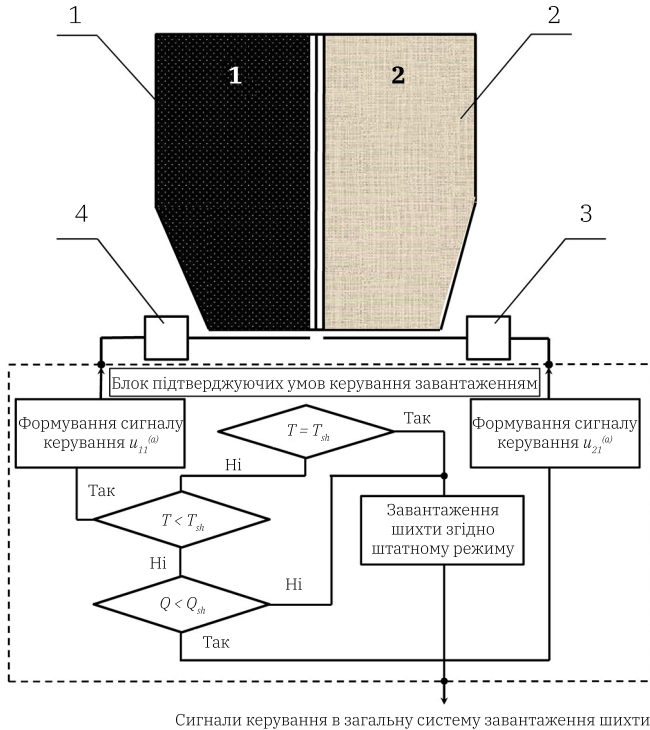


Рис. 4.10 – Блок-схема частини системи керування завантаженням, що включає регулювання температурного режиму та продуктивності вагранки шляхом подачі робочої паливної та металевої колош: 1 – бункер із коксом; 2 – бункер із металевою шихтою; 3 – виконавчий механізм системи завантаження металевої колоші; 4 – виконавчий механізм системи завантаження робочої паливної колоші

На рис. 4.10 прийняті наступні позначення: Q – поточна продуктивність вагранки, Q_{sh} – задана продуктивність вагранки, т/ч, $u_{11}^{(a)}$ – вмикаючий сигнал привода шибера бункера с коксом, що надходить з системи автоматизованого управління; $u_{21}^{(a)}$ – вмикаючий сигнал привода шибера бункера с металевою шихтою, що надходить з системи автоматизованого управління (рис. 4.11).

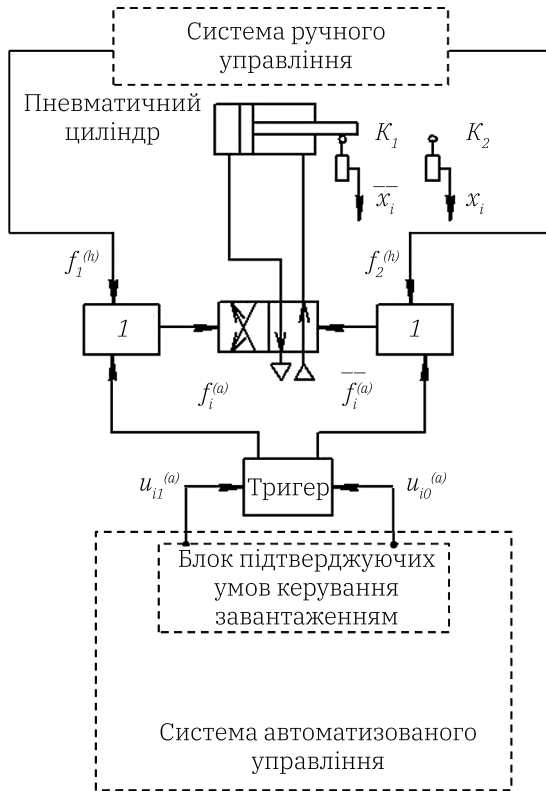


Рис. 4.11 – Елемент системи керування шиберами бункерних заслінок

На рис. 4.11 прийняті наступні позначення:

K_1, K_2 – кінцеві вимикачі ближній та дальній, відповідно;

$f_1^{(h)}, f_2^{(h)}$ – сигнали керування, що надходять на електромагніти розподільників з системи ручного управління;

$f_i^{(a)}, f_i^{(h)}$ – сигнали керування, що надходять на електромагніти розподільників з тригера з системи автоматизованого управління;

$u_{i1}^{(a)}, u_{i0}^{(a)}$ – сигнали керування, що надходять з системи автоматизованого управління на вмикаючий та вимикаючий входи тригера.

Таблиця 4.1 – Контрольовані параметри та технічні засоби автоматизації технологічного процесу плавки в вагранці

Параметри, що контролюються	Розмірність	Засоби автоматизації
Рівень завантаження шихти	м	Радіоізотопний сигналізатор рівня типу гама-реле, проміжний перетворювач сигналу, вторинний прилад
Температура футеровки	°С	Термопари, електронний потенціометр
Температура чавуну на випуску	°С	Термопари або пірометр випромінювання, вторинний прилад
Витрати повітряного дуття, кисню та природного газу відповідно	м ³	Діафрагми, діфманометри, вторинні прилади
Температура гарячого дуття	°С	Термопари, електронний потенціометр
Вологість дуття	%	Психрометр, вторинний прилад
Температура охолоджуючої води в контурі охолодження футеровки	°С	Термопари, електронний потенціометр
Вміст СО і СО ₂ в газах, що відходять	%	Оптико-акустичні газоаналізатори або автоматичний хроматограф
Маса чавуну в копильнику	кг	Тензодатчик, вторинний прилад
Продуктивність агрегату	т/год	Диференціатор, вторинний прилад
Хімічний склад розплаву	%	Лабораторне обладнання

РОЗДІЛ 5 ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ЕЛЕКТРОДУГОВОЇ ПЛАВКИ

***Мета розділу:** ознайомитись з технологією та технологічними схемами плавки в електродугових печах та схемами автоматизації таких процесів.*

Робочі питання:

- 1. Технологія електродугової плавки*
- 2. Технологічні схеми електродугової плавки*
- 3. Схема автоматизації електродугової плавки*

5.1. Технологія електродугової плавки

Електродугова піч змінного струму (рис. 5.1) призначена для виплавки сталі та чавуну. Сутність процесу полягає в розплавленні твердої шихти або доведення рідкого сплаву до заданої температури завдяки температурі, що створюється в робочому просторі печі електричними дугами, що горять між графітовим чи графітізованим електродом та шихтою (або рідким металом).

Підготовка електропечі до плавки.

Після випуску плавки подіну і укуси печі оглядають, очищують від шлаку і металу, що залишилися. Подина повинна бути рівною, без ям, з високо виведеними укусами – вище за рівень шлаку. Для заправки печей з основною футеровкою застосовують сухий магнезитовий порошок. Якщо потрібно підварити подину та укуси шаром понад 20 мм, використовують магнезитовий порошок, змішаний на зневодненій смолі, кам'яновугільному печі або рідкому склі. Печі з кислотою футеровкою заправляють меленим кварцитом або чистим кварцовим піском, при необхідності також змішаними на рідкому склі. Операції заправки зазвичай здійснюють за 5–10 хв.

Залежно від марки сталі, наявності на шихтовому дворі сталевого вуглецевого брухту і легованих відходів встановлюють номер стандартної шихти.

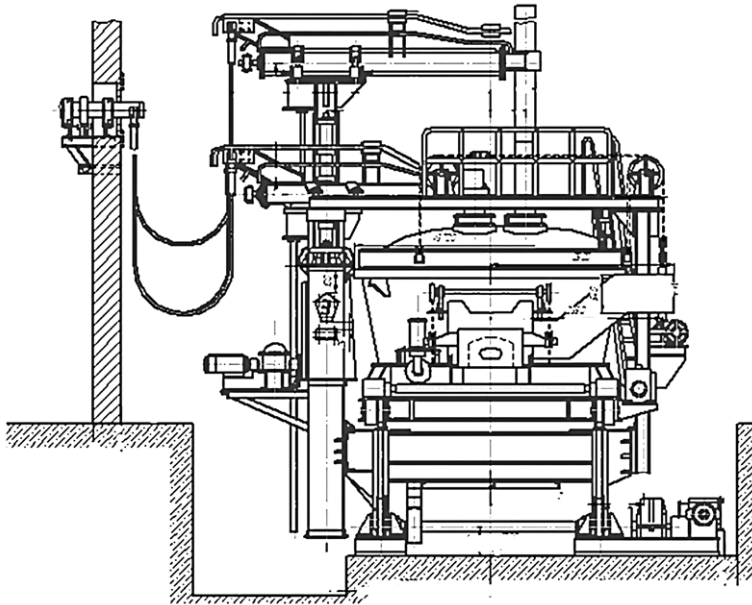


Рис. 5.1 – Електродугова піч

При нормальному стані печі порядок завалки в баддю і, отже, в піч, такий: безпосередньо на подіну подають 20...30% дрібної компакної шихти, важкий скрап задають у середні шари, а легкий у верхні. Щоб уникнути підвалок у процесі плавлення, необхідно прагнути до завантаження повної садки в баддю. У шихті рекомендується мати до 30% дрібної шихти, що завалюється в нижню частину бадді. Маса металевої садки визначається рівнем рідкої ванни на горизонті випускного отвору і має перевищувати 1.5 номінальної місткості печі. При плавці в печах з основною футеровкою, що проводиться з окисленням, в нижні шари шихти дають 2...3% залізної руди і стільки ж вапна, що забезпечує суттєву дефосфорацію до кінця розплавлення.

Період плавлення.

Завдання цієї операції полягає в швидкому переведенні металу в рідкий стан. Швидкість розплавлення в основному визначається

питомою потужністю трансформатора. Розплавлення шихти займає 1–2 год. У сталеливарному виробництві це зазвичай половина загальної тривалості плавки.

Плавлення здійснюється в такий спосіб. Спочатку, коли дуги відкриті і горять під зводом, щоб уникнути перегріву та оплавлення останнього, необхідно працювати на коротких дугах – малій напрузі і великій силі струму. Як тільки дуги заглибляться в шихту, зазвичай через 3–5 хв, слід перейти на максимальну потужність при найвищій напрузі та силі струму. Після утворення колодязів довгі дуги екрановані шихтою і не викликають перегріву футеровки. У твердій шихті дуги пропалюють колодязі, діаметром у 2...3 рази більшим за діаметр електрода. У цей час все тепло дуг сприймається шихтою, і коефіцієнт корисної теплової дії найвищий. Приблизно через 15–30 хв електроди опускаються до рівня рідкого металу, що вже скупчився на подині (шлаку), і потім у міру подальшого плавлення шихти починають повільно підніматися. Тверда шихта поступово розплавляється, розчиняється в перегрітій ванні колодязів, і електроди виходять на верхній рівень, де відкриті дуги горять на поверхні шлаку, що утворився під час розплавлення.

Плавка сталі в дугових печах з основною футеровкою.

Основна футеровка практично в достатній мірі чинить опір агресивному впливу всіх елементів, що входять до складу легованих і високолегованих сталей. Головною перевагою основної футеровки є можливість проведення глибоких дефосфорації та десульфурзації, а також дифузійного розкислення під безжелезистими білими шлаками. У дугових печах з основною футеровкою виплавляють найбільш відповідальні конструкційні леговані і вуглецеві сталі з низьким вмістом сірки і фосфору, що йдуть для виготовлення важко навантажених або холодостійких виливків, і весь сортамент високолегованих марок сталі, таких як високомарганцеві аустенітні, нержавіючі, жаростійкі, кислотостійкі та інші зі спеціальними властивостями.

Метод окиснення.

Шихту складають таким чином, щоб отримати після розплавлення вміст вуглецю на 0.2...0.3% вище за верхню межу марки. Для кращої дефосфорації при плавленні в завалку задають вапно (вапняк) та залізу руду (2–3% кожного). Під час плавлення до 50%

фосфору, що знаходився в шихті, переходить у шлак, а вміст у ньому P_2O_5 піднімається до 1.5%.

Інтенсифікацію плавлення здійснюють підрізуванням шихти киснем наприкінці операції плавлення, що скорочує її тривалість на 5–10%. Після повного розплавлення шихти частково скачують шлак, задають у піч вапно, руду і приступають до процесу окислення. В даному випадку переслідуються завдання подальшої дефосфорації та досягнення відповідного складу та температури рідкої сталі. Бажано вести процес зі спінюванням шлаку і безперервним сходом через поріг робочого вікна. Окисний процес слід закінчувати при добре нагрітому металі та вмісті вуглецю, що забезпечує відповідність заданому з урахуванням присадок у відновлювальний період. Окисний процес інтенсифікують введенням технічного газоподібного кисню (вміст його не менше 99%, вологи не більше 1 г/м^3). Рекомендований діаметр сталевих трубок 10–25 мм. Трубки футерують зовні вогнетривкою масою – це може бути шамот, вогнетривка глина, рідке скло. Кращою футеровкою служать шамотні трубки, що надіваються поверх сталевих. Більш досконалим методом введення кисню є його подача спеціальною мідною водоохолоджуваною фурмою, вмонтованою у звод печі, яка вертикально пересувається до поверхні ванни. Окислення газоподібним киснем значно збільшує швидкість вигорання вуглецю. Якщо за окислення рудою вона дорівнює 0.3–0.6% на годину, то за окислення киснем – понад 1.5%. Вміст фосфору наприкінці окислення залежно від призначення сталі має становити 0.01–0.02%. Окислювальний шлак, щоб уникнути рефосфорації, слід завантажувати особливо ретельно (зміст P_2O_5 в окислювальному шлаку 1–2%).

Відновлювальний період передбачає доведення плавки за складом та температурою, максимальну десульфуріацію та раціональне кінцеве розкислення для отримання заданих властивостей сталі. Найбільш ефективним є поєднання осадового та дифузійного розкислення. Досвід показав, що присадка алюмінію на початку відновної операції сприяє швидкому наведенню білого шлаку та суттєво прискорює процес десульфуріації. У момент присадки алюмінію з оксидними включеннями видаляється з розплаву до 80% кисню, що дозволяє скоротити тривалість відновлювальної операції. Відновлювальний шлак наводиться із вапна, плавикового

шпату та бою шамота (або піску) у співвідношенні 5:1:1. По розплавленні шлак обробляється порошками меленого феросиліцію та коксу (до 5 кг/т кожного). Кількість шлаку становить 3...5% маси металу. У цей період плавку доводять за хімічним складом, присаджуючи відповідні легуючі елементи. Можливість проведення дифузійного розкислення – істотна перевага основного процесу електроплавки. Беззалістий шлак забезпечує активну дифузю кисню та сірки з металевої ванни у шлакову. Білий шлак, остигаючи на повітрі, збільшується обсягом і розсипається в білий порошок.

Одночасно із розкисленням протікає десульфурація. Коефіцієнт розподілу сірки між шлаком і металом тим вищий, чим нижче вміст важких оксидів у шлаку. За наявності білого шлаку, що включає до 1% FeO, і відповідної температури рідкої сталі плавку випускають з електропечі. Кінцеве розкислення стали алюмінієм проводять його присадкою на штанзі в піч або подачею під час випуску в ківш на струмінь. Тривалість відновлювального періоду щодо різних марок сталей складає 30–60 хв. Спільний злив металу з білим шлаком і інтенсивне їх перемішування в ковші викликають додаткове видалення до 50% сірки, що міститься в сталі.

При надлишку коксу в шлаку утворюється карбідний шлак, який, остигаючи, розсипається на сірий порошок з характерним запахом ацетилену – відбувається реакція з вологою повітря. В ділянці дуг вуглець і вапно з'єднуються в карбід кальцію, що потім поширюється по всьому об'єму шлакової ванни (до 4% CaC₂). Однак у сталеливарному виробництві розкислення під карбідними шлаками не застосовується; чистіша за включеннями і газами сталь виходить при розкисленні під білими шлаками.

Плавка стали в дугових печах з кислою футеровкою.

При однаковій номінальній місткості печі та потужності трансформаторів продуктивність печей з кислою футеровкою значно вища за основні, а експлуатаційні витрати нижче через більш високу стійкість футеровки, що виготовляється до того ж з більш дешевих матеріалів, меншої витрати електродів та електроенергії, істотного зниження трудомісткості операцій. Глибина ванни в кислих печах значно більша, ніж в основних, що дозволяє працювати з великим перевантаженням без шкоди для стійкості футеровки. Плавки проводять з одним шлаком, що скорочує їх тривалість

і знижує трудомісткість роботи. Операції окислення та доведення, що передбачають одержання сталі заданого складу та відповідного нагрівання, проводять форсовано. Це підвищує продуктивність печей в 1.3–1.5 рази. Силікатні шлаки відрізняються водністю, завдяки чому електричні дуги розривають шлаковий покрив і безпосередньо контактують з рідким металом, безпосередньо передаючи йому тепло дуг. З цієї причини кислі шлаки мають нижчу температуру, ніж основні, і завдяки матовій поверхні в печі меншою мірою відбивають енергію дуг на стіни та звід. Нагрів металу в печах з кислою футеровкою здійснюється значно швидше, ніж в основних, а стійкість стін і зводів приблизно вдвічі вища.

У печах з кислою футеровкою сірка і фосфор практично не видаляються. Існуючі рекомендації з наведення вапняних шлаків для зв'язування та видалення фосфору малоефективні в умовах кислої футеровки, тому в цих випадках необхідно переходити на основну футеровку. Для видалення сірки при кислому процесі можлива позапечна десульфурація, проте вона пов'язана зі значними організаційними труднощами. Тому слід приділяти велику увагу підбору шихтових матеріалів з точки зору їх чистоти по сірці та фосфору. В якості шлакоутворюючих застосовують формувальні піски і в невеликих кількостях залізну руду і вапно (вапняк). Окисли заліза і марганцю, що виходять під час плавлення, взаємодіють з кремнеземом футеровки і утворюють насичені кремнеземом залізомарганцеві силікати. Кремнезем вноситься також відходами (пригар) і присадками піску. Співвідношення між концентраціями оксидів заліза та марганцю залежить від складу шихти. Зазвичай при розплавленні шихти шлак включає 50% SiO_2 і 50% $\Sigma(\text{FeO} + \text{MnO})$. У процесі нагрівання ванна під зазначеним шлаком енергійно закипає за рахунок його кисневих резервів. В окремих випадках при більш низькій концентрації важких оксидів в шлак вводять залізну руду. Після нетривалого кипіння шлак загущають присадками піску і ведуть відновлювальний процес. У цей період енергійно відновлюється кремній, шлак добре проварюється, набуває світлі відтінки і велику щільність. Колір поверхні шлаку стає світло-коричневим, зламу – світло-зеленим або світло-блакитним. У шлак зазвичай вводять і вапно для зменшення кількості важких оксидів. Зразковий склад кінцевого шлаку: 55% SiO_2 , 10% CaO , 10% FeO , 15% MnO ,

5% Al_2O_3 . На окремих заводах кількість вапна збільшують до 20%, що призводить до значного зниження важких оксидів у шлаку.

Плавки в печах з кислотою футеровкою зазвичай проводять кремневідновлювальним процесом, який відбувається переважно за рахунок відновлення вуглецем кремнезему шлаку і футеровки. Останнє обумовлено тим, що металева ванна знаходиться наче в оболонці кремнієвої кислоти. Одночасно відбувається реакція відновлення кремнію марганцем. Ступінь розвитку цього процесу значною мірою визначається температурою, вмістом вуглецю в сталі і складом шлаку. У міру підвищення температури та зменшення важких оксидів у шлаку швидкість відновлення кремнію зростає і його вміст прагне до рівноважного з вуглецем.

5.2. Технологічні схеми електродугової плавки

Робота печі здійснюється в складі ливарного конвеєра. Основна задача полягає в неперервному забезпеченні ділянки заливки заданою кількістю металу. Установка дугової печі (рис. 5.2) складається з печі 1, трансформатора 2, щитів управління та автоматики 3, маслонапірної установки 4, системи мокрого газоочищення 5, установки для набору шихти 6, стенду для підігріву шихти 7.

Дугові печі для виплавки сталі можуть мати як кислу, так і основну футеровку. Вибір футеровки печі і варіанта плавки в ній (з окисленням або без окислення) залежить від марки сталі, що виплавляється, і від використовуваних шихтових матеріалів. Середньовуглецеві та низьколеговані сталі звичайних марок виплавляють у кислих дугових печах. Використовувана для цього шихта повинна бути чистою по сірці, фосфору та легуючим елементам. При застосуванні окисленого і легкового скрапу в шихту додають 5–10% передільного чавуну і ведуть процес з окисленням вуглецю і кипінням. При неокисленій шихті скрап переплавляють без окислення, що значно підвищує продуктивність печей і знижує витрату електроенергії. При цьому вдається видалити з шихти більшу частину фосфору та сірки, забезпечити одержання сталі із вмістом усіх елементів у заданих межах. Застосування продування киснем дозволяє отримувати в дугових печах низьковуглецеві жароміцні сталі.

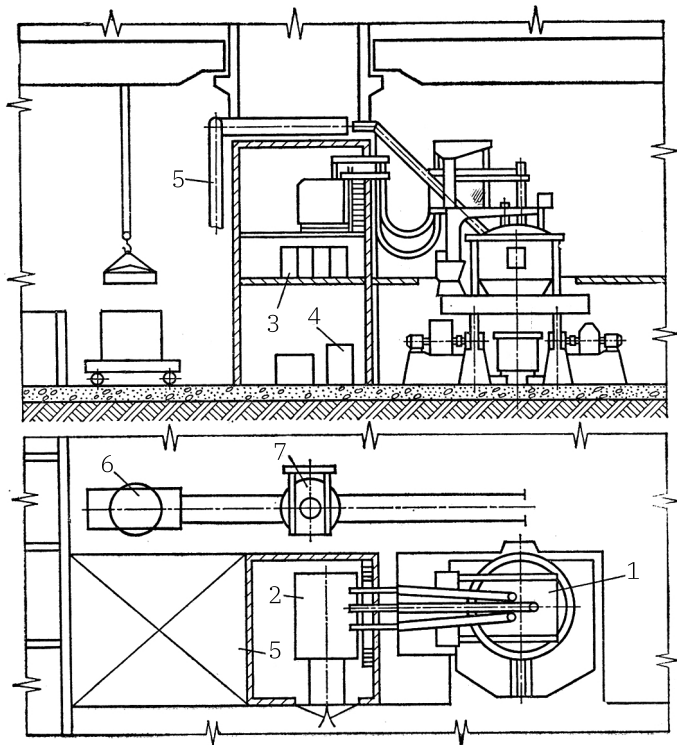


Рис. 5.2 – Схема встановлення електродугової печі

Одночасно під час продування киснем досягається дегазація металу, зменшується вміст неметалевих включень і збільшується продуктивність печей. Однак процеси продування стали чистим киснем і в суміші з порошкоподібними речовинами збільшують кількість шкідливих викидів в атмосферу та вимагають встановлення досить складних витяжних та очисних пристроїв.

Дугові печі є агрегатами періодичної дії, час плавки в них, залежно від ємності печі та технологічного процесу плавки, коливається від 1.5–2.5 год (при ємності до 3 т) до 3.5–4 год (при ємності 12 т). Зменшити тривалість плавки можна у трипозиційній карусельній установці (рис. 5.3).

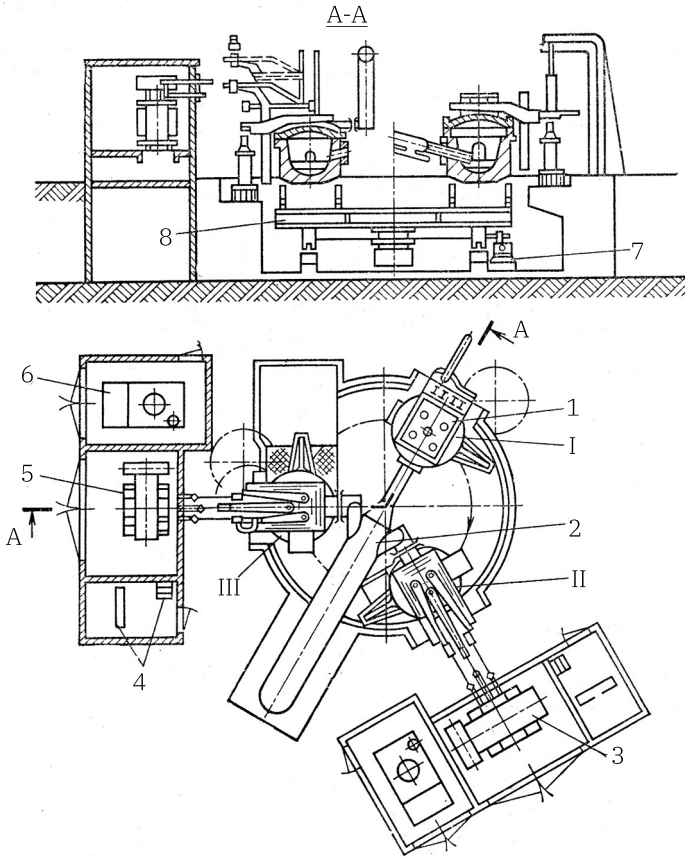


Рис. 5.3 – Трипозиційна карусельна установка з дуговими електропечами: I – піч на позиції підігріву шихти газовими пальниками; II – піч на позиції плавки; III – піч на позиції доведення та видачі сплаву; 1 – стэнд для підігріву шихти; 2 – відсмоктування димових газів з печей; 3 – пічний плавильний трансформатор; 4 – пульт управління; 5 – трансформатор для доведення сплаву (малої потужності); 6 – гідроприводна станція; 7 – привід каруселі; 8 – поворотний стіл

На позиції I шихта завантажується в піч і відбувається попереднє нагрівання її продуктами горіння природного газу.

На позиції II до печі підводиться максимальна потужність трансформатора і шихта швидко розплавляється. На позиції III, обладнаній трансформатором меншої потужності, рідкий сплав доводиться за хімічним складом та температурою, потім видається з печі. Зазначена установка дозволяє зменшити інтервали між видачею сплаву чергових плавок до 40–60 хв.

