

І. В. Шульга, к. техн. н., доцент, В. В. Владимиренко, аспірант,
І. О. Лаврова, к. техн. н., доцент

РАЦІОНАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ОТРИМАННЯ КОКСУ ІЗ ЗАДАНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
ДП «УХІН»*

Ключові слова: кокс доменний, кокс феросплавний, питомий електричний опір, вихід летких речовин, спікливість, ступінь подрібнення, відбивна здатність вітриніту.

Вступ. Як показано в попередніх роботах [1, 2], в сучасних умовах практично важливим є отримання коксу з двома рівнями питомого електричного опору: з питомим електричним опором не більше 0,1 Ом·см – для потреб доменного виробництва; з більшими значеннями питомого електричного опору – для використання в електропечах феросплавного виробництва. Нижче наведені головні технологічні принципи отримання коксу з двома рівнями заданого питомого електричного опору.

Доменний кокс. Відомо, що забезпечення низького питомого електричного опору доменного коксу відбувається одночасно з поліпшенням всього комплексу властивостей доменного коксу. Згідно з цим на підставі вимог до властивостей коксу поліпшеної якості була теоретично обґрунтована та сформульована концепція виробництва високоякісного коксу [3], що складається з наступних основних напрямків:

1. Формування раціональної сировинної бази коксування за рахунок забезпечення потрібних властивостей вугільної шихти, перш за все по зольності, сірчистості, ступеню метаморфізму. Підвищення глибини збагачення та зменшення зольності вугільних концентратів, підвищення ступеня однорідності вугільних шихт за петрографічним складом, зменшення кількості концентратів, які використовують для складання шихти на конкретному підприємстві та використання в шихтах переважно малосірчистого вугілля зі сприятливим хімічним складом мінеральної частини.

2. Раціональна технологія коксування, яку забезпечує спрямований вплив на фізико-хімічні процеси термічної деструкції та синтезу для отримання коксу з найбільшою часткою ділянок анізотропної структури (підвищення ступеня впорядкованості вуглецю коксу); зниження швидкостей коксування до рівня не більше 24 мм/годину; а також коригування температурного режиму за змін умов коксування.

3. Післяпічна обробка коксу, а саме: забезпечення стабільної вологості; раціональний рівень механічних навантажень на кокс за його сортування та додаткова механічна обробка коксу для реалізації наявних центрів механічних навантажень та утворення тріщин; обробка поверхні коксу з метою закриття пор і тріщин, а також уповільнення процесів газифікації.

Більшість дослідників серед властивостей вугілля та шихт, що найбільше впливають на якість отриманого коксу, виділяють [3, 4]: вихід летких речовин, спікливість шихти, петрографічну характеристику, зольність, сірчистість, технологічний режим вуглепідготовки.

Показник виходу летких речовин – одна з головних характеристик, яку застосовують як при постачанні вугілля для коксування, так і при розробці складів вугільних шихт. Численними дослідженнями показаний взаємозв'язок цього показника з виходом коксу та хімічних продуктів [4–6]. В той же час зв'язок виходу летких речовин з якістю коксу не такий однозначний через те, що вихід летких речовин може бути близьким та навіть практично однаковим у вугілля та їх сумішей, які мають вельми різні технологічні властивості. Тому визначальним для міцності коксу є не вихід летких речовин, а інші показники.

Співкливість вугілля найчастіше характеризують за даними пластометричного аналізу, перш за все по товщині пластичного шару Y (мм), яку визначають за ДСТУ 7722:2019 [7]. Відомо [8], що індивідуальне вугілля марок Ж та К, яке має найбільшу товщину пластичного шару, дає найміцніший кокс, тобто і товщина пластичного шару, і міцність отриманого коксу, в залежності від ступеня метаморфізму індивідуального вугілля змінюються по кривій з максимумом.

Важливим для характеристики властивостей вугілля та шихт є також показник середньої відбивної здатності вітриніту за даними петрографічного аналізу [9], який виконують за методикою стандарту ISO 7404 [10, 11]. Є певний взаємозв'язок цього показника з виходом летких речовин (вугілля та шихти з меншим виходом летких речовин у більшості випадків мають більший показник відбивної здатності). Але порівняно з виходом летких речовин відбивна здатність вугілля та шихт тісніше пов'язана з міцністю отриманого з них коксу, тому що петрографічні показники за своєю сутністю характеризують природу вугілля з точки зору як характеристик вихідного вуглеутворюючого матеріалу, так і глибини здійснення геологічних процесів вуглеутворення. Зокрема, найміцніший кокс отримують, як правило, з вугілля Донбасу та шихт на їх основі із середніми значеннями відбивної здатності (близько 1,0–1,2 %) [12]. Таким чином, величина відбивної здатності також значущо впливає на міцність коксу.

З метою характеристики технологічної цінності для коксування вугілля та шихт в сучасних умовах в ДП «УХІН» на базі петрографічних характеристик розроблені два комплексних показники [13]. Перший з них ($C_{ш}$ - співкливість шихти) характеризує вміст складових органічної маси вугілля, що утворюють при термічній деструкції значні кількості термостійких рідкорухливих продуктів, здатних міцно спікатися з твердофазним матеріалом:

$$C_{ш} = \frac{\Sigma(0,9 - 1,39)Vt}{100} \%,$$

де $\Sigma(0,9-1,39)$ – вміст у вітриніті у відсотках складових з відбивною здатністю від 0,9 до 1,39 %; Vt – вміст в органічній масі вугілля мацералів групи вітриніту, %.

