

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи
з навчальної дисципліни «Автоматизація металургійного виробництва»,
для студентів спеціальностей 136 – Металургія,
за освітньою програмою
«Металургійні процеси та системи»

Харків 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи
з навчальної дисципліни «Автоматизація металургійного виробництва»,
для студентів спеціальностей 136 – Металургія,
за освітньою програмою
«Металургійні процеси та системи»

Затверджено
редакційно-методичною
радою університету,
протокол №2 від 26.06.2025

Харків 2025

Методичні вказівки до самостійної роботи з навчальної дисципліни «Автоматизація металургійного виробництва», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХПІ», 2025. – 36 с.

Укладачі: Д. О. Дьомін

Рецензент проф. Акімов О.В.

Кафедра ливарного виробництва

Харків 2025

ТЕМА 1: Автоматизація доменного процесу

1.1. Схеми автоматизації доменної плавки

Доменна піч – це піч шахтного типу, що працює за принципом протитечії: згори донизу рухаються холодні шихтові матеріали, а на зустріч 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 як CO і CO₂. В результаті доменного процесу виходять продукти плавки: чавун, шлак, колошниковий (доменний) газ та колошниковий пил.

Перед завантаженням у доменну піч пилювату шихту зволожують і на гуркітах відсівають коксову дрібницю. Завантаження шихти в піч повністю механізовано. Скиповий витяг або конвеєр піднімає шихту на колошник, потім шихта надходить у приймальну вирву двоконусного засипного апарату. Для розподілу шихти за перерізом колошника передбачений розподільник шихти, що обертається.

Дуття подається в піч повітродувними машинами, встановленими на пароповітродувній станції (ППС). Перед подачею в піч дуття нагрівають у регенеративних повітронагрівачах, зволожують паром до заданого вмісту вологи і збагачують киснем. Зазвичай у доменних печах використовують комбіноване дуття, що містить у своєму складі природний газ.

Доменний газ в системі газоочищення очищають від пилу в пиловловлювачах (грубе очищення) і водою в скруберах високого та низького тиску. Після скрубера високого тиску газ пропускають через краплеуловлювач для осушення.

Чавун і шлак із відповідних льоток по жолобах надходять у ковші та в них транспортуються до місця використання. Для охолодження печі та очищення газу використовується вода.

Основним завданням при керуванні доменним процесом є стабілізація теплового стану печі, що виявляється у сталості продуктивності печі, складу та температури продуктів плавки. Головними причинами коливань теплового стану є зміни якості шихти, відхилення температури і складу дуття від заданих значень, порушення в розподілі матеріалів по перерізу печі. Сильний вплив на тепловий стан печі здійснює вологість коксу (оскільки кокс дозують за масою), зміст і рівень окисленості заліза в шихті. Тому саме ці обурення мають бути в першу чергу компенсовані при ручному або автоматичному керуванні ходом доменної печі.

Доменна піч – це об'єкт регулювання з великою інерційністю. Так, при зміні складу шихти перехідний процес триває $(2-3)\tau_0$, а при зміні параметрів дуття $(1-2)\tau_0$, де τ_0 – час знаходження матеріалів у печі, що дорівнює 5–6 год.

Контур схеми функціональної автоматизації доменного процесу наведена на рис. 1.1, а контур схеми функціональної автоматизації роботи повітрянагрівачів наведена на рис. 1.2.