На рис. 5.4 представлена схема двованної дугової печі, в якій поєднуються процеси плавки та окислення, а також процеси рекуперації тепла газів, що відходять.

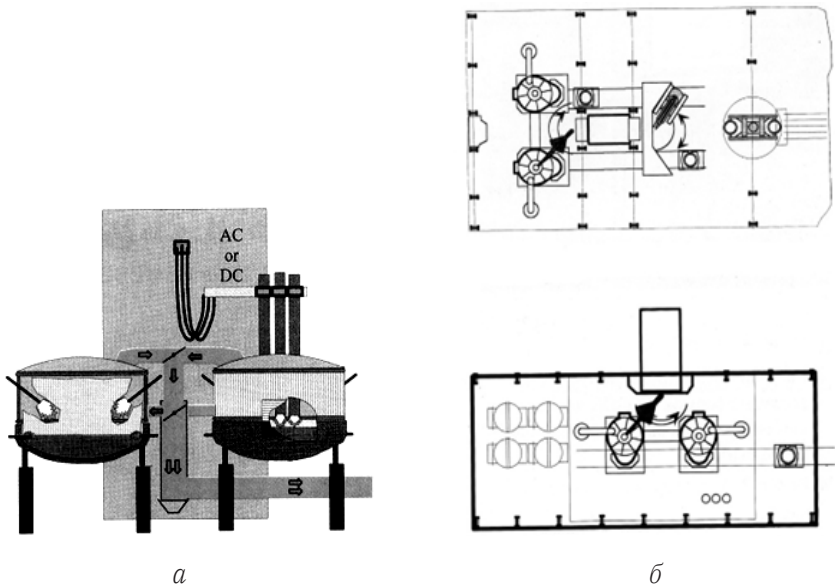
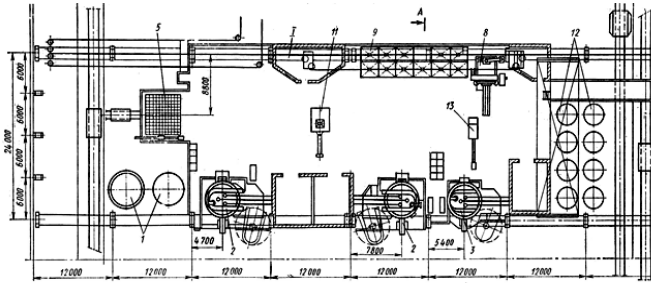
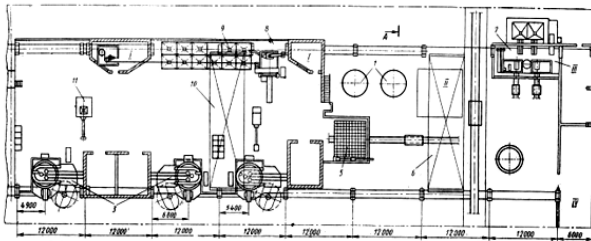


Рис. 5.4 – Схема двованної дугової печі:
а – схема процесу; *б* – компонування

На рис. 5.5 для прикладу представлено плавильне відділення цеху сталевого лиття для виплавки вуглецевих, легованих і високолегованих сталей для середніх, великих і важких виливків масою до 20 т. Відділення, що розташовується в двох кранових прольотах шириною 24 м, складається з ділянок підготовки, навісів, ремонту ковшів та зводів печей.



a



б

Рис. 5.5 – Планування плавильного прольоту сталеливарного цеху середнього, великого та важкого лиття: 1 – стенд для набору зводів; 2 – дугова сталеплавильна електропіч ДСП-25; 3 – дугова сталеплавильна електропіч ДСП-12; 4 – стенд для сушіння ковшів; 5 – установка для вибивання зводів електропечей; 6 – мостовий електричний кран середнього режиму роботи; 7 – установка для варки смоли; 8 – піч для випалу руди та феросплавів; 9 – установка для зберігання добавок; 10 – мостовий електричний кран важкого режиму роботи, $Q = 50/10$ т, кабіна з кондиціонуванням повітря; 11 – машина для завантаження в електропечі сипучих матеріалів та скачування шлаку; 12 – кошики для шихти; 13 – мультозавантажувальна машина; I – пульт управління; II – місце зберігання вогнетривів; III – комора; IV – ремонтно-механічна майстерня

Метал виплавляють у дугових електричних печах ємністю 12 та 25 т. Сталь із печей ємністю 12 т використовують для виливків з легованих і вуглецевих сталей масою до 2–3 т, з печей ємністю 25 т – для відливок більшої маси. Шихта у кошиках подається на ділянку її навішування з базового складу залізничним транспортом. У кошики, встановлені на платформні ваги, додаються легований скрап, чавун передільний, брукхт. Феросплави та руду перед завантаженням у піч піддають прокалюванню і подають у видаткові бункери, встановлені на пічному майданчику. Ці матеріали дозуються ваговим візком і безрейковою підлоговою мульдозавантажувальною машиною.

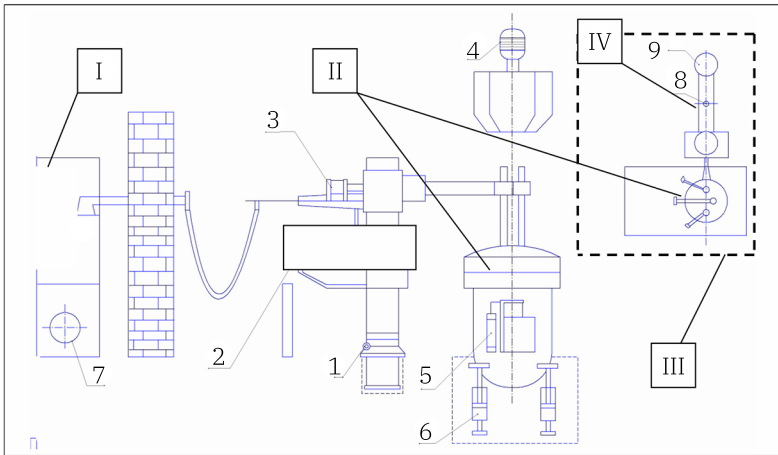


Рис. 5.6 – Схема заливальної ділянки системи «електродугова піч – ливарний конвеєр»: I – електропечний трансформатор; II – електропіч; III – заливальна ділянка системи «піч – ливарний конвеєр»; IV – двопозиційний заливальний автомат; 1 – гідроциліндр повороту зводу печі; 2 – електропривод механізму вертикального переміщення електродів; 3 – гідроциліндр відведення електродотримачів; 4 – електропривод затвора бункера з шихтовими матеріалами; 5 – гідроциліндр переміщення робочих дверей; 6 – гідроциліндри нахилу печі; 7 – електропривід механізму переключення ступенів напруги трансформатора; 8 – електропривод повороту заливального двопозиційного автомата; 9 – гідроциліндр повороту заливального ковша

Для ремонту та набивання зводів в обох торцях пічного прольоту передбачені стенди. Вибивання зводів виконують на спеціальних стендах, обладнаних бункерами та візками для збирання старих вогнетривів. Для ремонту та підготовки до плавки, розливальних ковшів передбачені ковшові ями, стенди для сушіння ковшів, для набору стопорів, а також стаціонарні сушарки для стопорів. Під майданчиком для печей у пічному прольоті розташовані електроустаткування, гідравлічні станції та інші допоміжні ділянки.

Загальна умовна схема заливальної ділянки системи «електродугова піч – ливарний конвеєр» показана на рис. 5.6.

5.3. Схема автоматизації електродугової плавки

Характеристики електродугових печей є основою для керування роботою печі. Такими характеристиками є електричні величини, які розраховуються за наступними формулами:

$$P_a = P_{\partial} + P_{ев}, \quad (5.1)$$

$$U_{\partial} = \frac{10^3 P_{\partial}}{3I}, \quad (5.2)$$

$$\eta = \frac{P_{\partial}}{P_a} 100\%, \quad (5.3)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{P_m}. \quad (5.4)$$

В формулах (5.1)–(5.4) прийняті наступні позначення:

P_a – активна потужність печі;

P_{∂} – активна потужність електричних дуг;

$P_{ев}$ – потужність електричних втрат;

U_{∂} – напруга електричної дуги;

I – сила струму;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності печі;

P_m – потужність печі теоретична.

На рис. 5.7 показана робоча діаграма електродугової печі.

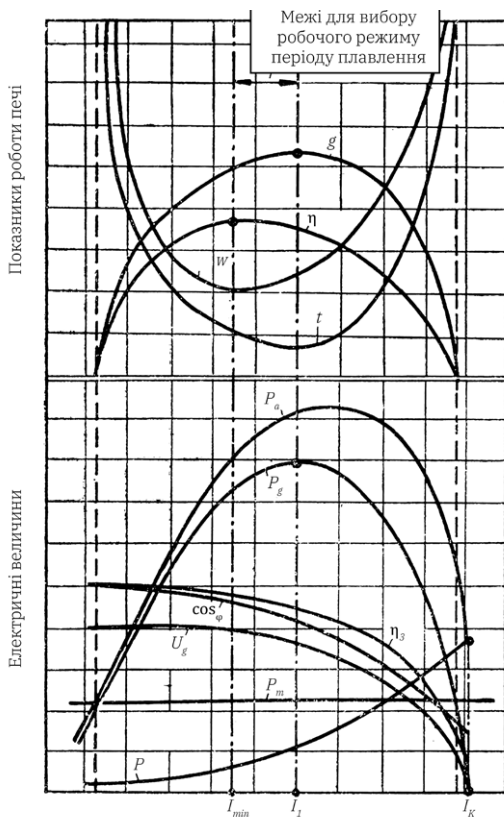


Рис. 5.7 – Робоча діаграма електродугової печі

Керування плавкою здійснюється двома шляхами:

- вибором ступеня напруги пічного трансформатора;
- керуванням довжини дуги.

Принцип формування директивного графіку плавки, який є відображенням часової діаграми підведення потужності шляхом зміни ступеня напруги трансформатора, представлений на рис. 5.8.

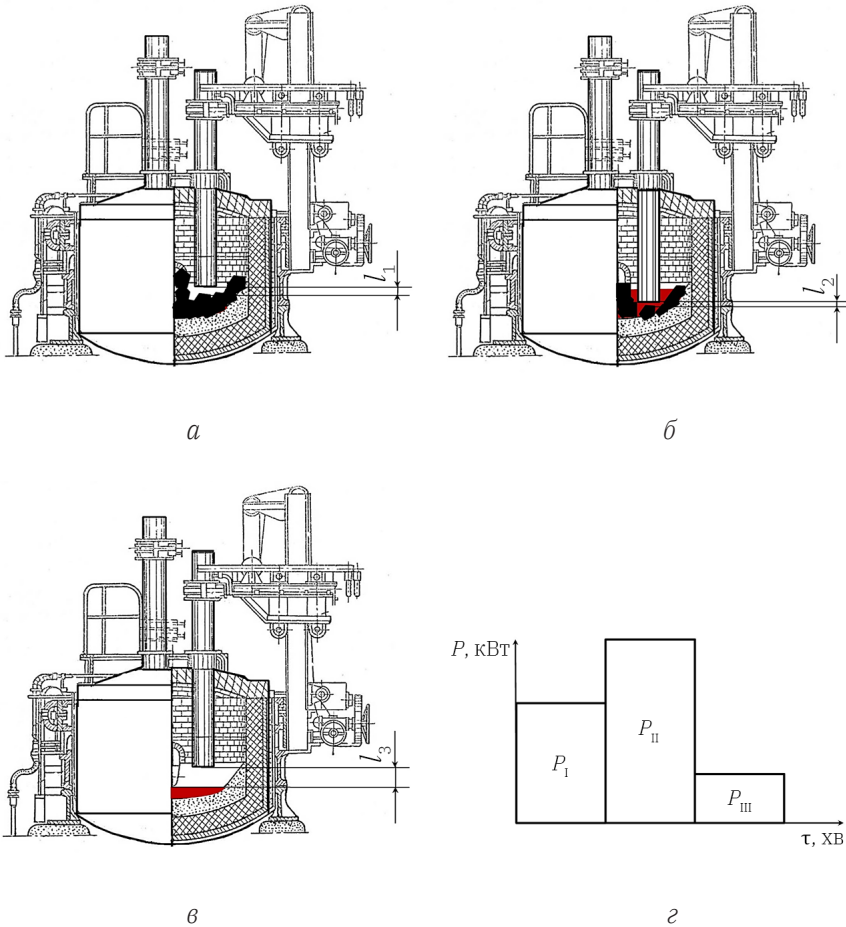


Рис. 5.8 – Етапи плавки в електродуговій печі, по яких формується управління процесом:

- a* – початковий етап плавки, потужність, що підводиться – P_I ;
- б* – етап плавки, коли в шихті прорізани колодязі і дуга закрита з усіх боків шихтою, потужність, що підводиться максимальна – P_{II} ;
- в* – етап плавки, коли вся шихта розплавлена і дуга знову відкрита, потужність, що підводиться, мінімальна, – P_{III} ;
- г* – графік потужності

Керуванням довжини дуги (l , рис. 5.8) здійснюється регуляторами. Для цього застосовуються диференціальні регулятори потужності, які підтримують сталість відносини напруги до сили струму, тобто опір фази. Параметр регулювання даної системи може бути записаний таким чином

$$A = aI - bU = bI(r_0 - r), \quad (5.5)$$

де I – сила струму;

U – напруга;

a і b – коефіцієнти, що залежать від коефіцієнтів трансформаторів струму та напруги та необхідного співвідношення струму та напруги;

$r_0 = a/b$;

r – задане та поточне значення повного опору печі.

Схема автоматичного регулювання наведена на рис. 5.9.

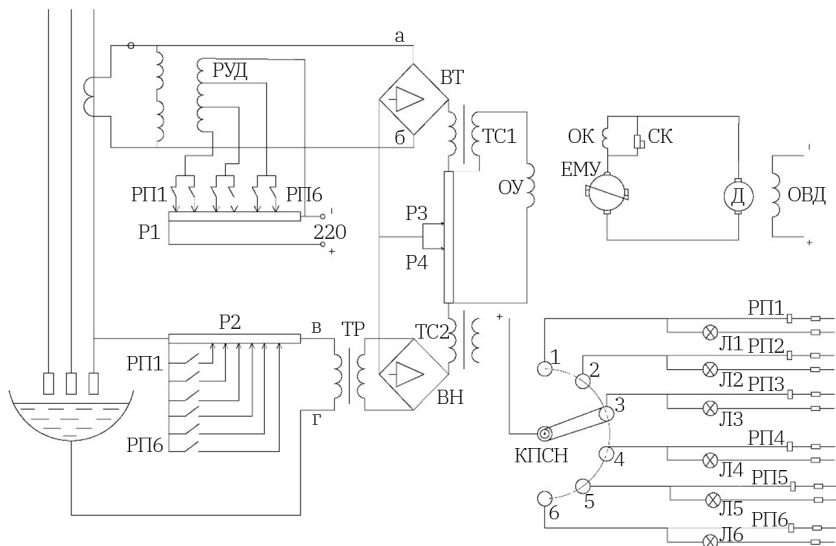


Рис. 5.9 – Схема автоматичного регулювання електричного режиму для однієї фази

Управління здійснюється перемиканням ступеня напруги *КПСН* з централізованого пункту. При цьому подається напруга на котушки реле проміжних *РП1–РП6*. Одне з реле при включенні відповідного ступеня напруги замикає контакти на опорі P_2 вимірювального ланцюга напруги регуляторів електродів та на опорі обмотки P_1 управління дроселя насичення. При рівності напруги U_T і U_H відповідно між точками *a-b* обмотки змінного струму дроселя і точками *в-г* роздільного трансформатора на обмотку електромагнітного підсилювача *ОУ* сигнал не надходить і механізм переміщення електродів нерухомий. В іншому випадку, виконавчий механізм включає переміщення електрода. Для налаштування нормального режиму роботи електромагнітного підсилювача *ЕМУ* служить компенсаційний опір, підключений паралельно до компенсаційної обмотки *ОК*.

На рис. 5.10 наведена схема регулювання потужності, що базується на використанні тиристорів.

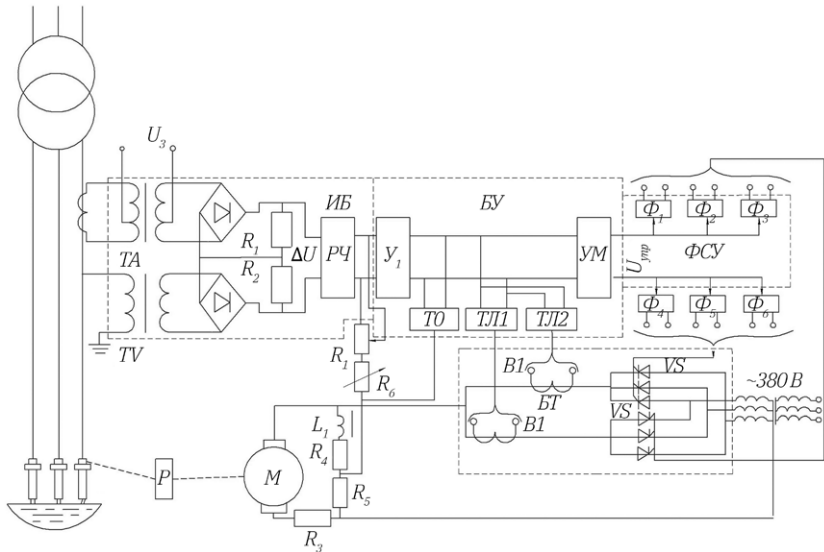


Рис. 5.10 – Функціональна схема однієї фази регулятора потужності на тиристорах

Регулятор складається з наступних блоків: вимірювального *ИБ*, управління *БУ*, фазозміщуючого пристрою, тиристорів *БТ*.

Переміщення електродів *E* здійснюється за допомогою двигуна постійного струму з редуктором *P*. Сигнал, пропорційний силі струму дуги, надходить на дросель підмагнічування *ТА*, сигнал, пропорційний напрузі, – на узгоджувальний трансформатор *ТВ*. На іншу обмотку дроселя подається напруга U_3 , пропорційна заданій силі струму. Після випрямлення і порівняння на резисторах R_1 і R_2 різниця напруги надходить на вхід пристрою регулювання чутливості *РЧ*, де встановлюються величини зони нечутливості і швидкодії системи. Далі сигнал надходить в блок управління *БУ*, де він посилюється підсилювачами $У_1$ і *УМ* та розділяється залежно від знаку розбалансу на два канали управління.

Блок *ФСУ* призначений для керування трифазним нульовим реверсивним тиристорним перетворювачем і складається з шести однотипних плат Φ , об'єднаних по три катодних (Φ_1, Φ_2, Φ_3) і анодних (Φ_4, Φ_5, Φ_6) груп.

Блок тиристорів *БТ* являє собою підсилювач потужності і містить шість керованих вентилів *VS* (дві групи – анодний і катодний) і два датчика струму B_1 і B_2 . До виходу тиристорного перетворювача підключається тахометричний міст, що складається з резисторів $R_3 - R_4$ і дроселя *L*. Напруга, пропорційна частоті обертання двигуна, подається в вузол струмового обмеження *ТО* і через регульовані резистори R_6 і R_7 – на вихід підсилювача $У_1$, що реалізує зворотний зв'язок по частоті обертання двигуна.

Функціональна схема автоматизації плавки в електродуговій печі наведена на рис. 5.11, параметри, що контролюються, та засоби автоматизації наведені в табл. 5.1.

На рис. 5.11 прийняті наступні позначення:

E – параметри електричного режиму (струму, напруги, потужності, кількості витраченої енергії);

T_{Φ} – температура футеровки;

G – положення електродів;

T_m – температура металу;

O – параметри системи водяного охолодження;

Q – склад відхідних газів;

F_{pm} – витрата рафінуючих матеріалів.

Таблиця 5.1 – Контрольовані параметри та технічні засоби автоматизації плавки в електродуговій печі

Параметри, що контролюються	Засоби автоматизації	Межі вимірювання
Температура футеровки	Радіаційний пірометр	1100–1900°C
Температура метала	Термопара занурення або термопара безперервного виміру	1500–1750°C
Тиск в робочому просторі	Діфманометр	До 50 Па
Склад газової фази в робочому просторі (CO ₂ , CO, O ₂)	Автоматичний газоаналізатор	До 10% CO ₂ , 15% CO, 10% O ₂
Витрата кисню для продувки ванни	Діафрагма в трубопроводі, діфманометри	В залежності від розміру печі
Параметри електропостачання (напруги, струми фаз, активна потужність, кількість електроенергії)	Електровимірвальні прилади	Також

Контур 1 – регулювання тиску води в системі охолодження фурми. Первинний вимірювальний прилад – датчик – встановлений на трубопроводі системи подачі води. В якості датчика використовується манометр. Передача сигналу здійснюється дистанційно. На щиті керування встановлено лампи сигнальні, що дають інформацію про наявність тиску, та засіб керування положенням заслінки, що виконує функцію регулювання через виконавчі механізми *1а* та *1б*.

Контур 2 – регулювання витрати води в системі охолодження фурми. Первинний вимірювальний прилад – датчик – встановлений на трубопроводі системи подачі води. В якості датчика використовується витратомір.

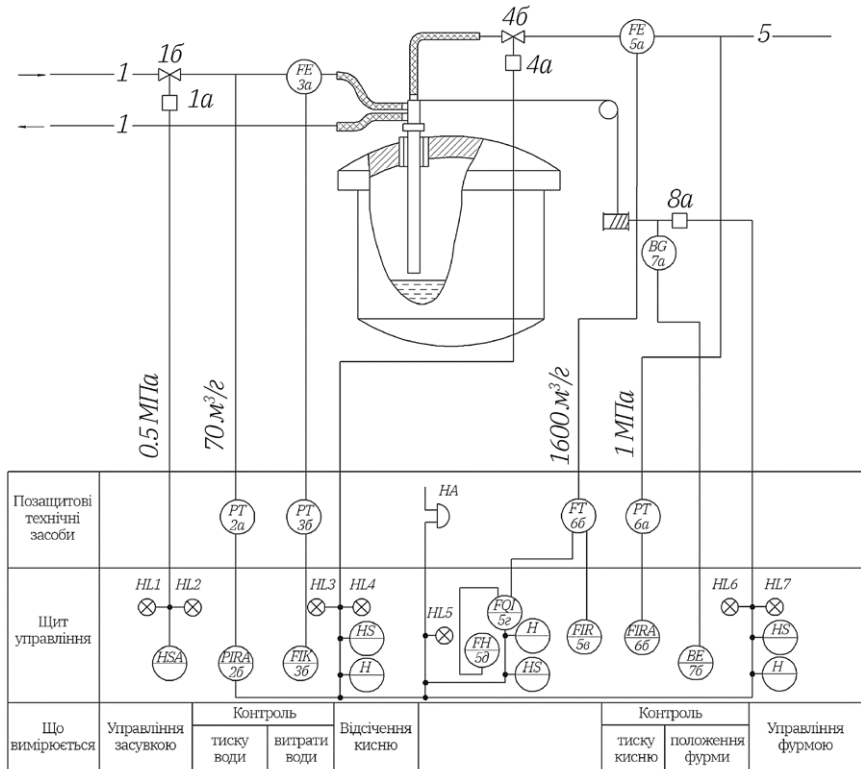


Рис. 5.12 – Схема автоматизації подачі кисню в дугову сталеплавильну піч

Контур 3 – відсічка кисню. На щиті керування встановлені лампи сигнальні та засіб дистанційної передачі сигналу на виконавчі механізми 4а та 4б заслінки трубопроводу подачі кисню.

Контур 4 – регулювання витрати кисню. Первинний вимірний прилад – витратомір – встановлений на трубопроводі подачі кисню в фурму, на щиті керування встановлені засоби дистанційної передачі сигналу та лампа контрольна. В якості позащитових засобів встановлено систему сигналізації з ручним завданням.

Контур 5 – це контур регулювання тиску кисню. Сигнал з первинного вимірювального пристрою, яким є манометр, передається на регулятор тиску, та якщо значення тиску, що виміряне датчиком, не відповідає заданому, регулятор усуває цю неузгодженість завдяки перекриванню чи відкриванню заслінки трубопроводу виконавчим механізмом 8 через редуктор та гнучку передачу.

Контур 6 – контур регулювання положення фурми, що пов'язаний з *контуром 5*. На щиті керування встановлено сигнальні лампи по стану фурми та її положенню.

Задля забезпечення чистоти розплаву по домішкам може також використовуватися продувка ванни інертними газами, в цьому разі основа функціональної схеми автоматизації даного процесу аналогічна до наведеної на рис. 5.12.

РОЗДІЛ 6

ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЛАВКИ В ІНДУКЦІЙНИХ ПЕЧАХ

***Мета розділу:** ознайомитись з технологією та технологічними схемами плавки в індукційних печах та схемами автоматизації таких процесів.*

Робочі питання:

- 1. Технологія плавки в індукційних тигельних печах*
- 2. Технологічні схеми індукційної плавки*
- 3. Схема автоматизації плавки в індукційних тигельних печах*

6.1. Технологія плавки в індукційних тигельних печах

Індукційні плавильні печі, найпоширеніші сьогодні в чавуноливарних цехах, підрозділяють за принципом роботи на два типи: тигельні та каналні. Найбільшого поширення плавки чавуну отримали тигельні печі. Великий інтерес представляє також застосування для плавки чавуну каналних печей із підвищеною потужністю індукційних одиниць.

Сутність індукційної плавки полягає в тому, що під дією електромагнітного поля, що формується індуктором, між металевими частинами шихти виникають струми Фуко. Завдяки цьому відбувається процес плавлення. Тож тигельна індукційна піч складається з індуктора, що є соленоїдом, виконаним з мідної водоохолоджуваної трубки, і тигля. Футеровка печі може бути кислою, основною чи нейтральною. Живлення печей здійснюється струмами низької, середньої та високої частоти.

На рис. 6.1 приведено схему індукційної плавки та графіки потужності, що підводиться по етапах плавки.

Плавку чавуну в індукційних електропечах з кислою футеровкою із залишком рідкого металу можна розділити на два основні етапи: період розплавлення шихтових матеріалів та період доведення за хімічним складом та температурою.