Другий показник ($K_{ш}$ – коксуємість шихти, яку виражають у відносних одиницях) являє собою відношення у складі органічної маси вугілля сумарного вмісту добре спікливих мацералів групи ліптиніту та складових вітриніту з показником відбитку від 0,9 до 1,39 %, що можуть приймати опіснювальні присадки, до кількості таких присадок – суми опіснювальних мацералів та інертних складових вітриніту з показником відбитку більше 1,7 %:

$$K_{ш} = \frac{C_{ш} + L}{\Sigma OK + \frac{\Sigma(\geq 1,7)Vt'}{100}}$$

де L – вміст мацералів групи ліптініту, %; $\sum OK$ – сума опіснюючих компонентів (інертніту та двох третин семівітрініту), %.

Отже, показниками, які характеризують властивості шихти та найсуттєвіше впливають на міцність отриманого коксу, є товщина пластичного шару та петрографічні характеристики.

Відомо, що на технологічні властивості вугільної шихти помітно впливає *рівень її подрібнення*. Найціннішими з цієї точки зору у вугіллі Донбасу є класи крупності 3–0,5 мм. Крупніші зерна мають меншу питому поверхню, що не дозволяє їм брати активну участь у поверхневій взаємодії з іншими елементами вугільної засипки на стадіях спікання та утворення коксу. Навпаки, надмірне подрібнення вугільних зерен призводить до так званого явища «самоопіснення», внаслідок чого ускладнюється реалізація притаманного вугіллю та шихтам потенціалу спікливості – питома поверхня стає занадто великою для ефективного змочування її утворюваними внаслідок термохімічної деградації рідкорухливими продуктами. Крім того, надмірне подрібнення вугілля призводить до збільшення виходу фусів та погіршення якості смоли за показниками густини і вмісту нерозчинних речовин. Вугілля різних марок та різних басейнів має різні вихідну крупність, механічну міцність та подрібнюваність. Тому для кожного підприємства потрібна розробка раціональних схем підготовки шихти до коксування з урахуванням конкретних умов цього підприємства [14].

Головними факторами технології коксування та післяпечної обробки, що впливають на властивості отриманого коксу, є: період коксування; рівень температур в контрольних вертикалах; рівномірність прогріву засипки, що коксується, перш за все по висоті, а також по довжині, особливо в зонах навпроти крайніх вертикалів; кінцева температура коксового пирога; режим гасіння; технологія сортування коксу.

Система обігріву печей ПВР, застосована на всіх коксових батареях України, є найпоширенішою в сучасних конструкціях ДП «Гіпрококс» [15]. Для неї характерні дві ознаки: об'єднання вертикалів в пари та рециркуляція продуктів горіння (рис. 1).

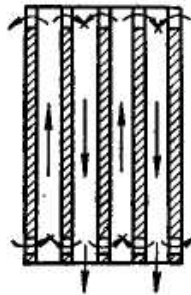


Рисунок 1 – Схема рециркуляції в печах системи ПВР

Простінок розбитий на пари вертикалів, поєднаних згори переважаючими вікнами. Горіння відбувається в одному з вертикалів пари, а іншим поєднаним вертикалом в цей же час до регенераторів відводяться продукти горіння.

В нижній частині вертикали, що працюють на висхідному та низхідному потоках, поєднані вікнами для рециркуляції. Крізь ці вікна частина продуктів спалювання з вертикалу, що працює на низхідному потоці, під впливом різниці тисків всмоктується до вертикалу, що працює на висхідному потоці, тобто відбувається рециркуляція продуктів горіння. Ступінь рециркуляції становить 30–40 %.

Переваги такої системи обігріву зумовлені перш за все розбавленням газу та повітря, що надходять на спалювання у вертикали висхідного потоку, продуктами спалювання, які рециркулюють з низхідного потоку на висхідний. Це призводить до зниження концентрацій газу та повітря в газоповітряній суміші у вертикалах висхідного потоку та зменшення швидкості горіння у відповідності із законом діючих мас:

$$v = - \frac{dc_r}{dt} = kc_r c_n,$$

де v – швидкість хімічної реакції горіння; c_r – концентрація газу в газоповітряній суміші; t – час реакції; k – константа швидкості реакції; c_n – концентрація повітря в газоповітряній суміші.

Як видно із записаної формули, зменшення концентрації газу та повітря призводить до зменшення швидкості горіння, а, отже, і збільшення часу t , необхідного для спалювання газу. Другим важливим позитивним наслідком рециркуляції є повернення частини ентальпії (тепловмісту) продуктів спалювання з низхідного потоку на висхідний, що сприяє зниженню витрати тепла на обігрів коксових печей.

При розробці технологічних параметрів коксування виходили з того, що загальна швидкість процесу коксування має забезпечувати достатню глибину здійснення термохімічних процесів поліконденсації на стадії утворення коксу і в той же час давати можливість технічно та економічно ефективно використовувати наявний пічний фонд. Дослідно-промисловими коксуваннями показано, що умови отримання високоякісного коксу виконуються при швидкості коксування 24–27 мм/годину.

У відповідності з цим раціональні періоди коксування для отримання коксу заданої якості складають:

- для коксових печей із середньою шириною камери 410 мм – не менше 17 годин;
- для коксових печей із середньою шириною камери 450 мм – не менше 19 годин.

Кінцева температура коксування, виміряна термopарами за 15 хвилин до видачі, має складати в осьовій площині коксового пирога 1050–1100 °С. За менших температур не досягається необхідна глибина здійснення процесів термічного синтезу. За більших температур виникає небезпека перегріву масиву вогнетривкої кладки з погіршенням умов її експлуатації та розтріскування коксового пирога безпосередньо в камері, ускладненню умов видачі коксу з печей та зменшенню виходу доменного коксу.

Рівень температур в опалювальній системі у відповідності з вимогами ПТЕ [16] має забезпечувати потрібний рівень температур коксування в коксі наприкінці заданого періоду коксування. У відповідності з рівнем температур в опалювальній системі встановлюють решту значущих технологічних параметрів обігріву печей (витрати опалювального газу загальні та по боках батареї, коефіцієнт надлишку повітря, розташування та вільні перерізи сталей і змінних регулювальних засобів тощо).