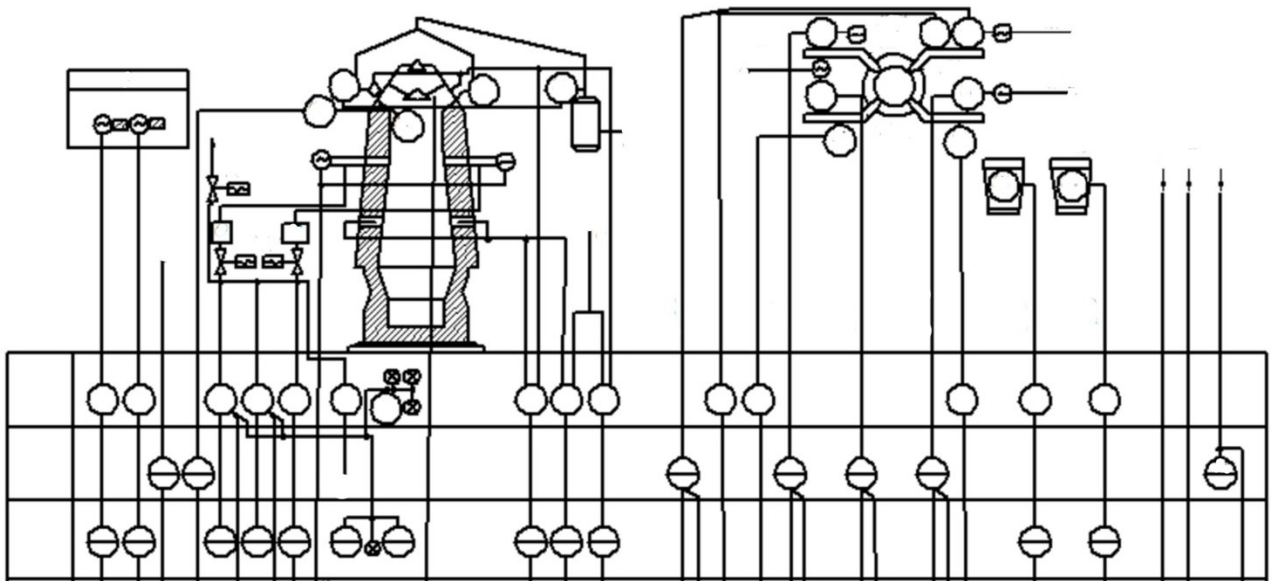


Рис. 1.1. Контур функціональної схеми автоматизації доменної плавки

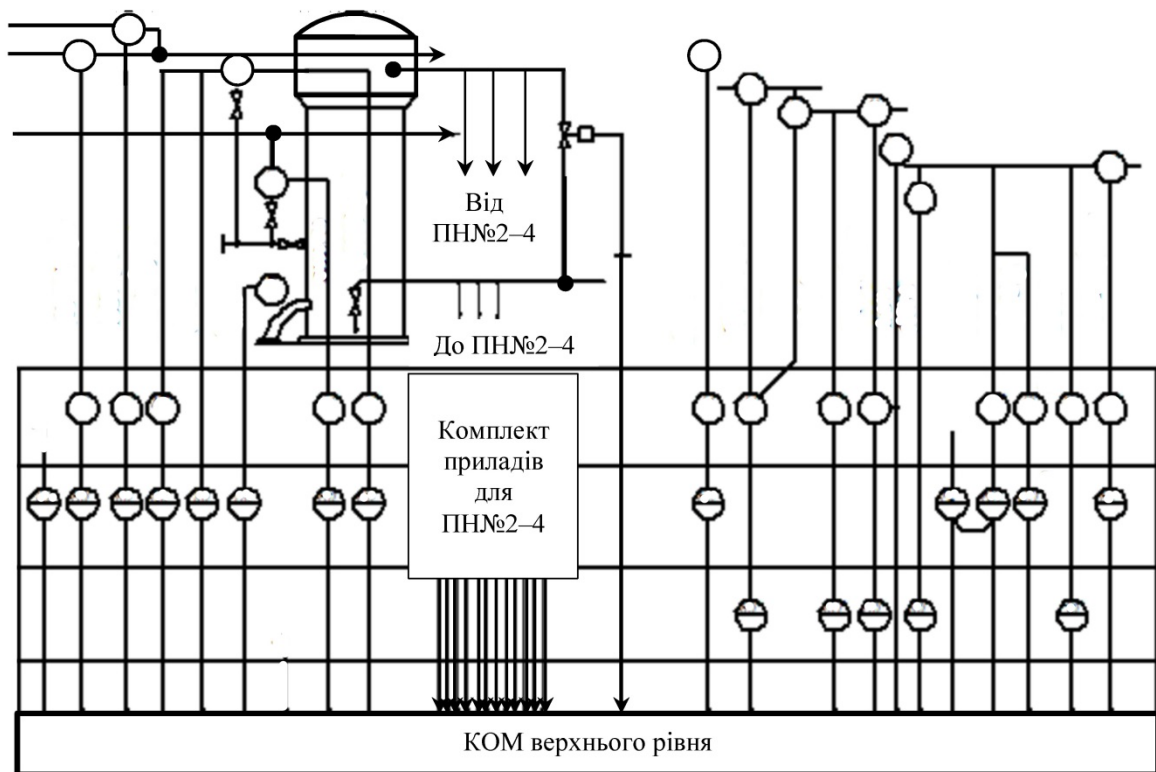


Рис. 1.2. Контур функціональної схеми автоматизації роботи повітрянагрівачів

На доменній печі та її повітронагрівачах здійснюють автоматичний контроль та регулювання ряду технологічних та теплотехнічних 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 радіусом колошника, для чого застосовують газовідбірну трубу, що пересувається за допомогою лебідки. Це так званий комбінований зонд, за допомогою якого вимірюється вміст CO , CO_2 та H_2 в газі та температури газу та шихти.

Водоохолоджувані 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 пірометр.

Для контролю теплового стану низу печі за допомогою термопар занурення на чавунному та шлаковому жолобах вимірюють температуру чавуну та шлаку. Механізовані термопари занурення мають дистанційне або автоматичне керування. Термоелектроди термопар занурення виконані з тугоплавких металів ($\text{W-Mo} + 0,5\% \text{ Al}$) і мають захисний наконечник із силікованого графіту (композиція SiC , C , Si). Робочий кінець термопар 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. 1.3.

Витрата дуття по фурм вимірюють діафрагмами або іншими датчиками змінного перепаду. Зокрема, можуть бути використані звужувальні такі пристрої: нормальна діафрагма (рис. 1.4 а), нормальне сопло Вентурі (рис. 1.4 б) та нормальна труба Вентурі (рис. 1.4 в). Найбільшу втрату тиску має діафрагма, найменшу – труба Вентурі.

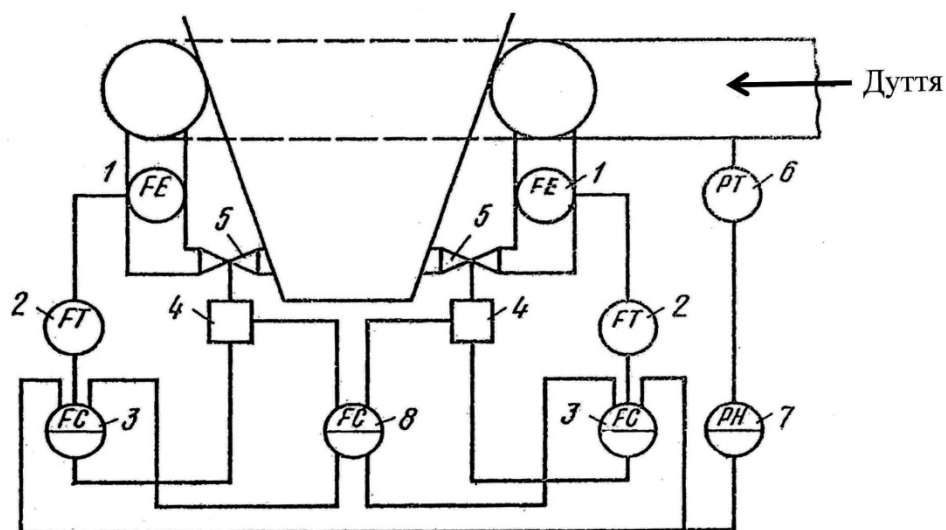


Рис. 1.3. Схема системи автоматичного розподілу дуття по фурмах

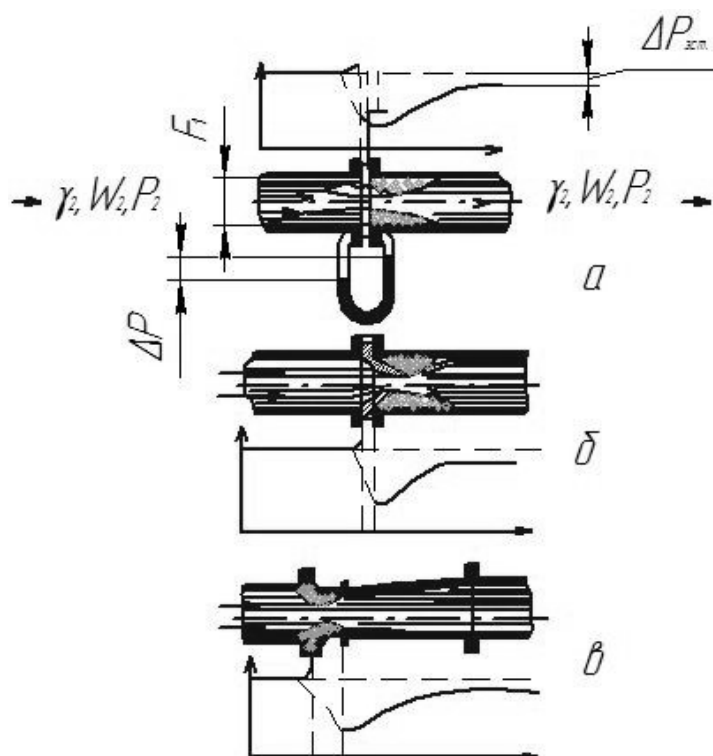


Рис. 1.4. Схема до звужувального пристрою: а – нормальна діафрагма, б – нормальне сопло Вентурі, в – нормальна труба Вентурі: $W_{1,2}$ – швидкість потоку рідини, $F_{1,2}$ – площа потоку, ρ_1 – щільність рідини, $P'_{1,2}$ – тиск рідини у трубопроводі до звуження потоку та у його найвужчому місці, ΔP – 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, що звужує, виявляється більше, ніж у місці звуження струменя.

Перепад тисків на звужуючому пристрої вимірюється диференціальними манометрами найрізноманітніших конструкцій (U-образні, дзвонові, кільцеві, мембранні, сильфонні).

