

Селегей А.М., Мішалкін А.П., Безшкуненко О.Г.

Аналіз технологічних параметрів доменної плавки для розробки прогнозних моделей розрахунку техніко-економічних показників процесу.

Selegej A., Mishalkin A., Bezshkurenko O.

Analysis of technological parameters of blast furnace smelting for the development of predictive models for calculating technical and economic indicators of the process.

Мета. Визначити основні технологічні параметри на підставі яких має ґрунтуватися прогнозна методика розрахунку техніко-економічних показників доменної плавки.

Методика. Розглянуто фізико-хімічні та технологічні закономірності доменного процесу, що впливають на техніко-економічні параметри плавки. Показано, що температурний інтервал 600-1000°C слід вибирати у разі розробки прогнозних моделей доменного процесу при аналізі відновлювальних процесів з урахуванням теплового балансу.

Результати. Визначені температурні інтервали для аналізу фізико-хімічних процесів, що впливають на техніко-економічні показники доменної плавки. Обґрунтовані припущення для аналізу. Проаналізовано теплові умови ефективного протікання відновних процесів та їх вплив на технологічні показники доменної плавки.

Наукова новизна. Розроблено аналітичне підґрунтя для отримання прогнозних моделей визначення зміни техніко-економічних показників доменної плавки. Встановлено, що найбільший вплив на протікання відновних реакцій має саме розподіл матеріалів у «сухій» зоні доменної печі.

Практична значимість. Отримані аналітичні дані дають змогу розробити ефективну модель прогнозування зміни техніко-економічних показників доменної плавки на основі даних про хімічний склад колошникового газу та його розподілу вздовж радіуса колошника печі.

Вважається загальновідомим, що поліпшення параметрів газодинаміки «сухої зони» доменної печі позитивно позначається на техніко-економічних показниках плавки. Однак більшість дослідників про зміну роботи печі судять лише на підставі порівняльного аналізу показників вмісту відновлювальних газів по радіусу колошника. Такий підхід раціональний з точки зору аналізу технологічних факторів, однак не дає можливості отримати прогнозовану зміну техніко-економічних показників (продуктивності, витрати коксу і т.д.) доменної плавки на конкретній печі. В сьогоденнішніх умовах на більшості металургійних підприємств України на перший план висуваються питання економічної ефективності, зниження витрат на сировину і енергоносії.

Підвищення ефективності технології виробництва чавуну в доменній печі можливо за рахунок проведення заходів, що дозволяють підвищити якість залізорудних матеріалів (агломерату та обкотишів) і коксу шляхом його спеціальної підготовки за фракційним складом і реакційної здатності [1,2].

Характеристика фізико-хімічних і теплових особливостей процесів в доменній печі

Профілі більшості доменних печей, хоча вони і побудовані за типовими проектами, в основному, ДІПОМЕЗу і ін. проектними інститутами, розраховані для умов плавки, які можуть істотно змінюватися.

Зміна мінералогії, гранулометрії, фізико-хімічних властивостей мінеральної сировини і палива, які мають істотний, іноді визначальний вплив на хід доменної плавки, привів до висновку про те, що більш раціонально проектувати і будувати печі з урахуванням саме цих факторів.

На підставі цього факту слід зазначити, що модель прогнозування зміни техніко-економічних показників доменної плавки, що розроблена на прикладі якоїсь однієї печі, може бути використана для більшості доменних печей.

Нижче, для прикладу, наведені конструктивні розміри доменної печі 2000 м³, на якій були проведені дослідження впливу способу завантаження шихтових матеріалів на склад колошникового газу і інші показники роботи печі.

Корисний об'єм печі, м³ - 2000; висота повна (Hп), мм - 32358; висота корисна (H0), мм - 29400 - висота печі від підшови чавунної льотки до нижньої кромки великого конуса засипного апарату або лотка БЗП в опущеному стані; висота горна (Hr), мм - 3600; висота заплічок (h3), мм 3000; висота распара (hp), мм - 1700; висота шахти (hш), мм -18200; висота колошника (h к), мм - 2900; висота «мертвого шару», мм - 1101; діаметр горна (dr), мм - 9750; діаметр распара (D), мм - 10900; діаметр колошника (d к), мм - 7300. Піч обладнана розподільчо-засипним апаратом з односхилим обертовим лотком-жолобом, що змінює кут нахилу.

В умовах ведення доменної плавки взаємодії

фізико-хімічних, теплових, газодинамічних та інших процесів, керованих ззовні, призводять до трансформації речового складу і властивостей вихідної шихти в рідкий чавун заданого складу і температури. Ці процеси відбуваються в умовах зміни теплового стану і складу вихідної шихти на різних ділянках робочого простору доменної печі, які визначаються особливостями реагування газового потоку, що піднімається з компонентами навколишньої шихти: передачею фізичної теплоти від газу, склад якого формується за рахунок течії реакцій в системі C - O і опором шихти потоку газу, який визначає в кінцевому підсумку ступінь використання його фізичної і хімічної енергії.