За зміни властивостей шихти та умов коксування рівень температур в опалювальній системі має коригуватись. Слід зазначити, що досягнення заданого рівня кінцевих температур коксування за різних періодів та за переробки шихти різної якості, природно, вимагає і різної витрати тепла. Нижче поданий аналіз впливу властивостей шихти та тривалості коксування на рівень температур в опалювальній системі.

Ступінь подрібнення шихти визначає її насипну густину. При цьому максимум насипної густини досягається за ступеня подрібнення 75–77 %. Відхилення в обидві боки призводять до зменшення насипної густини. З одного боку, підвищення насипної густини шихти є позитивним фактором, що збільшує продуктивність коксової батареї. Але

в той же час через необхідність підведення більшої кількості тепла до засипки того ж об'єму, але більшої маси, потрібне збільшення рівня температур в контрольних вертикалах.

З іншого боку, збільшення ступеня подрібнення дозволяє повніше реалізувати спікливість шихти, але знижує її насипну густину. Витрата тепла на коксування знижується, але одночасно зменшується і продуктивність коксових печей. Більше того, за надмірного подрібнення шихти та зростання кількості в ній пиловидних (менше 0,5 мм) класів відбувається т.зв. «самоопіснення» шихти і виникають ускладнення в експлуатації, зокрема, на стадії завантаження шихти до камер коксування. Таким чином, потрібний підбір оптимального ступеня подрібнення шихти з використанням прогресивних методів її підготовки, зокрема, диференційоване або групове подрібнення компонентів за схемами ДПК або ГПК. Ступень подрібнення найбільш твердого газового та петрографічно неоднорідного вугілля після попереднього подрібнення має становити 68–70 %, кінцевий ступень подрібнення шихти після остаточного подрібнення – 75–77 %, в т.ч. вміст пиловидних класів (менше 0,5 мм) в підготовленій до коксування шихті не повинен перевищувати 30 %.

Період коксування. Серед факторів, що характеризують технологічний режим коксування, найбільший вплив на витрату тепла в одиницю часу справляє саме тривалість періоду коксування. Так, практикою роботи встановлено, що збільшення тривалості коксування на 1 годину дозволяє знизити рівень температур в контрольних вертикалах на 15–30 °С, та навпаки – зниження періоду коксування вимагає відповідного збільшення рівня температур в контрольних вертикалах. Зміна рівня температур, в свою чергу, визначає рівень витрати опалювального газу на обігрів коксової батареї, тобто, з точки зору рівня температур в контрольних вертикалах підвищення періоду коксування дозволяє дещо знизити витрату тепла.

Однак, через те, що кінцева та середня за весь період коксування температури в коксівній засипці за правильно встановленого температурного режиму не залежать від тривалості процесу коксування, інтенсивність теплових втрат батареї крізь тепловіддавальні поверхні в докілья та ґрунт є величиною сталою. Тому за збільшення тривалості коксування понад проектний період кількість теплових втрат також збільшується. За даними роботи підприємств України, витрата тепла збільшується в середньому на 1,5 % (близько 10 ккал або 41,9 кДж на 1 кг сухої шихти) за збільшення тривалості коксування понад проектний період на 1 годину.

Вологість шихти також сильно впливає на завантаження та обігрів коксових печей. За збільшення вологості змінюється насипна густина шихти. Так, за послідовної зміни вологості шихти від 11,7 % до 2,1 % насипна густина шихти (в перерахунку на суху масу) змінюється від 0,623 т/м³ до 0,824 т/м³ відповідно. Це, як показано вище, закономірно призводить до зміни витрати тепла на коксування та вимагає зміни температури в контрольних вертикалах.

Вихід летких речовин. За коксування шихт з підвищеним виходом летких речовин утворюється велика кількість парогазових продуктів, що залишають камеру коксування крізь стояки до газозбірника. Середня за весь період коксування температура цих продуктів складає близько 750 °С, що помітно менше кінцевої температури коксу. Однак у порівнянні з коксом парогазові продукти мають більшу ентальпію, до якої входить величина питомої теплоти випаровування. Тому зростає кількість тепла, що виноситься з матеріальними потоками до газозбірника. Крім того, шихти з підвищеним виходом летких речовин мають, як правило, більший вміст найтвердішого газового вугілля. Внаслідок цього знижується ступінь подрібнення шихти, підвищується його насипна густина, а це,

як показано вище, також вимагає додаткового підведення теплової енергії. Це призводить до відповідного зростання витрати тепла – в цілому приблизно на 1 % на кожен відсоток збільшення виходу летких речовин. Тому температура в контрольних вертикалах також має бути збільшена приблизно на 4–6 °С на кожен відсоток збільшення виходу летких речовин.

Співклинність шихти. Рівень співклинності шихти, як і обсяги вугілля, що надходить на коксування, справляють помітний вплив перш за все на період коксування. Співклинність визначає кількість рідкорухливих продуктів, утворюваних за термічної деструкції органічної маси вугілля. Для завершення термохімічних перетворень цих продуктів, зокрема, процесів поліконденсації на стадіях спікання та утворення коксу, потрібен певний час. Крім того, за збільшення співклинності шихти зростає кількість не лише рідкорухливих, але і парогазових продуктів, особливо за коксування жирного вугілля з достатньо високим виходом летких речовин. Це, як показано вище, вимагає додаткової кількості тепла.

Речовинний склад вугілля. Різні компоненти речовинного складу вугілля та продукти їх термохімічних перетворень мають різні теплоємності. Тому різниця в речовинному складі вугілля зумовлює необхідність зміни режимних показників. Найбільший вплив на режимні показники справляє петрографічний склад вугілля. Зокрема, шихта з петрографічно неоднорідного вугілля вимагає за інших рівних умов помітно вищого (на 30–40 °С) рівня температур в контрольних вертикалах у порівнянні з шихтою з петрографічно однорідного вугілля. Це пов'язане з тим, що термохімічні перетворення інертніту вимагають більшої витрати тепла в порівнянні з вітринітом.