1.2. Повітронагрівачі та контрольовані параметри процесу плавки

Повітронагрівачі призначені для підігріву повітря, що вдуваються в піч. Нагрівання повітронагрівачів зазвичай здійснюється при постійній витраті газу, а температуру купола регулюють, змінюючи витрату повітря (шляхом розведення продуктів згоряння надмірною кількістю повітря). Дослідним шляхом на кожному повітронагрівачі визначають ступінь відкриття регулюючого органу, подачу вентиляторного повітря, при якому досягається максимальна швидкість підйому температури купола при заданій витраті газу. У такому режимі палик повітронагрівача працює на початку періоду нагрівання. Після досягнення температурою купола заданого значення регулятор нагрівання повітронагрівача збільшує витрату повітря.

Схема управління температурою гарячого дуття при різних режимах роботи повітронагрівачів представлена на рис. 1.5.

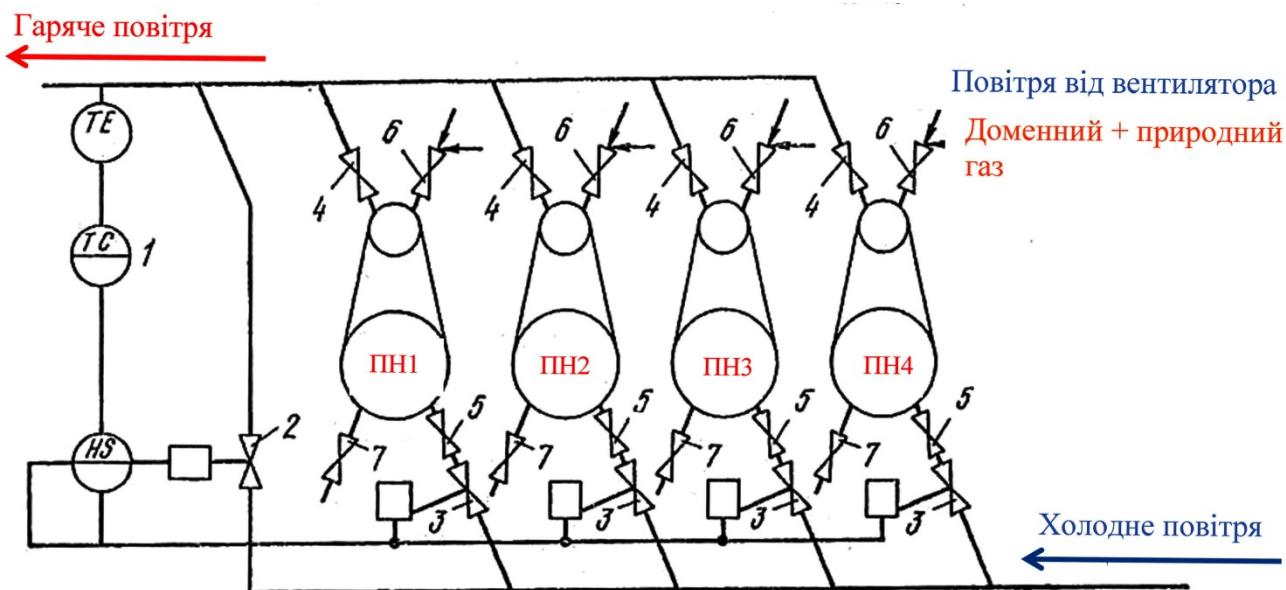


Рис. 1.5. Схема управління температурою гарячого дуття при різних режимах роботи повітронагрівачів: 1 – регулятор температури, 2 – клапан змішувальний, 3 – клапан, 4 – клапан гарячого дуття, 5 – клапан холодного дуття, 6 – відокремлювальні клапани газу та горілки, 7 – клапан димовий

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 дуття між повітронагрівачами при попарно-паралельному режимі роботи за допомогою клапанів 3.

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

При попарно-паралельному режимі два повітронагрівачі завжди знаходяться на дутті і два на нагріванні. Витрати повітря через повітронагрівачі непостійні. Спочатку, коли повітронагрівач включається на дуття, витрата повітря через нього мінімальна, а потім у міру охолодження попереднього повітронагрівача дуття між ними перерозподіляється за допомогою клапанів 3 так, щоб підтримувати постійну температуру гарячого дуття. Як тільки витрата дуття через охолоджений повітронагрівач зменшується до нуля, він відключається, ставиться на нагрівання і підключається наступний повітронагрівач. Далі цикл повторюється. Можливий такий попарно-паралельний режим, при якому температура гарячого дуття підтримується за допомогою змішувального клапана 2, а клапани 3 повністю відкриті.

При роботі з перекриттям (змішаний або комбінований режим) спочатку ставляться на дуття два повітронагрівачі, потім повністю остиглий перемикається на нагрівання, а на дуття залишається один, гарячіший, повітронагрівач. При достатньому охолодженні другого повітронагрівача до нього паралельно підключається гарячий, третій, повітронагрівач, 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 дуття 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 повітронагрівачів на дутті.

Параметри, що контролюються та засоби контролю наведені в табл. 1.1, а параметри, що регулюються – в табл. 1.2.

Таблиця 1.1 – Контрольовані параметри доменного процесу та засоби контролю

Контрольований параметр	Засоби контролю
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	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	Манометр (тиск газу на 0,15–0,25 МПа більше тиску дуття)
Температура в фурменній зоні (1400–1800°C)	Радіаційні пірометри або тепломіри повного випромінювання в комплекті з електронним потенціометром
Температура периферійних газів над рівнем засипу та під нею	Термопари гр. ХА в кладці печі, багатоточкові електронні потенціометри
Температура та склад газу за радіусом колошника	Термопара гр. ХА або газозабірна труба, що рухаються лебідкою
Температура колошникового газу по 4-х газовідведення печі (150–400 °C)	Термопари гр. ХА в комплекті з багатоточковим потенціометром
Температура чавуну (1450–1550 °C) і шлаку (1500–1600 °C) на випуску	Термопари занурення на чавунному та шлаковому жолобах
Склад колошникового газу (16–20% CO ₂ , 23–27% CO; 8–12% H ₂)	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	Термометри опору у комплекті з електронними мостами; термістори
Температура кладки	Термопари гр. ХА, багатоточкові електронні потенціометри
Витрати та тиску охолоджувальної води, пари, стиснутого повітря	Манометри та дифманометри в комплекті з діафрагмами

Таблиця 1.2 – 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 повітродувної машини
	Вміст кисню (21–27%)	Газоаналізатор на O ₂	Зміна кількості кисню, що всмоктується повітродувною 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

Контрольні запитання

1. В чому полягає суть процесу доменної плавки.
2. Що використовується в якості шихти та палива.

3. Які гази переважно входять до складу газової фази, що утворюється в процесі плавки.
4. Що є продуктами доменної плавки.
5. Які параметри завантаження печі мають контролюватися та як здійснюється керування цими параметрами.
6. Які параметри дуття мають контролюватися, який агрегат для цього використовується та як здійснюється керування цими параметрами.
7. Що є основним завданням при керуванні доменним процесом та з чим це пов'язано.
8. Що є головними причинами коливань теплового стану доменної печі.
9. Чи передбачена система охолодження печі та які елементи печі підлягають охолодженню.
10. Яка інерційність доменної печі як об'єкту керування.