На нашу думку, процес трансформації фізико-хімічних властивостей і складу шихти доцільно розглядати на основі аналізу ефектів синергетичного характеру, які утворюються всередині досліджуваної системи або процесу з встановленням їх джерел і способів контролю і управління ними в заданому напрямку. Узагальнена оцінка їх ефективності, мабуть, може бути проведена за результатами використання окислювально-відновного і теплового потенціалів досліджуваної системи.

У доменній плавці результат досягається, в основному, за рахунок реалізації відновлювальних і теплових процесів у шарі шихти з досягненням ефектів, в основному синергетичного характеру. Їх джерелом є окислювальна зона, в якій в умовах надлишку відновника утворюється газ CO з високим відновним і тепловим потенціалом. Надалі при проходженні через стовп шихти заданої газопроникності витрачається потенціал хімічної і теплової енергії CO. Під поняттям хімічного потенціалу слід розуміти енергію, що виділяється при протіканні хімічних реакцій. Під тепловим – тепло, що переноситься газом через товщу стовпа доменної шихти. Для умов доменної печі важливим завданням є створення умов, що забезпечують більш повне використання хімічної складової, а, з огляду на ендотермічний характер основних реакцій відновлення елементів з оксидних матеріалів шихти – теплової складової потенціалу корисних властивостей CO.

Повнота використання відновного потенціалу, а також фізичної теплоти газу CO, що утворюється при взаємодії нагрітого повітряного дуття з вуглем коксу в окислювальному зоні горна, залежить від багатьох чинників: фізико-хімічних властивостей компонентів шихти, що змінюються під впливом нагріву при її сході, фракційного складу компонентів шихти, температури дуття, витрати коксу і співвідношення коксу/ природний газ при використанні газу, а також в значній мірі від газопроникності стовпа шихтових матеріалів. Ці фактори визначають стабільність перебігу фізико-хімічних процесів і особливості ходу печі. Так, зменшення витрат коксу, збільшення частки дрібних фракцій погіршує газопроникність шихти. Важливим інструментом створення раціональної газопроникності є обґрунтований вибір схеми завантаження шихтових матеріалів на колошнику, яка визначає їх розподіл по

перетину і висоті печі. При цьому необхідно враховувати зміни в кількості горнового газу і температурі в окислювальному зоні горна.

Аналітичне обґрунтування значень температурного інтервалу досліджуваної зони при визначенні впливу способу завантаження на показники доменної плавки

Вибір температурної зони дослідження фізико-хімічних процесів заснований на тому, що в інтервалі температур 600 ÷ 1000 °C відбувається відновлення оксидів шихти газом CO, інтенсивність якого у великій мірі залежить від стабільності умов газопроникності сформованого шару, тобто, від раціонального розподілу компонентів шихти, яка завантажуються. Відповідно до даних, наведених в [3,4] температура близько 900 °C досягається на відстані від рівня засипу близько 12м, а температура близько 600 °C - на відстані близько 2 м. При величині загального падіння температури на досліджуваній ділянці, який становить 400 °C перепад температури на 1 м висоти досліджуваної зони становить близько $(900 - 600)/12 = \sim 30$ °C. У цій зоні, протяжність якої становить ~ 10 м, протікають з максимальною швидкістю реакції непрямого відновлення оксидів заліза і з мінімальною - реакції прямого відновлення заліза, кремнію та марганцю з їх оксидів. Ще одним фактором правомірності вибору для досліджень зазначеного температурного інтервалу є те, що на відповідній ділянці доменної печі різниця в температурах висхідного потоку CO і навколишньої шихти мінімальна, в порівнянні з іншими ділянками - під і над обраною для дослідження ділянкою шихтових матеріалів [3].

Авторами досліджень теплової боку доменного процесу, результати яких наведені в [5,6], по висоті стовпа шихтових матеріалів встановлено наявність двох ділянок уповільненого теплообміну, які, на їхню думку, утворюються в результаті дії хімічних реакцій з позитивною ентальпією - ендотермічних, які відбирають на своє розвиток частину фізичної теплоти у відновного газу.

Основним джерелом CO₂ є реакції непрямого відновлення оксидів заліза, інтенсивний розвиток яких відбувається в інтервалі температур 600 ÷ 900 °C. Певний вплив на кінцевий склад колошникового газу вносить реакція розпаду CO з утворенням сажистого вуглецю і CO₂. Цілком обґрунтованим, особливо при проведенні спрощених розрахунків по визначенню впливу на технологічні параметри доменного процесу газодинамічних умов, представляється використання в якості визначального параметра вмісту в колошниковому газі CO₂ або параметра (CO/CO₂) після встановлення їх зв'язку у вигляді функціональної залежності CO₂ від CO, що враховує фізико-хімічні особливості доменного процесу.