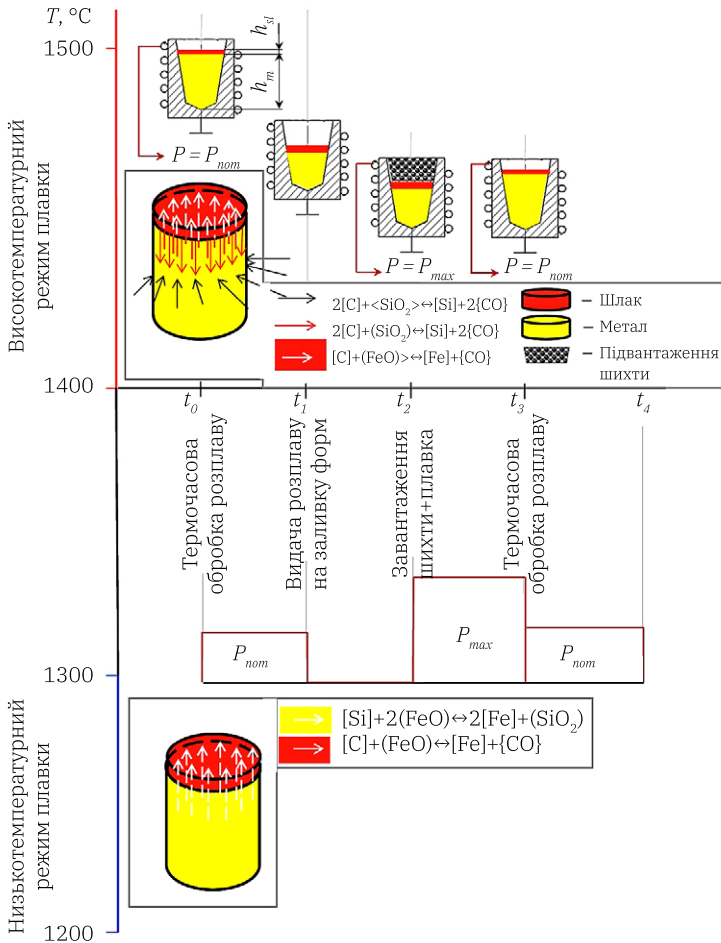


Рис. 6.1 – Схема індукційної плавки чавуну та графіки потужності, що підводиться по етапах плавки

Перший період характеризується поступовим підйомом рівня рідкого металу та шлаку в тиглі печі. У цей період плавки суттєвий розвиток отримують окислювально-відновні реакції взаємодії первинних шлаків, атмосфери, рідкого металу та футеровки печі.

Якщо температура рідкого металу в печі не перевищує 1300°C (низькотемпературний режим плавки), то залізо з первинних шлаків відновлюється в основному кремнієм і лише частково вуглецем. Відновлення заліза з шлаку, що утворюється, компенсується надходженням оксидів заліза з новими порціями шихти, тому протягом усього періоду розплавлення шлаки мають підвищений вміст оксидів заліза.

Другий період займає всього 15–20 хв, у цей час відбувається розчинення феросплавів, гомогенізація розплаву та перегрів його (або охолодження) до заданої температури випуску. В індукційних печах з кислою футеровкою шлаки в цей період насичені кремнеземом, мають нижчу температуру, ніж розплав, і реакційно інертні.

Розплавлення шихтових матеріалів при високотемпературному веденні плавки (температура розплаву вище 1400°C) також відбувається з утворенням первинних шлаків з високим вмістом оксидів заліза, як і при низькотемпературному режимі. У цьому випадку основним відновником є вуглець, який витрачається одночасно на відновлення оксидів заліза і кремнезему. Взаємодія первинних шлаків з футеровкою печі та відновлення оксидів заліза протікають активно і з вищою швидкістю, ніж реакція відновлення кремнезему вуглецем розплаву, тому шлаки швидко стають висококремнеземистими. Підвищення температури розплаву збільшує розчинність кремнезему в складних сполуках, що прискорює його перехід з футеровки в шлак. При високотемпературному режимі розплавлення шихтових матеріалів відбувається прискорення хімічного зносу футеровки та зменшення терміну її служби.

У печах промислової частоти плавку, як правило, ведуть до максимально можливої потужності за наявності інтенсивного електромагнітного перемішування розплаву. З підвищенням в'язкості шлаків дифузійні процеси уповільнюються. В'язкість силікатних розплавів збільшується з підвищенням SiO_2 . Вміст оксидів заліза в робочих шлаках, що сформувалися, по закінченні періоду розплавлення, залежить не тільки від температурного режиму плавки і інтенсивності руху розплаву, але і від складу і якості використовуваної шихти. Залишкова концентрація оксидів заліза в шлаках в кінці плавки в багатьох випадках залишається досить високою, незважаючи на наявність великої кількості розчиненого в розплаві, і завантажується в піч по ходу твердої плавки вуглецю.

Переплав шихтових матеріалів з високим ступенем окиснення завжди супроводжується сильним шлакоутворенням і чадом елементів. Так, при збільшенні ступеня окисленості чавунної стружки від 0 до 6% тривалість плавки збільшується на 10–15%, а кількість шлаку зростає до 10–11%, одночасно посилюється чад елементів, тому без спеціальної попередньої обробки стружку при плавці чавуну в індукційних печах використовувати недоцільно.

Технологія плавки в індукційній печі складається з таких операцій:

- підготовка металошихти до плавки;
- плавлення шихти;
- доведення розплаву до заданої температури та хімічного складу.

Підготовка металошихти до плавки залежить від виду шихти. Шматкові матеріали необхідно підігрівати до 500–600°C, що може здійснюватися в різний спосіб: продуванням прогрітим повітрям у добових бункерах, спеціальних цебрах пальниками, в камерних печах пальниками або індукційними струмами. Високотемпературний перегрів підвищує термічний ККД плавильної печі за рахунок прискорення плавки (до 500°C – на 15–20%, до 800°C – на 20–30%).

Плавлення шихти складається з кількох етапів. У початковий період, коли у цеху відсутній рідкий метал, проводиться наплавлення його з твердої шихти. Для прискорення цього процесу попередньо заготовляють спеціальний пусковий болван масою 0.5–0.6 ємності печі. Це дозволяє наповнити тигель рідким металом. Надалі застосовується режим плавки «на болоті», що постійно знаходиться в тиглі печі. При цьому з повної печі випускається 0.6–0.75 об'єму наплавленого металу з наступною добавкою відповідної кількості твердої шихти. Такий режим плавки є найбільш продуктивним та забезпечує максимальну швидкість процесу.

Зміна потужності проводиться перемиканням на відповідний ступінь вторинної обмотки живильного трансформатора. Кількість ступенів напруги вторинної обмотки може бути різною, але частина з них використовується для плавки, решта – для спікання тигля та міксерного режиму витримки рідкого металу.

Доведення розплаву до заданого хімічного складу здійснюється запровадженням необхідних відновників, модифікаторів та легуючих елементів.

Плавка в печах з кислотою футеровкою.

Набивання тиглів проводиться безпосередньо в печі за металічним або графітовим шаблоном сухою масою, яка складається з наповнювача (98–98.5% кварциту певної гранулярності) і сполучного (1.5–2% борної кислоти). Футеровка спікається в процесі першої плавки, що проводиться за уповільненим режимом. Вимоги до футеровки печей такі:

- механічна міцність;
- можлива мінімальна товщина – вона забезпечує спрямованість магнітного потоку;
- мінімальна електропровідність, що ускладнює короткі замикання;
- достатня вогнетривкість;
- незначні об'ємні зміни та опірність агресії металу та шлаку.

Внутрішня поверхня тигля має температуру рідкої сталі, зовнішня охолоджується котушкою індуктора. Перепад температур товщиною тигля 1400–1500°C. Останнє викликає об'ємні зміни у структурі тигля, що призводять до утворення тріщин і виходу його з ладу.

Не допускається спікання тигля за його товщиною, а зовнішні шари маси повинні завжди бути в «сирому» стані. З появою тріщини у кінці тигля відбувається його самозалікування. Зовнішні шари частини тигля, що не спеклася, перевіряють спеціальною голкою. Тигель, який спекся по всій товщині футеровки, замінюється. Стійкість кислих тиглів індукційних печей складає 50–100 плавок. Зі збільшенням місткості тиглів стійкість їх зменшується.

Металургійні процеси плавки в індукційних печах з кислотою футеровкою проводять форсовано. Шихтовими матеріалами служать відходи вуглецевої та легованої сталі, брухт, феросплави, електродний бій або інший карбюризатор. Основна вимога до шихти – можлива чистота за шкідливими домішками.

При плавленні легованих сталей нікель, хром та вольфрам дають у завалку. Основна маса шлаку утворюється природним шляхом за рахунок пригару та окалини шихти, розпалу футеровки та окислення елементів шихти в процесі плавлення. При недостатній кількості шлаку додають пісок чи бій скла. Необхідно, щоб плівка в'язкого шлаку закривала дзеркало ванни – це важливо для мінімального поглинання газів металом. Аналіз шлаку з розплавлення

зазвичай такий: $\text{SiO}_2 = (45-55)\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = (3-6)\%$; $\text{MnO} = (15-25)\%$; $\text{FeO} = (10-20)\%$; $\text{CaO} = (2-5)\%$. Після розплавлення шлак, що утворився, частково видаляється і наводиться свіжий з бою скла або суміші, що складається з 65% піску, 25% свіжообпаленого меленого вапна і 10% меленого плавикового шпату. Зазвичай кінцевий склад шлаку складає: $\text{SiO}_2 = (45-55)\%$; $\text{CaO} = (10-25)\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = (3-5)\%$; $\text{MnO} = (10-20)\%$; $\text{FeO} = (5-15)\%$.

Для отримання заданого вмісту вуглецю в нижні та середні шари шихти додають електричний бій. Засвоєння останнього становить 80...90%. Завдяки великій спорідненості до кремнекислоти окислення марганцю в процесі плавлення і всієї плавки проходить особливо інтенсивно. Тому доцільно проводити плавлення і доведення при низькому вмісті марганцю, присаджуючи його розрахункову кількість за 3–5 хв до випуску плавки. При цьому засвоєння марганцю дорівнюватиме 80–90%, що добре узгоджується зі стехіометричним співвідношенням кремнію і вуглецю. Угар хрому та ванадія зазвичай не перевищує 5%, нікель та молібден засвоюються на 100%.

Індукційні печі з кислою футеровкою особливо широко застосовують при виробництві точного лиття. Вони найбільше задовольняють необхідні для цієї технології стабільність складу плавки, необхідний високий перегрів при порційній заливці форм, автоматизований режим виробництва та висока якість лиття.

Плавка в індукційних печах з основною футеровкою.

Ці печі набувають все більшого поширення у зв'язку з розширенням сортаменту сталей агресивних до кислої футеровки. До таких сталей відносяться сталі високомарганцеві, високохромисті, а також сталі, що містять титан і алюміній. Однак стійкість основної футеровки недостатньо висока, і тому ведуться пошуки раціональніших високовогнетривких сумішей. На печах місткістю до 2 т досягнута відносно задовільна стійкість тиглів (30–50 плавки)

Існує кілька рецептів маси для набивання тиглів, наприклад, суміш 45% хромомagneзиту, 47% магнезиту, 1% плавикового шпату, 2% глини та 5% води. Гранулярний склад компонентів має бути чітко визначеним. Після набивання тигель просушують коксом з повітряним дуттям або вбудованою спіраллю опору, після чого виплавляють першу плавку на зниженій потужності – при цьому металевий шаблон розплавляється.

На машинобудівних заводах для печей місткістю до 1 т успішно застосовують більш стійкі набивні суміші на базі електроплавленого магнезиту. Наприклад, суміші зерен плавленого магнезиту (95%), борної кислоти (2%) і води (3%) або суміш зерен плавленого магнезиту (70%) та білого електрокорунду (30%). При таких сумішах на печах місткістю до 250 кг стійкість футеровок збільшується до 100 плавок, на більших печах – до 50–70. Деякі заводи замість металевого шаблону, що розплавляється, використовують графітові блоки з конфігурацією ванни тигля. На ньому роблять не тільки набивання печі футерувальною масою, але й сушку з наступним високотемпературним нагріванням і прокалюванням тигля, аж до підготовки до першої плавки. Потім графітний блок-шаблон витягують з тигля, після чого на обмеженій потужності проводять першу плавку. На другій і наступних плавках розплавлення ведуть з максимальною потужністю.

Щоб зменшити простій печей при перефутеровках, на деяких підприємствах тиглі невеликої місткості виготовляють в прес-формах і встановлюють в індукторі в готовому вигляді. Зазор між індуктором та тиглем ізолюють азбестом та порошками вогнетривів. Для цієї ж мети на більших установках розміщують по два тиглі, перемикаючи живлення з печі, що зупинилася на ремонт, на раніше відремонтовану.

Порядок завантаження шихти наступний. На дно тигля укладають частину дрібної шихти, стружку та частину шлакової суміші. Велику шихту розміщують у стінок тигля, перпендикулярно напрямку магнітних силових ліній, що прискорює розплавлення шихти. Решту шихти укладають з максимальною щільністю між великими шматками та у середній частині тигля. Чим щільніше укладена шихта і чим остання більша, тим швидше йде процес розплавлення і тим менша витрата електроенергії. Ідеальною є шихта – злиток у формі тигля.

У міру утворення рідкого металу в тигель задають шлакову суміш, що закриває дзеркало рідкої сталі. Шлакова суміш складається з 65% свіжообпаленого вапна, 20% магnezитового порошку та 15% плавикового шпату. Усі шлакоутворюючі прожарюють, подрібнюють і просівають через сито. Для розкислення шлаку застосовують порошки меленого феросиліцію, силікокальцію, алюмінію.

Після розплавлення шихти шлак частково видаляють. Перед цим за наявності сталі домішками, що легко окислюються (Mn, Cr, V), проводять його розкислення.

Під час плавки сталей з особливо низьким вмістом вуглецю (наприклад, не більше 0.05%) проводять окислювальну операцію за рахунок поверхневого обдування дзеркала сталі або введення в глибинні шари газоподібного кисню. Досвід показує, що вміст вуглецю легко знижується до 0.02%, а за наявності основного рідкого залозистого шлаку одночасно зменшується і кількість фосфору. Після окисної операції шлак необхідно видалити.

На початку відновлювального періоду проводять осадове розкислення феросиліцієм та алюмінієм. Феросплави присаджують після одержання аналізів першої проби. Шлаки безперервно розкисляють порошками розкислювачів. Температуру сплаву перевіряють термопарою занурення. Титан та алюміній для легування додають за 2...3 хв до випуску плавки. Для розкислення алюміній вводять у піч на штанзі за 1 хв до випуску. Засвоєння таких присадок, як вольфрам, хром та ванадій – близько 100%.

Дзеркало ванни доцільніше закривати кришкою-зводом, що пересувається, набраною з вогнетривких матеріалів, що значно знижує втрати тепла і забезпечує отримання більш гарячих шлаків. Під час використання алюмінієвого порошку заводять білі шлаки. Однак ступінь десульфурзації сталі залишається значно нижчою, ніж у дугових печах.

Плавки з окислювальним процесом та розкисленням шлаку в індукційних печах проводять зазвичай для складнолегованих сталей та сплавів особливо відповідального призначення. При плавці сталі звичайної якості процес ведуть форсовано, і через 10...30 хв після розплавлення ванни, коригування складу і температури проводять осадове розкислення і випуск.

Головні переваги індукційної плавки:

1. Отримання максимально чистого сплаву внаслідок відсутності джерел забруднення, поглинання водню металом на 40% менше, ніж у дугових печах. Готовий метал з індукційних печей без сердечника містить порівняно мало неметалевих включень. Окислення ванни розплаву слабше, ніж у інших печах, внаслідок нижчої температури та більш досконалих умов нагрівання.

2. Отримання однорідного сплаву та більш рівномірного хімічного складу ванни внаслідок перемішування, викликаного дією електродинамічних умов. Перемішування полегшує перебіг реакцій між металом та шлаком.

3. Отримання максимально можливих високих температур у всій масі металу, а не в окремих частинах, як це має місце у дугових печах.

4. Найменший чад металу внаслідок нагрівання металу зсередини назовні, що особливо важливо при плавленні сплавів з дорогими та рідкісними легуючими елементами, а також при плавленні кольорових металів.

5. Високий ККД печі та висока продуктивність внаслідок швидкості плавлення.

6. Просте, легке та широке регулювання потужності та температури.

7. Можливість плавки у вакуумі або у спеціальному газовому середовищі.

8. Більш легкі та гігієнічні умови праці.

6.2. Технологічні схеми індукційної плавки

Установка індукційної печі тигельної (рис. 6.2) складається з наступних основних елементів: печі тигельної 1 з індуктором, трансформатора 2 пічного з симетруючим пристроєм, комплектів блоків конденсаторів 3, і панелей і щитів управління 4, механізму 5 нахилу печі з приводом, підігріву шихти, системи 8 відсмоктування та очищення газів від печі.

Індукційні тигельні печі для чавуну мають закриту конструкцію, тобто магнітний потік в них із зовнішнього боку індуктора проходить по радіально розміщеним пакетам трансформаторної сталі (магнітопроводам). З метою підвищення питомої потужності та прискорення процесу плавки печі оснащують генератором, що дає підвищену до 500 Гц частоту струму. Завдяки цьому питома потужність печі з 250 кВт/т підвищується до 800 кВт/т. Для полегшення пуску та меншого зносу футеровки режимом роботи печі передбачено наявність у ній цілодобово протягом робочого тижня у неробочі зміни рідкого металу (болота), що становить не менше 1/3 ємності печі.

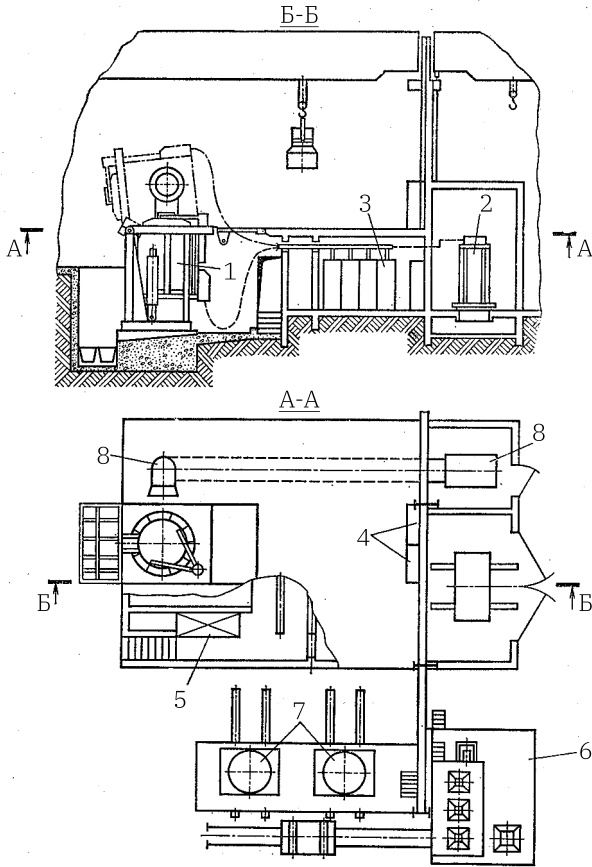


Рис. 6.2 – Установка індукційної печі тигельної

Тигельні печі зручні і надійні в експлуатації, особливо при виплавці низьковуглецевих чавунів. Основні переваги індукційної плавки в печах тигельних промислової частоти: стабільність хімічного складу плавки завдяки хорошому перемішуванню рідкого металу і застосування дешевої шихти на основі сталевих скрапу, легкокожних відходів, чавунної і сталевий стружки розсипом. Однак така шихта повинна мати стабільний хімічний склад і не містити

випадкових шкідливих домішок. Крім того, її необхідно просушити та підігріти для виключення піроефекту та викидів металу при попаданні в тигель вологи та органічних горючих компонентів.

Індукційні тигельні печі – це агрегати періодичної дії, що видають готовий рідкий метал при роботі з болотом через певні проміжки часу.

На рис. 6.3, 6.4 представлено планування плавильного відділення чавуноливарного цеху, обладнаного індукційними печами тигельними промислової частоти.

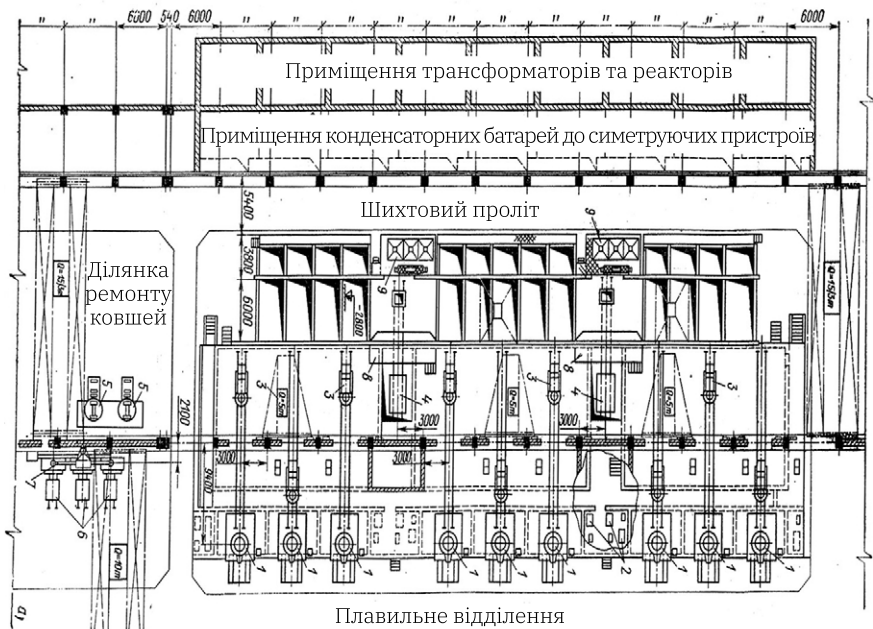


Рис. 6.3 – Плавильне відділення чавуноливарного цеху з індукційними печами тигельними: 1 – індукційні тигельні печі; 2 – насосні станції гідроприводів; 3 – установки для завантаження печей; 4 – візок; 5 – змішувачі для футерувальних мас; 6 – стенди для підігріву та сушіння ковшів; 7 – система витяжки від стендів; 8 – пульт управління шихтовкою; 9 – установка дозування феросплавів

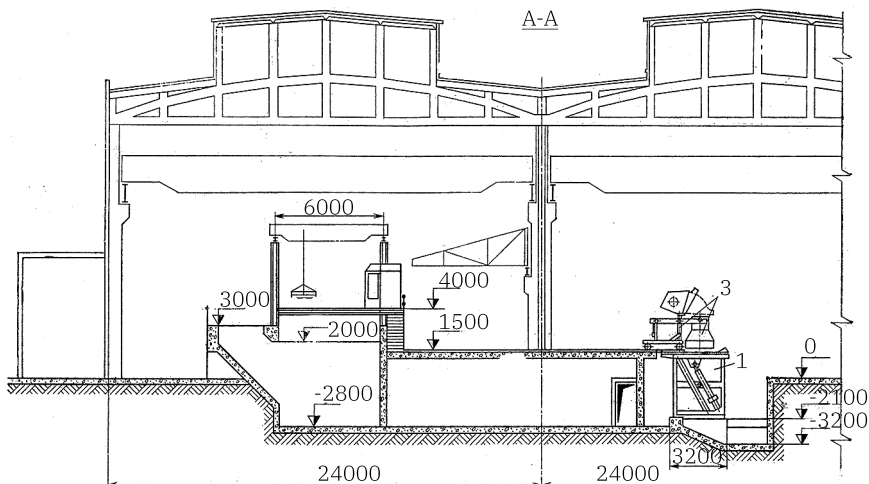


Рис. 6.4 – Розріз плавильного відділення чавуноливарного цеху з тигельними індукційними печами

З дев'яти тигельних печей шість плавильних і три міксерних. Причому будь-який тигель може бути підключений як до плавильного, так і до міксерного трансформатора. Такий комплект обладнання дозволяє краще використовувати встановлену потужність – будь-який тигель після розплавлення шихти в ньому підключають до міксерного трансформатора та вивільняють плавильний трансформатор для плавки в іншому тиглі. Бетонні роздаткові бункери заповнюють шматковими шихтовими матеріалами за допомогою мостового крана з магнітною шайбою або контейнера з дном, що відкривається. Потім спеціальний мостовий кран з магнітною шайбою набирає різні кускові компоненти шихти і завантажує їх у лійку-ваги, де зважується колоша для завалки печі. У цю ж лійку можуть бути завантажені чавунна або сталева дроблена стружка та феросплави з окремих контейнерів за допомогою вагових дозаторів та стрічкового конвеєра.

Готова колоша пересипається в баддю і на візку подається в зону дії консольного крана, який і встановлює її на візок. Візок

пересувається в пічний проліт і встановлює баддю над відкритим тиглем печі. Після деякої витримки, коли шихта просушується та підігрівається, вся колоша завантажується у тигель. Рідкий чавун відбирається з печі в ковші і транспортується на заливку мостовими кранами розливного прольоту. Висота робочого майданчика печей складає 1,5 м над рівнем підлоги, що дозволяє обслуговувати печі, очищати шлак та вести контроль за заповненням ковшів з металом із підлоги цеху. Ділянка приготування футеровальних мас розташована у прольоті навішування шихти. Стенди для сушіння та підігріву ковшів розміщені по периферії відділення, завдяки чому їх системи витяжки знаходяться поза дією кранів і не заважають їх роботі.

Стійкість футеровки в печах промислової частоти залежить від режиму експлуатації печі. В оптимальних умовах експлуатації дві зміни стійкість кварцитової футеровки тигля складає 1–2 місяці. Певні складності виникають при експлуатації тигельних печей в умовах частої видачі рідкого металу на розлив дрібними дозами. Все це знижує продуктивність і збільшує трудомісткість обслуговування тигельних печей. У цьому плані в експлуатації зручні каналні печі для плавки чавуну (рис. 6.5). У більшості конструкцій каналних печей передбачено можливість заміни каналної частини з індуктором без зупинки печі. Канальні печі для плавки виконують зазвичай шахтного типу. Основні переваги застосування каналних індукційних печей для плавки полягають у тому, що вони працюють з більшим ККД, ніж тигельні печі, а отже, питома витрата електроенергії на плавку в них менше. Крім того, для їх встановлення потрібні значно менші площі завдяки меншій кількості конденсаторних батарей. У той же час каналні печі незручні в експлуатації при частій зміні шихт і не допускають періодичної роботи.

