

## 4. Вплив технології доменної плавки на економічні показники та якість чавуну

### 4.1. Вплив відхилень ходу печі

Хід доменної печі визначається характером опускання шихтових матеріалів і її тепловим станом. Хід печі, при якому опускання матеріалів відбувається плавно, з нормативною швидкістю, називається рівним ходом.

Для даних умов плавки встановлюється визначений тепловий режим печі, обумовлений маркою чавуну, який виплавляється.

Про відхилення нормативного ходу доменної печі судять по складу чавуну і шлаку і їхній температурі, світінню на фурмах, швидкості сходу шихтових матеріалів і показанням контрольно-вимірювальної апаратури. При підвищенні нагрівання печі зміст кремнію в чавуні збільшується, а сірки зменшується (при постійній основності). Склад чавуну і шлаку, їхня температура, світіння на фурмах - це ознаки, які вказують на те, що нагрів печі вже змінився.

Швидкість сходу шихтових матеріалів визначається числом подач, завантажених у піч в одиницю часу. Зміна у швидкості сходу шихти сигналізує про порушення в опусканні шихтових матеріалів і нагріванні печі.

Показання контрольно-вимірювальної апаратури дають можливість установити початковий період відхилення від нормального плину процесів і, тим самим, вчасно вжити заходів для ліквідації цих відхилень. Для висновків про хід печі необхідна інформація про кількість, тиск, температуру і вологість дуття; про тиск, температуру і склад колошникового газу; про перепад статичного тиску газу по висоті печі; про температуру кладки шахти і рівень засипки; витрати природного газу і повітря по окремих фурмах.

Для забезпечення рівного ходу доменної печі кількість повітря, що вдувається, підтримується на постійному, заданому для даних умов плавки, рівні.

Ознакою **гарячого ходу** печі є підвищення тиску дуття (через збільшення об'єму газів при підвищенні температури). Крім того, підвищення тиску дуття є

провісником уповільнення сходу стовпа шихти (**тугий хід**).

Інформація про зміну тиску колошникового газу дозволяє судити про характер сходу шихтових матеріалів. При порушенні плавного сходу шихти тиск колошникового газу миттєво зростає. Зниження тиску колошникового газу відповідає опусканню чергової подачі в піч.

Характер зміни температури газу в газовідводах дозволяє судити про розподіл газового потоку в доменній печі. При рівномірному розподілі газового потоку по окружності печі температура газу в кожному газовідводі, вимірювана одночасно, повинна бути приблизно однаковою.

Інформація про температуру колошникового газу дозволяє також судити про ступінь використання газу в доменній печі: більш низька температура свідчить про краще використання газу.

Склад колошникового газу, і в першу чергу зміст у ньому  $H_2$ , характеризуючи хід відновлювальних процесів, є важливим показником роботи доменної печі і використовується для оцінки розподілу газового потоку по перерізу й окружності.

Контроль за перепадом статичного тиску по висоті печі є надійним методом для визначення газопроникності окремих ділянок стовпа матеріалів.

Рівномірність роботи газового потоку по окружності печі контролюється температурою, визначеною в декількох точках по окружності термopарамі, встановленими у вогнетривкій кладці шахти. При рівномірному розподілі газового потоку по окружності печі температура кладки в різних точках коливається незначно. Про розподіл газового потоку по окружності печі можна судити за інформацією про розподіл повітря і природного газу по окремих фурмах: при рівномірному розподілі витрати повітря і природного газу на фурмах приблизно однакові.

### 4.2. Керування ходом доменної печі.

Для керування ходом доменної печі і ліквідації порушень

використовуються такі способи:

- зміна рудного навантаження;
- завантаження в піч холостих подач (які не містять залізорудні матеріали) ;
- зміна температури чи вологості дуття;
- зміна кількості дуття;
- зміна режиму завантаження;
- штучні осідання шихти.

**Рудним навантаженням** називають відношення маси агломерату, окатишів та руди (за винятком виносу їх) до маси коксу. Величина її в сучасних умовах плавки складає 3-4. Змінюють величину рудного навантаження з метою підтримки теплового режиму печі на заданому рівні. Корекція рудного навантаження може здійснюватися зміною або маси коксу, або маси агломерату, окатишів та руди в подачі. Величина корекції складає (у подачу): по коксу – 10-300 кг, по агломерату, окатишам та руді – 300-500 кг.