Багаторічні дослідження технології коксування, виконані фахівцями ДП «УХІН» на коксохімічних підприємствах України [17], свідчать, що при зміні періоду коксування слід відповідним чином змінювати (зменшувати при подовженні та збільшувати при скороченні) рівень заданих температур в контрольних вертикалах. Тому за зміни властивостей шихти та умов коксування рівень температур в опалювальній системі має коригуватись з урахуванням наступних правил:

- за подовження періоду коксування на 1 годину температуру в контрольних вертикалах необхідно зменшувати на 15–20 °С та навпаки;
- за збільшення вологості шихти на 1 % температура має підвищуватись на 5–7 °С та навпаки;
- за зростання насипної густини шихти на 10 кг/м³ температуру в контрольних вертикалах підвищують на 2–4 °С, та навпаки;
- за переробки петрографічно неоднорідного вугілля підвищення температури в контрольних вертикалах на 1 °С на кожен відсоток вмісту інертніту більше 10 %. До отримання результатів петрографічного аналізу за збільшення вмісту в шихті на 10 % петрографічно неоднорідного вугілля, що потребує для своїх термохімічних перетворень більшої кількості тепла, температуру в вертикалах слід підвищити на 3–4 °С, та навпаки.

При коксуванні внаслідок термічної деструкції вугілля та виділення парогазових продуктів в пічній камері виникає надлишковий тиск, величина якого визначається кількістю утворених парогазових продуктів. Ці продукти евакуюються із засипки у підсклепінневий простір печі, а потім крізь стояки до газозбірника. В той же час пластична маса спричинює гідравлічний опір руху парогазових продуктів крізь засипку. У камері коксування два розташованих паралельно стінкам пластичних шари (рис. 2) сполучуються у верхній частині горизонтальним пластичним шаром та разом з подом утворюють призму (мішок), що ускладнює рух парогазових продуктів до підсклепінневого простору.

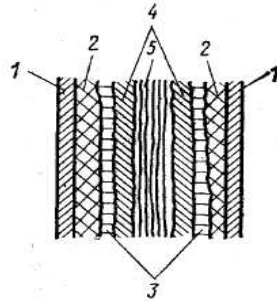


Рисунок 2 – Схема розташування шарів запуску в камері коксування через 6-8 годин після завантаження: 1 – кокс; 2 – напівкокс; 3 – пластичний шар; 4 – суха шихта; 5 – волога шихта

Внаслідок цього всередині призми зростає тиск, створюваний виділеними парогазовими продуктами. Частина цього тиску передається на стінки камери і є тиском розпору [18]. Виконані в ДП «УХІН» експериментальні дослідження дозволили визначити тиск розпору для шихт різного складу і визначити такі склади шихт, які дозволяють отримувати високоякісний кокс при дотриманні безпечних умов експлуатації кладки опалювальних простінок коксових печей. Для переробки шихт з великими значеннями тиску розпору потрібна конструкція коксових печей із опалювальним простінком підвищеної міцності [19]. Таким чином, небезпечним з точки зору підвищеного тиску розпору є петрографічно однорідне вугілля середнього та високого ступенів метаморфізму марок К і ПС та шихти, що містять більше 50 % такого вугілля. Таке вугілля та шихти слід перевірити експериментально на величину тиску розпору в умовах лабораторної установки ДП «УХІН» за ДСТУ 8724:2017 [20].

Гасіння коксу може здійснюватися сухим або мокрим способом. Обидва ці способи за умови правильної експлуатації дозволяють забезпечити стабільну вологість коксу. При цьому сухе гасіння дає можливість поліпшити механічну міцність і практично весь комплекс показників якості та утилізувати тепло розпеченого коксу. Однак більш розповсюдженим за сучасним умов є мокре гасіння, яке характеризується значно меншими капітальними вкладеннями. Сучасні технології мокрого гасіння мають забезпечувати його стабільну вологість на рівні 3,0–4,0 %. Слід зазначити, що обов'язковою умовою отримання коксу зі стабільною вологістю є забезпечення рівномірного приймання коксу в гасильний вагон.

Механічна обробка коксу для формування його ситового складу здійснюється під час сортування коксу. Завданням технології сортування є отримання товарних класів крупності коксу. За сортування валовий кокс розділяють на товарні класи за крупністю.

Стабільний технологічний режим сортування дозволяє забезпечити стабільність механічної міцності коксу. Крім того, існує також можливість диференційованого накладання механічних зусиль на кокс під час його сортування з метою зміцнення коксу [21].

Феросплавний кокс. Фахівцями Слов'янського державного педагогічного університету та УНПА «Укркокс» [22] сформульовані головні вимоги феросплавного виробництва до якості коксу як вуглецевого відновника, серед яких слід зазначити:

- високий питомий електричний опір – не менше 0,6 Ом·см;
- висока реакційна здатність;
- CRI за ДСТУ 4703:2006 [23] не менше 20 %;
- константа швидкості реакції $C+CO_2 \rightarrow 2CO$ за ДСТУ 7664:2014 [24] не менше $0,5 \text{ см}^3/(\text{г}\cdot\text{с})$;
- зольність сухої маси A^d - не вище 18 %;

- загальна сірчистість сухої маси S_t^d – не більше 1,4 %;
- вихід летких речовин з горючої маси V^{daf} – не вище 3,0 %.

