

О.А. ЖУЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., А.П. КОРОТИНСЬКИЙ, аспірант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
ім. І. Сікорського, Київ, Україна

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛЮВАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Для підвищення ефективності виробництва вуглецевих виробів як даної технологічної стадії, так і, як результат, всього виробництва вуглецевих виробів у цілому необхідне формулювання критерію оптимального керування та обмежень на технологічні параметри процесу та показників його якості. Досліджено процес випалювання вуглецевих заготовок з метою створення системи оптимального управління. Проведено аналіз існуючих досліджень, визначені фактори та їх вплив на процес випалювання та тепловий баланс камери, розглянуті основні способи введення процесу випалювання, наведені переваги та недоліки кожного з способів. Розглянуто та проаналізовано техніко-економічні показники, які можуть бути використані як критерії оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів, а саме: рентабельність, прибуток від реалізації продукції, собівартість готової продукції, експлуатаційні витрати, продуктивність. Також розглянуто питання використання якісних показників як критеріїв оптимального керування, таких як: об'ємна щільність, питомий електричний опір, теплопровідність. Наведено переваги та недоліки приведених критеріїв, обрано складову експлуатаційних витрат як критерій оптимального керування процесом. Крім критерію оптимальності для постановки задачі керування процесом випалювання вуглецевих виробів сформульовано обмеження, які діють у процесі керування та проведена їх умовна класифікація. Показано, що у зв'язку з неможливістю контролювати показники якості виробів, що випалюються, безпосередньо під час процесу, для забезпечення їх заданої якості потрібно враховувати обмеження на температурний режим процесу, що є складною задачею, враховуючи їх взаємозв'язок. Сформульована постановка задачі керування процесом випалювання вуглецевих виробів. Для розв'язання поставленої задачі керування у подальших дослідженнях потрібно розробити математичну модель процесу випалювання та метод врахування взаємозв'язаних параметричних обмежень.

Ключові слова: процес випалювання, вуглецеві заготовки, критерій управління, технологічні обмеження, оптимальне керування.

Проблема і її зв'язок з науковими і практичними завданнями. В останні десятиліття практично у всіх галузях промисловості помітно зростає роль вуглеграфітових виробів. Вони знайшли своє застосування в металургії, машинобудуванні, енергетиці, хімічній промисловості.

Якість кінцевих виробів багато в чому визначається режимом проведення основних операцій виробництва вуглеграфітових виробів. Випалювання, термічна обробка «зелених» (спресованих) заготовок, при якій сполучний матеріал (пек) перетворюється в кокс та скріплює частинки наповнювача, є основною технологічною операцією, що вимагає істотних енергетичних витрат. На цій стадії переробки вихідних матеріалів закладається структура майбутнього виробу, що визначає його основні властивості. Отримання випалених заготовок відповідної якості обумовлюється суворим дотриманням значної кількості технологічних параметрів.

В процесі випалювання в вуглецевих заготовках через їх складний початковий склад відбуваються різні фізико-хімічні процеси, що супроводжуються зміною агрегатного стану (заготовка спочатку розм'якшується в зв'язку з розплавом сполучного пека, потім знову твердіє в результаті коксування останнього), зміна розмірів (розширенням та усадкою), втрати маси. Ці зміни заготовок можуть відбуватись в визначеній послідовності та одночасно супроводжують один одного. Результатом різноманітних впливів являється напруження в заготовках, що при несприятливому поєднанні технологічних параметрів може призвести до викривлення форми заготовок або до їх розтріскування.

Виходячи з вищезазначених обставин нагальною є задача створення такої системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, що призведе до підвищення ефективності як даної технологічної стадії, так і, як результат, всього виробництва вуглецевих виробів у цілому.