Залежно від потужності індукторів та їх числа, каналні печі можна застосовувати для плавки та для витримки та нагрівання рідкого металу.

Плавильні каналні печі оснащують індукторами зі здвоєними каналами потужністю 2000–2500 кВт. Міксерні печі в залежності від ємності забезпечують індукторами у вигляді одинарного або здвоєного каналу потужністю 500–1000 кВт. Міксерні печі можуть бути шахтного та барабанного типів. У каналних печах, так

само, як і в тигельних, можливості проведення металургійних процесів видалення шкідливих або випадкових елементів обмежені.

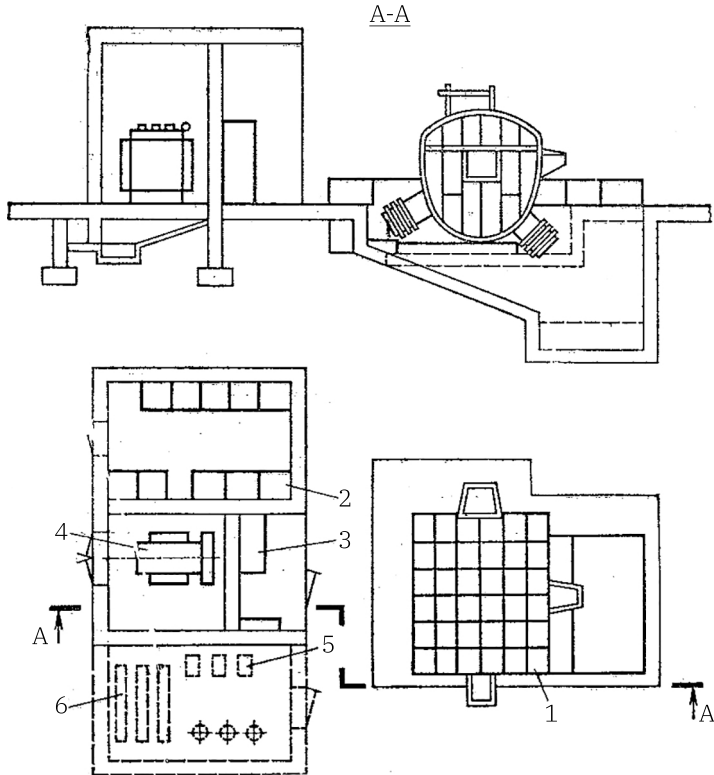


Рис. 6.5 – Установа індукційної каналної печі: 1 – канална піч; 2 – конденсатори; 3 – контрольно-вимірювальні прилади; 4 – трансформатор; 5 – гідравлічна станція нахилу печі; 6 – система водяного охолодження

Розглянуті монопроцеси плавки в індукційних мають свої недоліки, які у багатьох випадках можуть бути усунені або значно зменшені при поєднанні цих процесів у дуплекс- або триплекс-процеси.

6.3. Схема автоматизації плавки в індукційних тигельних печах

Схема автоматизації індукційної наведена на рис. 6.6, а параметри, що контролюються, та засоби автоматизації наведені в табл. 6.1.

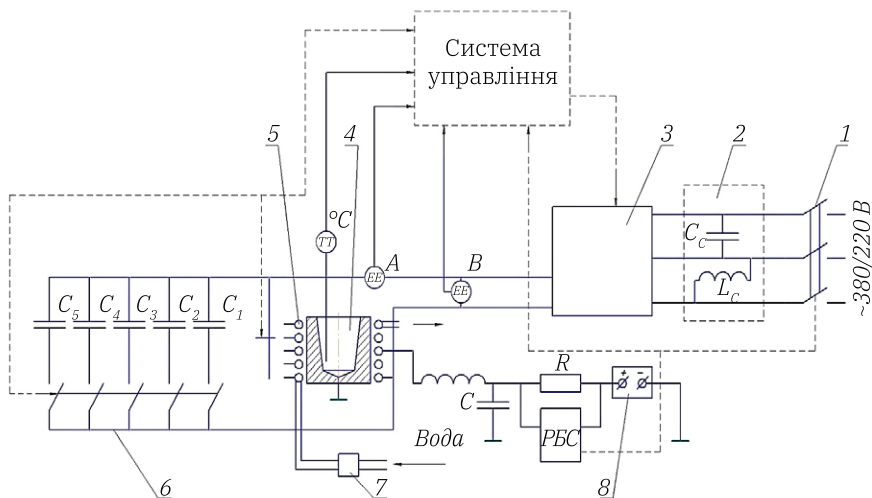


Рис. 6.6 – Схема автоматизації індукційної плавки

Таблиця 6.1 – Контрольовані параметри та технічні засоби автоматизації плавки в індукційній печі

Параметри, що контролюються	Розмірність	Засоби автоматизації
1	2	3
Напруга на індукторі	В	Вольтметр, трансформатор напруги
Струм індуктора	А	Амперметр, трансформатор струму

Продовження Таблиці 6.1

1	2	3
Активна потужність три-фазного струму	кВт	Ваттметр
Коефіцієнт потужності пічної плавильної установки	–	Фазометр
Стан футерування тигля та ізоляції індуктора	–	Спеціальна схема
Температура води, що охолоджує, на виході з індуктора	°С	Термобатарей, електронний потенціометр
Температура металу в тиглі	°С	Термопара занурення в комплекті з електронним потенціометром або пірометром спектрального відношення
Співвідношення між масами «болота» та шихти	–	Сельсін
Хімічний склад металу та шлаку з ходу плавки	%	Квантометр

Ступені напруги пічного трансформатора перемикаються за програмою, що передбачає корекцію за температурою металу в тиглі за часом. Оптимальне регулювання коефіцієнта потужності плавильних індукційних установок досягається компенсацією реактивної потужності індуктора шляхом паралельного підключення до нього ємностей C_1 – C_5 (рис. 6.6) зі складу компенсаційної батареї. Тому при використанні всього п'яти конденсаторів забезпечується 32 ступені зміни ємності, що компенсується. Введенням відповідного значення ємності, що змінюється протягом плавлення шихти, досягається коефіцієнт потужності на рівні 0.98–1.0.

Основними параметрами, які визначають як сам процес плавки, так і безпеку його, є температура розплаву в тиглі, температура футеровки, температура охолоджуючої рідини, стан футерування індукційної печі та ізоляція індуктора, а також значення електричних сигналів у вигляді сили струму та напруги на індукторі. Плавка в індукційній печі є досить економічною з погляду витрат електроенергії, оскільки є керованою за рахунок можливості оптимізації її електричних режимів. Крім цього, по ходу плавки контролюють такі параметри електричних режимів: напруга, отже, і потужність, на вторинній обмотці пічного трансформатора; струм індуктора; коефіцієнт потужності пічної установки.

Контроль стану тигля та ізоляції індуктора є ще однією характерною особливістю індукційної плавки. Пробій футеровки, що може призвести до витоків розплаву та травмування працівників, може бути спричинений не лише механічними пошкодженнями чи з причини відмов електричної частини печі, але й внаслідок фізико-хімічних процесів, що протікають на поверхні розділу «метал – футеровка» (рис. 6.1). Так, внаслідок «тигельної реакції»

$2[C] + \langle SiO_2 \rangle \rightleftharpoons [Si] + 2\{CO\}$ розплав вступає во взаємодію з кислото футеровкою, що призводить до її хімічного зносу. Тому задля запобігання пробою використовують спеціальну схему (рис. 6.6, табл. 6.1) контролю стану тигля та ізоляції індуктора. Для цього використовується джерело постійного струму, підключене до одного з витків індуктора. У ланцюг джерела включений фільтр LC для придушення змінної складової струму від індуктора та резистор R , якого підключено реле блокування і сигналізації PBC . Зі зменшенням товщини футеровки тигля до критичного значення або при пошкодженні ізоляції тигля реле спрацьовує, відключаючи електроживлення пічної установки та приводячи в дію систему аварійної сигналізації. При цьому проводяться також відсікання подачі води до індуктора та включення продування її стисненим повітрям.

Схема принципова регулювання температурного режиму плавки наведена на рис. 6.7.

В основу режиму з температурною корекцією покладено періодичний контроль температури металу та безперервний контроль температури футеровки.

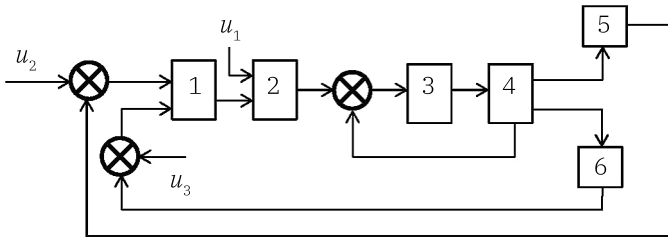


Рис. 6.7 – Схема регулювання температурного режиму індукційної плавки: 1 – регулятор теплового режиму; 2 – блок завдання уставки регулятора електричного режиму; 3 – регулятор електричного режиму; 4 – прилад вимірювання температури; 5 – датчик температури металу; 6 – датчик температури футеровки; u_1 – завдання директивного графіка електричного режиму плавки; u_2 – завдання директивного графіка температурного режиму плавки; u_3 – завдання гранично допустимої температури футеровки

Регулятор теплового режиму 1 пов'язаний з датчиками температури металу 5 і температури футеровки 6 і впливає на блок завдання уставки регулятора електричного режиму 2. Перед плавкою в блоки 2 і 1 вводяться директивні графіки електричного (u_1) і температурного (u_2) режимів плавки, а також програма вимірювань температури металу (за часом або у зв'язку з технологічними операціями) та гранично допустимі температури футеровки (u_3).

За сигналом різниці дійсної та заданої температури металу обчислювальним блоком 2 розраховуються параметри електричного режиму, які автоматично встановлюються і підтримуються регулятором електричного режиму 3. При досягненні критичних температур футеровки печі блок 2 зменшує потужність, що підводиться до печі. Температура вимірюється приладом 4.

РОЗДІЛ 7 ТЕХНОЛОГІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ДУПЛЕКС-ПРОЦЕСІВ ПЛАВКИ

Мета розділу: ознайомитись з технологічними схемами дуплекс-процесів плавки та схемами автоматизації таких процесів.

Робочі питання:

1. Технологічна схема дуплекс-процесу «вагранка – дугова електропіч»
2. Технологічна схема та автоматизація дуплекс-процесу «вагранка – індукційна піч»
3. Технологічна схема дуплекс-процесу «вагранка – трьохванний копильник» та «вагранка – мала сталеплавильна установка / кисневий конвертер»

7.1. Технологічна схема дуплекс-процесу «вагранка – дугова електропіч»

Схему дуплекс-процесу «вагранка – дугова електропіч» наведено на рис. 7.1.

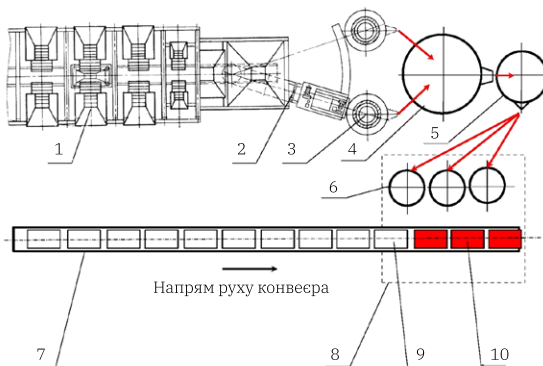


Рис. 7.1 – Схема дуплекс-процесу «вагранка – дугова електропіч»:
1 – роздавальна система завантаження шихти; 2 – скіповий підйомник; 3 – вагранка; 4 – міксер; 5 – ливарний конвеєр;
8 – ділянка заливки

Недоліком такої схеми є низький ККД вторинного агрегату, бо ККД електродугової печі на етапі термочасової обробки (витримки та перегріву металу) складає не більше ніж 25%. Через це такий дуплекс-процес не дуже поширений. Функціональні схеми автоматизації для обох агрегатів представлені на рис. 4.12 та 5.11 відповідно.

7.2. Технологічна схема та автоматизація дуплекс-процесу «вагранка – індукційна піч»

При дуплекс-процесі «вагранка – індукційна піч» складність отримання високої температури сплаву у вагранці компенсується нагріванням його в печі, в той же час відпадає необхідність насичення чавуну вуглецем в індукційній печі. При цьому встановлена та споживана індукційною піччю потужність зменшується в 5–7 разів. Витримка та нагрівання рідкого чавуну в індукційній печі сприяють усередненню та стабілізації його хімічного складу. Застосування дуплекс-процесу дозволяє при різносерійному характері виробництва зменшити число та збільшити одиничну потужність основного плавильного агрегату, а отже, знизити собівартість виробництва рідкого чавуну. Технологічний процес передбачає виплавку чавуну базової марки у вагранці, а доведення хімічного складу для отримання інших марок виконують в індукційних печах, зазвичай тигельних. Тому при масовому або великосерійному виробництві найчастіше використовують дуплекс-процес «вагранка – індукційний каналний міксер», а при різносерійному виробництві, для якого характерна багатошихтність, використовують дуплекс-процес «вагранка – тигельна індукційна піч».

На рис. 7.2. представлений варіант функціональної схеми автоматизації дуплекс-процесу плавки «вагранка – індукційна піч».

Підігрів дуття для горіння у косовій вагранці I відбувається наступним чином: пічні гази по трубопроводу подаються у циклон VI, де проходить їх первинна очистка. Залишкові гази, по окремому трубопроводу, за допомогою повітродувки надходять разом з очищеними у циклоні газами до радіаційного рекуператора VII. Не прогріте повітря подається повітродувкою у радіаційний рекуператор для теплообміну.

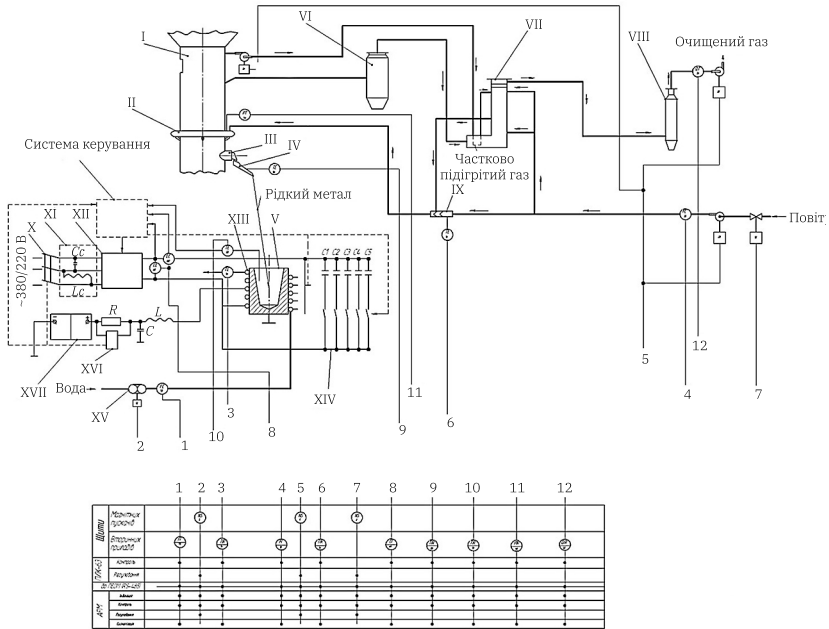


Рис. 7.2 – Схема автоматизації дуплекс-процесу плавки «вагранка – індукційна піч»: I – вагранка; II – фурменний пояс; III – накопичувач; IV – жолоб; V – піч індукційна; VI – циклон; VII – рекуператор радіаційний; VIII – мокрий струбер; IX – повітряний змішувач; X – вимикач живлення; XI – симетруючий пристрій; XII – регулюючий трансформатор з перемикачем ступеней напруги; XIII – індуктор; XIV – батарея конденсаторна; XV – насос системи охолодження; XVI – реле блокування і сигналізації; XVII – джерело постійного струму для контролю стану тигля і ізоляції індуктора

Пічні гази, закінчивши теплообмін, надходять у мокрий скрубер VIII, де відбувається остаточна очистка, і далі, за допомогою повітродувки, викидаються у атмосферу. Прогріте повітря із радіаційного рекуператора змішується з непрогрітим, яке подається повітродувкою, у повітряному змішувачі IX. Отримане в результаті змішування повітря по трубопроводу надходить у фурменний пояс II вагранки I, далі по фурмам, у зону горіння.

Розплавлений метал з накопичувача III по жолобу IV подається у тигель індукційної печі, де доводиться до необхідного стану і хімічного складу. Тигельна індукційна піч V має вогнетривкий тигель, оточений індуктором XIII у вигляді водоохолоджуваної мідної трубки. Охолоджувальна вода подається насосом XV. Піч живиться від трьохфазної мережі змінного струму через вимикач X і регулюємий трансформатор з перемикачем ступеней напруги XII.

Для забезпечення симетричного навантаження фаз використовується симетруючий пристрій XI, який містить індуктивність L_c та ємність C_c .

Ступінь напруги пічного трансформатора перемикається за часовою програмою з коригуванням за температурою чавуну в тиглі.

Оптимальне регулювання коефіцієнта потужності плавильної установки досягається компенсацією реактивної потужності індуктора шляхом паралельного підключення до нього ємностей C_1 – C_5 конденсаторної батареї XIV.

Для контролю стану тигля і ізоляції індуктора використовується джерело постійного струму XVII, яке підключене до одного з витків індуктора. В ланцюг джерела уведено фільтр LC для пригнічення змінної складової напруги від індуктора і резистор R , до якого під'єднано реле блокування та сигналізації XVI. Зі зменшенням товщини футерування тигля до критичного значення, або при пошкодженні його ізоляції реле спрацьовує, відключаючи електроживлення пічної установки та приводить в дію систему аварійної сигналізації.

Контроль і регулювання температури повітря, яке надходить у фурменний пояс і далі в зону горіння вагранки, виконується наступним чином: сигнали від термопари і витратоміра надходять до програмованого логічного контролера (ПЛК), де відбувається порівняння отриманих значень параметрів з заданими в керуючій програмі. Після порівняння ПЛК виробляє керуючий сигнал, який надходить до регулюючого органу – діафрагми для зміни витрати повітря, що забирається повітродувкою. Контроль тиску в фурменному поясі здійснюється за допомогою комплексу, який складається з датчика тиску і вторинного приладу показуючого та реєструючого.

Для контролю повноти допалювання СО у газах, що відходять з печі, передбачено газоаналізатор СО та СО₂. Комплект складається з відбираючого пристрою і вимірювального приладу показуючого та реєструючого.

Контроль температури рідкого чавуну на жолобі здійснюється за допомогою оптичного пірметра. Комплект складається з чутливого елемента та вимірювального приладу.

Значення температури рідкого чавуну, який знаходиться в тиглі індукційної печі, отримується вручну, адже чутливий елемент – термомпара не розрахована на тривале перебування в рідкому металі. Замір виконується наступним чином: зонд з термомпарою вставляється в отвір кришки печі і опускається в рідкий чавун на декілька секунд та виймається. При цьому, чутливий елемент з'єднаний з вимірювальним пристроєм, показуючим та реєструючим, до якого надходить значення температури від чутливого елемента.

Контроль і регулювання температури води в системі охолодження індуктора здійснюються за допомогою комплекту, який складається з датчика температури, витратоміра та вторинних вимірювальних приладів відповідно. Сигнали від датчиків надходять у ПЛК, де відбувається порівняння отриманих значень параметрів з заданими в керуючій програмі. ПЛК виробляє керуючий сигнал, який подається до виконавчого механізму – водяного насоса, змінюючи потужність його роботи і, як наслідок, витрату охолоджувальної води.

Для контролю якості споживаної індукційною піччю електроенергії використовується промисловий мультиметр, який складається з чутливих елементів та вимірювального приладу.

7.3. Технологічна схема дуплекс-процесу «вагранка – трьохванний копильник» та «вагранка – мала сталеплавильна установка / кисневий конвертер»

В дуплекс-процесі «вагранка – малий кисневий конвертер» виплавлений чавун може далі використовуватися як готовий продукт для заливки ливарних форм або перероблятися на сталь.

В першому випадку розплав чавуну обробляється додатковими матеріалами – модифікаторами та феросплавами, що містять легуючі елементи. Це робиться для того, щоб отримати необхідну мікроструктуру та фізико-механічні властивості чавуну.

В другому випадку в процесі переробки з розплаву видаляється вуглець до рівня, який диктується маркою сталі, що треба отримати. Для цього можуть використовуватися різні технологічні схеми, наприклад, наведені на рис. 7.3, 7.4. Так, наприклад, у процесі плавки чавун з вагранки безперервно надходить у трьохванний копильник, з якого метал видається в роздавальні ковші. Але перед видачею відбувається продувка чавуну киснем. Це робиться для того, щоб забезпечити заданий рівень перегріву чавуну завдяки теплоті екзотермічних реакцій. Цей метод застосовується при виготовленні тонкостінного литва, але такий технологічний процес може бути використаний і для виробництва сталі. Перша ванна застосовується для дефосфорації, друга – для видалення вуглецю, третя – для видалення сірки.

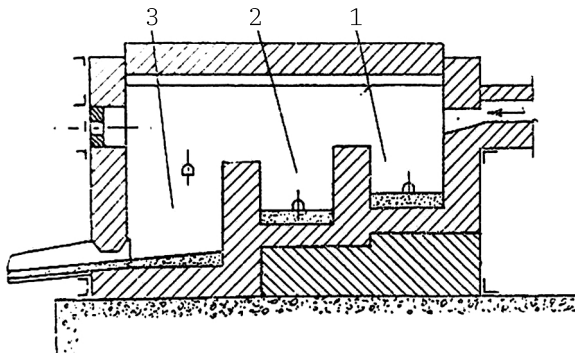


Рис. 7.3 – Технологічна схема вагранки в дуплекс-процесі «вагранка – трьохванний копильник»: 1, 2, 3 – ванни

Перевагою використання вагранок є висока продуктивність та можливість отримання великих об'ємів чавуну. Недоліками процесу є відносно невисока якість чавуну, складність отримання високої температури чавуну та шкідливий вплив на довкілля з боку викидів з вагранки (гази, пил тощо).

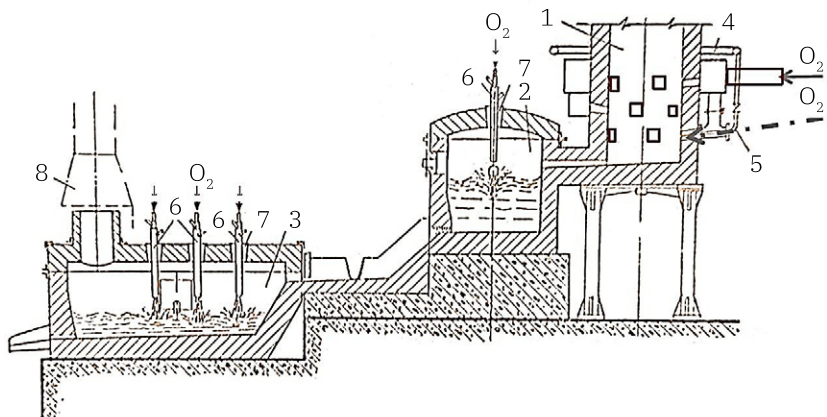


Рис. 7.4 – Технологічна схема дуплекс-процесу «вагранка з копильником – мала сталеплавильна установка»: 1 – вагранка; 2 – копильник; 3 – ванна для рафінування; 4 – кільцевий провід для подачі кисню у вагранку; 5 – трубка-сопло для подачі кисню у вагранку; 6 – висувна водоохолоджувана фурма для подачі кисню у рідку металеву ванну; 7 – холодильник; 8 – труба з зонтом для відводу газів

Функціональні схеми автоматизації в даному дуплекс-процесі можуть відповідати наведеним на рис. 3.1 та 4.12 відповідно.

РОЗДІЛ 8

МАТЕМАТИЧНИЙ АПАРАТ В ДОСЛІДЖЕННІ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

***Мета розділу:** ознайомитись з математичним апаратом, що використовується в дослідженні металургійних процесів задля їх технологічного аудиту, математичного моделювання та оптимізації процесів.*

Робочі питання:

1. *Методи експериментально-промислових досліджень в аудиті технологічних процесів металургійного виробництва*
2. *Математичне моделювання технологічних процесів*
3. *Оптимізація технологічних процесів*

8.1. Методи експериментально-промислових досліджень в аудиті технологічних процесів металургійного виробництва

Для того, щоб провести технологічний аудит, що дозволяє розкрити можливі резерви виробництва, необхідно вилучати інформацію з тих даних про технологічний процес, які є обов'язковими для контролю безпосередньо в цеху. Провівши на підставі цих даних відповідне моделювання, можна побачити слабкі місця технологічного процесу та напрямок пошуку для його оптимізації. Такий підхід, звичайно, передбачає застосування певного математичного апарату, який використовується для обробки виробничих даних.

Під виробничими даними надалі маються на увазі ті параметри технологічного процесу, виходячи з яких можна будувати висновки про його здатність забезпечувати задану якість продукції і які підлягають контролю у цеху підприємства. Це може бути структура чи склад матеріалів, сплавів, розміри деталей, стан їх поверхонь, властивості тощо. Цілями аналізу цих параметрів є визначення фактичних можливостей технологічного процесу, що застосовується, забезпечувати задані вимоги до якості продукції – виливків, математичне моделювання та подальша оптимізація

за обраними критеріями. Останніми можуть бути продуктивність процесу, показника якості продукції, енерговитрати, ресурсовитрати на виробництво тощо.