Тому, як вже зазначалось, в цьому випадку опір коксу, на відміну від доменного процесу, має бути якомога більшим. Готовність в цьому випадку повинна лише забезпечувати міцність коксу, достатню для мінімізації втрат за його транспортування та завантаження у феросплавні печі. Згідно із цим особливостями виробництва феросплавного коксу мають бути менші спікливість та коксівність шихти, що дає можливість використовувати шихти на основі газового вугілля, та менші кінцеві температури коксування (900–950 °С). Готовність коксу при цьому має забезпечувати лише відхід коксового пирога від стінок камери коксування для забезпечення можливості його видачі. Через менші кінцеві температури можлива інтенсифікація роботи коксових печей за їх роботи на зменшених періодах або, навпаки, робота на зменшених температурах в опалювальній системі, що дає можливість зекономити опалювальний газ.

Порівняльна характеристика особливостей отримання коксу з різними рівнями питомого електричного опору наведена в табл. 1. Як бачимо, технологічні особливості отримання коксу з різними рівнями питомого електричного опору мають суттєві відмінності. Так, шихта для отримання високоякісного доменного коксу з низькими значеннями питомого електричного опору повинна мати високі спікливість та коксівність, а це зумовлює її складання на основі добре спікливого вугілля марок Ж та К, в т.ч. найкращого коксового вугілля – не менше 25 %. В той же час для забезпечення прийнятних значень тиску розпору шихта не має містити більше 50 % сумарного вмісту вугілля тих марок, що розвивають найбільший тиск розпору – коксового та пісунато-спікливого.

Для отримання високоякісного коксу з низьким питомим електричним опором швидкість коксування не повинна перевищувати 24 мм/годину, а кінцева температура коксування має знаходитись в межах 1050–1100 °С. При цьому максимальний рівень температур в опалювальній системі для збереження вогнетривкої кладки повинен згідно з п. 10.186 ПТЕ-2017 не перевищувати 1410 °С. За таких умов перспективними прогресивними технологіями отримання високоякісного коксу можуть бути – трамбування вугільної шихти (для шихт с меншою спікливістю) та коксування в печах без уловлювання хімічних продуктів (для шихт з меншою спікливістю).

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика особливостей отримання коксу з різними рівнями питомого електричного опору

Показники	Одиниці виміру	Числові значення за отримання коксу:	
		Доменного	Феросплавного
Вміст в шихті основних марок коксівного вугілля	%	Ж+К≥50; К≥25; К+ПС≤50	Г≥50
Швидкість коксування	мм/год	≤24	27–29
Кінцева температура коксування	°С	1075±25	930±30
Максимальний рівень температур в опалювальній системі	°С	≤1410	1360–1380
Можливості застосування прогресивних технологій		Трамбування; печі без уловлювання	Термічна підготовка, безперервні методи

На відміну від доменного коксу, для отримання феросплавного коксу з підвищеними значеннями питомого електричного опору вугільна шихта має складатися на основі відносно менш дефіцитного та більш дешевого газового вугілля. Можливе форсування роботи коксових печей шляхом збільшення швидкості коксування та зменшення обороту печей, що дає можливість збільшити продуктивність та поліпшити техніко-економічні показники. Для отримання феросплавного коксу достатньо значно менших кінцевої температури коксування (900–960 °С) та максимальних температур в опалювальній системі – 1360–1380 °С. Тому організація виробництва феросплавного коксу можлива на коксових печах з гіршим технічним станом вогнетривкої кладки.

Згідно з вимогами феросплавного виробництва до властивостей коксу та технологічними особливостями його отримання серед перспективних прогресивних процесів виробництва варто зазначити технології, що дозволяють отримувати кокс із шихт на основі газового вугілля або взагалі з індивідуального газового вугілля – термічну підготовку шихти та безперервні процеси коксування (отримання формованого коксу та безперервне шарове коксування).

Висновки. Аналіз технологічних вимог споживачів до коксу з різними рівнями питомого електричного опору дозволив розробити раціональні технологічні параметри виробництва коксу із заданими значеннями ПЕО, зокрема доменного коксу з низьким опором та феросплавного коксу з високим опором.

Для виробництва високоякісного доменного коксу з низькими значеннями ПЕО необхідні:

- високі спікливість та коксівність шихти на основі добре спікливого вугілля марок Ж та К;
- тиск розпору вугільної шихти за коксування не більше 7 кПа;
- швидкості коксування не більше 24 мм/годину;
- кінцева температура коксування – 1050–1100 °С;
- максимальний рівень температур в опалювальній системі – не вище 1410 °С;
- можливе застосування прогресивних технологій – трамбування вугільної шихти та коксування в печах без уловлювання хімічних продуктів.

Технологічними особливостями отримання феросплавного коксу з високими значеннями питомого електричного опору мають бути:

- використання вугільних шихт на основі газового вугілля;
- підвищення швидкості коксування до рівня 27–29 мм/годину з відповідним зменшенням оборотів печей;
- кінцева температура коксування – 930±30 °С;
- максимальний рівень температур в опалювальній системі – 1360–1380 С;
- можливе застосування прогресивних технологій – термічної підготовки шихти та безперервних процесів коксування (отримання формованого коксу та безперервного шарового коксування).

Література

1. Шульга І.В. Використання показника питомого електричного опору для оцінки готовності коксу / І.В. Шульга, В.В. Владимиренко // ВуглеХімічний журнал. 2023. № 3. С. 3–10.