Аналіз досліджень і публікацій. Забезпечення форми, цілісності, однорідності структури і необхідних фізико-механічних властивостей випаленого матеріалу як в обсязі однієї заготовки, так і в усьому робочому обсязі камери випалювання залежить від температурного режиму нагріву заготовок в окремих інтервалах температур; рівномірності нагріву по довжині і діаметру заготовок; схем завантаження заготовок в камери випалу і умов їх упаковки засипкою; швидкості охолодження обпалених заготовок (температури вивантаження заготовок з печі).[1]

У роботі [2] наведено вплив на процес випалювання та тепловий баланс камери виду наповнювача, його гранулометричного складу та поведінки сполучного матеріалу.

У роботі [3] з результатів експериментального дослідження газовиділення при різних швидкостях випалу зразків промислових електродів, отримані і проаналізовані залежності газовиділення від швидкості випалювання і температури.

Авторами [4] доведено, що при зниженні темпу випалювання, пік газовиділення зміщується в область більш низьких температур, кількість виходу коксу з сполучного збільшується. Рекомендований температурний інтервал зниження температури для досліджених електродів - 370...520 °С.

У роботі [5] приведена методика для розробки модернізованого регламенту випалювання електродних виробів, що дозволяє забезпечити необхідну швидкість нагріву заготовки в інтервалі температури створення напівкоксу і узгодити мінімум швидкості зростання в заготовці з піком газовиділення. Нагрівання заготовок в печах здійснюється відповідно до температурних режимів. У роботі [6] пропонується проводити процес випалювання з різними темпами підводу теплоти для відповідного діапазону температур.

Відповідно до роботи [7] видно, що кількість повітря, що подається на горіння визначається, в основному, розрідженням на печі. Чим більше розрідження тим більше поступає гарячого повітря, це обмежує можливість теплового режиму печі. На практиці, зазвичай, використовують інший спосіб ведення процесу випалювання, коли газ споживається одночасно двох-трьох рядом розташованих камер. В даному випадку повітря на горіння в першу камеру поступає гарячим, а в другу-третю холодний з атмосфери. Цей спосіб введення процесу випалювання приводить до зниження КПД печі на 10 %.

Авторами [8] за допомогою експериментальних досліджень встановлено, що температура в газовому середовищі камери печі протягом процесу випалювання на 200-300 °С вище максимальної температури заготовок.

На підставі отриманих експериментальних даних, у праці [9] встановлено, що конструкція склепіння і муфельних каналів, схема завантаження печей і недосконалий технологічний регламент спричиняють значну нерівномірність температурного поля заготовок, samozапалення легких, неоднорідність фізичних властивостей випалених заготовок та ін., у результаті чого вихід бракованих виробів може становити до 15-20 %.

Результати експериментальних досліджень [10] свідчать, що максимальна температура електрода, пропорційна температурі в газовому середовищі і не залежить від тривалості підйому температури; при випалюванні різницю максимально досягнутих температур в завантаженні становить 50-90 °С, а різниця між максимальною температурою газового простору і температурою в завантаженні 250-350 °С.

З аналізу існуючих досліджень видно, що для отримання випалених заготовок відповідної якості необхідно дотримуватись великої кількості обмежень які.

Проведений аналіз експериментальних даних [11] по дослідженню теплових процесів в печі для випалення заготовок з вуглеграфітових матеріалів дозволяють зробити наступні висновки:

у всьому інтервалі температур випалу обмеженням процесу перенесення тепла є теплопередача через шар засипного матеріалу до заготовок, отже, піч для випалювання вуглеграфітових заготовок працює в так званому «кондуктивному» режимі і розташування заготовок в шарі засипки істотним чином впливає на швидкість і рівномірність їх нагрівання;

розташування контейнера з заготовками в робочій камері обпалювальної печі не є раціональним, так як до його нижньої частини тепло практично не підводиться;

Стадію нагріву вуглецевих заготовок, при випалюванні, за характером фізико-хімічних процесів, що відбуваються в заготовках, ділять на кілька інтервалів. На основі досліджень [12-13] описуються основні процеси, що відбуваються при випалюванні «зелених» заготовок та їх вплив на температурне поле печі.