Використовувана нижче термінологія:

– вибірка даних – усі результати вимірювання якогось параметра, що для зручності записується у вигляді таблиці даних;

– об'єм вибірки даних – кількість даних у вибірці, що позначається символом n ;

– середньоарифметичне значення параметра, або математичне очікування, – величина, яка розраховується на основі вибірки даних наступним чином

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (8.1)$$

де i – номер вимірювання у вибірці даних, x_i – i -е значення у вибірці вимірюваного параметра, $\sum_{i=1}^n$ – операція підсумовування x_i у вибірці;

– дисперсія параметра – величина, що розраховується на основі вибірки даних наступним чином

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2; \quad (8.2)$$

– середньоквадратичне відхилення параметра (СКВ) – величина, що розраховується на основі вибірки даних таким чином

$$S = \sqrt{S^2}. \quad (8.3)$$

Демонстрація розрахунку середньоарифметичного значення, дисперсії та середньоквадратичного відхилення за вибіркою виробничих даних на прикладі вимірювання твердості чавуну наведено у таблиці 8.1;

– щільність розподілу параметра – ймовірність знаходження параметра у якомусь діапазоні;

– функція щільності розподілу – залежність щільності розподілу параметра від значення параметра;

– гістограма розподілу параметра – стовпчаста діаграма, в якій ширина стовпця відповідає довжині середньоквадратичного відхилення параметра, а висота – кількості значень параметра з вибірки даних, що потрапили в цей діапазон;

– гіпотеза – припущення, що перевіряється при аналізі виробничих даних.

Таблиця 8.1 – Приклад розрахунку статистичних характеристик щодо вибірки виробничих даних вимірювання твердості чавуну

№ вимірювання	Значення твердості	Сума значень твердості по вибірці	Середньоарифметичне значення твердості	Відхилення експериментальних даних від математичного очікування	Квадрати відхилень	Об'єм вибірки
1	2	3	4	5	6	7
i	$HВ_i$	$\sum_{i=1}^{n=6} x_i$	x_{cp}	$x_i - x_{cp}$	$(x_i - x_{cp})^2$	n
1	227	1404	234	$227 - 234 = -7$	49	6
2	234			$234 - 234 = 0$	0	
3	241			$241 - 234 = 7$	49	
4	230			$230 - 234 = -4$	16	
5	228			$228 - 234 = -6$	36	
6	244			$244 - 234 = 10$	100	

Результати розрахунків.

Середньоарифметичне (математичне очікування твердості) x_{cp} 234 мм

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Сума квадратів відхилень $\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2$	250 мм ²
Дисперсія $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2$	50 мм ²
Середньоквадратичне відхилення $S = \sqrt{S^2}$	7.071 мм

Для отримання об'єктивної картини про технологічний процес необхідна перевірка наступних гіпотез:

1. Про вид закону розподілу параметра.

Для чого здійснюється: це обов'язкова попередня процедура перед перевіркою всіх наступних гіпотез. Передбачається, що параметри, які характеризують технологічний процес, мають нормальний закон розподілу. Для цього закону функція щільності розподілу має дзвоновий вигляд (рис. 8.1).

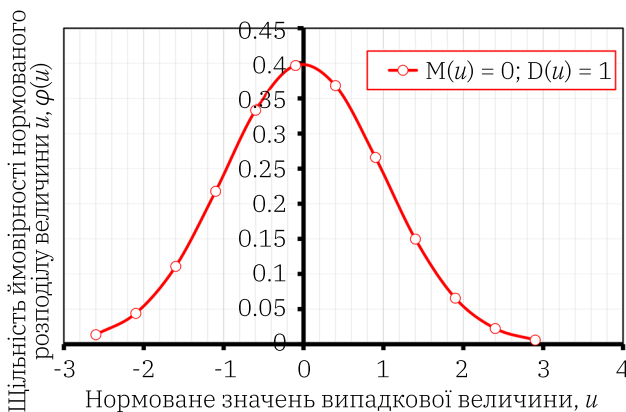


Рис. 8.1 – Вигляд кривої закону нормального розподілу:
 $M(u)$ – математичне очікування нормованої випадкової величини u ; $D(u)$ – дисперсія нормованої випадкової величини u

Крива закону нормального розподілу описується формулою

$$f(x, x_{cp}, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_i - x_{cp})^2}{2\sigma^2}\right), \quad (8.4)$$

де σ – стандартне відхилення, яка позначається для виборок малого розміру через S , що характеризує середньоквадратичне відхилення та розраховується відповідно до (8.3)

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right), \quad (8.5)$$

де u – нормоване значення випадкової величини, що відображає міру розсіювання випадкової величини x , що оцінюється в одиницях стандартного відхилення σ та розраховується за формулою

$$u = \frac{(x_i - x_{cp})}{\sigma}. \quad (8.6)$$

Якщо ця гіпотеза підтверджується, можна здійснювати подальшу перевірку гіпотез.

2. Про рівність середньоарифметичного значення параметра та заданого значення (технічним завданням, технічними умовами, стандартом тощо).

Для чого здійснюється: перевіряється можливість технологічного процесу забезпечити виконання необхідного значення параметра, зокрема дозволяє робити висновок про значний вплив систематичної похибки процесу, ідентифікувати цю похибку та кількісно оцінити корективи, які мають бути внесені до оснащення, спосіб виконання технологічної операції тощо.

3. Про рівність дисперсій параметра, розрахованих за двома вибірками даних.

Для чого здійснюється: дозволяє встановити вичерпання запасу точності обладнання та оснащення та визначити на підставі цього моменту часу для відповідного технічного обслуговування.

4. Про рівність середніх значень параметра, розрахованих за двома вибірками даних.

Для чого здійснюється: дозволяє встановити, чи накопичується систематична похибка у технологічному процесі (ця похибка може

бути пов'язана з розналагодженням обладнання, зносом оснастки тощо).

5. Виявлення помилок персоналу щодо значення параметра.

Для чого здійснюється: дозволяє видалити з вибірки неправильні дані та підвищити точність аналізу даних.

6. Про незалежність двох параметрів один від одного.

Для чого здійснюється: дозволяє встановити взаємну залежність двох параметрів технологічного процесу і на підставі цього надалі визначити діапазони значень, в яких один із параметрів впливає на інший, та кількісно оцінити ступінь цього впливу.

Перевірка всіх названих вище гіпотез здійснюється за однаковою схемою:

- чисельний розрахунок відповідного критерію перевірки;
- вибір виду критичної області під функцією щільності розподілу;
- визначення значень меж критичної області;
- порівняння чисельного значення обраного критерію та чисельного значення меж критичної області.

Перевірена гіпотеза приймається, якщо чисельне значення обраного критерію не потрапляє у критичну область, і відкидається, якщо чисельне значення обраного критерію потрапляє у критичну область. Ілюстрацію цієї області наведено на рис. 8.2.

Принципи перевірки гіпотез

1. Перевірка гіпотези про нормальний закон розподілу параметра.

Найбільш простим та наочним способом перевірки нормального закону розподілу є побудова гістограми розподілу параметра. Гістограма будується у такій послідовності:

- розраховується середньоарифметичне значення параметра;
- розраховується дисперсія параметра;
- розраховується середньоквадратичне відхилення параметра;
- розраховуються нижня та верхня межі інтервалу параметра:
 - а) нижня межа відповідає величині $(x_{cp} - 3S)$;
 - б) верхня межа відповідає величині $(x_{cp} + 3S)$;

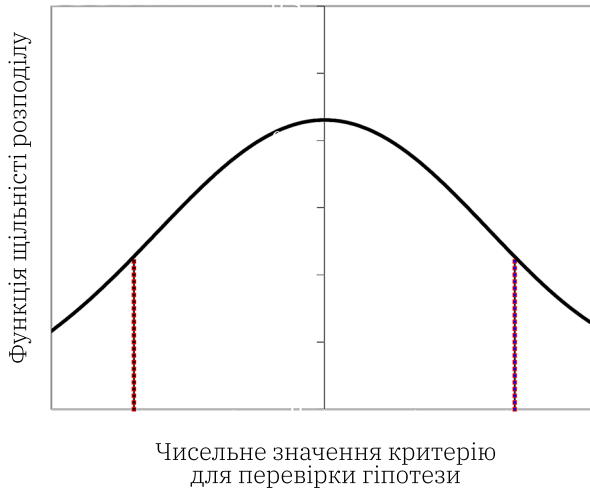


Рис. 8.2 – Ілюстрація загального принципу перевірки гіпотез: критичні області знаходяться зліва та справа від червоної вертикальної лінії

– весь інтервал значень параметра від нижньої до верхньої межі розбивається на 6 інтервалів, кожен з яких має довжину, що дорівнює одному середньоквадратичному відхиленню. Межі цих інтервалів мають значення: $x_{cp}-3S$, $x_{cp}-2S$, $x_{cp}-S$, x_{cp} , $x_{cp}+S$, $x_{cp}+2S$, $x_{cp}+3S$. Можливо також розбиття на 12 інтервалів шириною $0.5 S$;

– визначається кількість значень параметра вихідної вибірки, що потрапили в кожен з діапазонів; кількість значень відповідає висоті відповідного стовпчика на гістограмі;

– розраховується частота потрапляння значень з вихідної вибірки до кожного інтервалу, що за змістом відповідає ймовірності потрапляння значень в кожний інтервал. Загальна ймовірність дорівнює 1.

Ілюстрація побудови гістограми наведена на рис. 8.3.

Якщо зовнішній вигляд гістограми відповідає кривій розподілу (рис. 8.1), можна вважати, що закон розподілу параметра відповідає нормальному.

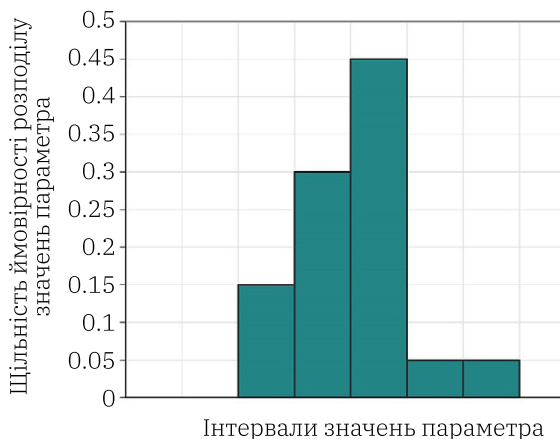


Рис. 8.3 – Приклад гістограми

Наприклад, за результатами аналізу вибірки даних вимірювання розміру виливку (об'єм вибірки $N = 100$) по формулах (8.1)–(8.3) визначені такі результати: $x_{cp} = 610.24$ мм, $S^2 = 16.0$ мм², $S = 4.0$ мм. Загальний інтервал значень параметра, яким є розмір виливку, складає: $x_{min} = 600.5$ мм, $x_{max} = 621.0$ мм. Цей інтервал розбито на 12 інтервалів шириною $0.5 S$. Побудовано гістограму на криву розподілу (рис. 8.4)

Але на практиці таке відбувається не часто і мають бути використані статистичні критерії для підтвердження або спростування гіпотези про нормальний закон. Для цього можна використовувати, наприклад, критерій Пірсона чи так званий χ^2 -критерій. Його сутність полягає в наступному. За формулою (8.7) розраховується величина χ^2 -критерію

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (8.7)$$

де m_i – експериментальна частота, тобто кількість значень з вибірки, що попала в i -й інтервал;

p_i – теоретична ймовірність падання значень в i -й інтервал, яка визначається з обраного закону розподілу, що перевіряється;

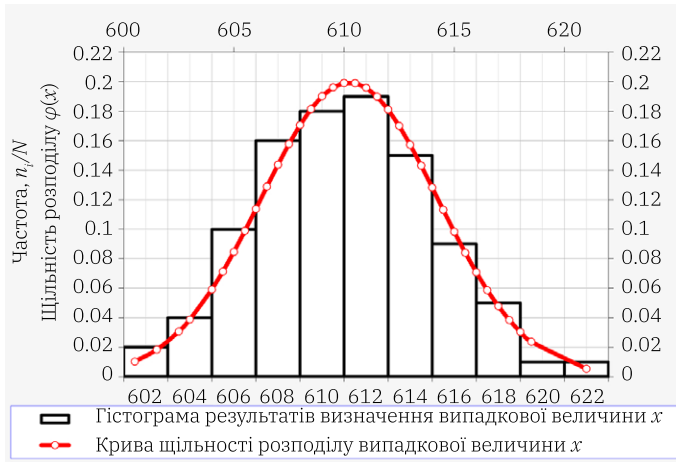


Рис. 8.4 – Візуалізація перевірки гіпотези про нормальний закон розподілу

n – загальна кількість значень у вибірці;

k – число інтервалів, всередині яких проводиться групування значень, наприклад $k = 12$.

Розрахована величина χ^2 порівнюється з табличним значенням $\chi_{кр}^2$ за заданою довірчою ймовірністю $P = 0.95$ або $P = 0.99$ для числа ступенів свободи $\varphi = k - 3$.

Якщо $\chi^2 < \chi_{кр}^2$, то з обраною довірчою ймовірністю P можна вважати, що розподіл випадкової величини відповідає тому закону розподілу, який перевіряється, наприклад нормальному закону. В іншому випадку різниця між емпіричним законом та законом, що перевіряється, має статистично значущий характер, тобто гіпотеза про обраний закон розподілу відкидається.

В практиці металургійного виробництва частіше за все доводиться працювати з обмеженими вибірками даних. Для таких випадків користуються так званими критеріями узгодженості на основі розрахунку третього та четвертого центрального моментів розподілу – асиметрії A та ексцесу E (першим центральним моментом розподілу є математичне очікування, а другим центральним моментом розподілу є дисперсія):

$$A = \frac{1}{nS^3} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^3, \quad (8.8)$$

$$E = \frac{1}{nS^4} \sum_{j=1}^n (y_j - \mu)^4 - 3. \quad (8.9)$$

Закон розподілу може буд визначений за нормальний, якщо виконуються умови:

$$|A| \leq 3\sqrt{D(A)}, \quad (8.10)$$

$$|E| \leq 5\sqrt{D(E)}, \quad (8.11)$$

де

$$D(A) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n-3)}, \quad (8.12)$$

$$D(E) = \frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}. \quad (8.13)$$

2. Перевірка гіпотези про рівність середньоарифметичного значення параметра та заданого значення.

Для перевірки застосовується критерій

$$T = \frac{(x_{cp} - x_{зад})\sqrt{n}}{S}, \quad (8.14)$$

де $x_{зад}$ – задане значення параметра.

Критична область вибирається симетричною (рис. 8.2).

Гіпотеза приймається у разі, якщо отримане значення T не потрапляє у критичну область. Якщо отримане значення T потрапляє

у критичну область, гіпотеза відкидається, тобто робиться висновок, що середньоарифметичне значення не відповідає заданому.

Чисельні значення межі критичної області наведено у таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Чисельні значення межі критичної області, що застосовується для перевірки гіпотези про рівність середньоарифметичного значення заданому значенню параметра

Значення межі критичної області	Величина ($n-1$)							
	2	4	6	8	10	11	12	13
Ліва	-4.30	-2.78	-2.45	-2.31	-2.23	-2.20	-2.18	-2.16
Права	4.30	2.78	2.45	2.31	2.23	2.20	2.18	2.16

Значення межі критичної області	Величина ($n-1$)							
	14	15	16	17	18	19	20	-
Ліва	-2.15	-2.13	-2.12	-2.11	-2.10	-2.09	-2.09	-
Права	2.15	2.13	2.12	2.11	2.10	2.09	2.09	-

Примітки:

1. Значення округлені до другого знаку.

2. Більш повні дані можуть бути знайдені у таблицях t -розподілу у літературі з математичної статистики.

3. Межі вказані для ймовірності 95%

3. Перевірка гіпотези про рівність дисперсій параметра, розрахованих за двома вибірками даних.

Для перевірки застосовується критерій

$$T = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (8.15)$$

де S_1^2 – дисперсія, розрахована за першою вибіркою даних;
 S_2^2 – дисперсія, розрахована за другою вибіркою даних.
 Критична область є несиметричною.
 Чисельні значення межі критичної області наведено у таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Чисельні значення межі критичної області, що застосовується для перевірки гіпотези про рівність дисперсій параметра, розрахованих за двома вибірками даних

Значення межі критичної області	Величина ($n-1$)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Ліва	0.01	0.05	0.11	0.16	0.2	0.23	0.26	0.29
Права	161	19	9.28	6.39	5.05	4.28	3.79	3.44

Значення межі критичної області	Величина ($n-1$)							
	9	10	11	12	14	16	20	–
Ліва	0.31	0.34	0.35	0.37	0.4	0.43	0.47	–
Права	3.18	2.98	2.82	2.69	2.48	2.33	2.12	–

Примітки:

1. Число даних в обох вибірках має бути однаковим (n – кількість даних у вибірці).
2. Наведено дані за обсягом вибірки до $n = 20$. Більш повні дані можуть бути знайдені за таблицями F -розподілу у літературі з математичної статистики.
3. Межі вказані для ймовірності 95%

Гіпотеза приймається у разі, якщо отримане значення T не потрапляє у критичну область. Це означає, що дві аналізовані вибірки даних є однією загальною вибіркою даних. Якщо отримане значення T потрапляє у критичну область, гіпотеза відкидається, тобто робиться висновок, що кожна з вибірок даних є самостійною.

4. Перевірка гіпотези про рівність середніх значень параметра, розрахованих за двома вибірками даних.

Для перевірки застосовується критерій

$$T = \frac{(x_{1cp} - x_{2cp})}{(S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)}, \quad (8.16)$$

де x_{1cp} – середньоарифметичне значення параметра, розраховане за першою вибіркою даних, x_{2cp} – середньоарифметичне значення параметра, розраховане за другою вибіркою даних;

n_1 – кількість даних у першій вибірці;

n_2 – кількість даних у другій вибірці;

S_1^2 – середньоквадратичне відхилення, розраховане за першою вибіркою даних;

S_2^2 – середньоквадратичне відхилення, розраховане за другою вибіркою даних.

Критична область вибирається симетричною (рис. 8.2). Чисельні значення меж критичної області відповідають наведеним у таблиці 8.1.

Гіпотеза приймається у разі, якщо отримане значення T не потрапляє у критичну область. Якщо отримане значення T потрапляє у критичну область, гіпотеза відкидається, тобто робиться висновок про те, що середньоарифметичні значення параметра не збігаються. Це може свідчити про наявність систематичної похибки. Прикладний зміст перевірки цієї гіпотези полягає в наступному. Якщо кожна з вибірок отримана в різні моменти часу та середньоарифметичні значення параметра не збігаються, можна говорити, що з часом у процесі експлуатації має місце вичерпання запасу точності обладнання, зношування оснащення тощо.

5. Перевірка гіпотези про помилку у визначенні значення параметра.

Результатом помилки під час перевірки параметра може бути неправильне вимірювання чи запис значення параметра. Таке значення, як правило, різко виділяється з усієї вибірки даних за своєю величиною.

Для перевірки застосовується критерій

$$T = \frac{(x_{nep} - x_{cp})}{S}, \quad (8.17)$$

де x_{nep} – значення параметра, що перевіряється.

Критична область вибирається симетричною (рис. 8.2). Чисельні значення меж критичної області відповідають наведеним у таблиці 8.1.

Якщо отримане значення T потрапляє у критичну область, то можна вважати, що значення параметра, який перевіряється, дійсно неправильне і повинно бути виключено з вибірки.

6. Перевірка гіпотези щодо незалежності двох параметрів один від одного.

Для перевірки застосовується критерій

$$T = \frac{r}{S_r}, \quad (8.18)$$

де

$$r = \frac{m_{1,2}}{s_1^2 s_2^2}, \quad (8.19)$$

$$m_{1,2} = \frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n} \right\}, \quad (8.20)$$

$$s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_1)^2, \quad (8.21)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m_2)^2, \quad (8.22)$$

$$s_r^2 = \frac{(1 - r^2)^2}{n}, \quad (8.23)$$

$$S_r = \sqrt{(s_r^2)}, \quad (8.24)$$

де x_i – значення першого параметра;

y_i – значення другого параметра;

n – кількість вихідних даних у вибірці першого та другого параметрів;

i – номер значення параметра у вибірці;

m_1 – середньоарифметичне значення першого параметра;

m_2 – середньоарифметичне значення другого параметра;

s_1^2 – дисперсія першого параметра;

s_2^2 – дисперсія другого параметра.

Критична область вибирається симетричною (рис. 8.2). Чисельні значення меж критичної області відповідають наведеним у таблиці 2.1.

Гіпотеза відхиляється, якщо $t > \varepsilon s_r$, де ε – чисельне значення межі критичної галузі.

Розглянемо такий приклад.

У цеху виплавляється сталь для виготовлення умовного вилітка. Проведемо аналіз фактичних можливостей технологічного процесу щодо забезпечення вимог, заданих кресленням вилітка на якийсь розмір (d), і покажемо можливі резерви підвищення точності виготовлення вилітка за цим параметром. Як вихідні дані візьмемо результати обмірів двох вибірок, що складаються з 20 готових вилітків кожна, виконаних технологом цеху.

Вибірки № 1 та № 2, що складаються з результатів цих обмірів, розраховані середньоарифметичні значення, дисперсії та середньоквадратичні відхилення, наведені у таблицях 8.4 та 8.5.

Таблиця 8.4 – Вибірка № 1 виробничих даних щодо визначення розмірів вилітку

№ зразка	Розмір, мм	Сума значень розміру по усій вибірці	Середньоарифметичне	Відхилення	Квадрати відхилень	Об'єм вибірки
1	2	3	4	5	6	7
i	d_i , мм	$\sum_{i=1}^{n=20} d_i$, мм	d_{cp} , мм	$d_i - d_{cp}$, мм	$(d_i - d_{cp})^2$, мм ²	n
1	245	4951.3	247.565	-2.565	6.579	20
2	246			-1.565	2.449	
3	245			-2.565	6.579	
4	246			-1.565	2.449	

Продовження Таблиці 8.4

1	2	3	4	5	6	7
5	252			4.435	19.669	
6	248			0.435	0.189	
7	247.3			-0.265	0.07	
8	248			0.435	0.189	
9	244.4			-3.165	10.017	
10	248.3			0.735	0.54	
11	249			1.435	2.059	
12	250			2.435	5.929	
13	246.6			-0.965	0.931	
14	247.8			0.235	0.055	
15	247.8			0.235	0.055	
16	249.2			1.635	2.673	
17	246.4			-1.165	1.357	
18	246.8			-0.765	0.585	
19	249.4			1.835	3.367	
20	248.3			0.735	0.54	

Результати розрахунків.

Середньоарифметичне (математичне очікування твердості) $x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 247.565 мм

$$\begin{aligned} \text{Сума квадратів відхилень } \sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2 &= 66.281 \text{ мм}^2 \\ \text{Дисперсія } S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2 &= 3.489 \text{ мм}^2 \\ \text{Середньоквадратичне відхилення } S = \sqrt{S^2} &= 1.868 \text{ мм} \end{aligned}$$

Таблиця 8.5 – Вибірка № 2 виробничих даних щодо визначення розмірів виливку

№ зразка	Розмір, мм	Сума значень розміру по усій вибірці	Середньоарифметичне	Відхилення	Квадрати відхилень	Об'єм вибірки
1	2	3	4	5	6	7
i	d_i , мм	$\sum_{i=1}^{n=20} d_i$, мм	d_{cp} , мм	$d_i - d_{cp}$, мм	$(d_i - d_{cp})^2$, мм ²	n
1	247	4980.8	249.04	-2.04	4.162	20
2	249			-0.04	0.002	
3	254			4.96	24.602	
4	248.6			-0.44	0.194	
5	255.4			6.36	40.45	
6	259			9.96	99.202	
7	257			7.96	63.362	
8	251.3			2.26	5.108	
9	248.6			-0.44	0.194	
10	246			-3.04	9.242	
11	249			-0.04	0.002	
12	243.9			-5.14	26.42	

Продовження Таблиці 8.5

1	2	3	4	5	6	7
13	241.8			-7.24	52.418	
14	243			-6.04	36.482	
15	248.5			-0.54	0.292	
16	249.4			0.36	0.13	
17	250			0.96	0.922	
18	244.2			-4.84	23.426	
19	247			-2.04	4.162	
20	248.1			-0.94	0.884	

Результати розрахунків.

Середньоарифметичне (математичне очікування твердості) $X_{cp} = 249.04$ мм

$$X_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Сума квадратів відхилень $\sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2 = 391.656$ мм²

Дисперсія $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2 = 20.613$ мм²

Середньоквадратичне відхилення $S = \sqrt{S^2} = 4.540$ мм

Треба перевірити гіпотезу про рівність дисперсій.

Величина критерію T , розрахована за формулою (8.15), складає

$$T = \frac{S_1^2}{S_2^2} = \frac{20.613}{3.489} = 5.91.$$

Межа критичної області визначається за таблицею 8.3. За $(n-1) = 19$ чисельне значення межі $\varepsilon \approx 2.1$. Отже, величина критерію потрапляє у праву частину критичної області (так як $T > \varepsilon$) та гіпотеза про рівність дисперсій відхиляється.

Перевіримо гіпотезу, що середній розмір виливку дійсно відповідає заданому кресленням. Візьмемо для прикладу вибірку № 1.

Нехай відповідно до робочого креслення розмір виливку має становити 246 мм. За даними таблиці 8.4, середньоарифметичне значення становить 247.565 мм, середньоквадратичне відхилення становить 1.868 мм, об'єм вибірки дорівнює 20. Величина критерію для перевірки гіпотези відповідно до (8.14) становитиме

$$T = \frac{(X_{cp} - X_{зад})\sqrt{n}}{S} = \frac{(247.565 - 246) \times \sqrt{20}}{1.868} = 3.75.$$

Межа критичної області визначається за таблицею 8.1. При $(n-1) = 19$ чисельне значення межі $\varepsilon = 2.09$. Отже, величина критерію потрапляє у праву частину критичної області (так як $T > \varepsilon$) і гіпотеза про рівність середньоарифметичного значення та заданого значення розміру відхиляється.

З цього можна дійти висновку, що існуючий технологічний процес не забезпечує задані кресленням виливки вимоги. Відповідно формується брак виливків по цьому розміру. Доля браку може бути визначена за формулою

$$G = \Phi\left(\frac{x_{\max} - x_{cp}}{S}\right) - \Phi\left(\frac{x_{\min} - x_{cp}}{S}\right), \quad (8.25)$$

де $\Phi(\cdot)$ – спеціальні функції, які називаються інтегралами ймовірностей та визначаються за таблицями інтегралів ймовірностей.

