

УДК 62-503.56

О.А. Жученко, доц., канд. техн. наук, М.Г. Хібеба, асп.*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна, E-mail: azhuch@ukr.net*

Постановка задачі керування процесом формування у виробництві вуглецевих виробів

Виконано порівняльний аналіз техніко-економічних показників як критеріїв оптимального керування процесом формування. Визначено, що використання розглянутих показників має недоліки, пов'язані з особливостями виробництва. Запропоновано використання модифікованого показника питомої собівартості експлуатаційних витрат як такого, що дозволяє найбільш повно оцінити ефективність процесу формування вуглецевих виробів. Проведено постановку задачі керування процесом формування у виробництві вуглецевих виробів. Математично сформульована постановка задачі керування включає обраний критерій оптимальності та обмеження. Критерій оптимальності базується на питомій собівартості експлуатаційних витрат і враховує витрати, що залежать від технологічного режиму та дійсну продуктивність гідравлічного пресу. До витрат відносяться матеріальні витрати сировини, енерговитрати на привід пресового інструменту, що безпосередньо впливають на тиск пресування та на нагрів внутрішньої поверхні пресу за допомогою індукторів масового циліндру, формувальної та калібрувальної зони мундштука, а також свічок для додаткового нагрівання кутів калібрувальної зони. Дійсна продуктивність гідравлічного пресу визначається як доля продукції належної якості в усій виробленій продукції. В результаті аналізу окремих етапів процесу формування було сформовано обмеження на тиск та час підпресування електродної маси, обмеження на тиск безпосередньо пресування та обмеження на напругу, що подається на нагрівачі. Використання даних обмежень під час розробки системи керування дозволить дотримувати якість продукції на заданому рівні та враховувати конструктивні особливості апарату, особливості електродної маси та процесу формування вуглецевих виробів. Розв'язання задачі керування повинно забезпечити функціонування технологічного процесу формування у виробництві вуглецевих виробів в оптимальному з точки зору ресурсо- та енергозбереження режимі та, як результат, підвищенню ефективності виробництва вуглецевих виробів в цілому.

виробництво вуглецевих виробів, критерій оптимального керування, гідравлічний прес, електродна маса, екструзія

А.А. Жученко, доц., канд.техн. наук, Н.Г. Хібеба, асп.*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

Постановка задачи управления процессом формирования в производстве углеродных изделий

Выполнен сравнительный анализ технико-экономических показателей как критериев оптимального управления процессом формирования. Определено, что использование рассмотренных показателей имеет недостатки, связанные с особенностями производства. Предложено использование модифицированного показателя удельной себестоимости эксплуатационных расходов как такового, что позволяет наиболее полно оценить эффективность процесса формирования углеродных изделий. Проведено постановку задачи управления процессом формирования в производстве углеродных изделий. Математически сформулирована постановка задачи управления включает выбранный критерий оптимальности и ограничения. Критерий оптимальности базируется на удельной себестоимости эксплуатационных расходов и учитывает расходы, зависящие от технологического режима и действительную производительность гидравлического прессы. К расходам относятся материальные затраты сырья, энергозатраты на привод прессового инструмента, непосредственно влияющие на давление прессования и на нагрев внутренней поверхности прессы с помощью индукторов массового

цилиндра, формовочной и калибровочной зоны мундштука, а также свечей для дополнительного нагрева углов калибровочной зоны. Настоящая производительность гидравлического пресса определяется как доля продукции надлежащего качества во всей производимой продукции. В результате анализа отдельных этапов процесса формирования были сформированы ограничения на давление и время подпрессовки электродной массы, ограничения на давление непосредственно прессования и ограничения на напряжение, подаваемое на нагреватели. Использование данных ограничений при разработке системы управления позволит придерживаться заданного качества продукции и учитывать конструктивные особенности аппарата, особенности электродной массы и процесса формирования углеродных изделий. Решение задачи управления должно обеспечить функционирование технологического процесса формования в производстве углеродных изделий в оптимальном с точки зрения ресурсо- и энергосбережения режиме и, как результат, повышению эффективности производства углеродных изделий в целом.

производство углеродных изделий, критерий оптимального управления, гидравлический пресс, электродная масса, экструзия

Постановка задачі. Споживачами вуглецевих виробів є різні галузі промисловості, в яких виробництво пов'язане з необхідністю використання електротермічних технологічних процесів. Зокрема, до таких виробництв відносяться підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші [1].

Виробництво вуглецевих виробів характеризується значною ресурсо- та енергоємністю [2, 3]. Окрім того існує необхідність суворого дотримання великої кількості технологічних параметрів, тому актуальною є задача підвищення ефективності даного виробництва шляхом впровадження оптимальних режимів роботи на ключових етапах виробництва.