Постановка задачі. У праці [14] сформульована загальна задача оптимізації виробництва вуглецевих виробів. У відповідності до поставленої задачі потрібно сформулювати задачі керування технологічними процесами, що складають виробництво вуглецевих виробів. Одним з таких процесів є процес випалювання. Постановка задачі керування процесом випалювання повинна включати формулювання критерію оптимального керування та обмежень на технологічні параметри процесу та показники його якості.

Таким чином, метою даної статті є формулювання постановки задачі керування процесом випалювання вуглецевих виробів.

Викладення матеріалу та результати. *Аналіз техніко-економічних показників як критеріїв оптимального керування процесом випалювання.*

Розглянемо та проаналізуємо техніко-економічні показники, які можуть бути використані як критерії оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів.

Найбільш загальним показником ефективності процесу випалювання є його рентабельність за нормативний час (тиждень, місяць, рік)

$$R_B = Q_B / C_B, \quad (1)$$

де Q_B - прибуток від реалізації продукції, C_B - собівартість продукції.

Прибуток від реалізації продукції розраховується так

$$Q_B = \sum_{i=1}^N a_i F_i - \sum_{j=1}^M b_j S_j - Q_E, \quad (2)$$

де a_i, F_i - ціна одиниці та кількість одиниць i -го виду реалізованої продукції відповідно; b_j, S_j - відповідно ціна одиниці та кількість одиниць j -го виду сировини, що використовувалась у виробництві; N, M - кількість видів реалізованої продукції та сировини відповідно; Q_E - експлуатаційні витрати на виробництво. Собівартість продукції складається із вартості експлуатаційних витрат і сировини

$$C_B = Q_E + \sum_{j=1}^M b_j S_j. \quad (3)$$

Щодо використання рентабельності, як критерія оптимального керування процесом випалювання, слід зробити декілька зауважень. По-перше, процес випалювання не є початковим у виробництві вуглецевих виробів. Це означає, що у ціні заготовки, що поступає на випалювання, містяться витрати на попередніх технологічних стадіях, що ускладнює розрахунки за цим критерієм особливо в умовах зміни ціни на початкову сировину та енергоносії.

По-друге, процес випалювання є завершальним тільки для неграфітованої частини виробів. Тому фактично тільки для цієї частини можна говорити про ціну готової продукції, яка підлягає реалізації.

Названі вище причини вказують на недоцільність використання рентабельності процесу випалювання вуглецевих виробів, як критерія оптимального керування.

Прибуток від реалізації продукції та собівартість готової продукції можуть слугувати самостійними критеріями оптимального керування.

Прибуток від реалізації продукції згідно формули (2) містить у собі вартість експлуатаційних витрат, сировини та готової продукції.

Використання даного показника, як критерія оптимального керування процесом випалювання, має ті ж вади, які згадувалися при аналізі критерія рентабельності.

Характерною особливістю собівартості готової продукції (3), як критерія оптимального керування, є штучне зменшення складової, що визначається експлуатаційними показниками, тобто безпосередньо технологічними режимами виробництва. Це відбувається тоді, коли сировина стала або її зміна не пов'язана із зміною експлуатаційних показників і технологічних режимів виробництва. Тому критерій собівартості продукції доцільно застосовувати для оцінювання ефективності процесу випалювання за умов зміни вартості сировини.

Експлуатаційні витрати на процес випалювання Q_E вуглецевих виробів визначаються енерго- E та трудовитратами T

$$Q_E = E + T.$$

Вартість енерговитрат складається з вартості витрат палива та електроенергії, що витрачається вентиляторами подачі повітря $E = E_{\Pi} + E_B$.

Враховуючи, що $E_{\Pi} \ll E_B$, вартість витрат електроенергії можна нехтувати.

Вартість витрат палива розраховується за формулою

$$E_{\Pi} = d S_{\Pi},$$

де d - теплотворна здатність одиниці витрати палива; S_{Π} - витрати палива.