Фактично, отримане значення G відповідає відсотку придатного лиття. Віднімаючи зі 100% величину G , отримують величину браку (%) за цим розміром.

Різниця між заданим на кресленні розміром та середньоарифметичним значенням відповідає систематичній похибці технологічного процесу. Якщо встановити причину цієї похибки

та усунути її, то залишиться лише випадкова похибка. Саме вона є показником можливостей технологічного процесу. Кількісно вона визначається величиною $\pm t_{кр}S$ та відповідає полю розсіювання розміру виливку. Значення $t_{кр}$ залежать від кількості даних у вибірці (N) і наведені в таблиці 8.6.

Таблиця 8.6 – Критичні значення ($t_{кр}$) розподілу Стьюдента

$N-1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{кр}$	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.37	2.31	2.26	2.23
$N-1$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	–
$t_{кр}$	2.20	2.18	2.16	2.15	2.13	2.12	2.11	2.10	2.09	–

На основі (8.25) можна оцінити ефективність технологічного процесу, обравши за критерій оцінювання можливість отримання розміру виливку, заданого кресленням. Нехай верхнє допустиме значення розміру 33.5 мм, нижнє допустиме значення розміру 32.5 мм, номінальний розмір, заданий кресленням, 33 мм.

Нехай за результатами обмірів розміру отримані наступні результати (таблиця 8.7).

Таблиця 8.7 – Результати обмірів розміру виливка

№ виливку	Розмір, мм	№ виливку	Розмір, мм
1	2	3	4
1	33.1	10	32.6
2	33.4	11	32.8
3	30	12	32.1
4	30.2	13	32.9
5	31	14	31.6

Продовження Таблиці 8.7

1	2	3	4
6	33	15	31.4
7	33.1	16	31.8
8	33.3	17	31.1
9	29.4	18	29.9

Середньоарифметичне значення розміру за розрахунком на підставі даних, наведених у таблиці 8.7, становить 31.817 мм, середньоквадратичне відхилення 1.308 мм.

За (8.25) розраховується кількість виливків, розмір яких потрапив у заданий діапазон:

$$\begin{aligned}
 G &= \left\{ \Phi \left(\frac{33.5 - 31.817}{1.308} \right) - \Phi \left(\frac{32.5 - 31.817}{1.308} \right) \right\} 100\% = \\
 &= \left\{ \Phi(1.29) - \Phi(0.52) \right\} 100\% = \{0.401 - 0.2\} 100\% = 20.1\%.
 \end{aligned}$$

Це означає, що кількість придатних виливків за цим розміром становить лише 20.1%. Відповідно, частка браку становить 79.9%.

8.2. Математичне моделювання технологічних процесів

Насамперед можна розглянути один приклад, що ілюструє важливість побудови математичної моделі технологічного процесу саме з практичної точки зору. Припустимо, що при виплавці чавуну у вагранці як паливо використовується кокс. Є пропозиції щодо реалізації коксу від двох постачальників. Необхідно оцінити, кому з них віддати перевагу. Зрозуміло, що з об'єктивної точки зору пріоритет має бути відданий тому з постачальників, якість коксу якого вища. При різниці в ціні на даний товар необхідно якнайточніше відповісти на питання, який кокс якісніший. Зрозуміло, що найкращим

є кокс, який за меншої витрати забезпечує більшу повноту горіння, відповідно більшу температуру в печі та більш високу якість чавуну. Отже, для відповіді на поставлене питання необхідно провести порівняльну серію експериментальних плавок із коксом обох поставальників у своїх цехових умовах. Повноту горіння можна оцінити, наприклад, за складом газів, що відходять, і визначити при цьому фактичну витрату коксу. Витрата коксу, своєю чергою, можна ув'язати з температурою чавуну. За результатами кожної із цих серій експериментальних плавок треба побудувати математичну модель залежності повноти горіння від витрати коксу та залежність температури чавуну від витрати коксу. Далі треба перевірити адекватність отриманих моделей та чисельно оцінити, при використанні якого коксу забезпечується максимальна повнота горіння та, відповідно, максимальна температура чавуну.

Аналогічно може бути поставлене завдання моделювання у разі необхідності ухвалення рішення про вибір кращого поставальника запчастин, комплектуючих тощо.

Іншими словами, математичне моделювання може бути ефективно застосоване за необхідності ухвалення рішень щодо певного вибору варіантів поставок з існуючих альтернатив, або задля об'єктивної оцінки технологічного процесу та його можливостей щодо забезпечення заданих вимог до якості та функціонування (енерго-та ресурсовитрат, продуктивності).

Для побудови математичних моделей зазвичай використовуються метод найменших квадратів (МНК), який дозволяє будувати рівняння регресії, яке пов'язує вхідні змінні процесу (об'єкта) з вихідною змінною, яка є критерієм оптимальності.

Власне, процес побудови математичної моделі за допомогою методу найменших квадратів полягає у послідовному виконанні наступних процедур:

1. Вибір виду моделі.
2. Вибір експериментальних точок.
3. Проведення експерименту.
4. Розрахунок параметрів моделі.
5. Обчислення сум квадратів відхилень експериментальних значень досліджуваної величини від розрахункових, отриманих за моделлю, та оцінка дисперсій.

6. Статистичний аналіз точності моделі.

7. Перевірка адекватності моделі.

1. Вибір виду моделі.

Моделювання будь-якого технологічного процесу за допомогою МНК засноване, як правило, на тому, що модель представляється у вигляді полінома. При дослідженні впливу одного фактору такий поліном має вигляд

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (8.26)$$

де x – фактор технологічного процесу (вхідна змінна);

y – характеристика ефективності технологічного процесу (вхідна змінна), наприклад якість продукції, його властивості, частка браку, витрата енергії чи матеріалів виготовлення даної продукції і т. п.;

a_i – коефіцієнти моделі.

У разі впливу двох факторів поліном має вигляд

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2. \quad (8.27)$$

Аналогічно поліном розширюється при наявності більшої кількості факторів (вхідних змінних).

Спочатку передбачається, що модель має лінійний вигляд, тобто при дослідженні впливу на вихідну змінну одного фактора: $y = a_0 + a_1x$; двох факторів: $y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2$ і т. д.

Нижче розглянуто лише випадок дослідження одного фактора. Більш складні варіанти (з великою кількістю факторів) побудови моделей будуються аналогічно.

2. Вибір експериментальних точок.

Експериментальні точки, за якими будується модель, утворюють так звану область планування експерименту. З огляду на те, що для діючого виробництва найбільший інтерес представляє можливість дослідження процесу без втручання у його хід, тобто без додаткових витрат, область планування відповідає області робочих режимів у фактичному технологічному процесі. Візуально цю область можна побачити, зобразивши її у вигляді точкового графіка (рис. 8.5).

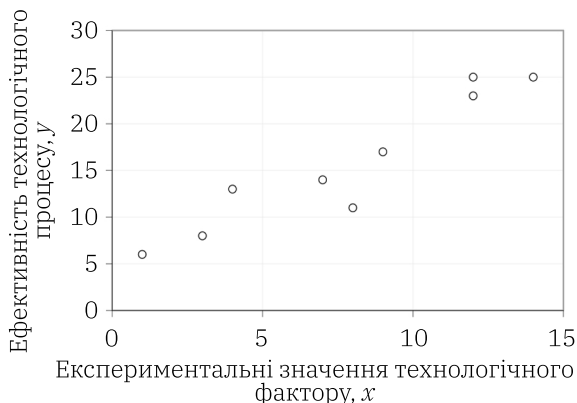


Рис. 8.5 – Вибір області планування експерименту

У наведеній ілюстрації область робочих режимів, що відповідає області планування, знаходиться в діапазоні $x = (1-14)$. З рис. 8.5 видно також, модель має лінійний вигляд, тобто графічно описується прямою лінією.

3. Проведення експерименту.

Власне, побудована область планування за фактичними даними технологічного процесу є результатом проведення експериментів. Це так званий пасивний експеримент. Тобто проведення експерименту при такому підході до вибору області планування – не що інше, як вимір величин фактора x і відповідних їм величин y в ході звичайного технологічного процесу, що здійснюється в цеху.

4. Розрахунок параметрів моделі.

Параметрами моделі є її коефіцієнти. Тому для аналізованого випадку – побудови лінійної моделі впливу одного фактора на вихідну змінну – розрахунку підлягають коефіцієнти a_0 і a_1 .

Розрахунок здійснюється простим послідовним перемноженням матриць

$$A = (F^T F)^{-1} F^T Y. \quad (8.28)$$

В цьому рівнянні:

F – матриця плану експерименту;

F^T – транспонована матриця плану експерименту;

$(F^T F)^{-1}$ – дисперсійна матриця, що позначається як C ;

Y – матриця значень ефективності технологічного процесу;

A – матриця коефіцієнтів.

Формуються всі ці матриці в такий спосіб.

Матриця F Кількість стовпців у ній дорівнює двом, а кількість рядків – числу експериментальних точок. Перший стовпець завжди з одиниць, а другий – з чисельних значень фактора, тобто із значень x_i .

У наведеній вище ілюстрації матриця F має вигляд (нижче всі матриці представлятимуться у вигляді таблиць)

$$F =$$

1	4
1	7
1	12
1	8
1	9
1	1
1	3
1	14
1	12

Матриця F^T . Вона отримується заміною рядків матриці F її стовпцями

$$F^T =$$

1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	7	12	8	9	1	3	14	12

Добуток матриць $F^T F$. Отримана в результаті перемноження матриця матиме розмірність 2×2 , тобто включатиме два рядки і два стовпці. Її елементи отримуються перемноженням рядків на стовпці або узагальнено у вигляді формул

$$F^T F = \begin{array}{|c|c|} \hline N & \sum_{i=1}^N x_i \\ \hline \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 \\ \hline \end{array}$$

Тут N – кількість експериментальних точок. У наведеному прикладі $N = 9$

$$F^T F = \begin{array}{|c|c|} \hline 9 & 70 \\ \hline 70 & 704 \\ \hline \end{array}$$

Дисперсійна матриця $C = (F^T F)^{-1}$. Вона має ту саму розмірність, що і матриця $F^T F$, тобто включає в себе два рядки та два стовпці. Елементи її розраховуються за формулами

$$C = \begin{array}{|c|c|} \hline \frac{a_{22}}{a_{21} \left((-a_{11}) \times \frac{a_{22}}{a_{21}} + a_{12} \right)} & \frac{a_{12}}{a_{11} \left((-a_{21}) \times \frac{a_{12}}{a_{11}} + a_{22} \right)} \\ \hline \frac{1}{\left((-a_{11}) \times \frac{a_{22}}{a_{21}} + a_{12} \right)} & \frac{1}{\left((-a_{21}) \times \frac{a_{12}}{a_{11}} + a_{22} \right)} \\ \hline \end{array}$$

Тут $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ – елементи матриці $F^T F$: $a_{11} = 9, a_{12} = 70, a_{21} = 70, a_{22} = 704$. Таким чином, неважко отримати елементи матриці C , підставляючи ці значення у відповідні комірки з формулами

$$C = \begin{array}{|c|c|} \hline 0.49 & -0.0487 \\ \hline -0.0487 & 0.0063 \\ \hline \end{array}$$

Добуток матриць CF^T . Розмірність цього добутку 2×5 , тобто результуюча матриця-таблиця має два рядки та п'ять стовпців. У цьому прикладі

$$CF^T = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 0.2952 & 0.1491 & -0.0944 & 0.1004 & 0.0517 & 0.4413 & 0.3439 & -0.1918 & -0.0944 \\ \hline -0.0235 & -0.0046 & 0.0269 & 0.0017 & 0.008 & -0.0424 & -0.0298 & 0.0395 & 0.0269 \\ \hline \end{array}$$

Матриця Y має розмірність $N \times 1$, тобто представляє собою таблицю з N рядків і одного стовпця. У розглянутому прикладі вона має вигляд

$$Y = \begin{array}{|c|} \hline 13 \\ \hline 14 \\ \hline 25 \\ \hline 11 \\ \hline 17 \\ \hline 6 \\ \hline 8 \\ \hline 25 \\ \hline 23 \\ \hline \end{array}$$

Добуток матриць CF^TY має розмірність 2×1 , тобто складається з двох рядків і одного стовпця і є шуканою матрицею коефіцієнтів

$$A = \begin{array}{|c|} \hline 3.9811 \\ \hline 1.5707 \\ \hline \end{array}$$

Отже, рівняння прямої, що описує залежність у даному прикладі, має вигляд (рис. 8.6)

$$y = 3.9811 + 1.5707x.$$

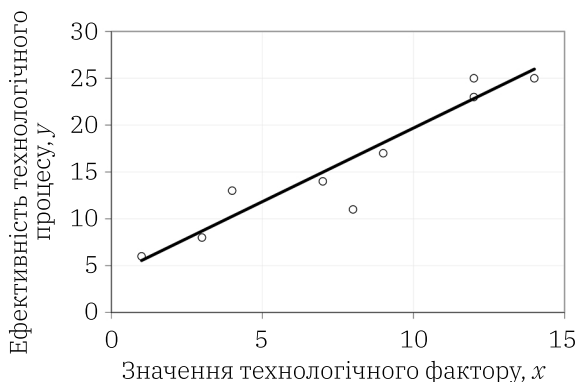


Рис. 8.6 – Результати моделювання

5. Обчислення сум квадратів відхилень експериментальних значень досліджуваної величини від розрахункових, отриманих за моделлю, та оцінка дисперсій.

Обчислення сум квадратів та оцінка дисперсій неадекватності моделі.

Ця операція призначена для оцінки точності отриманої моделі. Підставляючи кожне з значень x в отримане рівняння, розраховується величина y , результат записується в стовпець таблиці поруч із експериментальним значенням y . Потім розраховується квадрат різниці отриманих значень для кожної експериментальної точки та загальний результат по всіх точках підсумовується

x	$Y_{\text{експ}}$	$Y_{\text{розра}}$	$(Y_{\text{експ}} - Y_{\text{розра}})^2$
4	13	10.2639	7.486243
7	14	14.976	0.952576
12	25	22.8295	4.71107
8	11	16.5467	30.76588
9	17	18.1174	1.248583
1	6	5.5518	0.200883
3	8	8.6932	0.480526
14	25	25.9709	0.942647
12	23	22.8295	0.02907
Сумма квадратів відхилень S_R			46.81748

Після розрахунку сум квадратів відхилень визначається число ступенів свободи та дисперсія, що характеризує неадекватність моделі. У разі, якщо в кожній експериментальній точці x вимірювання величини y проводилося 1 раз, тобто в кожній експериментальній точці проводився лише один експеримент, число ступенів свободи розраховується за формулою

$$\varphi_1 = N - (k + 1), \quad (8.29)$$

а дисперсія розраховується за формулою

$$s_R^2 = \frac{S_R}{\varphi_1}, \quad (8.30)$$

де k – кількість вхідних змінних;

φ_1 – число ступенів свободи.

У цьому прикладі:

$$N=9, k=1, \varphi_1=7, s_R^2 = \frac{46.81748}{7} = 6.69.$$

У разі, якщо в кожній експериментальній точці x вимірювання величини y проводилося n разів, тобто в кожній експериментальній точці проводилось n експериментів, сума квадратів відхилень визначається за формулою

$$S_D = nS_R. \quad (8.31)$$

Обчислення сум квадратів та оцінка дисперсій, що характеризують точність проведення експерименту.

Ця процедура виконується у тому випадку, якщо в кожній експериментальній точці x проводяться кілька вимірювань величини y , тобто в кожній експериментальній точці проводяться декілька паралельних експериментів. Наприклад, результат y , за якими виконувались наведені вище обчислення, був середнім результатом за двома значеннями, виміряними в кожній точці x

x	y_1	y_2	y_{cp}
4	11	15	13
7	13	15	14
12	24	26	25
8	8	14	11
9	15	19	17
1	3	9	6
3	6	10	8
14	22	28	25
12	21	25	23

Формула для визначення сум квадратів і дисперсії у разі має вигляд

$$S_E = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{icp} - y_{ij})^2, \quad (8.32)$$

де y_{icp} – середнє значення у кожному з паралельних експериментів;
 y_{ij} – кожне вимірено значення вихідної змінної.

Після розрахунку сум квадратів відхилень визначається число ступенів свободи та дисперсія, що характеризує точність експериментів. У разі, якщо в кожній експериментальній точці x вимірювання величини y проводилося n разів, тобто в кожній експериментальній точці було проведено n паралельних експериментів, число ступенів свободи розраховується за формулою

$$\varphi_2 = N(n-1), \quad (8.33)$$

а дисперсія визначається за формулою

$$s_e^2 = \frac{S_E}{n\varphi_2}, \quad (8.34)$$

де k – кількість вхідних змінних;

φ_2 – число ступенів свободи;

n – число паралельних експериментів;

N – число експериментів.

В розглянутому прикладі $n = 2$, $N = 9$, розрахунки за формулою (8.32) демонструються у таблиці

x	Y_1	Y_2	Y_{cp}	$(y_{icp} - y_{ij})^2$
4	11	15	13	8
7	13	15	14	2
12	24	26	25	2
8	8	14	11	18
9	15	19	17	8
1	3	9	6	18
3	6	10	8	8
14	22	28	25	18
12	21	25	23	8
Сума квадратів відхилень S_E				90

Підставляючи результати розрахунків в (8.34), отримано

$$s_e^2 = \frac{90}{18} = 5.$$

У разі, якщо в кожній експериментальній точці x вимірювання величини y проводився лише 1 експеримент, число ступенів свободи розраховується за формулою

$$\varphi_2 = N - 1, \quad (8.35)$$

а дисперсія визначається за формулою

$$s_e^2 = \frac{S_E}{\varphi_2}. \quad (8.36)$$

6. Статистичний аналіз точності моделі.

Його метою є перевірка точності визначення коефіцієнтів моделі. Іншими словами, оцінюється поле розсіювання коефіцієнтів a_0 та a_1 , тобто нижнє та верхнє відхилення для кожного з цих коефіцієнтів. Здійснюється це за допомогою критеріїв:

$$\begin{aligned} a_0 &\pm t_{кр} s_0; \\ a_1 &\pm t_{кр} s_1, \end{aligned} \quad (8.37)$$

$$\begin{aligned} s_0^2 &= c_{11} s^2; \\ s_1^2 &= c_{22} s^2. \end{aligned} \quad (8.38)$$

тут $t_{кр}$ – критичне значення розподілу Стьюдента (для прикладу нижче наведено кілька таких значень для числа ступенів свободи від 1 до 12);

c_{11} – перший діагональний елемент головної діагоналі дисперсійної матриці C ;

c_{22} – другий діагональний елемент головної діагоналі дисперсійної матриці C .

За величину s^2 може бути обрана або величина s_R^2 , або величина s_e^2 .

Значення $t_{кр}$ з довірчою ймовірністю 95% для числа ступенів свободи

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.62	2.23	2.18

У прикладі, що розглядається, при числі ступенів свободи $\varphi = 9$, $t_{кр} = 2.62$, $c_{11} = 0.49$, $c_{22} = 0.0063$, за s^2 обираємо $s_e^2 = 10$:

$$s_0^2 = 0.49 \times 10 = 4.9;$$

$$s_1^2 = 0.0063 \times 10 = 0.063;$$

$$s_0 = 2.21, s_1 = 0.25, t_{кр} s_0 = 5.79, t_{кр} s_1 = 0.655.$$

Отже поля відхилень для значень коефіцієнтів дорівнюють:

$$\begin{aligned} a_0 \pm t_{кр} s_0 &= 3.98 \pm 5.79 \\ a_1 \pm t_{кр} s_1 &= 1.5707 \pm 0.655 \cdot \end{aligned}$$

7. Перевірка адекватності моделі.

Вона здійснюється з метою визначення, чи дійсно отримана модель визначає реальний досліджуваний процес, тобто отримана модель адекватно описує експериментальні дані. Проводиться перевірка за допомогою F -критерію Фішера

$$F = \frac{\frac{S_D}{\varphi_1}}{\frac{S_E}{\varphi_2}} = \frac{S_D \varphi_2}{S_E \varphi_1} \leq F_{кр}, \quad (8.39)$$

де $F_{кр}$ – критичне значення F -розподілу, що визначається за таблицями математичної статистики.

Якщо умова (8.39) виконується, модель є адекватною.

У наведеному прикладі

$$F = \frac{842.76}{630} = 1.34 \leq F_{кр} = 3.68.$$

Отже, одержана модель адекватна.

Окрім пасивних експериментів, як у розглянутому вище прикладі, можуть проводитися активні експерименти. Це означає, що експерименти проводяться не в будь-яких точках, а у заздалегідь обраних точках плану. В такому разі говорять, що формується план активного експерименту. Першим кроком на цьому шляху є вибір діапазонів варіювання вхідних змінних та їх нормування вхідних змінних.

Розглянемо такий приклад. При виплавці сталі за даними середніх плавок визначено, що хімічний склад відповідає наведеному в таблиці 8.8.

Таблиця 8.8 – Результати хімічного аналізу плавок вуглецевої сталі

Хімічні елементи	Вміст елементу в сталі, %							
	0.24	0.34	0.22	0.26	0.32	0.28	0.30	0.36
C	0.24	0.34	0.22	0.26	0.32	0.28	0.30	0.36
Mn	0.6	0.56	0.72	0.52	0.76	–	0.64	0.68
Ni	0.2	0.4	0.4	0.6	0.8	0.2	0.8	0.6

З цих даних видно, що діапазони (min–max) значень вхідних змінних наступні: C = (0.22–0.36)%, Mn = (0.52–0.76)%, Ni = (0.2–0.8)%.

Обравши мінімальні та максимальні значення, можна розпочати операцію нормування. Ця операція має на меті перевести натуральні значення для кожної з вхідних змінних у безрозмірні, щоб «зрівняти» їх ефекти впливу на досліджувану вихідну змінну. Операція нормування здійснюється за такою формулою

$$x = \frac{x_{\text{нат}} - x_{\text{cp}}}{I}, \quad (8.40)$$

де x – нормоване значення вхідної змінної;

$x_{\text{нат}}$ – натуральне значення вхідної змінної;

x_{cp} – середнє значення вхідної змінної;

I – інтервал варіювання вхідної змінної, що визначається як різниця між максимальним значенням вхідної змінної та його середнім значенням або між середнім значенням вхідної змінної та його мінімальним значенням, тобто $I = x_{\text{max}} - x_{\text{cp}} = x_{\text{cp}} - x_{\text{min}}$.

У наведеному прикладі діапазон змін вмісту вуглецю становить (0.24–0.36)%. Отже, середнє значення становить 0.29%, а інтервал варіювання 0.05%. Аналогічно, середнє значення марганцю становить 0.64%, інтервал варіювання 0.12%; середнє значення вмісту нікелю 0.5%, інтервал варіювання 0.3%. Підставляючи ці дані у загальну формулу, отримуємо формули для перерахунку натуральних значень керуючих факторів нормовані значення:

$$C = \frac{C_{\text{нат}} - 0.29}{0.07}, \quad \text{Mn} = \frac{\text{Mn}_{\text{нат}} - 0.64}{0.12}, \quad \text{Ni} = \frac{\text{Ni}_{\text{нат}} - 0.5}{0.3}.$$

Використовуючи дані таблиці 8.8, перерахуємо за отриманими формулами натуральні значення керуючих факторів в нормовані (таблиця 8.9).

Таблиця 8.9 Перерахунок натуральних значень керуючих факторів у нормовані

Вміст вуглецю (C)		Вміст марганцю (Mn)		Вміст нікелю (Ni)	
Натуральне значення, %	Нормоване значення	Натуральне значення, %	Нормоване значення	Натуральне значення, %	Нормоване значення
0.24	-0.714	0.6	-0.333	0.2	-1
0.34	+0.714	0.56	-0.667	0.4	-0.333
0.22	-1	0.72	+0.667	0.4	-0.333
0.26	-0.429	0.52	-1	0.6	+0.333
0.32	+0.429	0.76	+1	0.8	+1
0.28	-0.143	-	-	0.2	-1
0.30	+0.143	0.64	0	0.8	+1
0.36	+1	0.68	+0.333	0.6	+0.333

З таблиці 8.9 випливає, що нормуванням вхідних змінних усі вони переведені в безрозмірний діапазон [-1; +1].

Наступним етапом планування є вибір значення кожної вхідної змінної у відповідному експерименті. Загальна кількість комбінацій факторів (не враховуючи ефекту попарної їх взаємодії та квадратичних ефектів), які впливають на обрану вихідну змінну, визначається за такою формулою: $N = 2^k$, де k – число вхідних змінних. При $k = 2$ число комбінацій дорівнює 4, при $k = 3$ число комбінацій дорівнює 8, при $k = 4$ число комбінацій дорівнює 16 і т.д.

Далі формується таблиця плану експериментів за правилом: для першого фактора (першої вхідної змінної) максимальне і мінімальне значення чергуються через одне, для другого через два, для третього через чотири, для четвертого через 8 і т. д. Наприклад, при дії чотирьох факторів таблиця плану експерименту в нормованому вигляді матиме вигляд, наведений в табл. 8.10.

Таблиця 8.10 – Приклад плану експерименту для $k = 4$

Номер експерименту	Значення факторів в нормованому вигляді			
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1
5	+1	+1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1
8	-1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1
10	-1	+1	+1	-1
11	+1	-1	+1	-1
12	-1	-1	+1	-1
13	+1	+1	-1	-1
14	-1	+1	-1	-1
15	+1	-1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1

Припустимо, ставиться задача визначення залежності магнітної індукції (y) сталі від різних наборів змінних:

– у першій серії – від вмісту вуглецю та напруженості магнітного поля;

– у другій серії – від вмісту марганцю та напруженості магнітного поля;

– у третій серії – від вмісту нікелю та напруженості магнітного поля.

Зв'язок натуральних та нормованих значень напруженості

магнітного поля (H_s) має вигляд
$$H_s = \frac{H_{s_{\text{нам}}} - 6250}{3750}.$$

У розглянутій задачі кожна з серій експериментальних промислових плавок буде включати по чотири плавки, в кожній з яких визначена величина магнітної індукції сталі (табл. 8.11).