Одним з основних технологічних процесів виробництва вуглецевих виробів є формування останніх шляхом продавлювання електродної маси через мундштук відповідної форми у гідравлічному пресі, бо саме на етапі пресування електродних заготовок закладаються в основному всі спадкові властивості, що визначають якість готових виробів [2, 3]. Зокрема, пресування в значній мірі визначає форму заготовки, її довжину, пористість та механічну міцність.

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день у процесі формування вуглецевих виробів визначальними факторами є температурний режим та тиск пресування, на контроль та керування якими направлені майже всі існуючі автоматичні системи.

Автори праці [3] пропонують як контрольований параметр використовувати інтенсивність випресовування (зусилля для видавлювання одиничного об'єму маси за 1 с). Недоліком даного методу є неможливість безпосереднього вимірювання даного параметру, що призводить до, по-перше, ускладнення системи керування за рахунок його обчислення і, по-друге, можливих похибок керування, обумовлених неточністю проведених розрахунків.

Дослідження впливу різних параметрів на якість випресованих заготовок показали [4], що для отримання бездефектної продукції необхідно, щоб під час пресування були дотримані умови нерозривності середовища. Виконання цих умов може бути досягнуто за допомогою регулювання температур у «контрольних» точках поверхні пресового інструменту [4]. Така система керування в залежності від температур в «контрольних» точках та температури розм'якшення пеку $T_{розм}$ вмикає

або вимикає нагрівальні елементи. Суттєвим недоліком даної системи керування є її релейна природа, що значно погіршує якість керування.

Вагомим недоліком згаданих вище та інших [3–5] відомих систем керування процесом формування вуглецевих виробів є та обставина, що вони не забезпечують оптимальних техніко-економічних показників [6] даної технологічної стадії виробництва, що, як правило, призводить до зниження ефективності її функціонування.

Загальна задача оптимізації виробництва вуглецевих виробів сформульована у праці [7]. Задача керування процесом формування вуглецевих виробів повинна формуватись у відповідності до поставленої загальної задачі. Постановка задачі керування процесом формування повинна включати формулювання критерію оптимального керування та обмежень на технологічні параметри процесу та показники його якості.

Постановка завдання. Таким чином, метою даної статті є формулювання постановки задачі керування процесом формування вуглецевих виробів.

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

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

$$R_B = \frac{Q_B}{C_B}, \quad (1)$$

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

Прибуток від реалізації продукції розраховується таким чином

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

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

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

Використання рентабельності як критерію оптимального керування процесом формування має ряд недоліків. По-перше, процес формування не є початковим у виробництві вуглецевих виробів. Це означає, що у ціні маси, що поступає до гідравлічного пресу, 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 формування не є завершальним в процесі виробництва вуглецевих виробів. Тому для даного етапу фактично неможливо говорити про ціну готової продукції, яка підлягає реалізації.

Названі вище причини вказують на недоцільність використання рентабельності процесу формування вуглецевих виробів як критерію 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 критерію оптимального керування процесом формування вуглецевих виробів має ті ж вади, які згадувалися при аналізі критерію рентабельності.

Характерною особливістю собівартості готової продукції (3) як критерію 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. До недоліків використання даного показника можна віднести те, що він не враховує зміну продуктивності процесу, а отже мінімізація цього критерію може призвести до зменшення продуктивності.

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

$$K_{заг} = \sum_{i=1}^n k_i,$$

де k_i – кількість виробленого i -го виду продукції, штук;
або масово (кг, тон)

$$G_{заг} = \sum_{i=1}^n k_i q_i,$$

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

При виборі одиниці вимірювання продуктивності процесу пресування очевидно, що більш об'єктивним є оцінювання продуктивності кількісним методом (штук).

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

- якщо з метою оптимізації планують використовувати способи, за яких продуктивність процесу формування вуглецевих виробів зростає, а решта техніко-економічних показників (якість готового продукту, енерговитрати тощо) не погіршуються;
- якщо процес формування, 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.

Недоліком використання даного критерію є те, що він не враховує затрати на виробництво, а отже збільшення продуктивності може призвести до збільшення енергетичних витрат.

В якості критеріїв оптимальності керування процесом формування вуглецевих виробів можуть використовуватись й показники якості проходження даного процесу. Якість проходження даного процесу визначається в першу чергу за наявністю чи відсутністю деформацій в сформованій заготовці. Також важливим є рівномірний розподіл фізико-хімічних властивостей заготовки.