Трудовитрати на ведення процесу випалювання визначаються так

$$T = T_1 + T_2 + T_3,$$

де T_1 - прямі трудовитрати; T_2 - цехові витрати (зарплатня цехового персоналу, амортизаційні відрахування, утримання виробничих приміщень тощо); T_3 - загальнозаводські витрати (зарплатня загальнозаводського персоналу, утримання заводських лабораторій тощо).

Трудовитрати є практично сталими величинами, які не залежать від технологічного режиму процесу випалювання.

Продуктивність процесу випалювання може вимірюватись кількісно (у штуках виробленої продукції)

$$P = \sum_{i=1}^n p_i,$$

де p_i - кількість виробленого i -го виду продукції, штук;
або масово (кг, т)

$$B = \sum_{i=1}^n p_i q_i,$$

де q_i - вага i -го виду продукції, кг.

При виборі одиниці вимірювання продуктивності процесу випалювання очевидно, що більш об'єктивним є оцінювання продуктивності масовим методом (кг, т). Однак цей підхід має свої вади, бо оцінювання продуктивності за масою виробленої продукції ускладнює подальше використання цього показника для розрахунку економічної ефективності процесу випалювання у зв'язку з тим, що різні види продукції мають різну вартість, яка формується на ринкових умовах. У цьому розумінні доцільніше використовувати кількісне (штук) оцінювання продуктивності.

Як самостійний критерій оптимального керування продуктивність зазвичай застосовують у таких випадках:

якщо з метою оптимізації використовувати способи, за яких продуктивність процесу випалювання вуглецевих виробів зростає, а решта техніко-економічних показників (якість готового продукту, енерговитрати тощо) не погіршуються; якщо процес випалювання, що входить до складу технологічного комплексу виробництва вуглецевих виробів, є «вузьким місцем» і тому з метою підвищення ефективності роботи всього комплексу ставиться однозначна задача отримання максимальної продуктивності процесу незалежно від зміни інших її економічних показників або за їх обмежень.

У процесі випалювання вуглецевих виробів у значній мірі формуються показники якості готової продукції, які теж можуть бути використані як критерії оптимальності керування даним процесом. Згідно з ТУ 1913-001-00200992-95 до показників якості вуглецевих виробів відносяться:

об'ємна щільність, питомий електричний опір, міцність на вигин, питомий опір стисненню, теплопровідність, повітряна проникність, реакційна здатність в струмі CO_2 , реакційна здатність в струмі повітря, зміст домішок:

сірка, кремній залізо, ванадій, натрій.

Постановка задачі керування. Проведений вище аналіз техніко-економічних показників, які можуть бути використані як критерії оптимального керування процесом випалювання вуглецевих виробів показує, що у найбільшій мірі ефективність ведення технологічного процесу випалювання можна оцінити за допомогою змінної складової експлуатаційних витрат для кожної кампанії випалювання

$$C_j = E_{II}. \quad (4)$$

Після завершення кампанії випалювання може виникнути потреба у визначенні експлуатаційних витрат на кожен одиницю виробів, що випалювались (наприклад, для розрахунку собівартості продукції). Точно оцінити цю величину практично неможливо. Це пояснюється тим, що під час проведення кожної кампанії випалювання у піч завантажуються нова комбінація різних видів продукції. Теоретично можливо виконати відповідні розрахунки за допомогою математичної моделі процесу випалювання. Але такий підхід не забезпечить великої точності розрахунків при тому, що для їх виконання потрібний значний час.

Тому оцінювати величину експлуатаційних витрат C_{ij} на одиницю i -го виду виробів під час j -ї кампанії випалювання пропонується за формулою

$$C_{ij} = \gamma_{ij} c_j / l_{ij},$$

де l_{ij} - кількість одиниць i -го виду продукції, яка випалювалась під час j -ї кампанії; γ_{ij} - ваговий коефіцієнт, який обчислюється як масова частина i -го виду продукції від загальної маси M_j виробів, що випалювались у j -й кампанії

$$\gamma_{ij} = \sum_{i=1}^{n_j} m_i / M_j,$$

де n_j - кількість видів продукції, що випалювалась під час j -ї кампанії; m_i - маса одиниці i -го виду продукції.