**Холостою подачею** називається подача, що не містить рудних матеріалів. Такі подачі вживаються для розпушення стовпа шихтових матеріалів і для підігріву печі.

**Температура дуття.** Зміною температури дуття користуються для регулювання теплового режиму плавки. На сучасних доменних печах температура дуття доведена до 1100-1300 °С.

**Кількість дуття.** Кількістю дуття, що вдувається в одиницю часу, визначається кількість коксу, що спалюється у горні печі, швидкість опускання стовпа шихтових матеріалів, а значить і продуктивність доменної печі. Оптимальним у сучасних умовах плавки вважається вдування в піч 1,8-2,2 м<sup>3</sup> повітря в хвилину на 1 м<sup>3</sup> об'єму печі. При збагаченні дуття киснем ця величина зменшується.

**Режим завантаження.** Це найефективніший спосіб регулювання ходу печі, тому що дозволяє досягти рівного ходу печі при задовільному використанні хімічної і теплової енергії газу. Регулювання зміною режиму завантаження

зводиться до зміни величини подачі, рівня засипки, порядку опускання матеріалів у піч і програми роботи обертового розподільника. Зміна режиму завантаження є першочерговою мірою регулювання при будь-якій відхиленні ходу печі від норми.

**Осідання.** Цей спосіб регулювання зводиться до різкого зниження тиску дуття зменшенням його кількості, що вдувається в піч. Осідання застосовуються в основному при припиненні опускання стовпа шихтових матеріалів.

#### 4.3. Автоматичне керування доменним процесом.

Доменний процес є об'єктом, що підлягає автоматичному керуванню, у зв'язку з такими його особливостями:

- безперервність процесу при періодичному завантаженні шихти і випуску продуктів плавки;
- одержання одного кінцевого продукту – чавуну, що характеризується широкими межами коливань складу і властивостей;
- сталість складу шихти, що завантажуються;
- значний об'єм продукції і великі капіталовкладення.

Для створення автоматизованої системи керування доменним процесом необхідне знання основних його закономірностей і опис цих закономірностей у математичній формі, тобто розробка алгоритму керування. (Алгоритмом називається припис, що визначає зміст і послідовність операцій, що переводять вихідні дані в шуканий результат).

Автоматичному керуванню насамперед підлягає тепловий режим доменної плавки і її інтенсивність (характер і швидкість руху стовпа шихтових матеріалів).

Задачею автоматичного керування тепловим режимом є підтримка теплового стану печі на заданому рівні, для чого необхідно виявити виникаючі відхилення в момент їхньої появи і не допускати їхнього розвитку. Для рішення цієї задачі алгоритм керування повинний передбачати:

а) компенсацію змін вхідних параметрів процесу (змін у складі шихти і дуття);

б) компенсацію змін ходу відновлювальних і теплообмінних процесів у верхній і нижній зонах печі, що відбуваються в результаті змін у розподілі газового потоку;

в) ліквідацію відхилень нагрівання печі від заданого рівня.

Величина компенсаційного впливу змін у складі шихти і дуття:

$$\Delta K_1 = \left[ (a_1 Fe + a_2) \cdot A + a_3 \cdot И - \frac{a_4 \cdot V_{п.г.}}{\Pi} - \frac{a_5 \cdot t_{\theta}}{\Pi} \right] \cdot \frac{1}{C_K - W_K}$$

де  $\Delta K$  – зміна маси коксу в подачі, т;

$C_K, W_K$  – зміст вуглецю і води у коксі, %;

$Fe$  – зміст заліза в залізорудній частині шихти, %;

$A$  – кількість рудних матеріалів у подачі, т;

$V_{п.г.}$  – витрата природного газу, м<sup>3</sup>/год;

$t_{\theta}$  – температура дуття, °С;

$\Pi$  – швидкість сходу шихти, подача/год;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – коефіцієнти моделі.