2. Vladymyrenko, V., Shulga, I. The Relationship Between Specific Electrical Resistance and the Readiness of Coal Coke (2023) Materials Science Forum, 1096, pp. 103–108.
3. Филатов Ю. В. Теория и практика производства и применения доменного кокса улучшенного качества / Ю. В. Филатов, Е. Т. Ковалев, И. В. Шульга и др. – Київ: Наукова думка, 2011. – 128 с.
4. Мениович Б. И. Повышение эффективности процесса слоевого коксования / Б. И. Мениович, С. И. Пинчук, А. Г. Дюканов. – Київ: Техніка, 1985. – 229 с.
5. Вирозуб И. В. Расчеты коксовых печей и процессов коксования / И. В. Вирозуб, Р. Е. Лейбович. – Київ: Вища школа, 1970. – 270 с.
6. Телешев Ю. В. Исследование и разработка способов управления выходом и качеством продуктов коксохимического производства. Дисс. ... канд. техн. наук 05.17.07 / Ю. В. Телешев. – Харьков: УХИН, 1998. – 150 с.
7. ДСТУ 7722:2015 Вугілля кам'яне. Метод визначення пластометричних показників. – Київ: УкрНДНЦ, 2016. – 16 с.
8. Саранчук В. І. Основи фізики і хімії горючих копалин / В. І. Саранчук, М. О. Ільяшов, В. В. Ошовський, В. С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – 640 с.
9. Маценко Г. П. Короткий словник з петрографії вугілля / Г. П. Маценко, В. С. Білецький, Т. Г. Шендрик. – Донецьк : Східний видавничий дім. – 2011. – 74 с.
10. ISO 7404-1:2016 Methods for the petrographic analyses of coals. Part 1. Vocabulary. – Geneva, ISO: 2016. – 6 p.
11. ISO 7404-2:2009 Methods for the petrographic analyses of coals. Part 2. Methods of preparing coal samples. Geneva, ISO: 2009. – 12 p.
12. Ковалев Е. Т. Формирование свойств кокса. Реакционная способность / Е. Т. Ковалев, В. М. Шмалько, И. В. Шульга, А. И. Рыщенко // Углекимический журнал. 2006. № 5–6. С. 13–20.
13. Кафтан Ю. С. Взаимосвязь органической и минеральной частей угольной шихты с «холодной» и «горячей» прочностью кокса / Ю. С. Кафтан, И. Д. Дроздник, Д. В. Мирошниченко и др. // Углекимический журнал, 2007. № 3 – 4. С. 3–13.
14. Коваль В. В. Оптимізація схеми підготовки вугілля до коксування. Дис. на здобуття вченого ступеня доктора філософії. – Харків: НТУ ХПІ, 2023. – 166 с.
15. Шульга І. В. Устаткування підприємств з переробки твердих горючих копалин [Електронний ресурс] / І. В. Шульга, Д. В. Мірошниченко. – Харків – Тернопіль: НТУ «ХПІ» – Видавництво «Крок», 2022. – 209 с.
16. ПТЕ-2017 Правила технічної експлуатації коксохімічних підприємств. – Харків: ДП «Гипрококс», 2018. – 283 с.
17. Васильев Ю. С. Разработки УХИНа по совершенствованию промышленной техники коксования / Ю. С. Васильев, И. В. Шульга, Э. И. Торяник // Углекимический журнал. 2010. № 3 – 4. С. 38–48.
18. Кузніченко В. М. Тиск розпирання вугілля та шихт в процесі коксування. / В. М. Кузніченко, І. В. Шульга, О. В. Ситник – Харків: Планета-Прінт, 2021. – 210 с.
19. Патент України на винахід № 27068. Горизонтальна коксова піч / М. С. Шептовицький, Ю. С. Васильев, С. І. Кауфман, В. С. Кононенко, О. М. Мінасов, З. В. Островський, В. І. Рудика, А. Г. Старовойт, Л. М. Фідчунов, І. В. Шульга. – 2000. Бюл. № 1.
20. ДСТУ 8724:2017. Вугілля кам'яне та шихти на його основі. Метод визначення тиску розпирання, який виникає під час коксування. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 16 с.

21. Shulga I. V. Moisture Content of Wet-Quenched Coke / I. V. Shulga, I. V. Miroshnichenko, I. M. Ryschenko, D. V. Miroshnichenko // *Coke and Chemistry*. – 2019. – V. 62. – N 9. – P. 402–407.

22. Лазаренко А. Я. Производство и использование высокорреакционного кокса в ферросплавной промышленности / А. Я. Лазаренко, А. Н. Лихенко // *УглеХимический журнал*. 2006. № 3 – 4. С. 17–22.

23. ДСТУ 4703:2006 (ISO 18894:2006, MOD) Кокс. Метод визначення індексу реакційної здатності (CRI) та міцності залишку коксу після реакції (CSR). Київ: УкрНДНЦ, 2006. – 27 с.

24. ДСТУ 7664:2014 Кокс кам'яновугільний. Метод визначення реакційної здатності. – К.: УкрНДНЦ, 2014. – 15 с.

Bibliography (transliterated)

1. Shulga I.V. Viktoristannya pokaznika pitomogo elektrichnogo oporu dlya ocinki gotovnosti koksu / I.V. Shulga, V.V. Vladymyrenko // *VugleHimichnij zhurnal*. 2023. № 3. P. 3–10.

2. Vladymyrenko, V., Shulga, I. The Relationship Between Specific Electrical Resistance and the Readiness of Coal Coke (2023) *Materials Science Forum*, 1096, pp. 103–108.

3. Filatov Yu. V. Teoriya i praktika proizvodstva i primeneniya domennogo koksa uluchshennogo kachestva / Yu. V. Filatov, E. T. Kovalev, I. V. Shulga i dr. – Kiyiv: Naukova dumka, 2011. – 128 p.

4. Meniovich B. I. Povyshenie effektivnosti processa sloevogo koksovaniya / B. I. Meniovich, S. I. Pinchuk, A. G. Dyukanov. – Kiyiv: Tehnika, 1985. – 229 p.

5. Virozub I. V. Raschety koksovyyh pechej i processov koksovaniya / I. V. Virozub, R. E. Lejbovich. – Kiyiv: Visha shkola, 1970. – 270 p.

6. Teleshev Yu. V. Issledovanie i razrabotka sposobov upravleniya vyhodom i kachestvom produktov koksohimicheskogo proizvodstva. Diss. ... kand. tehn. nauk 05.17.07 / Yu. V. Teleshev. – Harkov: UHIN, 1998. – 150 p.