Недоліком прямого відновлення елементів з їх оксидів є те, що ці реакції ендотермічні, що вимагають витрат теплової енергії і, відповідно, додаткової витрати коксу. Крім цього, збільшення ступеня прямого відновлення оксидів призводить до

зменшення кількості коксу у дутцевих фурмах, тобто знижується прихід тепла в горні, тим самим погіршуючи тепловий баланс плавки. Реакції ж непрямого відновлення не вимагають витрат тепла. Однак непряме відновлення, яке протікає без витрат теплоти, вимагає значно більшої витрати вуглецю, необхідного для утворення необхідної кількості відновного газу, ніж пряме.

Фактичні значення ступеня прямого відновлення на печах, що працюють без застосування природного газу або мазуту, зазвичай вище оптимальних ($> 40\%$). У зв'язку з цим необхідно вживати всіх заходів для поліпшення відновлення шихти газами, тобто за рахунок створення умов, які призводять до збільшення ступеня використання фізичної і хімічної теплоти CO [7]. Роль прямого відновлення зводиться, в основному, до визначення кількості вуглецю, необхідного для нагрівання і відновлення заліза. Незначна поверхня контакту твердих фаз (оксиду і вуглецю коксу) обмежує їх помітний розвиток в зонах без рідких фаз (шлаковій).

Незважаючи на значну кількість досліджень, дискусії з питань про оптимальне співвідношення прямого і непрямого відновлення оксидів заліза в умовах доменної плавки тривають.

Невизначеність зкладами в сумарний ефект відновлення індивідуальних вкладів від реалізації на окремих по висоті печі ділянках шихтових матеріалів реакцій непрямого і прямого відновлення, є причиною подальших досліджень, спрямованих на підвищення ефективності доменного процесу.

Виходячи з наведених особливостей процесів на характерних ділянках по висоті доменної печі необхідно відзначити, що зміна способу завантаження певним чином має впливати на розподіл шихтових матеріалів і, відповідно, газопроникність стовпа шихтових матеріалів. Ці фактори, в свою чергу, визначають ступінь використання потенціалу корисних властивостей CO - його теплової та хімічної енергії.

Відсутність якої-небудь значущої кореляції (функціональної залежності) між вмістом в газах CO₂, зміна якого (ΔCO_2) становить близько 5% [8,9] і CO, зміст якого в умовах зміни газопроникності стовпа шихтових матеріалів практично не змінюється ($\Delta\text{CO} = 0,4\%$) [8,9] при зміні способу завантаження шихти, ймовірно, може бути пояснено такими причинами.

У верхніх горизонтах шахти в інтервалі температур 200 ÷ 600 °C на свіжовідновлених частинках заліза відбувається реакція розкладання CO з утворенням C і CO₂ і виділенням значної кількості теплової енергії. Це призводить при зниженні вмісту CO до відповідного підвищення в газах вмісту CO₂. Тому при вирішенні поставленого в роботі завдання відповідно, розподілу шихтових матеріалів у доменній печі на основі використання даних про склад колошникових газів обрано такі умови і прийнято ряд нижченаведених припущень.

1. Як об'єкт відновлення обрана зона печі з температурою 600 - 900 °C, де інтенсифікуються, в

основному, реакції непрямого відновлення оксидів заліза і мінімізовано розвиток реакцій розкладання CO та перебіг відновлення оксидів кремнію і марганцю за прямим чи непрямым механізмом.

2. Розрахунок можливого збільшення рудного навантаження ґрунтується на використанні даних про вміст газоподібного продукту відновлення оксидів заліза - CO₂ в колошниковому газі при зміні способу розподілу шихтових матеріалів.

3. Виключення реакцій непрямого і прямого відновлення кремнію і марганцю з їх оксидів (SiO₂ і MnO) обґрунтовано термодинамічною заборонаю їх перебігу в інтервалі температур дослідження. Зазначені реакції можуть протікати за механізмом прямого відновлення при більш високих температурах (> 1500 °C), а основна частина кремнію і марганцю відновлюється з (SiO₂), в основному, при проходженні крапель шлаку в горні між шматками коксу.

4. Розрахунки основних показників процесу виробляють з використанням реакції непрямого відновлення Fe₂O₃ монооксидом вуглецю для умов повного відібрання кисню з утворенням Fe і CO₂.

5. Зважаючи на відсутність будь-якої кореляційної (функціональної) зв'язку між змістами CO і CO₂ в колошниковому газі і незначною відмінністю вмісту CO при зміні розподілу шихти розрахунки можливого збільшення рудного навантаження, зниження витрати коксу і інші показники процесу розраховували по фактичній зміні (збільшенні) змісту в газах CO₂ при зміні способу завантаження шихти.