Величина зміни витрати коксу, що компенсує зміни ступеня розвитку непрямого відновлення заліза, пропорційна змісту CO<sub>2</sub> у колошниковому газі:

$$\Delta K_2 = n_1 \cdot \Delta CO_2 \cdot K$$

де  $n_1$  – коефіцієнт моделі;

$\Delta CO_2$  – зміна змісту CO<sub>2</sub> у газі, %;

$K$  – маса коксу в подачі, т.

Тепловий режим доменної плавки може порушитися і під час відсутності змін складу шихти і параметрів дуття, зміни використання теплової і хімічної

енергії газу, унаслідок змін складу шлаку, влучення в піч води зі згорілої охолоджувальної арматури і т.д. Рівень нагрівання печі виявляється через деяке значення  $[Si]_{\phi}$  – фактичний зміст кремнію в чавуні.

При відхиленні  $[Si]_{\phi}$  від заданого значення фактор, що компенсує, визначається:

$$\Delta K_3 = n_3 ([Si]_3 - [Si]_{\phi})$$

де  $n$  – коефіцієнт моделі;

$[Si]_3$  – заданий зміст кремнію в чавуні, %;

Зупинимося на автоматичному керуванні сходом шихтових матеріалів у доменній печі.

Задача технолога – досягнення максимальної продуктивності печі – залежить від забезпечення режиму вдування в піч максимальної для заданих умов плавки кількості дуття. Установлення граничного рівня можливого форсування печі і підтримка його протягом плавки, під силу тільки автоматизованій системі керування.

У першу чергу алгоритмом визначається граничний ступінь форсування, перевищення якого приводить до розладу ходу печі. Тому що граничний ступінь визначається втратами тиску газу під час руху в печі, необхідно визначити граничне значення загального перепаду статичного тиску газу.

Знаючи величину критерію газодинамічної стійкості шару ( $P_y$ ), що визначається як відношення перепаду статичного тиску газу ( $\Delta P$ ) до насипної маси матеріалу ( $\gamma$ ) і висоті його шару ( $H$ ):

$$P_y = \frac{\Delta P}{\gamma \cdot H}$$

можна визначити граничну величину  $\Delta P$  (величина  $P_y$  коливається незначно й у середньому дорівнює 0,5):

$$\Delta P_{gr} = 0,5 \cdot \gamma \cdot H$$

Вхідними параметрами є перепади статичного тиску газу по висоті печі і характеристика розподілу газового потоку по перерізу печі:

$$a = (CO_{2ГР} - CO_{2П}) + (CO_{2ГР} - CO_{2Ц})$$
$$d = \frac{(CO_{2П} + CO_{2Ц})}{2}$$

де  $CO_{2П}$ ,  $CO_{2ГР}$ ,  $CO_{2Ц}$  - зміст  $CO_2$  на периферії, гребені (максимум кривої) і в центрі відповідно.

Вихідними параметрами для впливу є: при зміні газопроникності верхньої частини печі – порядок завантаження матеріалів у піч і тиск газу на колошнику; при зміні газопроникності нижньої частини печі – температура чи вологість дуття; при зміні газопроникності у верхній і нижній частинах печі одночасно – кількість дуття.

#### 4.4. Особливості режимів плавки різних видів чавуну.

У доменних печах виплавляють два види чавуна – переробний (85%) і ливарний, а також доменні феросплави (феромарганець, феросиліцій і ін.). В Україні виплавляють два види переробного чавуна:

**Мартенівський** – виплавляється із шихти, що складається на 90 – 100% з офлюсованого агломерату з низьким змістом фосфору. Мартенівський чавун містить помірну кількість Si -0,60%; P-0,2%; мало S- 0,03%. У зв'язку з цим при виплавці мартенівського чавуна виходить низька витрата коксу (450-600 кг/т чавуна), рудне навантаження при цьому складає 3,3-4. Для одержання чавуна з низьким змістом сірки основність шлаку  $CaO/SiO_2$  підтримується на рівні 1,15-1,25. При виплавці мартенівського чавуна в шлаку міститься мало закису марганцю (MnO). Для успішного протікання процесів десульфурації в шлаку повинно міститися 5-8% MgO. Плавка ведеться на комбінованому дутті: витрата природного газу складає 60-110 м<sup>3</sup>/т, зміст кисню в дутті – 23 – 30%, волога дуття – 20-25г/м<sup>3</sup>, температура дуття – 1000 – 1300°С. Витрата дуття – 1,8-2,2 м<sup>3</sup>/хв на 1м<sup>3</sup> об'єму печі.