Питома собівартість експлуатаційних витрат $P_{пр}$ визначається як

$$P_{np} = \frac{TC_{opt}}{G_{np}}, \quad (4)$$

де P_{np} – питома собівартість експлуатаційних витрат;

TC_{opt} - загальні витрати;

G_{np} – дійсна продуктивність роботи гідравлічного пресу.

Використання даного показника як критерія оптимального керування дозволяє у процесі оптимізації врахувати як собівартість продукції так і продуктивність процесу, тому даний критерій найбільш доцільно використовувати для оцінювання ефективності процесу формування вуглецевих виробів.

Проведений вище аналіз техніко-економічних показників, які можуть бути використані як критерії оптимального керування процесом формування вуглецевих виробів показує, що у найбільшій мірі ефективність ведення даного технологічного процесу можна оцінити за допомогою критерію, що базується на питомій собівартості експлуатаційних витрат (4).

До загальних витрат на виробництво віднесемо ті, що тісно пов'язані з умовами проходження технологічного процесу, а саме енерго- та матеріальні витрати. Матеріальні витрати визначаються наступним чином:

$$C_m = P_m G_m, \quad (5)$$

де C_m – матеріальні витрати;

P_m, G_m – ціна та витрата сировини відповідно.

Розглянемо фактори, які формують енерговитрати. До C_e віднесемо енерговитрати на привід пресового інструменту, що безпосередньо впливають на тиск пресування, W_{II} та на нагрів внутрішньої поверхні пресу за допомогою індукторів масового циліндру, формувальної та калібрувальної зони мундштука, а також свічок для додаткового нагрівання кутів калібрувальної зони W_T :

$$C_e = P_e W_e = P_e (W_{II} + W_T), \quad (6)$$

де P_e – тариф на електроенергію; W_e – витрати електроенергії.

Тоді загальні витрати визначатимуться так:

$$TC_{opt} = P_e (W_{II} + W_T) + P_m G_m. \quad (7)$$

Отже, критерій оптимального керування, що впливає з (4), буде мати вигляд:

$$K_{opt} = \frac{(P_e (W_{II} + W_T) + P_m G_m)}{G_{np}}. \quad (8)$$

Математично загальна задача оптимального керування процесом формування вуглецевих виробів може бути сформульована наступним чином:

$$K_{opt} \rightarrow \min$$

$$\Omega_n \leq \Omega \leq \Omega_e, \quad (9)$$

де $\Omega, \Omega_n, \Omega_e$ – вектор поточних значень технологічних змінних, вектор нижніх та верхніх припустимих значень цих змінних відповідно.

Мінімізація критерію оптимальності можлива за рахунок як зменшення енерговитрат так і збільшення дійсної продуктивності роботи гідравлічного пресу.

Дійсна продуктивність пресу визначається як

$$G_{np} = K_{np} G_{заг}, \quad (10)$$

де K_{np} – коефіцієнт, що характеризує частку продукції належної якості в усій виробленій продукції;

$G_{заг}$ – загальна продуктивність пресу. Для збільшення $G_{пр}$ потрібно максимізувати $K_{пр}$, тобто забезпечити такі умови, при яких усі сформовані заготовки будуть задовольняти поставленим вимогам. Під поставленими вимогами розуміємо дотримання показників якості, розглянутих вище. Їх безпосереднє врахування в постановці задачі керування неможливе, оскільки дані показники неможливо виміряти. Тому пропонується врахувати їх опосередковано, введенням обмежень на технологічні параметри, що впливають на наявність деформацій та ізотропність властивостей в заготовці.

Технологічний процес формування вуглецевих виробів складається з декількох етапів, кожен з яких доцільно розглядати окремо.

На першому етапі електродна маса завантажується в зону ущільнення пресового інструменту. Далі в дослідженні даний етап не розглядається, тому що він передує безпосередньо етапу пресування і тому не впливає ні на якість вихідного продукту ні на зменшення енерго- чи ресурсо витрат.

Наступний етап – підпресування завантаженого матеріалу у зоні ущільнення. У ході даного процесу з електродної маси видаляється повітря, а простір між частинками наповнювача заповнюється в'язким. Основна мета даного процесу – усереднити фізико-хімічні властивості [3] та привести матеріал до компактного (безпористого) стану, при якому мінімізується ефект пружної післядії і збільшується міцність, а отже і зменшується вірогідність розтріскування випресованої заготовки під час її релаксації [8] та на подальших етапах виробництва.