6. Оцінка теплового стану об'єкта дослідження проводилася на основі розрахунку питомої теплопродуктивності (або теплоспоживання) досліджуваних реакцій в заданому інтервалі температур.

Підтвердженням доцільності обраного для дослідження впливу способу завантаження температурного інтервалу по висоті доменної печі є і встановлене в роботах [10-12] S-образний розподіл температур по висоті доменної печі.

Розробці алгоритмів керування доменним процесом з використанням даних про склад і температуру колошникового газу присвячено багато досліджень. Практична можливість реалізації цієї ідеї обґрунтована ще в роботі [13]. На думку авторів [14] проблеми з реалізацією управління ходом доменної плавки по зміні складу колошникового газу пов'язані з використанням газоаналізаторів, що дають значну похибку при вимірюванні вмісту CO і CO₂ (до 2,5%). За даними цього дослідження зміна суми (CO + CO₂) колошникового газу на 1% викликає зміну температури рідкого чавуну на випусках на 50 – 60 °C, а температури дуття для компенсації зазначеного відхилення такого ж порядку 60 - 80 °C. Автори взяли, на нашу думку не цілком обґрунтовано, що зміна складу колошникового газу (CO і CO₂) характеризує тільки зміна ступеня прямого і непрямого відновлення. В роботі [14] в якості головного чинника для встановлення впливу складу колошникового газу на особливості тепло-

вого боку доменного процесу ними була використана величина суми ($\text{CO} + \text{CO}_2$). На нашу думку, цей фактор тільки побічно впливає на основні показники процесу і не може бути використаний для ефективного вирішення поставленого завдання - управління процесами в доменній печі. До того ж, використовувати суму або відношення змісту газу - відновлювача до змісту газу - продукту відновних реакцій без встановлення їх взаємозв'язку у вигляді функціональної залежності, що відображає фізико-хімічні особливості процесів з їх участю, може привести до некоректних висновків.

Величина залишкового вмісту CO в колошниковому газі залежить від умов транспорту газу в шарі шихтових матеріалів, які визначаються способом завантаження і розподілу матеріалів, тобто, газопроникністю шару. Цей параметр в кінцевому підсумку і визначає повноту використання потенціалу відновлювальних та теплових властивостей CO . Величина ж вмісту CO_2 є сумою продуктів різних реакцій, як екзотермічних так ендотермічних, які реалізуються в умовах доменної плавки в інтервалі температур 200 - 1250 °C.

Оцінка теплового боку процесів в шарі шихтових матеріалів доменної печі

Вперше математична модель теплового балансу доменної печі, що описує теплофізичні і хімікофізичні процеси доменної плавки була запропонована проф. Б.І. Китаєвим в 1944 р [15]. Детальний опис цієї моделі показано в роботах [16-18]. Аналізуючи процес зміни теплоємності потоків газу і шихти по висоті доменної печі, проф. Б.І. Китаєв створив теорію теплообміну при доменній плавці, основні положення якої зводяться до наступних постулатів.

1. Тепловіддача від газу-теплоносія до шихти відбувається за двома сходами теплообміну: нижній і верхній. Існує зона уповільненого теплообміну, що розділяє нижню і верхню зони теплообміну. Температурний градієнт по висоті зони уповільненого теплообміну досягає мінімального значення.

2. Теплові процеси в кожній із ступенів теплообміну автономні і характеризуються великим розходженням у співвідношеннях теплоємностей потоків газу і шихти. Зони активного теплообміну відокремлені зоною уповільненої теплообміну, для них характерно відношення теплоємностей потоків, близьким до 1. Нижній щабель теплообміну має $W_{\text{ш}} > W_{\text{г}}$, тобто $m > 1,0$. А верхня ступінь $W_{\text{ш}} < W_{\text{г}}$, тобто $m < 1,0$.

3. Теплообмін в доменній печі вважається завершеним, це підтверджується наявністю зони уповільненої теплообміну. У цій зоні теплоємності потоків шихти і газу зближуються так, що $W_{\text{ш}} \approx W_{\text{г}}$, $m \approx 1$.

Загальнови́знано, що теплообмін між потоками шихтових матеріалів і газів в доменній печі здійснюється послідовно в двох зонах (верхній і нижній), розділених зоною уповільненої теплообміну - "холостою" зоною [14]. При цьому всі інші процеси (відновлення, шлакоутворення і ін.) в цих характе-

рних зонах не припиняються, а зміна співвідношення теплоємностей потоків в доменній печі призводить до зміни температур по висоті печі, представленому на рис. 1 [19].

В роботі [20] при розрахунку маси вуглецю, газифікованого вуглекислим газом по реакції Будуара автори вказують на те, що ступінь реалізації даної реакції залежить від температури шихти і температури газового потоку. Також зазначено, що з помітною швидкістю ця реакція починає протікати при температурах вище 800 °C, тобто в середніх і нижніх горизонтах доменної печі.