7. DSTU 7722:2015 Vugillya kam'yane. Metod viznachennya plastometrichnih pokaznikiv. – Kiyiv: UkrNDNC, 2016. – 16 p.

8. Saranchuk V. I. Osnovi fiziki i himiyi goryuchih kopalyn / V. I. Saranchuk, M. O. Plyashov, V. V. Oshovskij, V. S. Bileckij. – Doneck: Shidnij vidavnychij dim, 2008. – 640 p.

9. Macenko G. P. Korotkij slovnik z petrografiyi vugillya / G. P. Macenko, V. S. Bileckij, T. G. Shendrik. – Doneck : Shidnij vidavnychij dim. – 2011. – 74 p.

10. ISO 7404-1:2016 Methods for the petrographic analyses of coals. Part 1. Vocabulary. – Geneva, ISO: 2016. – 6 p.

11. ISO 7404-2:2009 Methods for the petrographic analyses of coals. Part 2. Methods of preparing coal samples. Geneva, ISO: 2009. – 12 p.

12. Kovalev E. T. Formirovanie svojstv koksa. Reakcionnaya sposobnost / E. T. Kovalev, V. M. Shmalko, I. V. Shulga, A. I. Ryshenko // *Uglehimicheskij zhurnal*. 2006. № 5 – 6. P. 13–20.

13. Kaftan Yu. S. Vzaimosvyaz organicheskoy i mineralnoj chastej ugolnoj shihty s «holodnoj» i «goryachej» prochnostyu koksa / Yu. S. Kaftan, I. D. Drozdnyk, D. V. Miroshnichenko i dr. // *Uglehimicheskij zhurnal*, 2007. № 3 – 4. P. 3–13.

14. Koval V. V. Optimizaciya shemi pidgotovki vugillya do koksovannya. Dis. na zdobuttya vchenogo stupenya doktora filosofiyi. – Harkiv: NTU HPI, 2023. – 166 p.

15. Shulga I. V. Ustatkuvannya pidpriyemstv z pererobki tverdih goryuchih kopolin [Elektronnij resurs] / I. V. Shulga, D. V. Miroshnichenko. – Harkiv – Ternopil: NTU «HPI» – Vidavnicтво «Krok», 2022. – 209 p.
16. PTE-2017 Pravila tehnicnoyi ekspluatatsiyi koksohimichnih pidpriyemstv. – Harkiv: DP «Giprokoks», 2018. – 283 p.
17. Vasilev Yu. S. Razrabotki UHINa po sovershenstvovaniyu promyshlennoj tehniki koksovaniya / Yu. S. Vasilev, I. V. Shulga, E. I. Toryanik // Uglehimicheskij zhurnal. 2010. № 3–4. P. 38–48.
18. Kuznichenko V. M. Tisk rozpirannya vugillya ta shiht v procesi koksovannya. / V. M. Kuznichenko, I. V. Shulga, O. V. Sitnik – Harkiv: Planeta-Print, 2021. – 210 p.
19. Patent Ukraini na vinahid № 27068. Gorizontalna koksova pich / M. S. Sheptovickij, Yu. S. Vasilyev, S. I. Kaufman, V. S. Kononenko, O. M. Minasov, Z. V. Ostrovskij, V. I. Rudika, A. G. Starovojt, L. M. Fidchunov, I. V. Shulga. – 2000. Byul. № 1.
20. DSTU 8724:2017. Vugillya kam'yanе ta shiht na jogo osnovi. Metod viznachennya tisku rozpirannya, yakij vinikaye pid chas koksovannya.–Kiyiv: DP «UkrNDNC»,2018.– 16 p.
21. Shulga I. V. Moisture Content of Wet-Quenched Coke / I. V. Shulga, I. V. Miroshnichenko, I. M. Ryschenko, D. V. Miroshnichenko // Coke and Chemistry. – 2019. – V. 62. – N 9. – P. 402–407.
22. Lazarenko A. Ya. Proizvodstvo i ispolzovanie vysokoreakcionnogo koksa v ferrosplavnoj promyshlennosti / A. Ya. Lazarenko, A. N. Lihenko // UgleHimicheskij zhurnal. 2006. № 3 – 4. P. 17–22.
23. DSTU 4703:2006 (ISO 18894:2006, MOD) Koks. Metod viznachennya indeksu reakcijnoyi zdatnosti (CRI) ta micnosti zalishku koksu pislya reakcii (CSR). Kiyiv: UkrNDNC, 2006. – 27 p.
24. DSTU 7664:2014 Koks kam'yanovugilnij. Metod viznachennya reakcijnoyi zdatnosti. – K.: UkrNDNC, 2014. – 15 p.

УДК 662.7

I. В. Шульга, к. техн. н., доцент, В. В. Владимиренко, аспірант,
I. О. Лаврова, к. техн. н., доцент

РАЦІОНАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ОТРИМАННЯ КОКСУ ІЗ ЗАДАНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ПИТОМОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ

В роботі наведені головні технологічні принципи отримання коксу з двома рівнями заданого питомого електричного опору (ПЕО) для доменного і феросплавного виробництва відповідно. ПЕО є важливою характеристикою коксу, що тісно пов'язаний з його готовністю та всім комплексом металургійних властивостей. Зі зростанням готовності електричний опір коксу зменшується одночасно з поліпшенням його споживацьких властивостей. Тому визначений за стандартних умов питомий електричний опір є об'єктивною характеристикою готовності коксу.