Таблиця 8.11 – Таблиця плану експерименту

Серія 1			
1	2	3	4
Номер експериментальної плавки	Вміст вуглецю в сталі в нормованому вигляді	Напруженість магнітного поля в нормованому вигляді	Магнітна індукція, Тл
1	+1	+1	1.75
2	-1	+1	1.77
3	+1	-1	1.37
4	-1	-1	1.44
Серія 2			
Номер експериментальної плавки	Вміст марганцю в сталі в нормованому вигляді	Напруженість магнітного поля в нормованому вигляді	Магнітна індукція, Тл
1	+1	+1	1.77
2	-1	+1	1.76
3	+1	-1	1.41
4	-1	-1	1.44

Продовження Таблиці 8.11

1	2	3	4
Серія 3			
Номер експериментальної плавки	Вміст нікелю в сталі в нормованому вигляді	Напруженість магнітного поля в нормованому вигляді	Магнітна індукція, Тл
1	+1	+1	1.75
2	-1	+1	1.75
3	+1	-1	1.43
4	-1	-1	1.41

В останній графі таблиці 8.11 наведено вимірне під час експерименту значення магнітної індукції. За отриманими результатами можна побудувати математичний опис впливу вхідних змінних на величину магнітної індукції. Цей математичний опис і є моделлю досліджуваного процесу.

При вирішенні практичних завдань найбільш простим та ефективним є представлення моделі досліджуваного процесу у вигляді полінома (табл. 8.12).

Таблиця 8.12 – Варіанти представлення поліному

Кількість вхідних змінних		Вид поліному (рівняння регресії)
1		2
1	1a	$y = a_0 + a_1 x_1$
	1б	$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2$
2	2a	$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$
	2б	$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1^2 + a_4 x_2^2 + a_5 x_1 x_2$

Продовження Таблиці 8.12

1	2
3	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$
3б	$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3 + a_{10}x_1x_2x_3$

Якщо обмежуються найбільш простим варіантом: для однієї вхідної змінної варіантом 1а, для двох вхідних змінних варіантом 2а, для трьох вхідних змінних варіантом 3а, отримані при цьому результати не дозволяють знайти оптимальні значення вхідних змінних, що забезпечують максимум або мінімум вихідної змінної. Однак вони дозволяють зробити ряд важливих висновків, зокрема про значущість факторів, про силу впливу кожної вхідної змінної на вихідну змінну, а також про те, як потрібно змінювати значення вхідних змінних, щоб досягти оптимуму, тобто максимальних (або мінімальних) значень вихідної змінної.

Якщо використовують поліноми виду 1б, 2б, 3б, це дозволяє вирішити оптимізаційну задачу.

Наведені у кожному з поліномів коефіцієнти і є тими величинами, які треба визначити, виходячи з таблиці плану експерименту. Розрахунок здійснюється табличним способом та ілюструється нижче для кожної серії (табл. 8.13–8.16).

Таблиця 8.13 – Результати розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії за даними табл. 8.11 для серії експериментів 1

Серія 1			
1	2	3	4
Номер експериментальної плавки $i (i = 1, \dots, N)$	Вміст вуглецю в сталі в нормованому вигляді x_1	Напруженість магнітного поля в нормованому вигляді x_2	Магнітна індукція y
1	+1	+1	1.75

Продовження Таблиці 8.13

1	2	3	4
2	-1	+1	1.77
3	+1	-1	1.37
4	-1	-1	1.44
Розрахункові значення коефіцієнтів	$a_1 = -0.0225$	$a_2 = 0.1775$	$a_0 = 1.5825$

$$a_1 = \frac{1}{N} \sum X_{1i} Y_i = \frac{1}{4} ((+1) \times 1.75 + (-1) \times 1.77 + (+1) \times 1.37 + (-1) \times 1.44) = -0.0225$$

$$a_2 = \frac{1}{N} \sum X_{2i} Y_i = \frac{1}{4} ((+1) \times 1.75 + (+1) \times 1.77 + (-1) \times 1.37 + (-1) \times 1.44) = 0.1775$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum Y_i = \frac{1}{4} (1.75 + 1.77 + 1.37 + 1.44) = 1.5825$$

Таблиця 8.14 – Результати розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії за даними табл. 8.11 для серії експериментів 2

Серія 2			
1	2	3	4
Номер експериментальної плавки	Вміст марганцю в сталі в нормованому вигляді x_1	Напруженість магнітного поля в нормованому вигляді x_2	Магнітна індукція y
1	+1	+1	1.77

Продовження Таблиці 8.14

1	2	3	4
2	-1	+1	1.76
3	+1	-1	1.41
4	-1	-1	1.44
Розрахункові значення коефіцієнтів	$a_1 = -0.005$	$a_2 = 0.17$	$a_0 = 1.595$

Таблиця 8.15 – Результати розрахунку коефіцієнтів рівнянь регресії по даних табл. 8.11 для серії експериментів 3

Серія 3

Номер експериментальної плавки	Вміст нікелю в сталі в нормованому вигляді x_1	Напруженість магнітного поля в нормованому вигляді x_2	Магнітна індукція y
1	+1	+1	1.75
2	-1	+1	1.75
3	+1	-1	1.43
4	-1	-1	1.41
Розрахункові значення коефіцієнтів	$a_1 = 0.005$	$a_2 = 0.165$	$a_0 = 1.5875$

З усіх проведених вище розрахунків отримано математичний опис впливу досліджуваних факторів на магнітну індукцію сталі:

$$Br = 1.5825 - 0.0225 \frac{C - 0.29}{0.07} + 0.1775 \frac{Hs - 6250}{3750},$$

$$Br = 1.595 - 0.005 \frac{Mn - 0.64}{0.12} + 0.17 \frac{Hs - 6250}{3750},$$

$$Br = 1.5875 + 0.005 \frac{Ni - 0.5}{0.3} + 0.165 \frac{Hs - 6250}{3750}.$$

Для отримання математичної моделі, що містить квадратичні члени (поліном виду 2б), існує процедура побудови центральних ортогональних композиційних планів (ОЦКП). Такі плани записуються у вигляді таблиці (таблиця 8.16).

Таблиця 8.16 – ОЦКП для двох незалежних змінних

Діапазон значень вхідних змінних	Матриця планування				Параметр оптимізації
	Позначення	Незалежні змінні		Квадратичні значення факторів та ефект взаємної дії факторів на параметр оптимізації	
		Фактор 1	Фактор 2		
1	2	3	4	5	6
Основний рівень	0	Середнє значення	Середнє значення		
Інтервал варіювання	<i>I</i>				
Верхній рівень	+1	Максимальне значення	Максимальне значення		
Нижній рівень	-1	Мінімальне значення	Мінімальне значення		

Продовження Таблиці 8.16

1	2	3	4	5		6		
Позна- чення	x_0	x_1	x_2	$(x_1^2 - \beta)$	$(x_2^2 - \beta)$	$x_1 x_2$	y	
Номер екс- пери- менту	1	+1	+1	+1	0.33	0.33	+1	y_1
	2	+1	-1	+1	0.33	0.33	-1	y_2
	3	+1	+1	-1	0.33	0.33	-1	y_3
	4	+1	-1	-1	0.33	0.33	+1	y_4
	5	+1	+1	0	0.33	-0.67	0	y_5
	6	+1	-1	0	0.33	-0.67	0	y_6
	7	+1	0	+1	-0.67	0.33	0	y_7
	8	+1	0	-1	-0.67	0.33	0	y_8
	9	+1	0	0	-0.67	-0.67	0	y_9
Коефіцієн- ти моделі	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5		

Примітки:

1. Значення $y_1 \dots y_9$ – це значення параметра оптимізації у відповідних експериментах.

2. $\beta = 0.6667$

Формули для розрахунку коефіцієнтів моделі мають вигляд:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x^j y^j, i = 1, \dots, n, \quad (8.41)$$

$$a_i = c_2 [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] y^j, i = n+1, \dots, 2n, \quad (8.42)$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_\mu^j x_\lambda^j y^j, i = 1, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n+1, \dots, k, \quad (8.43)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{j=1}^N a_{n+i}, \quad (8.44)$$

де c_1, c_2, c_3 – коефіцієнти для лінійних, квадратичних та парних взаємодій незалежних змінних відповідно, що приймають наступні значення: $C_1 = 0.1667, C_2 = 0.5, C_3 = 0.25$;

n – число лінійних членів моделі;

N – число експериментів.

Аналіз моделі, що отримується, перевіряється відповідно до процедур (8.29)–(8.38).

8.3. Оптимізація технологічних процесів

Оптимізація представляє собою процедуру знаходження оптимальних рішень, тобто визначення таких значень вхідних змінних, за якими обраний критерій оптимізації досягає максимуму або мінімуму залежно від вимог з урахуванням обмежень. При рішенні практичних задач говорять про експериментальну оптимізацію.

В практиці металургійного виробництва використовуються наступні методи експериментальної оптимізації:

- метод Бокса-Уілсона (метод крутого сходження);
- симплекс-метод;
- гребеневий аналіз («рідж»-аналіз);
- перетворення поверхні відгуку до канонічного вигляду.

Метод Бокса-Уілсона.

Суть методу полягає в наступному.

На основі малої серії дослідів отримують локальний опис поверхні відгуку в деякій вихідній області за допомогою моделі лінійного вигляду. У центрі області розраховується лінійне наближення градієнта та розраховуються кроки у напрямі градієнта. Тобто у напрямі якнайшвидшого підйому (крутого сходження) проводяться експерименти для досягнення стаціонарної області, у якій розташований екстремум (максимум або мінімум). Якщо знайдене лінійне наближення градієнта для центру області істотно відрізняється від значення градієнта в деякій точці у напрямку руху, можна знайти новий опис поверхні відгуку за допомогою поліномів першого

порядку в околиці цієї точки і розрахувати нове значення градієнта. У стаціонарній області лінійна модель виявляється вже не адекватною, і для опису поверхні відгуку в цій області, як правило, використовуються поліноми другого і навіть третього ступеня.

У стаціонарній області потрібно провести більшу кількість експериментів, тому що тут необхідно отримати якомога точніший опис. Стратегія крутого сходження для двох вхідних змінних представлена на рис. 8.3.

Вектор-градієнт безперервної функції $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ має вигляд

$$\text{grad } y = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} i + \frac{\partial f}{\partial x_2} j + \frac{\partial f}{\partial x_3} k + \dots \right). \quad (8.45)$$

Цей вектор перпендикулярний поверхні рівного рівня $y = \text{const}$ і вказує напрямком якнайшвидшого підйому (крутого сходження) (рис. 8.7). У формулі (8.45) i, j, k – одиничні вектори по осях змінних x . Якщо модель лінійна, тобто $y = a_0 x_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n$, то коефіцієнти a_i є координатами вектор-градієнта. Якщо змінювати значення цих змінних пропорційно знайденим оцінкам коефіцієнтів a_i , то реалізується рух у напрямі якнайшвидшого наближення до оптимуму. Компоненти градієнта та нормованого градієнта експериментально отриманої лінійної моделі залежать від вибору основного рівня та інтервалів варіювання змінних.

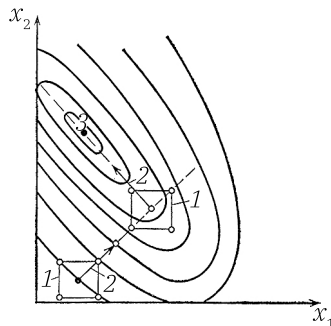


Рис. 8.7 – Стратегія крутого сходження: 1 – план експерименту для лінійної моделі; 2 – лінійне наближення градієнту; 3 – стаціонарна область

Компоненти нормованого градієнта визначаються таким чином

$$\frac{\text{grad } y}{|\text{grad } y|} = \frac{\frac{\partial f}{\partial x_1} i + \frac{\partial f}{\partial x_2} j + \frac{\partial f}{\partial x_3} k + \dots}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \right]^{0.5}}. \quad (8.46)$$

Необхідно вибирати інтервали варіювання таким чином, щоб величини коефіцієнтів мали однаковий порядок. У цьому випадку застосування методу крутого сходження є найефективнішим.

Метод крутого сходження складається з послідовних кроків:

1. Побудова лінійної моделі.

Передбачається, що експеримент починається з точки, що досить віддалена від оптимуму (або так званої стаціонарної області), тому для опису поверхні відгуку на околиці початкової точки можна використовувати лінійну модель. За допомогою планування експерименту можна знайти точки проведення експериментів та розрахувати оцінки коефіцієнтів. Цей етап завершується статистичним аналізом отриманої моделі.

2. Покрокове покращення величини цільової функції. Щоб здійснити рух у напрямку оптимуму, необхідно розрахувати напрямки градієнта та визначити величину кроку до наступного досвіду. Координати l -ї точки експерименту за напрямом градієнта знаходяться за формулою:

$$x_i^l = x_i^{l-1} + \lambda a_i, \quad l = 1, L, \quad (8.47)$$

де a_i – оцінка i -го коефіцієнта моделі. Так як градієнт завжди проходить через центр плану, то

$$x_i^l = l \lambda a_i, \quad (8.48)$$

де λ – обрана величина нормованого кроку.

При виборі величини кроку мають значення міркування, близькі до тих, що використовуються під час вибору інтервалу

варіювання. Величину кроку для k -го фактору λ_k вибирають із фізичних міркувань, виражаючи її в натуральних одиницях, потім розраховують

$$\lambda = \frac{\lambda_k}{I_k |a_k|}, \quad (8.49)$$

де I_k – інтервал варіювання. Для визначення величини кроку λ_i по іншому змінним у натуральних одиницях використовується таке співвідношення

$$\lambda_i = \lambda |a_i| I_i. \quad (8.50)$$

При цьому виходить, що величини кроків λ_i , завжди співвідносяться один з одним так само, як модулі величин $a_i I_i$, тобто $\lambda_1 : \lambda_2 : \dots : \lambda_n = |a_1 I_1| : |a_2 I_2| : \dots : |a_n I_n|$.

Якщо з виробничих або технологічних міркувань виявляється неможливим одночасна зміна двох вхідних змінних у процесі крутого сходження, то значення змінної, за якою неможливе сходження, фіксується на якомусь рівні. Для прикладу реалізації методу крутого сходження нижче розглядається така задача. У ливарному цеху виготовляються виливки методом лиття під низьким тиском. Схема процесу лиття під низьким тиском на основі системи з двоступінчастим поданням повітря представлена на рис. 8.8.

В табл. 8.17, 8.18 представлено розміри тигля та обрані технологічні режими лиття відповідно.

В таблиці 8.19 наведено дані по отриманих коефіцієнтах лінійних рівнянь відповідно до плану експерименту та результати процедури Бокса-Уілсона для експериментальної оптимізації тиску в ресивері.

В таблиці 8.20 наведено дані по отриманих коефіцієнтах лінійних рівнянь відповідно до плану експерименту та результати процедури Бокса-Уілсона для експериментальної оптимізації тривалості заповнення кристалізатора.

Значення висоти виливку зафіксовано на середньому рівні.

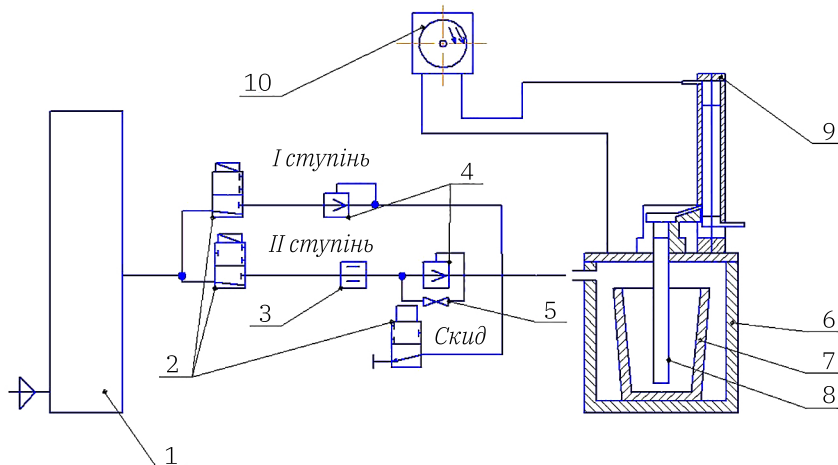


Рис. 8.8 – Система з двоступінчастим поданням повітря в процесі лиття під низьким тиском: 1 – ресивер; 2–5 – елементи пневматичної системи; 6 – піч; 7 – тигель; 8 – металопровід; 9 – форма; 10 – прилад для запису протитиску в формі та тиску в печі

Таблиця 8.17 – Конструктивні параметри тигля

Конструктивний параметр	Значення
Глибина тигля H , м	0.6
Площа внутрішнього перетину метало-провода F_1 , м ²	0.004
Площа дзеркала металу в тиглі (площа металопровода не враховується) F_2 , м ²	0.014
Відстань від верху тигля до дзеркала металу ξ_0 , м	0.1
Довжина трубопроводу, що поєднує тигель з ресивером l , м	3

Таблиця 8.18 – Технологічні режими лиття

Технологічні режими	Значення
Висота виливку H_l , м (x_1)	0.4–0.8
Діаметр виливку D_b , м	0.07
Тиск підпресовки, за якого відбувається твердження виливку p_T , МПа (x_2)	0.02–0.08
Сплав	мідний

Таблиця 8.19 – Результати процедури Бокса-Уілсона для експериментальної оптимізації тиску в ресивері

№ експерименту та розрахункові параметри	Змінні вхідні					Змінні вихідні
	Значення нормовані			Значення натуральні		
	x_0	x_1	x_2	H_l	P_T	
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	0.8	0.08	0.276
2	1	-1	1	0.4	0.08	0.233
3	1	1	-1	0.8	0.02	0.216
4	1	-1	-1	0.4	0.02	0.174
a_i	0.225	0.0213	0.0298			
ai^*I_i		0.0043	0.0009			
λ_k		0.0357	0.0075			
		0.0357	0.0075			
λ		0.0002	0.0075			
$\lambda_{окр}$		0	0.008			
Основний рівень		0.6	0.05			

Продовження Таблиці 8.19

1	2	3	4	5	6	7
Інтервал варіювання		0.2	0.03			
Верхній рівень		0.8	0.08			
Нижній рівень		0.4	0.02			
5		0	0.267	0.6	0.058	0.233
6		0	0.533	0.6	0.066	0.241
7		0	0.8	0.6	0.074	0.25
8		0	1.067	0.6	0.082	0.257
9		0	1.333	0.6	0.09	0.265
10		0	1.6	0.6	0.098	0.273
11		0	1.867	0.6	0.106	0.281
12		0	2.133	0.6	0.114	0.289

Таблиця 8.20 – Результати процедури Бокса-Уілсона для експериментальної оптимізації тривалості заповнення кристалізатора

№ експерименту та розрахункові параметри	Змінні вхідні					Змінні вихідні
	Значення нормовані			Значення натуральні		
	x_0	x_1	x_2	H_l	P_T	
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	0.8	0.08	0.33
2	1	-1	1	0.4	0.08	0.37
3	1	1	-1	0.8	0.02	0.4

Продовження Таблиці 8.20

1	2	3	4	5	6	7
4	1	-1	-1	0.4	0.02	0.5
a_i	0.4	-0.035	-0.05			
ai^*I_i		-0.007	-0.002			
λ_k		0.035	0.0075			
		-0.035	-0.008			
λ		-0.0002	-0.008			
$\lambda_{окр}$		0	-0.008			
Основний рівень		0.6	0.05			
Інтервал варіювання		0.2	0.03			
Верхній рівень		0.8	0.08			
Нижній рівень		0.4	0.02			
5		0	-0.267	0.6	0.058	0.37
6		0	-0.533	0.6	0.066	0.36
7		0	-0.8	0.6	0.074	0.36
8		0	-1.067	0.6	0.082	0.36
9		0	-1.333	0.6	0.09	0.34
10		0	-1.6	0.6	0.098	0.34
11		0	1.8667	0.6	0.106	0.34
12		0	2.1333	0.6	0.114	0.32

Як видно, з табл. 8.19, рух в напрямку градієнту при визначенні тиску в ресивері вказує на лінійну зміну цієї змінної, а стаціонарна область не досягається. Аналогічні висновки можуть бути зроблені відносно тривалості заповнення кристалізатора (табл. 8.20), причому видно, що для мінімізації тривалості необхідно збільшувати тиск підпресовки.

Реальні виробничі умови передбачають обмежені можливості проведення активних промислових експериментів. Кожне втручання в технологічний процес або роботу обладнання з метою побудови математичної моделі може призвести до появи браку, параметричних чи функціональних відмов в технологічному процесі. Причина цього у наступному. Плануючи активний промисловий експеримент, часто виникає необхідність виходу за межі технологічних режимів, встановлених щодо його здійснення у конкретних виробничих умовах. Якщо цього не станеться, збільшення кількості експериментів призведе до збільшення витрат на побудову моделі. Причому на етапі проведення експериментів та побудови моделі технологічного процесу немає жодної гарантії її кінцевої ефективності. Іншими словами, витрати на промисловий експеримент не окупаються отриманими результатами. Тому для промислових умов існують методи дослідження, що вимагають незначної кількості експериментів і пов'язані з малими відхиленнями від номінальних режимів роботи обладнання та перебігу технологічних процесів. До таких методів відноситься послідовний симплексний метод.

Симплексний метод заснований на проведенні активного експерименту на обладнанні, що працює, але він не передбачає математичного опису процесу. В основі методу лежить побудова симплексу та його переміщення у факторному просторі. Строго кажучи, симплексом називається найпростіша опукла геометрична фігура, утворена множиною $(n+1)$ точок, що не належать одночасно жодному $(n-1)$ -мірному підпростору даного факторного простору. Ці точки називаються вершинами симплекса, а їх число завжди на одиницю більше розмірності факторного простору. Наприклад, на площині (тобто у двовимірному просторі $n = 2$) симплексом є трикутник, у тривимірному просторі ($n = 3$) – трикутна піраміда (тетраedr) і т. д.

Симплекс може бути довільним чи регулярним. Симплекс є регулярним, якщо відстані між усіма точками, що його утворюють (тобто між вершинами симплексу), однакові. З довільного симплексу завжди можна отримати регулярний шляхом перетворення системи координат. Для промислової реалізації методу зручно використовувати регулярний симплекс.

Враховуючи, що завданням експериментатора є визначення положення симплексу при русі його в факторному просторі (а цей рух планується і здійснюється саме до оптимальної області технологічного процесу), першочерговим завданням є визначення вершин початкового симплексу. Іншими словами, на першому етапі потрібно розрахувати координати вершин симплекса в «стартовій» позиції. Ці координати описують початковий симплекс. Нижче наведено один із можливих варіантів розрахунку початкового симплексу. Помістимо одну з вершин симплексу на початок координат, а решту вершин розташуємо так, щоб ребра, що виходять з першої вершини, утворювали однакові кути з відповідними координатними осями (рис. 8.9).

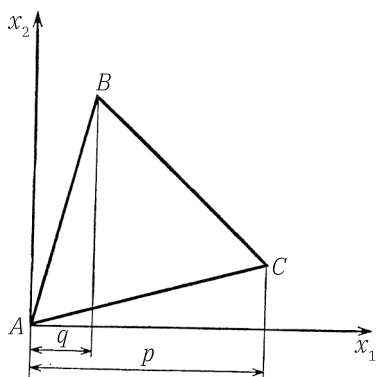


Рис. 8.9 – Початковий симплекс

Координати вершин симплексу в цьому випадку задаються матрицею:

– для площини, тобто. при дослідженні двох факторів технологічного процесу (симплексом є трикутник)

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ p & q & q \\ q & p & q \\ q & q & p \end{pmatrix};$$

– для тривимірного простору, тобто при дослідженні трьох факторів технологічного процесу (симплексом є трикутна піраміда)

$$K = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ p & q & q \\ q & p & q \\ q & q & p \end{pmatrix}.$$

Координати p та q вершин симплекса розраховуються за формулами:

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{n\sqrt{2}} \left(n - 1 + \sqrt{(n+1)} \right); \\ q &= \frac{1}{n\sqrt{2}} \left(\sqrt{(n+1)} - 1 \right). \end{aligned} \quad (8.51)$$

Експериментальне визначення оптимальних значень факторів технологічного процесу здійснюється за допомогою послідовної процедури:

1. Розрахунок координат початкового симплексу та реалізація відповідних дослідів, при цьому всі значення факторів, що впливають на досліджуваний параметр технологічного процесу, попередньо повинні бути нормовані за формулою (8.40).

2. Відкидання точки плану з найменшим значенням досліджуваного параметра технологічного процесу та побудова нового симплексу. Новий симплекс утворюється вершинами вихідного симплексу і новою вершиною, що отримується шляхом дзеркального відображення відкинутої вершини щодо протилежної

ій $(n-1)$ -мірної грані вихідного симплексу. Координати нової точки x^* розраховуються у векторному записі

$$x^* = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n+1} x^i - \left(\frac{2}{n} + 1 \right) x^j, \quad (8.52)$$

де j – номер вершини вихідного симплексу з найменшим значенням цільової функції.

3. Проведення експерименту у новій точці x^* та отримання відповідного значення y^* (тобто досліджуваного параметра технологічного процесу). Можливий також розрахунок прогнозованого значення y^* по формулі (в векторному записі)

$$y_{\text{розрах}}^* = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n+1} y_{\text{розрах}}^i - \left(\frac{2}{n} + 1 \right) y_{\text{розрах}}^j. \quad (8.53)$$

4. Послідовне переміщення симплексу, в процесі якого на кожному кроці відбувається відкидання вершини симплексу з найгіршим значенням досліджуваного параметра та реалізація експерименту в новій вершині. При цьому напрямок переміщення центру симплексу коливається у напрямку градієнта. Іншими словами, симплекс переміщається в область оптимальних значень технологічних факторів.

5. Якщо при переміщенні симплекса протягом $(n+1)$ кроків та чи інша вершина зберігає своє положення, то симплекс здійснює оберт навколо цієї вершини. Фактично це означає одну з альтернатив:

- у цій точці знаходиться оптимальне значення досліджуваного параметра технологічного процесу;
- значення досліджуваного параметра технологічного процесу цієї вершини визначено неправильно.