Аналогічний висновок міститься і в роботі [20]. Автори посилаються на те, що процес відновлення істотно змінюється, в разі коли шихта опускається до горизонтів з температурою 900-1000 °C, відзначаючи, що в цій зоні доменної печі продукт відновлення (CO_2) починає взаємодіяти з вуглецем палива по реакції (1): в сторону утворення CO , поглинаючи на свій розвиток близько 2970 кДж / кг Fe.

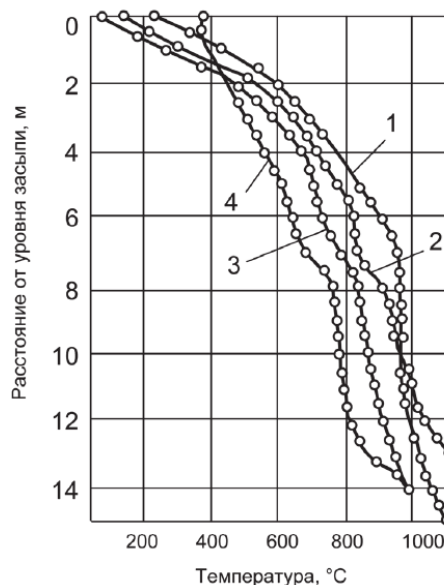


Рис.1. Зміна температури газу по висоті доменної печі при плавці окатишів, офлюсованих вапняком - 1, доломітом - 2; марганцевий - 3 і агломерату - 4.

При збільшенні швидкості протікання цієї реакції в нижній, високотемпературній частині доменної печі при в інтервалі температур 1100-1200 °C інтенсифікується реакція прямого відновлення FeO до Fe з поглинанням на свій розвиток близько 2726 кДж / кг Fe. Таким чином, ця реакція реалізується через послідовно - паралельний перебіг реакцій непрямого відновлення FeO оксидом вуглецю та газифікації вуглецю коксу діоксидом вуглецю, інтенсивність розвитку якої є визначальною при переході від механізму непрямого відновлення до прямого.

Дані про зміст CO_2 на різних горизонтах доменних печей, тобто при різній температурі процесу

[20], свідчать про те, що в нижньому і середньому горизонтах ($800 \div 1100$ °C) концентрація CO_2 більше, ніж це відповідає реакції Будуара ($\text{C (тв)} + \text{CO}_2 (\text{газ}) = 2 \text{CO (газ)}$).

Автори пояснюють встановлений факт інтенсивним накопиченням CO_2 за рахунок інтенсифікації реакцій «непрямого» відновлення. У цих умовах, як було зазначено вище, реакція газифікації вуглецю коксу загасає. У верхніх горизонтах концентрація CO_2 також значно менше рівноважної, що може бути пояснено незначним розвитком реакції Будуара при температурах менше 800 °C з практичним її припиненням, що призводить до того, що газ виходить з печі в незміненому складі. Якщо врахувати, що за даними цього дослідження не більше 20% маси утворюваного CO_2 витрачається на газифікацію вуглецю, то його кінцевий вміст у відхідних з печі газах повинен знизитися приблизно на 3-4%. Зміна ж вмісту CO при зміні способу завантаження [8] становить всього близько 0,4% для обраних в якості найгіршого та найкращого варіантів розподілення матеріалів на колошнику. Це мабуть і є причиною відсутності значущої кореляції між вмістами CO та CO_2 в [8].

На рис. 2 і 3 наведена зміна складу газу по висоті і перетинах, а також розподіл температур в доменній печі.

Згідно рис. 2 горновий газ, що формується в зоні і на горизонті фурм у міру просування вгору по висоті печі до колошника змінює свій склад і температуру внаслідок хімічних процесів і теплообміну з матеріалами, що опускаються. За перетинах печі, починаючи з распара, виявляються максимуми вмістів CO_2 на деякій відстані від стін печі. Вони відповідають ділянкам переважного розміщення залізородної частини шихти.

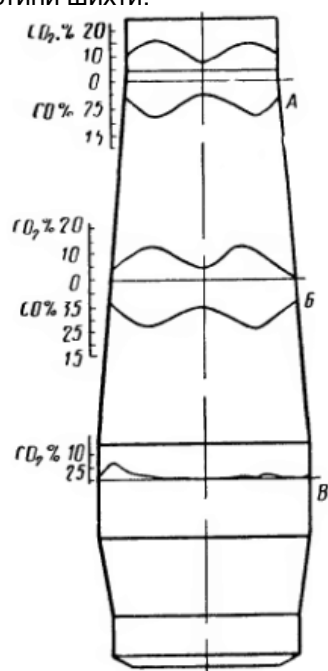


Рис. 2. Зміна складу газу по висоті і перетинах доменної печі.