Крім критерію оптимальності (4) для постановки задачі керування процесом випалювання вуглецевих виробів потрібно сформулювати обмеження, які діють у процесі керування. Ці обмеження умовно можна поділити на дві групи:

обмеження, що пов'язані з показниками якості виробів, що обробляються, та параметричні обмеження, обумовлені особливостями технології випалювання.

Вимоги до показників якості вуглецевих виробів сформульовані у ТУ 1913-001-00200992-95. До основних з них відносяться щільність, електричний опір, теплопровідності. На жаль, контролювати ці величини безпосередньо під час проведення випалювання неможливо. Тому, як вказують результати досліджень [1-10], для забезпечення заданих показників якості виробів після випалювання потрібно жорстко дотримуватись встановленого температурного режиму для кожної стадії процесу випалювання, тобто

$$T_{зад}^{\min}(\tau) \leq T(\tau) \leq T_{зад}^{\max}(\tau), \quad (5)$$

де $T_{зад}^{\min}(\tau)$, $T_{зад}^{\max}(\tau)$ - вектори заданого відповідно мінімального та максимального температурного режиму; $T(\tau)$ - вектор поточної температури випалювання; τ - поточний час.

Вектор $T(\tau)$ має таку структуру

$$T(\tau) = \begin{bmatrix} T_1(\tau) \\ T_2(\tau) \\ \dots \\ T_l(\tau) \end{bmatrix},$$

де T_1, T_2, T_3 - температури у характерних точках процесу.

Відповідну структуру мають і вектори $T_{зад}^{\min}(\tau)$ та $T_{зад}^{\max}(\tau)$.

Задача забезпечення виконання умови (5) не є тривіальною, враховуючи взаємний вплив температур у різних точках процесу випалювання.

Таким чином, задача керування процесом випалювання вуглецевих виробів включає у себе критерій оптимальності (4) та обмеження (5).

Висновки і напрямок подальших досліджень. На основі проведеного аналізу техніко-економічних показників, які можуть бути використані у системі керування процесом випалювання вуглецевих виробів, обґрунтовано вибір змінної складової експлуатаційних витрат як критерія оптимального керування процесом.

Показано, що у зв'язку з неможливістю контролювати показники якості виробів, що випалюються, безпосередньо під час процесу, для забезпечення їх заданої якості потрібно враховувати обмеження на температурний режим процесу, що є складною задачею, враховуючи їх взаємозв'язок.

Сформульована постановка задачі керування процесом випалювання вуглецевих виробів.

Для розв'язання поставленої задачі керування у подальших дослідженнях потрібно розробити математичну модель процесу випалювання та метод врахування взаємозв'язаних параметричних обмежень.

Список літератури

1. Санников А. К. Производство электродной продукции [Текст] / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. – М.: Металлургия, 1985 г. – 129 с. – Библиогр.: с. 128. – 1230 экз.
2. Пулинец И. В. Влияние технологических параметров процесса обжига на Качество углеграфитовых заготовок / И. В. Пулинец // Энерготехнологии и ресурсосбережение. - 2012. - № 6. - С. 59-62.
3. Исследование газовой выделенной при обжиге электродного образца / Шилович Т.Б., Соколов М.Ю. «Металлургическая теплотехника». Выпуск 3 (18), 2011 УДК 662.749.39
4. Газовыделение образцов электродной массы при термообработке Панов Е.Н., Шилович Т.Б., Лелека С.В., Шилович Я.И., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

5. Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовыделения обжигаемых заготовок **Карвацкий А.Я., Лелека С.В.** Восточно-Европейский журнал передовых технологий 6/5 (54) 2011 УДК 536.2
6. **И. В. Пулинец, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, Т. В. Чирка** Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий монография Киев НТУУ «КПИ» 2014
7. Печи электродных заводов / **Чалых Е.Ф., Пащенко Л.Ф.** Учебное пособие. - Москва: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1983. - 76 с.
8. Усовершенствование технологии обжига электродных материалов / **В. П. Фокин, А. А. Малахов, С. А.** // Цветные металлы. — 2002. — № 4. — С. 48—51
9. **Пулинец І. В.** Підвищення ефективності роботи печей випалу вуглеграфітових виробів автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології»/ Київ – 2013 – 20с.
10. **Сошкин Г. С.** Исследование процесса обжига электродной продукции в многокамерных печах и разработка системы управления технологическим режимом автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук Спец. 05.13.06 – «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами» / Владикавказ - 2012–24с.
11. **Шибалов С. Н.** Совершенствование тепловых процессов с целью повышения качества обжига заготовок из углеродистых материалов автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук Спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / Москва 2004– 36с.
12. **Молокова Т.Л., Харламповин Г.Ж., Сухоруков И.Ф.** - Химия твердого топлива, 1977, № 6, с. 114-120.
13. **Сухоруков И.Ф., Атминский А.И., Львова О.К. и др.** - Цветная металлургия, 1965, №20, С. 51-55.
14. **Жученко О.А.** Statement of the optimization problem of carbon products production // Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів» Vol. 8, issue 2/2016. С. 39-44
- Рукопис подано до редакції 17.03.17

УДК 622.233.05

А.С. ГРОМАДСКИЙ, д-р техн. наук, проф., Д.И. КУЗЬМЕНКО, ассистент,
Криворожский национальный университет

РАЗРАБОТКА ШТЫРЕВЫХ КОРОНОК ДЛЯ БУРЕНИЯ КОМПЕНСАЦИОННЫХ СКВАЖИН

Цель. Целью данной работы является разработка штыревых коронок для бурения компенсационных скважин. Применение компенсационных шпуров и скважин обеспечивает возможность повышения мощности взрыва на каждом единичном шпуре (скважине), что позволяет снизить общее количество пробуренных шпуров в проходческом забое и уменьшить количество ВВ, патронов боевиков, медных проводов при зарядании забоя. Однако буровой инструмент для формирования компенсационных шпуров и скважин далеко несовершенен.

Методы исследования. Не рассматривалась эффективность передачи энергии ударного импульса в буровом инструменте с учетом его геометрических параметров, что способствовало передаче энергии к породоразрушающим элементам буровой коронки с минимальными потерями, что значительно повышает эффективность разрушения горной породы.

Научная новизна. Решение данной задачи складывает актуальность работы. Ее целью является моделирование прохождения ударного импульса через буровой инструмент с поиском рациональных геометрических параметров бурового инструмента.

Практическая значимость. Полученные авторами аналитические зависимости для определения геометрических параметров коронки, которые позволяют спроектировать коронки-расширители для бурения компенсационных взрывных скважин, у которых скорость бурения повышена на 45 %.

Результаты. В результате применения эмпирических зависимостей была спроектирована коронка для бурения компенсационных скважин в одну стадию, скорость бурения которой в 1,9 раз выше, чем у коронки-расширителя КРР-65, а удельный износ в 1,5 раз меньше.

Ключевые слова: буровая коронка, компенсационная скважина, скорость бурения, коронки-расширители, крепость породы.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Наиболее распространенным и эффективным способом разрушения горных пород средней и высокой крепости являются буровзрывные работы [1-4].

Наиболее сложным и трудоемким процессом является проходка подэтажных выработок. Сложность проведения таких выработок обуславливается специфическими условиями, в которых осуществляется этот процесс, а именно зажимом забоя выработки при малой плоскости забоя, малый размер свободного пространства выработки, который не позволяет применять мощное буровое оборудование. Соответственно и эффективность взрывных работ в таких условиях относительно невысокая. Установлено, что коэффициент использования шпура (КИШ)