Література

1. Автоматизовані системи управління: навч. посіб. / Д. О. Дьомін, П. С. Пензєв. – Харків: ТОВ "ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП", 2024. – 130 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» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХП», 2025. – 36 с.
3. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Інноваційні основи металургії. Екологія та охорона праці в ливарному виробництві», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХП», 2025. – 30 с.

ТЕМА 2: Схема автоматизації мартенівського процесу

2.1. Загальні відомості

При виплавці сталі в мартенівських печах відбувається випалювання з чавуну кремнію, марганцю, фосфору, сірки і вуглецю. Великі сучасні мартенівські печі працюють на скрап-рудному процесі, при якому металева частина шихти складається з 50–60% рідкого чавуну і 50–40% залізного брухту відповідно. Джерелами кисню для окислення чавуну служать залізна руда, технічний кисень, застосовуваний для продувки ванни через спеціальні зводові фурми; кисень атмосфери печі, що надходить у ванну через шлак. Аналіз продуктів згоряння, проводиться за допомогою автоматичних газоаналізаторів або аналізатора надлишкового кисню.

З точки зору автоматизації мартенівська піч і процес 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 плавки;
- технологічні 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;
- відсутні багато датчиків, необхідних для автоматичного управління мартенівської плавкою (датчики складу металу, шлак та ін.).

Використовують два основних способи управління тепловою потужністю:

- статичне програмне керування,
- динамічне керування.

При статичному програмному керуванні 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. Тобто функцію керування виконує сталевар, а локальні системи автоматики тільки підтримують задані витрати палива. Однак у зв'язку з інтенсифікацією процесів плавки шляхом подачі кисню в факел і в ванну статичне керування все менш задовольняє вимогам забезпечення економічної роботи печей. При збільшенні інтенсивності продувки ванни киснем і скороченні періодів заливки-прогріву шихти коливання температури зводу печі підвищуються до рівня від 1300–1400 до 1800–1900°C. Так само впливають значні коливання вмісту кисню і горючих компонентів у продуктах згоряння. Ця нестаціонарність теплового процесу зумовила застосування динамічного керування, що використовує поточну інформацію і задає керуючий вплив по ходу плавки.

До динамічних систем керування тепловою потужністю можна віднести системи керування обмежуючим фактором, в яких теплова 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. Якщо така ситуація виникає, то теплова потужність починає дискретно або безперервно знижуватися до тих пір, поки параметр не увійде в допустимі межі.

Завдання регулювання горіння в мартенівській печі – це повне спалювання палива всіх видів, включаючи і СО з ванни, в межах робочого простору печі. Контролювати якість спалювання палива можна за аналізом продуктів згоряння, зокрема на O_2 , використовуючи газоаналізатори.

При проектуванні схем регулювання горіння можна рекомендувати використовувати регулювання горіння по співвідношенню палива всіх видів і носіїв кисню та схему регулювання з корекцією по аналізу продуктів згоряння. Провідними параметрами є витрати палива (природного газу і мазуту), введення–витрата вентиляторного повітря, витрата кисню, що подається в факел, і витрата стисненого повітря.

Завдання регулятору співвідношення встановлює сталевар, використовуючи для цього дистанційний задатчик.

Регулювання тиску з корекцією по аналізу продуктів згоряння забезпечує більш повне спалювання палива, дозволяє враховувати, що виділяється з ванни. В цьому випадку застосовують спеціальні коригуючий регулятор, що замінює задатчик співвідношення. Співвідношення задається автоматично в залежності від відхилення вмісту кисню в продуктах згоряння від заданого.

Тиск в робочому просторі мартенівської печі регулюють таким чином, щоб на рівні отворів в робочих вікнах для візуального спостереження («гляделки» на професійному сленгу) надлишковий тиск дорівнював нулю. При цьому під склепінням тиск становить 30–60 Па. Тиск регулюють шиббером, встановленим в загальному боріві перед димовою трубою, або направляючим апаратом димососа котла-утилізатора.

Система автоматичного перекидання клапанів у мартенівській печі служить для обертання насадок регенераторів, дозволяє зменшити час між перекиданнями клапанів, що може здійснюватися 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 поширеною та ефективною є система перекидання клапанів по різниці температур зверху 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 пропорційно до температури гріючої насадки. Перекидання клапанів відбувається після кожного півоберта вихідного валу реле, при цьому інтервал між перекиданнями обернено пропорційний температурі насадки за період нагріву.

2.2. 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;
- відсутні багато датчиків, необхідних для автоматичного керування мартенівської плавкою (датчики складу металу, шлак та ін.).

Схема автоматизації мартенівської плавки представлена на рис. 2.1.