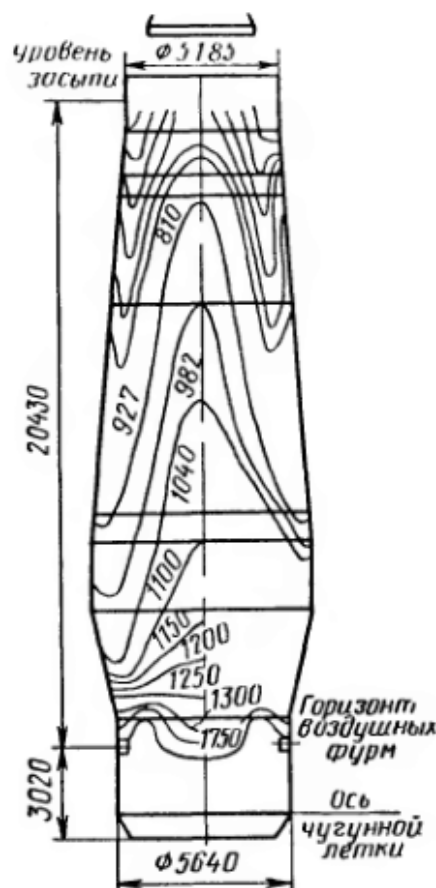


Рис. 3. Температурне поле доменної печі.

Мінімальний вміст CO_2 відзначається біля стін печі, де проходить велика кількість газу. Внаслідок підвищених швидкостей руху і меншої кількості залізородних матеріалів на цих ділянках, газ з меншою повнотою бере участь у взаємодії з оксидами заліза по реакціях непрямого відновлення. У напрямку до осі печі вміст CO_2 в газі також знижується через зменшення рудного навантаження на цих ділянках. Область печі ближче до її осі виявляється більш проникною для газів, які проводять тут меншу відновну роботу.

Максимум вмістів CO_2 в деякому віддаленні від стін печі характеризує розвиток периферійного потоку газу в печі. Зазвичай він повинен знаходитися на відстані не більше $1/3$ радіусу колошника від стін. При наближенні максимуму CO_2 до стін можливо ущільнення і навіть прилипання матеріалів, при віддаленні його від стін периферійний потік стає надмірно розвиненим.

Згідно з існуючими поглядами на механіку руху сипучих тіл (до яких відноситься кокс), над випускними отворами (фурмена зона) формується квазі-тор розпушення, що утворюється еліпсоїдами розпушення над зонами горіння [21]. На думку професора В. К. Грузинова, бажано поєднання гребеня матеріалів на колошнику печі з великою віссю квазітора розпушення. В цьому випадку відбувається завантаження дрібних фракцій шихти на вертикаль зони розпушених матеріалів, що покращує газодинамічні характеристики стовпа шихти в печі.

Крім того, газ прямує в ділянки більшої концентрації рудних матеріалів, покращуючи ступінь використання відновлювачів [20,22,23].

Виходячи з даних, наведених на рис. 5.2 і 5.3, можна вважати, що доменна піч є досить досконалим тепловим агрегатом. Зниження температури газового потоку по її висоті з 1300 °С на рівні фурм до 400-200°С на виході з колошника свідчить про досягнення високих рівнів передачі теплової енергії від її джерела до шихтових матеріалів.

На підставі аналітичного огляду даних про тепловий стан печі, який визначається взаємодією великої кількості реакцій, як екзотермічних так і

ендотермічних, слід пам'ятати, що склад колошникового газу, що залишає піч, тісно пов'язаний з витратою коксу, розвитком прямого і непрямого відновлення, та іншими властивостями залізородної частини шихти, вдуванням природного газу або інших видів палива через фурми, вмістом кисню в дутті.

Таким чином, зміна температури по висоті і перетинах доменної печі, як і склад газів, пов'язане з розподілом матеріалів, що опускаються, складом і якістю шихти і характеристиками дуття.