На підставі вимог до властивостей коксу поліпшеної якості була теоретично обґрунтована та сформульована концепція виробництва високоякісного коксу. Проаналізовані технологічні і фізико-хімічні фактори виробництва, що значуще впливають на показники питомого електричного опору, такі як сировинна база коксування (марочний склад шихти), режимно-технологічні фактори (температурний режим коксування,

об'єм підклепінневого простору, швидкість коксування), вихід летких речовин, вологість, спікливість та ступінь подрібнення шихти, середня відбивна здатність вітриніту. Також значуще впливає на якісні показники отриманого коксу апаратурно-конструктивні особливості коксових печей, наявність чи відсутність термічної підготовки шихти та технологія коксування (трамбування, безперервне шарове коксування).

Аналіз технологічних вимог споживачів до коксу з різними рівнями питомого електричного опору дозволив розробити раціональні рівні технологічних параметрів виробництва коксу із заданими значеннями ПЕО, зокрема доменного коксу з низьким опором та феросплавного коксу з високим опором і раціональний комплекс прийомів післяпечної підготовки коксу для різних напрямків його використання у відповідності з вимогами конкретних споживачів. Зокрема, подрібнюючи найкрупніші (та найменш готові) класи доменного коксу, можна поліпшити його характеристики. За допомогою яких оцінюються готовність та весь комплекс споживацьких властивостей доменного коксу. В той же час таку операцію для феросплавного коксу робити не варто, оскільки це зменшує питомий електричний опір коксу та ефективність роботи феросплавних електропечей.

Ключові слова: кокс доменний, кокс феросплавний, питомий електричний опір, вихід летких речовин, спікливість, ступінь подрібнення, відбивна здатність вітриніту.

И. В. Шульга, В. В. Владимиренко, И. О. Лаврова

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОКСА С ЗАДАНЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

В работе представлены главные технологические принципы получения кокса с двумя уровнями заданного удельного электрического сопротивления (УЭС) для доменного и ферросплавного производства соответственно. УЭС является важной характеристикой кокса, которая тесно связана с его готовностью и всем комплексом металлургических свойств. С ростом готовности электрическое сопротивление кокса уменьшается одновременно с улучшением его потребительских свойств. Поэтому определенное в стандартных условиях удельное электрическое сопротивление является объективной характеристикой готовности кокса.

На основании требований к свойствам кокса улучшенного качества теоретически обоснована и сформулирована концепция производства высококачественного кокса. Проанализированы технологические и физико-химические факторы производства, значимо влияющие на показатели удельного электрического сопротивления, такие как сырьевая база коксования (марочный состав шихты), режимно-технологические факторы (температурный режим коксования, объем подводного пространства, скорость коксования), выход летучих веществ, влажность, спекаемость и степень измельчения шихты, средняя отражательная способность витринита. Также значимо влияют на качественные показатели полученного кокса апаратурно-конструктивные особенности коксовых печей, наличие или отсутствие термической подготовки шихты и технология коксования (трамбувание, непрерывное слоевое коксование).

Анализ технологических требований потребителей к коксу с разными уровнями удельного электрического сопротивления позволил разработать рациональные уровни технологических параметров производства кокса с заданными значениями УЭС, в том

числе доменного кокса с низким сопротивлением и ферросплавного кокса с высоким сопротивлением и рациональный комплекс приемов послепечной подготовки кокса для разных направлений в соответствии с требованиями конкретных потребителей. В частности, измельчая самые крупные (и менее готовые) классы доменного кокса, можно улучшить его характеристики, посредством которых оцениваются готовность и весь комплекс потребительских свойств доменного кокса. В то же время, такую операцию для ферросплавного кокса делать не стоит, поскольку это уменьшает удельное электрическое сопротивление кокса и эффективность работы ферросплавных электропечей.

Ключевые слова: кокс доменный, кокс ферросплавный, удельное электрическое сопротивление, выход летучих веществ, спекаемость, степень измельчения, отражательная способность витринита.

I. V. Shulga, V. V. Vladymyrenko, I. O. Lavrova

RATIONAL TECHNOLOGICAL PRINCIPLES OF RECEIVING COKE WITH SPECIFIC INDICATORS OF SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE

The paper presents the main technological principles of obtaining coke with two levels of given specific electrical resistance (PEO) for blast furnace and ferroalloy production, respectively. PEO is an important characteristic of coke, which is closely related to its readiness and the whole complex of metallurgical properties. As readiness increases, the electrical resistance of coke decreases simultaneously with the improvement of its consumer properties. Therefore, the specific electrical resistance determined under standard conditions is an objective characteristic of coke readiness.

On the basis of the requirements for the properties of coke of improved quality, the concept of production of high-quality coke was theoretically justified and formulated. The technological and physico-chemical factors of production that significantly affect the indicators of specific electrical resistance are analyzed, such as the raw material base of coking (grade composition of the charge), regime and technological factors (temperature regime of coking, volume of the sub-vault space, speed of coking), yield of volatile substances, humidity, cohesiveness and the degree of grinding of the charge, the average reflectivity of vitrinite. Also, the quality indicators of the obtained coke are significantly influenced by the hardware and design features of coke ovens, the presence or absence of thermal preparation of the charge and coking technology (tamping, continuous layer coking).

The analysis of the technological requirements of consumers for coke with different levels of specific electrical resistance made it possible to develop rational levels of technological parameters for the production of coke with given PEO values, in particular blast furnace coke with low resistance and ferroalloy coke with high resistance, and a rational set of techniques for post-furnace preparation of coke for various directions of its use in compliance with the requirements of specific consumers. In particular, by grinding the largest (and least ready) classes of blast furnace coke, its characteristics can be improved. With the help of which the readiness and the entire set of consumer properties of blast furnace coke are evaluated. At the same time, such an operation should not be performed for ferroalloy coke, as it reduces the specific electrical resistance of coke and the efficiency of ferroalloy electric furnaces.

Keywords: blast furnace coke, ferroalloy coke, specific electrical resistance, release of volatile substances, solubilization, degree of grinding, reflectivity of vitrinite.