**Бесемерівський** – виплавляється із шихти, що складається з 90-100% офлюсованого агломерату, спеченого з руд з низьким змістом фосфору (<0,022%). Цей чавун містить більше кремнію, чим мартенівський, але менше фосфору і сірки. Для одержання потрібної кількості Si зменшують рудне навантаження. Температурно–дуттєвий і шлаковий режими не відрізняється від режиму виплавки мартенівського чавуна.

**Ливарний** – відрізняється від передільного підвищеним змістом Si (1,2-3,5%). Найкращими умовами для відновлення Si у такій кількості є робота доменної печі на кислому шлаку ( $B' < 1$ ) і вищої температури у нижній частині печі. При виплавці ливарного чавуна рудне навантаження нижче на 20-25% у порівнянні з переробним, тому витрата коксу зростає. Для одержання чавуна з низьким змістом сірки основність шлаку підтримується на рівні 1-1,2. Ливарний чавун виплавляють на комбінованому дутті, витрата природного газу і зміст кисню в дутті такі ж, як і при виплавці переробного чавуна. При виплавці ливарних чавунів інтенсивність плавки трохи знижується. Через погіршення показників доменної печі (зростання витрати коксу та зменшення продуктивності) при виплавці ливарного чавуна, іноді цей вид чавуна одержують поза доменною піччю – шляхом добавки до переробного чавуна феросиліцію.

**Феромарганець** (FeMn) – використовується в сталеплавильному виробництві для розкислення і легування стали. FeMn виплавляють як у доменних, так і в електричних печах. Сировиною для виплавки феромарганцю є марганцеві руди. Головною метою при виплавці FeMn є відновлення великої кількості Mn. Для цього необхідна висока температура і великий прихід тепла в нижній частині печі, що досягається підвищеною витратою коксу (1,5-2,0 т/т), високої температури дуття (>1000 С); зміст кисню в дутті - 30-32%. Природний газ і волога дуття не використовуються, тому що вони знижують температуру горна. Для підвищеного відновлення Mn треба мати підвищену основність шлаку (на рівні 1,3-1,5). Такий шлак малорухомий і непостійний по фізичних

властивостях. Для поліпшення фізичних властивостей у шлаку повинно міститися 6-9% MgO.

**Феросиліцій (FeSi)** – використовується в сталеплавильному виробництві як розкислювач. FeSi виплавляють як у доменних печах, так і в електричних. У доменних печах виплавляється FeSi, що містить 10-12% Si. Сировиною для виплавки FeSi є залізні руди. При виплавці FeSi краще використовувати не офлюсований агломерат, тому що в офлюсованому агломераті кремнезем зв'язаний з окислами заліза й окисом кальцію, що утрудняє відновлення Si.

Для більш повного відновлення Si необхідна підвищена температура у горні і великий прихід тепла. З цієї причини витрата коксу при виплавці FeSi складає 1,3-1,4 т/т; при цьому температура дуття – максимально можлива; зміст кисню у дутті – 30-32%; природний газ і волога дуття не застосовуються. Шлаки повинні бути кислі – основність дорівнює 1-1,05.

#### 4.5 Позадоменна обробка чавуну.

Одним зі способів позадоменної обробки чавуна є його десульфурація.

Сірка, що надходить у піч, розподіляється між чавуном, шлаком і газом. У чавуні і шлаку сірка може знаходитися у виді з'єднань Fe, Mn, Ca, Mg. Зміст сірки в чавуні залежить від кількості сірки, що залишається в печі, коефіцієнта розподілу сірки і відносної кількості шлаку. Однак, унаслідок погіршення якості шихтових матеріалів, порушень технології плавки і деяких інших причин, зміст сірки в чавуні іноді перевищує припустимі межі.