Бібліографічний опис

1. Теоретические и экспериментальные основы подготовки кокса к доменной плавке / А. Л. Подкорытов, А. М. Кузнецов, Е. Н. Дымченко и др. // *Металлург*. – 2009. – № 6. – С. 34-37.
2. Исследование процесса получения и эффективность применения коксового орешка в доменной плавке / Д. В. Горин, А. В. Храпко, А. В. Кузин, Н. В. Голухин // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2011. – № 3. – С. 10-16.
3. Бабарыкин Н.Н. Влияние восстановительных процессов на теплообмен в доменной печи/ Н.Н. Бабарыкин // *Сталь* –1981. –№ 3. – С. 5-9
4. Свер Е. Ольсен, Марет Тангстад, Тор Линдстад. Производство марганцевых ферро-сплавов (Пер. с англ.) – Trondheim: SINTEF and Tapir Academic Press, 2007. – 235 с.
5. Китаев, Б.И. Теплообмен в доменной печи / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Б.Д. Лазарев. – Москва: Металлургия, 1966. – 355 с.
6. Китаев Б.И. Теплотехника доменного процесса /Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий – Москва: Металлургия, 1978. – 248 с.
7. Воскобойников В. Г., Кудрин В. А., Якушев А. М. «Общая металлургия». – М.: Металлургия, 2005.
8. А.с. 1266863 СССР. М. Клз. С21В 5/00. Способ ведения доменной плавки / В.Н. Ковшов, И.Й. Дышлевич, Н.В. Терещенко, В.М. Бондарь, В.А. Петренко, В.В. Тарановский, А.Я. Ткач, В.П. Грищенко, (СССР) – №3713678/22-02; заявл. 26.03.84, опубл. 30.10.86. Бюл. № 40.
9. Товаровский И.Г. Аналитическое исследование процессов доменной плавки: монография / И. Г. Товаровский, В. И. Большаков, А. Е. Меркулов. - Д. : Экономика, 2011. - 205 с.
10. Ярошенко Ю.Г. Эволюция схем теплообмена в доменной печи / Ю.Г.Ярошенко, Н.А.Спирин, В.С.Швыдкий, Я.М.Гордон, В.В.Лавров. // *Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия*. 2016;59(8):523-530.
11. Теплотехника доменного процесса: монография/ Б.И. Китаев, Ю.Г.Ярошенко, Е.Л. Суханов и др.– М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
12. Китаев, Б.И. Управление доменным процессом / Б.И. Китаев – Свердловск: УПИ – 1984. – 94 с.
13. Похвиснев А.Н. Управление доменным процессом по изменению состава колошникового газа // *Теория и практика металлургий*.—1939.— №8.—С.15–19
14. Полянский Г.А. Математическая модель контроля и прогнозирования хода доменного процесса / Г.А. Полянский, В.И. Набока, А.П. Фоменко, Н.В. Крутас // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр.* — Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2008. — Вип. 16. — С. 361-371.
15. Kitaev B.I. The schema of heat exchange in a the blast furnace and the preporation of ores for melting // *Stal'* 7-8, 1944.
16. Гиммельфарб А.А., Ефименко Г.Г. Автоматическое управление доменным процессом. – М.: Металлургия, 1969.– 309с
17. Тараканов А.К. О рациональных технологических принципах построения алгоритмов управления тепловым режимом доменной плавки // *Известия вузов. Черная металлургия*.—1987.— С.134–138.
18. Тараканов А.К. Развитие теоретических основ и промышленная реализация новых методов управления технологическим режимом доменной плавки. Дисс. докт. техн. наук.– Днепропетровск, 1991.
19. Бабарыкин Н.Н., Марсуверский Б.А., Новиков В.С. Свойства окатышей ССГОК и их поведение в доменной печи // *Производство чугуна*. Вып. 4. Свердловск: УПИ, 1978. С. 66–79.
20. Китаев, Б.И. Управление доменным процессом / Б.И. Китаев – Свердловск: УПИ – 1984. – 94 с.

21. Камкіна Л.В., Надточій А.А., Анкудінов Р.В., Бабенко О.В. Системи технологій промисловості. Частина 1: Конспект лекцій (російською мовою). – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. – 53 с.
22. Каплун Л.И. Устройство и проектирование доменных печей: / Л.И.Каплун, А. В. Малыгин, О. П. Онорин, А. В. Пархачев // учебное пособие –Екатеринбург : УрФУ, 2016. – 219с.
23. Абрамин Г. В. Новая концепция загрузки доменной печи / Г. В. Абрамин, Б. М. Боранбаев, А. В. Кошельников, Д. А. Янковский // Сталь. 1999. № 3. С. 1□3.