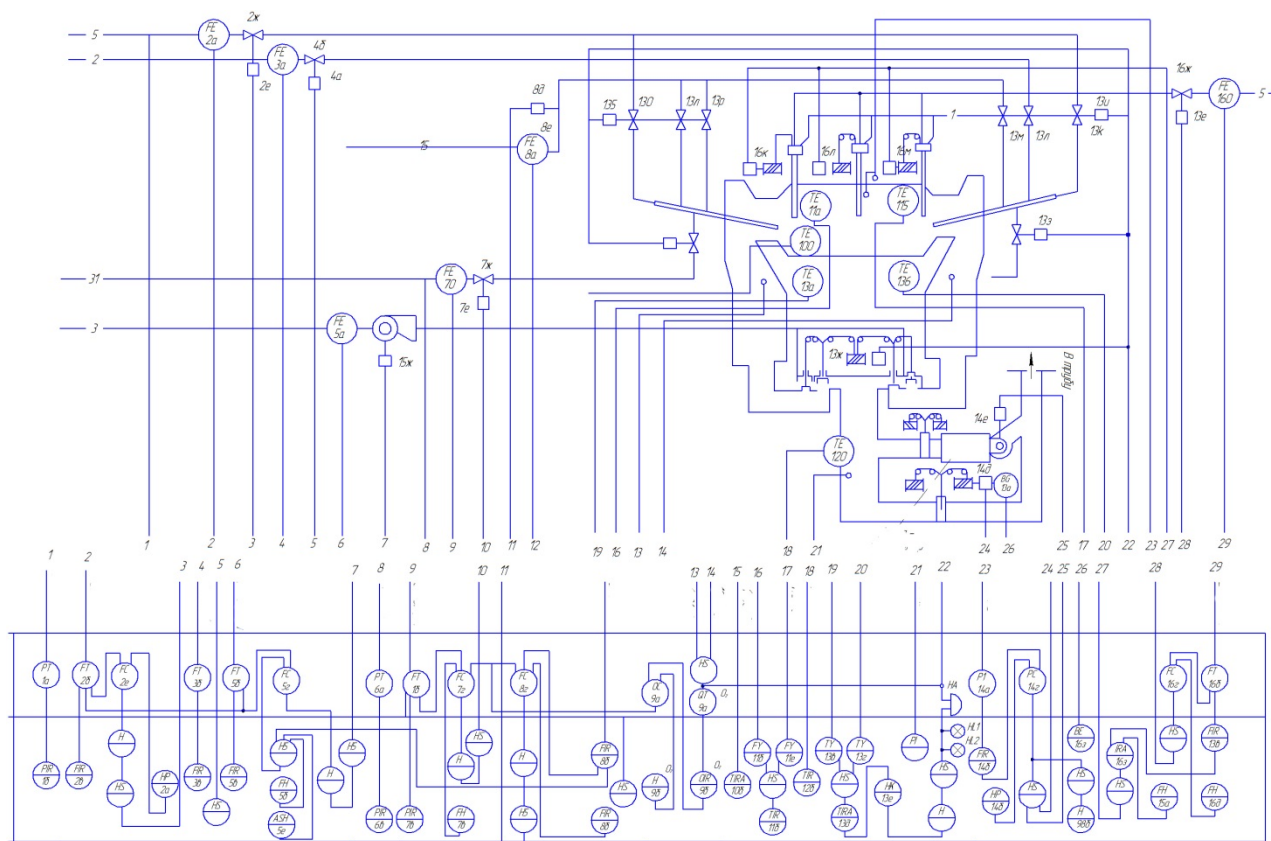


Рис. 2.1. Схема автоматизації мартенівської плавки

Автоматично контрольовані параметри мартенівської плавки наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Автоматично контрольовані параметри мартенівської печі.

Параметр	Засіб контролю	Межа вимірювання
Температура склепіння робочого простору	Радіаційний пірометр, шомпольний термозонд	1400–1800°C
Температура верха насадок регенератора	Радіаційний пірометр	1000–1400°C
Температура рідкого металу	Термопара занурення, термопара безприливної дії	1500–1750°C
Температура в загальній борувій	Термопара хромель-алюмеліова	400–700°C
Витрати газу, мазути, кисня, вентиляторного повітря	Термопара звуження у трубопроводах та дифманометрах	залежить від розмірів печі та інших конструкційних та технологічних факторів
Тиск під склепінням робочого простору	Дзвоновий дифманометр	30–60 Па
Розрідження в загальному боруві	Тягометр	400–1000 Па
Зміст кисня 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 дія 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 навколишнього 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 °С.

Продукти згоряння і додаткові компоненти O_2 і H_2 . Віддушка приймають температуру печі і надходять в вимірювальну камеру, по осі якій розташована диференціальна термопара 7. Її ділянка між спаями 8 і 9 зроблений з платини і є каталізатором. Спай 8 розігрівається, якщо в продуктах згоряння присутні надмірна 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.

2.3. 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 інтенсифікація процесів плавки шляхом подачі кисню в факел і в ванну. При збільшенні інтенсивності продувки ванни киснем і скорочення періодів заливки–прогріву шихти підвищуються коливання температури зводу від 1300–1400 °С до 1800–1900 °С. 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 вплив по ходу плавки.

До динамічним системам управління тепловою потужністю можна віднести системи управління обмежуючим факторам, в яких теплова 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 теплова 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 по співвідношенню палива всіх видів і носіїв кисню та схему регулювання з корекцією по аналізу 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 задатчик.

Регулювання тиску з корекцією по аналізу продуктів згоряння забезпечує більш повне спалювання палива, дозволяє враховувати, що виділяється з ванни. В цьому випадку застосовують спеціальні коригуючий регулятор, що замінює задатчик 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 було дорівнює нулю. При цьому під склепінням тиск становить 30–60 Па. Тиск регулюють шибером, 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, дозволяють зменшити час між перекиданнями клапанів та може формуватися різними способами. Найбільш простою системою автоматичної перекиданні 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 краще відповідає пред'явленим вимогам перекидання по різниці 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.

Контрольні запитання

1. В чому полягає суть процесу мартенівської плавки.

2. Що використовується в якості шихти та палива.
3. Що є джерелами кисню для окислення чавуну.
4. Які особливості мартенівської печі та процесу плавки в ній як об'єкту автоматизації (керування).
5. Які основні параметри печі та процесу плавки мають контролюватися та як здійснюється керування цими параметрами.
6. Які є способи управління тепловою потужністю мартенівської печі.
7. В чому полягає завдання регулювання горіння в мартенівській печі
8. Як регулюють тиск в робочому просторі мартенівської печі.
9. Для чого служить система автоматичного перекидання клапанів у мартенівській печі.
10. Як здійснюється перекидання клапанів в процесі мартенівської плавки.

Література

1. Автоматизовані системи управління: навч. посіб. / Д. О. Дьомін, П. С. Пензев. – Харків: ТОВ "ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП", 2024. – 130 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» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХП», 2025. – 36 с.
3. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Інноваційні основи металургії. Екологія та охорона праці в ливарному виробництві», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХП», 2025. – 30 с.

ТЕМА 3: Автоматизація конвертерного процесу

3.1. Загальні відомості

Киснево-конвертерний процес з верхнім продуванням полягає в продуванні рідкого чавуну киснем, що підводиться до металу згори через сопла водоохолоджуваної форми. При цьому вигорають домішки чавуну: вуглець, кремній, марганець, сірка, фосфор, а продукти реакцій переходять в шлак або газову фазу. При екзотермічних окислювальних реакціях виділяється більше тепла, ніж треба для нагріву сталі до температури випуску, тому вводять охолоджувачі, якими можуть бути сталевий лом або залізна руда. Конвертерний процес протікає дуже швидко, що є його основною перевагою з точки зору досягнення високої продуктивності агрегату, але і створює значні труднощі, що ускладнюють управління плавкою. В ході плавки відсутня безперервна інформація про склад металу, і тому основною трудностю є припинення продування при заданому вмісті вуглецю. Швидкість вигорання вуглецю настільки велика що, 1 хвилина відповідає переходу до сталі іншої марки. Додаткова трудність полягає в тому, що до моменту припинення продування температура металу також має бути в заданих межах.

Використовують локальні системи керування – без застосування ЕОМ автоматичне регулювання зводиться до підтримки заданої витрати кисню, регулюванню 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 в 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, падіння тиску при витраті охолоджуваної фурми води, а також при збільшенні температури води при сливі з фурми вище певного рівня. Таке збільшення може свідчити 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 в 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 змісту в металі вуглецю. 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, визначуваної по складу 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.

3.2. Схема автоматизації конвертерного процесу

Схема автоматизації конвертерного процесу представлена на рис. 3.1.