Щоб уточнити, яка ситуація має місце, у цій точці знову проводиться експеримент та надалі виконують операції з новим значенням параметра технологічного процесу. Якщо виявляється, що значення досліджуваного параметра технологічного процесу у новій вершині симплекса менше, ніж у інших вершинах, відповідно до описаної стратегією руху симплекса повертаються до попереднього симплексу. Щоб запобігти зациклюванню, в якості

вершини, що відкидається, обирають вершину, наступну по порядку за найгіршою вершиною симплекса. Подальший рух продовжують, проводячи експеримент у точці, розташованій дзеркально відкинутій вершині.

6. Якщо нова вершина виходить за межі допустимої області планування, слід робити так само, як описано в попередньому пункті.

7. При досягненні області оптимуму розмір симплексу зменшують (як правило, на 0.25 початкової величини). Оптимум вважається досягнутим, якщо одна й та сама точка входить у послідовні симплекси m разів. Величина m визначають за емпіричною формулою:

$$m = 1.65n + 0.05n^2, \quad 2 \leq n \leq 30. \quad (8.54)$$

Якщо помилка експерименту відносно велика, необхідно в кожній вершині симплекса проводити кілька експериментів і використовувати усереднені значення досліджуваного параметра технологічного процесу. Перевагами симплекс-методу є:

- невеликий обсяг обчислень;
- мала кількість необхідних експериментів (додавання нового фактору вимагає проведення лише одного додаткового експерименту);
- обмеження на область варіювання факторів легко враховуються при русі симплекса;
- напрямок руху визначається тільки співвідношенням величин досліджуваного параметра технологічного процесу у вершинах симплекса, а не їх абсолютними значеннями;
- чим більше число вхідних змінних, тим вище ефективність методу.

Нижче наводиться приклад практичного застосування методу в промислових умовах при вирішенні задачі знаходження оптимального легуючого комплексу для чавуну з метою підвищення його міцності та зниження металомісткості корпусних виливків, що виготовляються в чавуноливарному цеху.

Досліджувалася можливість підвищення межі міцності чавуну за рахунок підбору оптимального комплексу Сзкв-Сr(Ni)-Cu(Ti).

Як фактори, що визначають межу міцності, обирався вміст хрому, міді та вуглецевий еквівалент. Оптимальний вміст нікелю та титану обирався за співвідношенням із вмістом хрому та міді відповідно. Легуючі елементи вводилися в електропіч у складі хромонікелевих та титаномедистих чавунів. План промислових експериментів – послідовний розрахунок координат симплексу та проведення плавок у відповідних точках – наведено у таблиці 8.21.

Таблиця 8.21 – План промислових експериментів та їх результати

Но- мер екс- пе- ри- мен- ту	Вихідний симплекс	Вер- ши- на	Вміст хрому, (x_1)		Вуглецевий еквівалент, (x_2)		Вміст міді, (x_3)		Межа міц- ності на розтя- гуван- ня σ_B , МПа (y)
			нату- раль- не	нор- мова- не	нату- раль- не	нормо- ване	нату- раль- не	нормо- ване	
1	ABCD	A	0.290	0	4.190	0	0.180	0	215
2	ABCD	B	0.328	0.950	4.209	0.2375	0.199	0.2375	220
3	ABCD	C	0.299	0.225	4.266	0.9500	0.199	0.2375	210
4	ABCD	D	0.299	0.225	4.209	0.2375	0.255	0.9375	220
5	ABCD	C*	0.312	0.558	4.139	-0.6330	0.224	0.5460	225
6	ABC*D	A*	0.336	1.155	4.180	-0.1050	0.272	1.1470	225
7	A*BC*D	D*	0.352	1.550	4.137	-0.6590	0.208	0.3495	240
8	A*BC*D*	B*	0.339	1.225	4.096	-1.1690	0.270	1.1240	240
9	A*BC*D*	A**	0.333	1.067	4.067	-1.5360	0.196	0.1990	255
10	A**BC*D*	D**	0.304	0.350	4.065	-1.5660	0.252	0.8970	285
11	A**BC*D*	B**	0.294	0.092	4.084	-1.3210	0.178	-0.0290	275
12	A**B**C*D*	C**	0.308	0.448	4.000	-2.3160	0.190	0.1650	274
13	A**B**C*D*	A***	0.270	-0.474	4.035	-1.9320	0.219	0.4900	260
14	A**B**C*D*	B***	0.295	0.124	3.986	-2.5550	0.265	1.0640	265

Рух симплексу в факторному просторі графічно зображено на рис. 8.10. Вдало обрана завдяки експертним оцінкам вихідна область планування (початковий симплекс), дозволила при мінімальній кількості плавок швидко досягти бажаного ефекту – межа міцності чавуну, що має комплекс Секв-Cr-Cu = (0.304–4.065–0.252)%, складала 285 МПа.

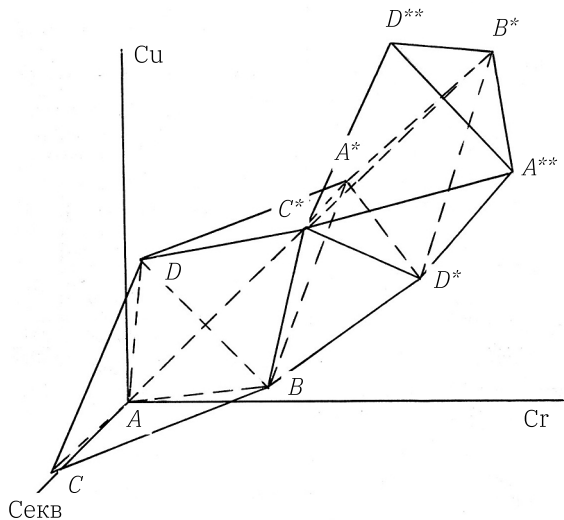


Рис. 8.10 – Переміщення симплексу у факторному просторі Секв-Cr-Cu

Як вже зазначалося вище, у багатьох випадках оптимальні параметри технологічного процесу знаходяться поза зоною технологічно можливих режимів або меж можливостей обладнання. Тому необхідно враховувати наявні в процесі обмеження, якими можуть бути конструктивні можливості обладнання або технологічні режими, що вводяться в цьому процесі з якихось практичних міркувань. У такому разі в результаті експериментальної оптимізації знаходять так звані субоптимальні значення вхідних змінних, які забезпечують отримання найкращих у вибраному сенсі значень вихідної змінної з урахуванням обмежень. Для знаходження використовується метод гребеневого аналізу.

Гребневий аналіз («Рідж-аналіз») полягає в наступному.

Вихідними для проведення аналізу є опис технологічного процесу математичною моделлю у вигляді полінома. У координатах « x_1-x_2 » будується поверхня відгуку, що є графічним описом впливу вхідних змінних на параметр оптимізації. Потім у цих координатах будується умовний циліндр з радіусом r . Лінія перетину поверхні відгуку та поверхні циліндра даного радіусу розгортається на площину, і на ній визначаються точки мінімуму та максимуму. Процедура пошуку субоптимальних значень описується параметрично:

$$\begin{cases} x^*(\lambda) = (\lambda I - A)^{-1} a, \\ r^*(\lambda) = \sqrt{x^{*T} x^*}, \\ y^*(\lambda) = a_0 + 2a^T x^* + x^{*T} A x^*, \end{cases} \quad (8.55)$$

де $x^*(\lambda)$ – матриця субоптимальних значень вхідних змінних у нормованому вигляді, що залежать від параметра λ ;

$x^{*T}(\lambda)$ – транспонована матриця субоптимальних значень вхідних змінних;

$r^*(\lambda)$ – радіус кола, що обмежує область вхідних змінних;

I – одинична матриця;

a_0, a, A – матриці оцінок коефіцієнтів;

a^T – транспонована матриця оцінок коефіцієнтів при лінійних членах.

Два останні рівняння описують аналітично гребневі лінії, звідки й назва методу.

Система (8.55) після перетворень дозволяє отримати зручні для практики розрахункові формули:

– для визначення субоптимальних значень вхідних змінних

$$x_i^* = \frac{a_i}{2\lambda}; \quad (8.56)$$

– для визначення радіусу умовного циліндру, що описує обмеження

$$r = \sqrt{r^2}, \quad r^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i}{2\lambda} \right)^2; \quad (8.57)$$

– для визначення оптимального значення вихідної змінної

$$y^* = a_0 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{2\lambda_i} \quad (8.58)$$

Графічна інтерпретація суті гребеневого аналізу показана на рис. 8.11.

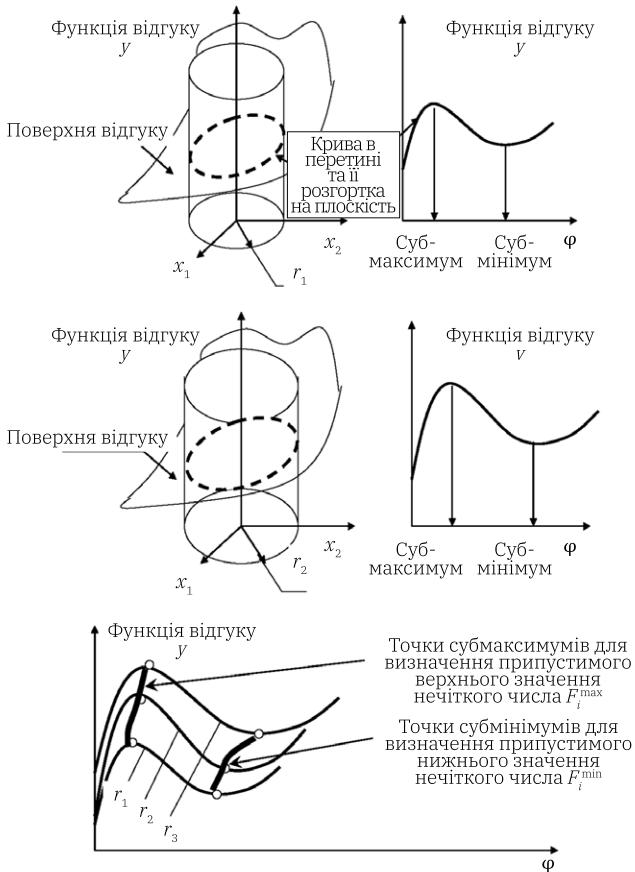


Рис. 8.11 – Реалізація процедури рідж-аналізу

Нижче наведено приклад застосування гребеневого аналізу. Мета дослідження полягала у побудові математичної моделі твердості конструкційного чавуну за даними серійних плавок у факторному просторі «С – Секв» у діапазонах С = (3.42–3.57)% та Секв = (4.2–4.4)%.

Вхідна змінна «вміст вуглецю (С)» позначалася через x_1 , вхідна змінна «вуглецевий еквівалент (Секв)» позначалася через x_2 .

За допомогою МНК розраховано значення оцінок коефіцієнтів рівнянь регресії виду (8.27):

$$A = \begin{pmatrix} 216.934 \\ -11.7595 \\ 1.057318 \\ 2.341327 \\ 4.389574 \\ -37.0113 \end{pmatrix}.$$

На рис. 8.12–8.14 представлено графічне рішення задачі гребеневого аналізу отриманої поверхні відгуку $HV = HV(C, \text{Секв})$, аналітично описуваного рівнянням регресії виду (8.27), розраховані коефіцієнти у якому представлені вище як компоненти матриці A .

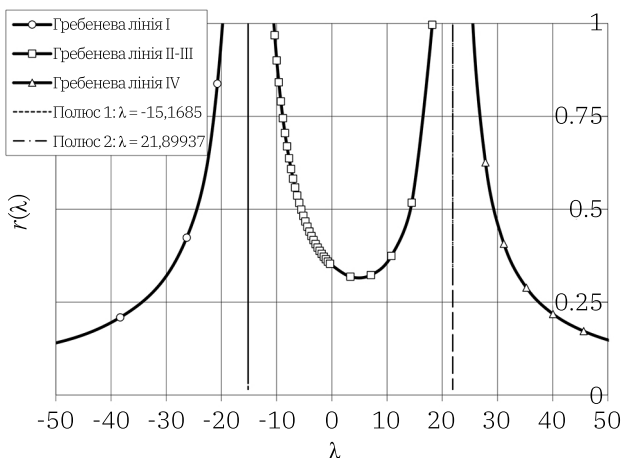


Рис. 8.12 – Залежність $r = r(\lambda)$

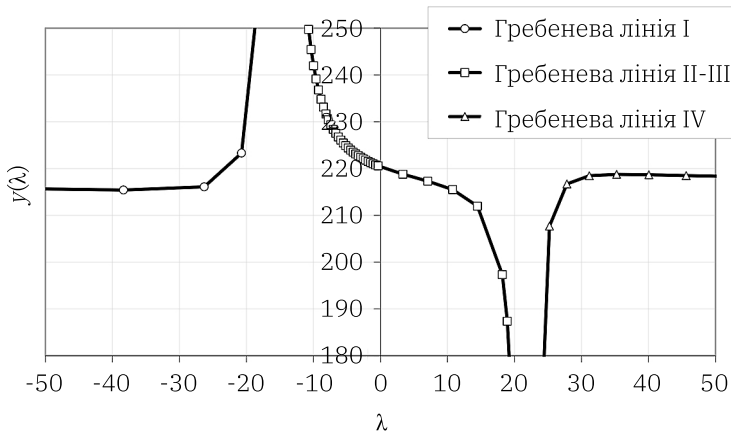


Рис. 8.13 – Залежність $y = y(\lambda)$

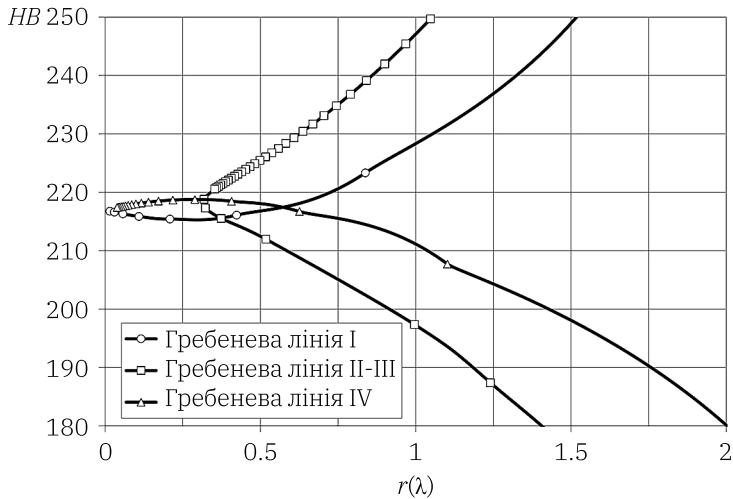


Рис. 8.14 – Залежність $y = y(r)$

З отриманих результатів гребеневого аналізу можна зробити практичні висновки.

Якщо за обмеження, що накладається, обрати діапазон області планування $C = (3.42-3.57)\%$ та Секв = $(4.2-4.4)\%$ (в нормованому вигляді $[-1;1]$), що відповідає значенню $r = \sqrt{2} = 1.414$, то можливе існування кількох субоптимальних рішень. Вони визначаються як точки перетину гребневих ліній та обмеження $r = 1.414$. У цьому завданні мінімізації твердості немає і діапазон НВ = 180–250 задовольняє вимогам до якості, заданим умовами виробництва. Якщо пріоритетом є мінімізація твердості, то субоптимальне рішення перебуває як точка перетину обмеження $r = 1.414$ та нижньої гілки гребневої лінії II–III. Це свідчить про багатоваріантність одержуваних рішень, вибір найкращого з яких визначається вимогами умов виробництва.

Очевидно, що має місце безліч субоптимальних рішень, які задаються першим рівнянням системи (8.55). Для випадку, коли вимоги НВ = 180–250 є достатніми, такі рішення у нормованому вигляді наведено на рис. 8.15, а натуральному на рис. 8.16.

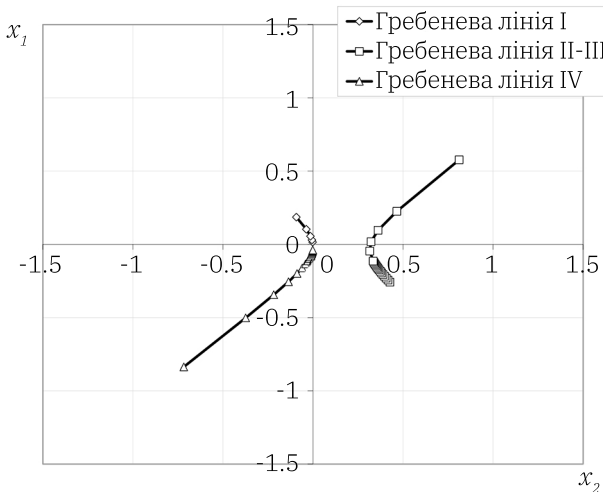


Рис. 8.15 – Множина субоптимальних рішень щодо визначення значень вхідних змінних, що задовольняють вимогам НВ = 180–250 (вхідні змінні задані у нормованому вигляді)

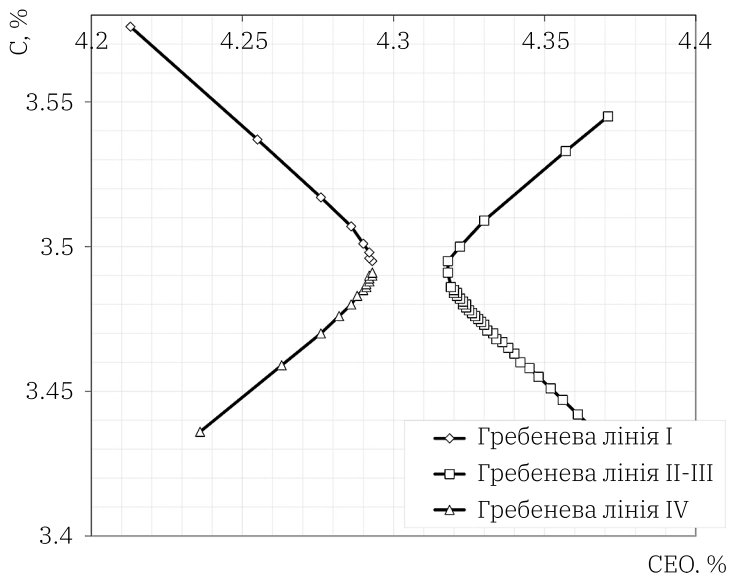


Рис. 8.16 – Номограма, що описує множину субоптимальних рішень для дослідженої області значень вхідних змінних у натуральному вигляді, що задовольняють вимоги $NB = 180\text{--}250$

Канонічне перетворення поверхні відгуку.

Суть цього методу експериментальної оптимізації полягає у наступному:

1. Визначення координат стаціонарної точки x^* шляхом вирішення системи лінійних рівнянь:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^* \\ \vdots \\ x_n^* \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}. \quad (8.59)$$

2. Обчислення значення цільової величини у стаціонарній точці

$$y^* = a_0 + 2a'x^* + x^{*'}Ax^*. \quad (8.60)$$

3. Визначення n власних значень $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$:

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = (-\lambda)^n + P_1 \lambda^{n-1} + \dots + P_n = 0. \quad (8.61)$$

4. Запис рівняння поверхні відгуку в канонічній формі

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2. \quad (8.62)$$

Таким чином, в результаті перенесення та повороту осей та переходу від системи координат $(x_1; x_2)$ в систему координат $(\xi_1; \xi_2)$ забезпечується перетворення вихідного рівняння поверхні відгуку

$$y(x) = a_0 + 2a'x + x'Ax, \quad (8.63)$$

до канонічного вигляду

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2. \quad (8.64)$$

Зв'язок між старою та новою системою координат визначається рівнянням

$$x = x^* + B\xi, \quad (8.65)$$

де B – матриця повороту, $B^T B = I$, а різниця між значеннями вихідної змінної довільної і стаціонарної точки описується рівнянням

$$y(\xi) - y^* = \xi' L \xi. \quad (8.66)$$

Реалізацією процедури 1–4 для розглянутого вище прикладу з аналізом поверхні відгуку НВ = НВ(С, Секв) отримано наступні значення: $\lambda_1 = -15.1685$, $\lambda_2 = 21.89937$. Це означає, що рівняння, що описує поверхню відгуку в канонічній формі, має вигляд

$$y - 217 = -15.1685 \xi_1^2 + 21.89937 \xi_2^2. \quad (8.67)$$

Оскільки співвідношення власних чисел за величиною та знаком визначають вид поверхні відгуку та $|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 < 0, \lambda_2 > 0$, поверхня відгуку є гіперболічним параболоїдом (рис. 8.17).

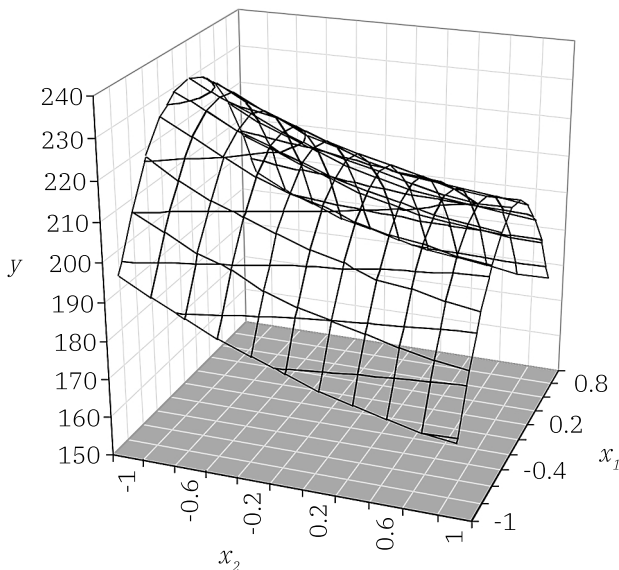


Рис. 8.17 – Поверхня відгуку, що описує розподіл значень твердості конструкційного чавуну в факторному просторі С – Секв (вхідні змінні в нормованому вигляді)

На підставі проведеного аналізу встановлено, яким має бути вуглецевий еквівалент для різного вмісту вуглецю. Це дозволяє визначати кількість кремнію та марганцю, що вносяться феросплавами, для забезпечення заданої твердості чавуну.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до самостійної роботи з курсу «Автоматизація металургійного виробництва», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи». Харків: НТУ «ХП», 2025. 36 с.
2. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Автоматизація металургійного виробництва», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи». Харків: НТУ «ХП», 2025. 36 с.
3. Дьомін Д. О., Пензєв, П. С. Автоматизовані системи управління. Харків: ТОВ "ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП", 2024. 130 с. <https://doi.org/10.62067/978-617-8242-09-1>
4. Domin D. Development of «whole» evaluation algorithm of the control quality of "cupola – mixer" melting duplex process // Technology Audit and Production Reserves. 2019. Vol. 3, Issue 1 (47). P. 4–24. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.174449>
5. Domin D. Experimental and industrial method of synthesis of optimal control of the temperature region of cupola melting // EUREKA: Physics and Engineering. 2023. Issue 2. P. 68–82. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002804>
6. Nikolaiev D. Construction of a cupola information profile for further modeling for the purpose of controlling melting processes // ScienceRise. 2024. Issue 2. P. 3–14. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2024.003674>
7. Domin D. Optimization of parameters of the cupola melting by the criterion of the maximum cast iron temperature // EUREKA: Physics and Engineering. 2025. Issue 2. P. 158–165. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003712>
8. Дьомін Д. О. Оптимальне керування електродуговою плавкою в дуплекс-процесах. Харків: ТОВ «ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП», 2026. 160 с. <https://doi.org/10.62067/978-617-8242-10-7>
9. Domin D. Synthesis process control elektrodugovoy smelting iron // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2012. Vol. 2, Issue 10 (56). P. 4–9. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.3881>

10. Domin D. Synthesis of optimal temperature regulator of electroarc holding furnace bath // Scientific Bulletin of National Mining University. 2012. Issue 6. P. 52–58.
11. Domin D. Constructing the parametric failure function of the temperature control system of induction crucible furnaces // EUREKA: Physics and Engineering. 2020. Issue 6. P. 19–32. <http://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001489>
12. Classification rule for determining the temperature regime of induction gray cast iron / Stanovska I., Duhanets V., Prokopovych L., Yakhin S. // EUREKA: Physics and Engineering. 2021. Issue 1. P. 60–66. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001604>
13. Integrated approach to the development of the effectiveness function of quality control of metal products / Dymko I., Muradian A., Leheza Y., Manzhula A., Rudkovskiy O. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 3 (90). P. 26–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.119500>
14. Determination of conditions for preventing chemical wear of induction furnace lining in the “cupola furnace – induction furnace” duplex process / Nikolaev D., Selivorstov V., Dotsenko Y., Osypenko I., Kuznetsow E. // Technology Audit and Production Reserves. 2025. Vol. 6, Issue1(86).P.43–47. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.345473>
15. Baskakov D. Definition of the rational technological mode of low-pressure casting // ScienceRise. 2025. Issue 1. P. 11–17. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2025.003799>
16. Domin D. Investigation of structural cast iron hardness for castings of automobile industry on the basis of construction and analysis of regression equation in the factor space “carbon (C) – carbon equivalent (Ceq)”. Technology Audit and Production Reserves. 2018. Vol. 3, Issue1(41).P.29–36. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.109097>
17. Domin D. Strength analysis of lamellar graphite cast iron in the «carbon (C) – carbon equivalent (Ceq)» factor space in the range of C = (3,425-3,563) % and Ceq = (4,214-4,372) % // Technology Audit and Production Reserves. 2017. Vol. 1, Issue 1 (33). P. 24–32. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.93178>

Навчальне видання

ДЬОМІН Дмитро Олександрович
Доктор технічних наук, професор

**ТЕХНОЛОГІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ
МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА**

Навчальний посібник
для магістрів
денної та заочної форми навчання
За спеціальністю
G10 Металургія

Підписано до друку 25.03.2026 р. Гарнітура IBM Plex Serif
ТОВ «ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП»
вул. Шатилова дача, 4, м. Харків, Україна, 61165
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
No. 7582 від 01.02.2022
Електронна версія