Позадоменна десульфурація чавуну застосовується:

- для доведення змісту сірки у чавуні до кондиційного;
- при роботі печі на кислих шлаках;
- для одержання чистих по сірці чавунів.

Для виплавки киснево-конвертерної сталі необхідний чавун з низьким вмістом сірки.

Позадоменна десульфурація дозволяє вести доменну плавку на кислих

шлаках і досягати гарних результатів роботи доменних печей. Зниження основності шлаку викликає зменшення його кількості, зниження витрати коксу і флюсу. Перехід на кислі шлаки дозволяє понизити основність офлюсованого агломерату, що викликає підвищення його міцності, а отже, і газопроникності стовпа матеріалів у печі.

Підвищення газопроникності шихти, зниження в'язкості і тугоплавкості шлаків, зниження питомої витрати коксу, зв'язані з переходом на кислі шлаки, забезпечують більш рівний хід і підвищення продуктивності печі.

У такий спосіб плавка на кислих шлаках забезпечує зниження питомої витрати коксу і підвищення продуктивності, але виплавлений при таких шлаках чавун містить багато сірки (0,1-0,5%) і вимагає обов'язкової десульфурації після випуску з доменної печі.

Процес позадоменної десульфурації чавуна підкоряється тим же термодинамічним закономірностям, що і процес десульфурації в доменній печі: елементи, що утворюють більш міцні сульфідні, чим Fe (Mn, Mg, Na, Ca) будуть відбирати сірку у заліза, і тим більш енергійно, чим нижче пружність дисоціації його сульфідів.

Найбільш розповсюдженими десульфуруючими присадками є кальцинована сода, вапно, карбід кальцію, металевий магній. Крім цього, разом з основними десульфуруючими реагентами застосовують добавки – вапняк, доломіт, алюміній, плавиковий шпат, коксик і ін.

Дія десульфуратора і добавок виявляється в тім, що вони або просто зв'язують сірку в сульфіді (сода, вапно, магній), або розкисляють шлак, звільняючи його від Fe (алюміній, коксик), або розріджують шлак, збільшуючи його активність (плавиковий шпат), і тим полегшують десульфурацію.

Ці присадки і добавки вводяться в чавун у жолобі на струмись при випуску чавуна з печі або в ківш перед випуском, чи після випуску чавуна. Іноді десульфурація може проводитися в спеціальних пристроях (обертові печі, барабани й ін).

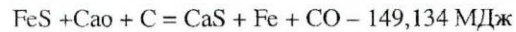
#### Процес десульфурації содою:



Процес триває 10-15 хв. Витрата соди - 25-50кг/т.

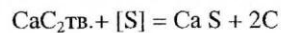
Недоліки даного процесу: дефіцит соди, летучість і низьке її використання (30-60%), роз'їдання футеровки ковша; можливий перехід сірки назад у чавун.

#### Десульфурація вапном:



Процес триває 5-10 хв. Витрата вапна складає від 1 до 10% до маси чавуна. Зворотного переходу сірки в чавун не відбувається; при цьому не утворюється рідкий шлак, тому що вапно після поглинання сірки залишається у виді твердого порошку. Цей метод застосовується в обертовій печі або на струмінь чавуну.

#### Десульфурація карбідом:



Витрата карбіду – 3-5 кг/т чавуну; вміст сірки знижується до 0,002-0,005 %. Карбід вдувається азотом у рідкий чавун або подається в метал, а потім перемішується крильчаткою.

#### Десульфурація металевим магнієм:

Присадкою Mg у кількості 0,1-0,12% до маси чавуна видаляється близько 90% S і чавун виходить зі змістом S до 0,005%. Спосіб небезпечний для персоналу, тому що відбуваються викиди чавуну. На заводах де використовують Mg, його застосовують у теплоізоляційній покритті, у спеціальному випарнику і занурюють у ківш на глибину 1,5 м. Ківш ємністю 50-60 т обробляється протягом 60-80секунд.

Для підвищення економічності процесу десульфурації і виробництва низькосірчаного металу необхідно приймати міри до зменшення кількості шлаку, що попадає в чавуновозні ковші при випуску чавуна з доменної печі, і більш повному видаленню шлаку з ковшів після десульфурації, тому що шлак

попадає в конвертор, і є джерелом сірки, що повертається в метал у процесі конвертерної плавки.