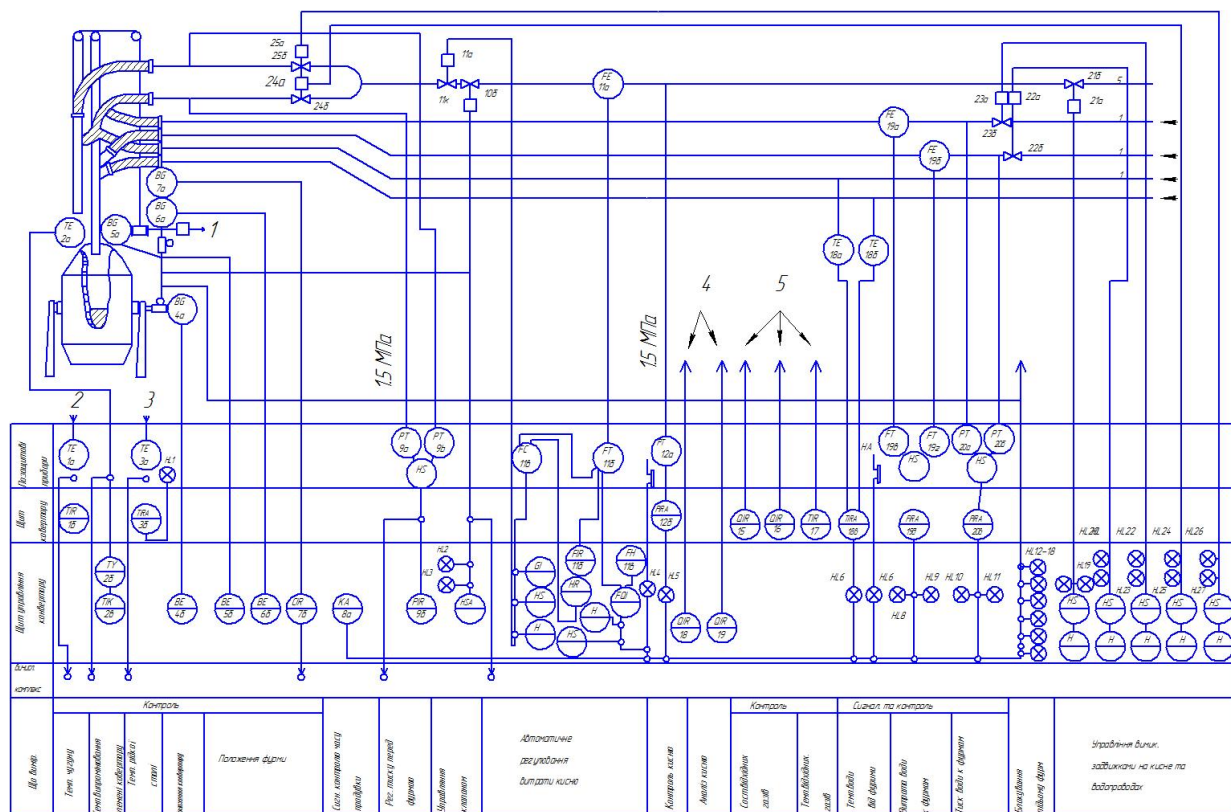


Рис. 3.1. Схема автоматизації конвертерної плавки

Основними параметрами керування є кількість кисню, що подається в конвертер, та час відсічки кисню. Зважаючи на технічну складність формування

зворотного зв'язку, для керування процесом використовують математичні моделі. Шукану кількість можна отримати, наприклад, за рівнянням:

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

де 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 CO₂. Вона може бути знайдена за рівнянням регресії, отриманим по даних статичної обробки плавок поточного виробництва.

Контрольні запитання

1. В чому полягає суть процесу конвертерної плавки.
2. Що є джерелами кисню для окислення чавуну.
3. В чому полягає складність керування конвертерним процесом.
4. В чому полягає суть статичного керування конвертерним процесом.
5. В чому полягає суть динамічного керування конвертерним процесом.

Література

1. Автоматизовані системи управління: навч. посіб. / Д. О. Дьомін, П. С. Пензєв. – Харків: ТОВ "ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП", 2024. – 130 с.
2. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Інноваційні основи металургії. Екологія та охорона праці в ливарному виробництві», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХПІ», 2025. – 30 с.

склі. Печі з кислою футеровкою заправляють меленим кварцитом або чистим кварцовим піском, при необхідності також замішаними на рідкому склі. Операції заправки зазвичай здійснюють за 5–10 хв.

Залежно від марки сталі, наявності на шихтовому дворі сталевих вуглецевих брухту і легованих відходів встановлюють номер стандартної шихти. При нормальному стані печі порядок заправки в баддю і, отже, в піч, такий: безпосередньо на подіну подають 20...30% дрібної компактної 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 плавлі 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. Основною перевагою основної футеровки є можливість проведення глибоких дефосфорації та десульфурзації, а також дифузійного розкислення під безжелезистими білими шлаками. У дугових печах з основною футеровкою

виплавають 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 залізну 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 окиснення. 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 вміст вуглецю, що забезпечує відповідність заданому аналізу з урахуванням присадок у відновлювальний період. Окисний процес інтенсифікують введенням технічного газоподібного кисню (вміст його не менше 99%, вологи не більше 1 г/м³). 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 і вертикально пересувається до поверхні ванни. Окиснення газоподібним киснем значно збільшує швидкість вигорання вуглецю. Якщо за окисненні рудою вона дорівнює 0,3–0,6% на годину, то за окисненні киснем – понад 1,5%. Вміст фосфору наприкінці окиснення 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 афективним 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, плавицевого 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. Беззалізистий шлак забезпечує активну дифузію 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 викликає 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% CaC_2). 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 кислим футеруванням

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 відображають енергію дуг на стіни та склепіння. Нагрів металу в печах з

кислою футеровкою здійснюється значно швидше, ніж в основних, а стійкість стін і склепінь приблизно вдвічі вище.

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 десульфуріяція, 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 він 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 кислою футеровкою зазвичай проводять кремневідновлювальним процесом, який відбувається переважно за рахунок відновлення вуглецем кремнезему шлаку і футерування. Останнє обумовлено тим, що металева ванна знаходиться наче в оболонці кремнекислоти. 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.

4.2. Автоматизація процесу електродугової плавки

Схема автоматизації електродугової плавки представлена на рис. 4.2. При виплавці сталі задля інтенсифікації процесу плавки здійснюється додаткова подача у ванну кисню. На рис. 4.3 показано функціональну схему автоматизації подачі кисню в електродугову піч.