Reference

1. Teoreticheskie i eksperimental'nye osnovy podgotovki koksa k domЕННОЙ plavke / A. L. Pod-korytov, A. M. Kuznecov, E. N. Dymchenko i dr. // Metallurg . – 2009. – № 6. – S. 34-37.
2. Issledovanie processa polucheniya i effektivnost' primeneniya koksovogo oreshka v domЕННОЙ plavke / D. V. Gorin, A. V. Hrapko, A. V. Kuzin, N. V. Goluhin // Metallurgicheskie processy i oborudovanie. – 2011. – № 3. – S. 10-16.
3. Babarykin N.N. Vliyanie vosstanovitel'nyh processov na teploobmen v domЕННОЙ pechi/ N.N Babarykin //Stal' –1981. –№ 3. – S. 5-9
4. Sver E. Ol'sen, Maret Tangstad, Tor Lindstad. Proizvodstvo margancevyh ferro-splavov (Per. s angl.) – Trondheim: SINTEF and Tapir Academic Press, 2007. – 235 s.
5. Kitaev, B.I. Teploobmen v domЕННОЙ pechi / B.I. Kitaev, YU.G. YAroshenko, B.D. Lazarev. –Moskva: Metallurgiya, 1966. – 355 s.
6. Kitaev B.I. Teplotekhnika domennogo processa /B.I. Kitaev, YU.G. YAroshenko, E.L. Suhanov, YU.N. Ovchinnikov, V.S. SHvydkij – Moskva: Metallurgiya, 1978. – 248 s.
7. Voskoboynikov V. G., Kudrin V. A., YAkushev A. M. «Obshchaya metallurgiya». – M.: Metallurgiya, 2005.
8. A.s. 1266863 SSSR. M. KI3. C21B 5/00. Sposob vedeniya domЕННОЙ plavki / V.N. Kovshov, I.J. Dyshlevich, N.V. Tereshchenko, V.M. Bondar', V.A. Petrenko, V.V. Taranovskij, A.YA. Tkach, V.P. Grishchenko, (SSSR) – №3713678/22-02; zayavl. 26.03.84, opubl. 30.10.86. Byul. № 40.
9. Tovarovskij I.G. Analiticheskoe issledovanie processov domЕННОЙ plavki: monografiya / I. G. Tovarovskij, V. I. Bol'shakov, A. E. Merkulov. - D. : Ekonomika, 2011. - 205 s.
10. YAroshenko YU.G. Evolyuciya skhem teploobmena v domЕННОЙ pechi / YU.G.YAroshenko, N.A.Spirin, V.S.SHvydkij, YA.M.Gordon, V.V.Lavrov. // Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenij. CHernaya Me-tallurgiya. 2016;59(8):523-530.
11. Teplotekhnika domennogo processa: monografiya/ B.I. Kitaev, YU.G.YAroshenko, E.L. Suhanov i dr.– M.: Metallurgiya, 1978. – 248 s.
12. Kitaev, B.I. Upravlenie domennym processom / B.I. Kitaev – Sverdlovsk: UPI – 1984. – 94 s.
13. Pohvisnev A.N. Upravlenie domennym processom po izmeneniyu sostava kolosnikovogo gaza // Teoriya i praktika metallurgii.—1939.—№8.—S.15–19
14. Polyanskij G.A. Matematicheskaya model' kontrolya i prognozirovaniya hoda domennogo processa / G.A. Polyanskij, V.I. Naboka, A.P. Fomenko, N.V. Krutas // Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii: Sb. nauchn. tr. — Dnipropetrovs'k.: ICHM NAN Ukraїni, 2008. — Vip. 16. — S. 361-371.
15. Kitaev B.I. The schema of heat exchange in a the blast furnace and the preperation of ores for melting // Stal' 7-8, 1944.
16. Gimmel'farb A.A., Efimenko G.G. Avtomaticheskoe upravlenie domennym processom. – M.: Metallurgiya, 1969.– 309s
17. Tarakanov A.K. O racional'nyh tekhnologicheskikh principah postroeniya algoritmov upravle-niya teplovym rezhimom domЕННОЙ plavki // Izvestiya vuzov. CHernaya metallurgiya.—1987.—S.134–138.
18. Tarakanov A.K. Razvitie teoreticheskikh osnov i promyshlennaya realizaciya novykh metodov upravleniya tekhnologicheskim rezhimom domЕННОЙ plavki. Diss. dokt. tekhn. nauk.– Dnepropetrovsk,1991.
19. Babarykin N.N., Marsuverskij B.A., Novikov V.S. Svoystva okatyshej SSGOK i ih povedenie v domЕННОЙ pechi // Proizvodstvo chuguna. Vyp. 4. Sverdlovsk: UPI, 1978. S. 66–79.
20. Kitaev, B.I. Upravlenie domennym processom / B.I. Kitaev – Sverdlovsk: UPI – 1984. – 94 s.
21. Kamkina L.V., Nadtochij A.A., Ankudinov R.V., Babenko O.V. Sistemi tekhnologij promislovosti. CHastina 1: Konspekt lekciy (rosijs'koyu movoyu). – Dnipropetrovs'k: NMetAU, 2014. – 53 s.
22. Kaplun L.I. Ustrojstvo i proektirovanie domennyh pechej: / L.I.Kaplun, A. V. Malygin, O. P. Onorin, A. V. Parhachev // uchebnoe posobie –Екатеринбург : УрФУ, 2016. – 219s.
23. Abramina G. V. Novaya koncepciya zagruzki domЕННОЙ pechi / G. V. Abramina, B. M. Boranbaev, A. V. Koshel'nikov, D. A. YAnkovskij // Stal'. 1999. № 3. S. 1□3.