### 4.6 Використання пилу, газу і шлаку як вторинних ресурсів.

#### Газ

При спалюванні 1 т коксу в печі утворюється близько 500 м<sup>3</sup> газу. Теплота згоряння колошникового газу дорівнює 3700 кДж/м<sup>3</sup> і змінюється в залежності від умов роботи печі: при поліпшенні якості шихтових матеріалів, підвищення нагрівання дуття, збільшення тиску газу в робочому просторі печі, збагаченні дуття киснем, при вдуванні вуглецьводеньвмістних добавок (сприятливих зниженню питомої витрати коксу) змінюється вихід і теплота згоряння колошникового газу.

Приклад: при витраті коксу 500-550 кг/т чавуну питомий вихід газу дорівнює близько 200м<sup>3</sup>/т чавуну. При підвищенні ступеня використання газу (що знижує зміст у ньому С) знижується теплота згоряння газу до 3000 - 3400 кДж/м<sup>3</sup>. При вдуванні вуглецьводеньвмістних добавок і збагаченні дуття киснем теплота згоряння доменного газу підвищується в середньому на 5,0 - 7,5 % на 1% збільшення кисню в дутті.

Колошниковий газ використовується для опалення доменних повітрянагрівачів, коксових, мартенівських і нагрівальних печей. Наявність пилу в газі знижує його теплоту згоряння і призводить до засмічення і зносу агрегатів, що його використовують. Для усунення негативного впливу пилу газ перед використанням попередньо очищається.

#### Шлак

Доменний шлак використовується як сировина для виробництва будівельних матеріалів: цементу, шлакової цегли, шлакоблоків, шлакобетону, шлаковати та войлоку. Перед використанням шлак подрібнюється методом грануляції – швидким охолодженням шлаку в басейні чи жолобі. Розрізняють

мокру, суху і напівсуху грануляції. Найбільш широко використовується мокра грануляція, заснована на зливі рідкого шлаку у воду. Шлак, що утвориться при цьому, містить до 15-30% вологи, що знижує ефективність його застосування для виробництва будівельних матеріалів, тому що збільшені витрати на сушіння і перевезення.

При напівсухій грануляції виходить продукт, що містить 6-10% вологи. Доменні шлаки використовуються для одержання шлаковати і шлакового войлоку. Шлаковата утворюється при зливі рідкого шлаку з ковша в жолоб з отворами. На шлак, що випливає з жолоба, струмками подається стиснене повітря, у результаті чого шлак перетворюється в найтонші нитки. Шлаковата застосовується як ізоляційний матеріал, тому що має дуже низьку теплопровідність.

**Шлаковий войлок** виготовляється зі шлаковати при обробці її спеціальними емульсіями. Войлок виходить у виді плит і також використовується як ізоляційний матеріал.

Шлак застосовується і для виробництва **шлакового щебеню і пемзи**. Для виробництва щебеню придатні всі доменні шлаки, крім високоосновних (через їхню схильність до розпаду).

**Пемза** виходить у результаті зливу рідкого шлаку в траншею під водний струмінь тиском 0,06 мПа, при цьому шлак спучується і кристалізується, утворюючи тверду пористу масу.

Доменний шлак використовується для виробництва **шлакоситалів** – конструкційних і оздоблювальних матеріалів легше алюмінію, що мають хімічну і термічну стійкість, високу міцність на вигин, стиск і стирання. Їх одержують сплавляючи гранульований шлак з кварцовим піском і частково з глиною.

#### **Колошниковий пил**

Колошниковий пил є відходом доменного виробництва, утворюється в результаті виносу дрібних часток шихтових матеріалів з доменної печі в складі

колошникового газу. Пил одержують у результаті очищення колошникового газу. Як вторинна сировина пил використовується в складі металовмістних сирих матеріалів при виробництві агломерату, тому що містить достатню кількість заліза (приблизно 15%). Для виробництва 1 тонни агломерату в аглошихту додається до 50 кг колошникового пилу.