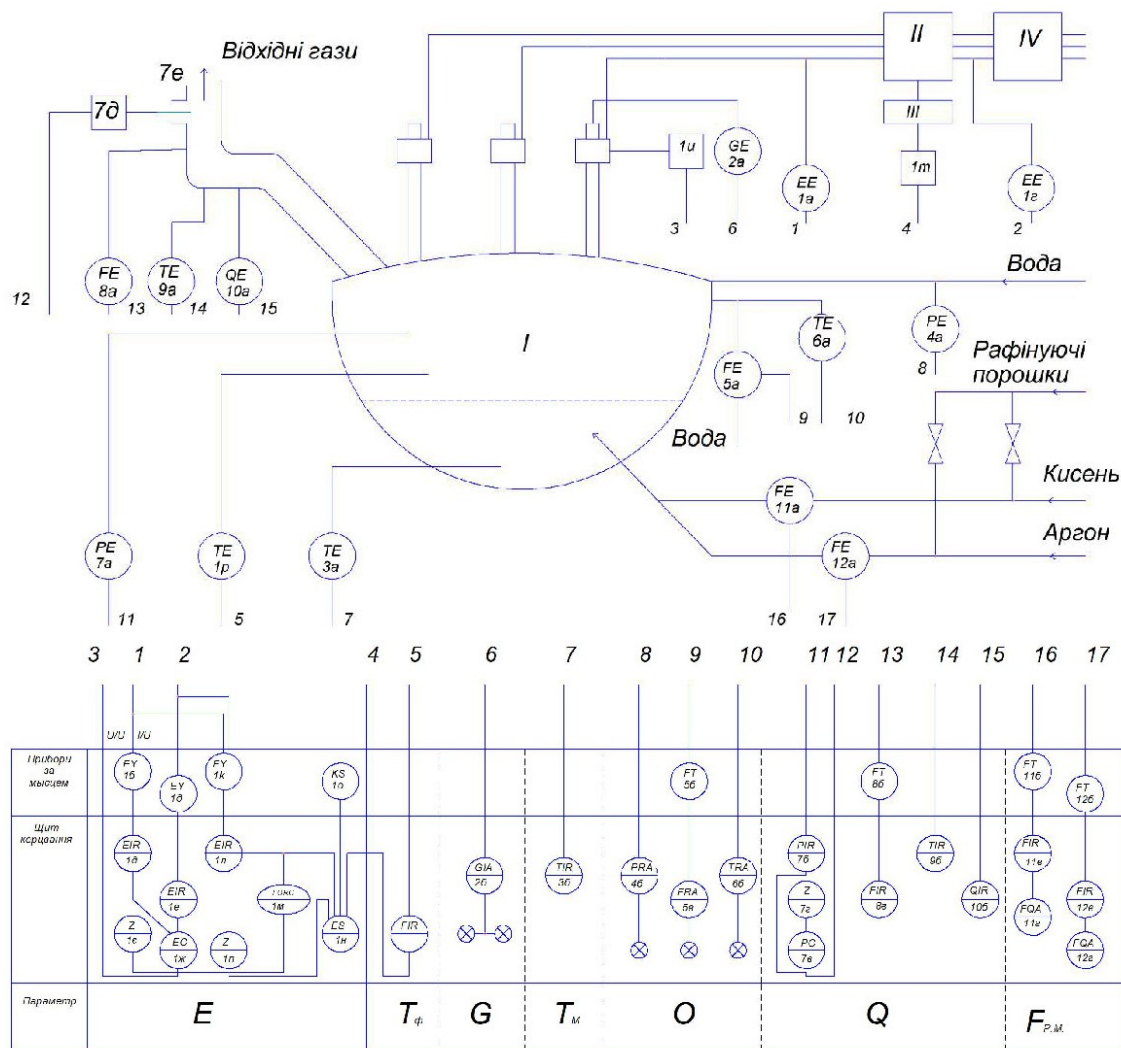


Рис. 4. 2. Схема автоматизації електродугового процесу

Функціональна схема автоматизації продувки передбачає наявність декількох контурів контролю та регулювання параметрів процесу, що автоматизується.

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 сигналізуючі, що дають інформацію про наявність тиску, та засіб керування положенням заслінки, що виконує функцію регулювання через виконавчий механізм 1 а, б.

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

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

Контур 4 – регулювання витрати кисню. Первинний вимірювальний 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 перекидванню 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.

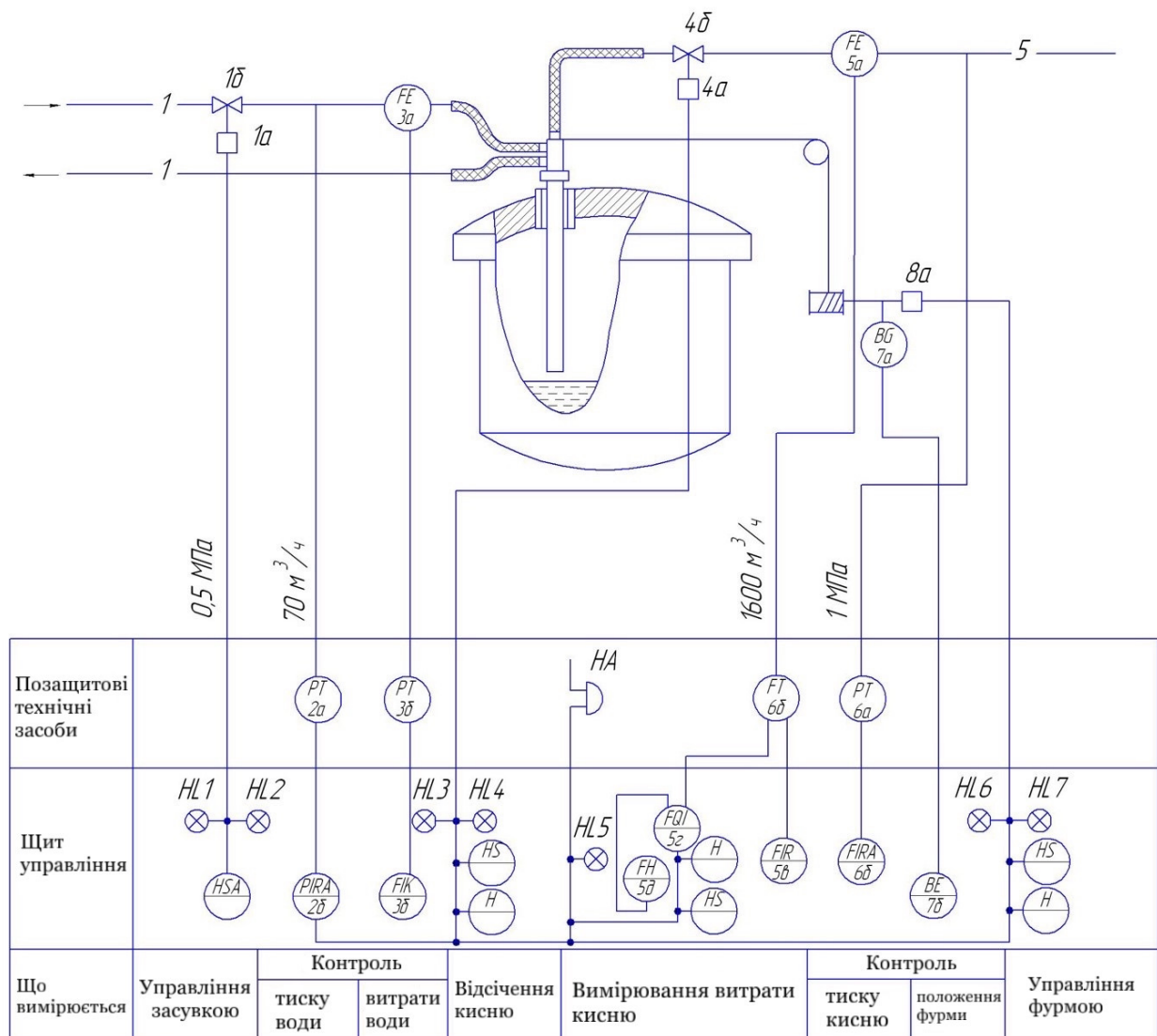


Рис. 4.3. Схема автоматизації подачі кисню в дугову сталеплавильну піч

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. 4.3.

Контрольні запитання

1. В чому полягає суть процесу електродугової плавки.
2. Що використовується в якості шихти та палива.
3. Що є джерелом температури в електродуговій печі.
4. Які основні конструктивні елементи електродугової печі.
5. Як здійснюється керування процесом плавки.
6. Які існують етапи плавки в електродуговій печі.
7. Які засоби використовують для регулювання електричної потужності.
8. Які основні контури контролю та регулювання системи автоматизації процесу плавки.

Література

1. Автоматизовані системи управління: навч. посіб. / Д. О. Дьомін, П. С. Пензев. – Харків: ТОВ "ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП", 2024. – 130 с.
2. Виробництво виливків із сталі / Ю.А. Шульте. – Київ: Вища школа, 1983. – 184 с
3. Demin D. A. Synthesis process control elektrodugovoy smelting iron // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2012. Vol. 2, Issue 10 (56). P. 4–9. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.3881>
4. Demin, D. A. (2012). Synthesis of optimal temperature regulator of electroarc holding furnace bath. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 6, 52–58.
5. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Автоматизація металургійного виробництва», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХП», 2025. – 36 с.
6. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Інноваційні основи металургії. Екологія та охорона праці в ливарному виробництві», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХП», 2025. – 30 с.
7. Дьомін Д. О. Виробничо-технологічна комплектація ливарних цехів / Д. О. Дьомін, О. Б. Дьоміна, О. В. – Харків: ПП "ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР", 2012. – 320 р.

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 живлючого трансформатора. Кількість ступенів напруги вторинної обмотки може бути різною, але частина з них використовуються 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 кислою 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 кислою 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: $\text{SiO}_2 = (45\text{--}55\%)$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = (3\text{--}6\%)$; $\text{MnO} = (15\text{--}25\%)$; $\text{FeO} = (10\text{--}20\%)$; $\text{CaO} = (2\text{--}5\%)$. Після розплавлення шлак, що утворився, частково видаляється і наводиться свіжий з бою скла або суміші, що складається з 65% піску, 25% свіжообпаленої меленого вапна і 10% меленого плавикового шпату. Зазвичай кінцевий склад шлаку складає: $\text{SiO}_2 = (45\text{--}55\%)$; $\text{CaO} = (10\text{--}25\%)$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = (3\text{--}5\%)$; $\text{MnO} = (10\text{--}20\%)$; $\text{FeO} = (5\text{--}15\%)$.

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% 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 асортименту 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 металурги безперервно ведуть 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 плавки, на більших печах – до 50–70. Деякі заводи замість металевих шаблонів, що розплавляються, використовують

графітові блоки з конфігурацією ванни тигля. На ньому роблять не тільки набивання печі футерувальною масою, але і 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 другий 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% магнезитового 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 феросилієм та алюмінієм. Феросплави присаджують після одержання аналізів першої проби. Шлаки безперервно розкисляють порошками розкислювачів. Температуру сплаву перевіряють термopарою 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 десульфурації сталі залишається значно нижчим, 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

4.2. Автоматизація процесу індукційної плавки

Схема автоматизації індукційної плавки представлена на рис. 5.2.

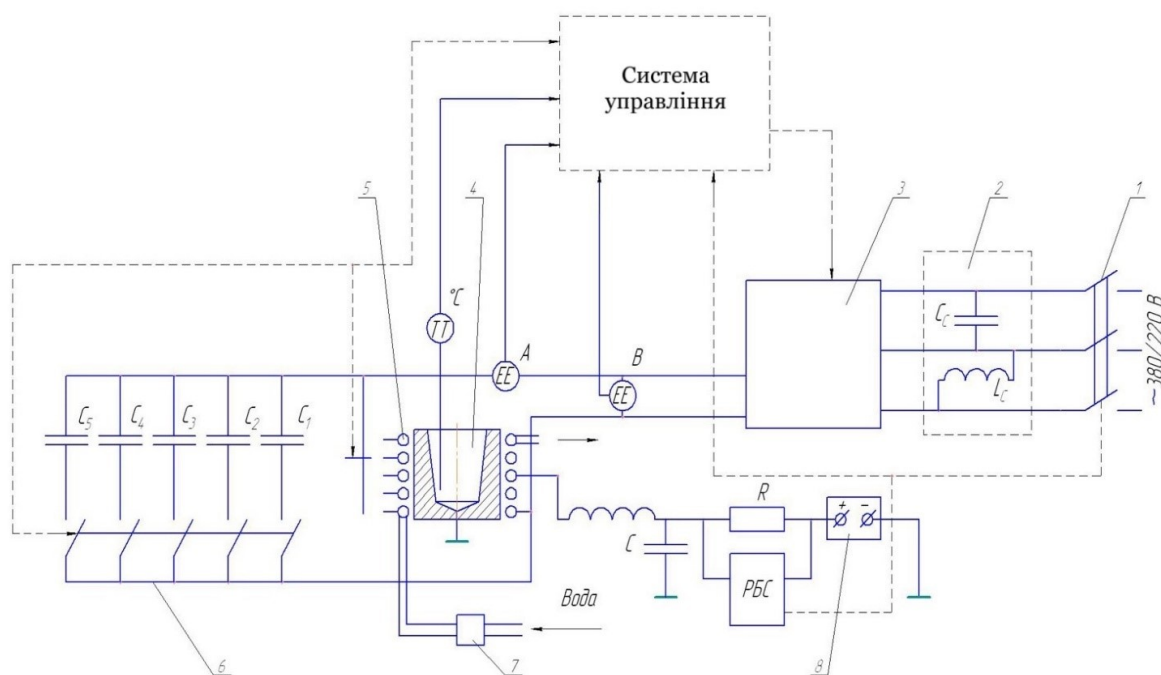


Рис. 5.2. Схема автоматизації процесу індукційної плавки

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. 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. 5.2) 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.

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.

Контрольні запитання

1. В чому полягає суть процесу плавки в індукційних печах.
2. Що використовується в індукційних печах в якості шихти та палива.
3. Які основні елементи індукційної печі.
4. Який фізичний принцип покладено в основу плавлення в індукційних печах.
5. Які операції включає технологія плавки в індукційній печі.
6. Від чого залежить підготовка металошихти до плавки та як вона проводиться.
7. З яких етапів складається плавлення шихти.
8. Який режим плавки є найбільш продуктивним.
9. Як здійснюється зміна потужності, що підводиться до печі.
10. Як та для чого проводиться доведення розплаву до заданого хімічного складу.

Література

1. Автоматизовані системи управління: навч. посіб. / Д. О. Дьомін, П. С. Пензев. – Харків: ТОВ "ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР ГРУП", 2024. – 130 с.
2. Demin 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. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001489>
3. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Автоматизація металургійного виробництва», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХП», 2025. – 36 с.
4. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу «Інноваційні основи металургії. Екологія та охорона праці в ливарному виробництві», для студентів спеціальностей 136 – Металургія, за освітньою програмою «Металургійні процеси та системи» / Укл. Дьомін Д. О. – Харків, НТУ «ХП», 2025. – 30 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи
з навчальної дисципліни «Автоматизація металургійного виробництва»,
для студентів спеціальностей 136 – Металургія,
за освітньою програмою
«Металургійні процеси та системи»

Укладачі: ДЬОМІН Дмитро Олександрович

Відповідальний за випуск О. В. Акімов

Роботу до видання рекомендує О. І. Пономаренко

За авторською редакцією

План 2025р., поз. 677

Підп. до друку 2025 р. Гарнітура Times New Roman
Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
Електронна версія