Технологічними змінними даного етапу є тиск та час підпресування. Виходячи з того, що даний процес впливає на показники якості продукції виникає необхідність введення обмежень на його технологічні змінні. Збільшення тиску та часу підпресування збільшує степінь переорієнтації анізотричних зерен наповнювача в об'ємі контейнера пресу, призводить до нерівномірного розподілу фізико-хімічних властивостей випресованих виробів. З іншого боку недостатній час та тиск підпресування призводить до нерівномірного розподілу наповнювача, що в свою чергу спричинює зменшення міцності та нерівномірний розподіл фізико-хімічних властивостей заготовки [3,8].

Отже маємо наступні обмеження:

$$P_{пд.н} \leq P_{пд} \leq P_{пд.в}, \quad (11)$$

де $P_{пд}$, $P_{пд.н}$, $P_{пд.в}$ – відповідно дійсне значення тиску підпресування, його нижнє та верхнє допустиме значення;

$$\tau_{пд.н} \leq \tau_{пд} \leq \tau_{пд.в}, \quad (12)$$

де $\tau_{пд}$, $\tau_{пд.н}$, $\tau_{пд.в}$ – відповідно дійсне значення часу підпресування, його нижнє та верхнє допустиме значення;

Третій етап – пресування, що включає видавлювання підпресованої електродної маси через мунштук та відрізання заготовок заданої довжини. Це основний етап процесу формування, адже тут проходить безпосередньо формування заготовок заданої геометрії. Оптимальна швидкість видавлювання залежить від типу виготовлюваної продукції і контролюється тиском пресування, що залежить від енерговитрат на гідравлічний привід пресового інструменту. Обмеження на тиск пресування визначається конструкційними особливостями апарату та, в першу чергу, властивостями електродної маси, що також впливають на швидкість пресування.

$$0 \leq P_{\Pi} \leq P_{\Pi.B} \quad (13)$$

Для отримання бездефектної продукції необхідно, щоб під час процесу пресування були дотримані умови нерозривності середовища, а це в свою чергу можливо у разі, коли між заготовкою та поверхнею мундштука існуватиме тонкий ламінарний шар з умовами проковзування на поверхні контакту «мундштук – електродна маса». Цей шар формується з кам'яновугільного пеку, який під дією температур, вищих температури розм'якшення, витісняється на поверхню електродної маси. Одночасно з цим потрібно сформувати в електродній масі ядро, що матиме структурний режим руху, а для цього його температура має бути нижча за температуру формування ламінарного шару. Для нагрівання пресового інструменту та електродної маси використовуються індуктори масового циліндру, формувальної та калібрувальної зони мундштука, а також свічки для додаткового нагрівання кутів калібрувальної зони. Вищенаведені дані формують обмеження на напругу, що подається на нагрівачі пресового інструменту. Також на обмеження по напрузі впливає максимально допустима напруга, що може бути подана на нагрівач.

$$u_{\Pi.H} \leq u_{\Pi} \leq u_{\Pi.B}, \quad (14)$$

де u_{Π} , $u_{\Pi.H}$, $u_{\Pi.B}$ – вектори відповідно дійсного значення напруг, що подаються на нагрівачі, їх нижнє та верхнє допустиме значення.

Отже, об'єднуючи критерій (8) та обмеження (11-14), отримаємо математичне формулювання задачі керування процесом формування вуглецевих виробів у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{opt} = \frac{(P_e(W_{\Pi} + W_T) + P_m G_m)}{G_{np}} \rightarrow \min \\ P_{\PiД.H} \leq P_{\PiД} \leq P_{\PiД.B} \\ \tau_{\PiД.H} \leq \tau_{\PiД} \leq \tau_{\PiД.B} \\ 0 \leq P_{\Pi} \leq P_{\Pi.B} \\ u_{\Pi.H} \leq u_{\Pi} \leq u_{\Pi.B} \end{array} \right. \quad (15)$$

Висновки. На основі проведеного аналізу техніко-економічних показників, що можуть бути використані як критерії оптимальності у системі керування процесом формування вуглецевих виробів, обґрунтовано вибір найбільш доцільного показника - питомої собівартості експлуатаційних витрат.

Сформульовано у математичному вигляді задачу керування даним процесом, яка включає у себе критерій оптимальності та обмеження, що накладаються на технологічні змінні процесу з урахуванням вимог до якості продукції, що виробляється.

Для розв'язання поставленої задачі керування у подальших дослідженнях потрібно розробити математичну модель процесу формування вуглецевих виробів.

Список літератури

1. Офіційний сайт ПрАТ «Український графіт»: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ukrgrafit.zp.ua/priminienie>.
2. Чалых, А.Ф. Графитация углеродистых материалов [Текст] / А.Ф. Чалых, В.П. Соседов – М.:Металлургия, 1987. – 176 с.
3. Санников, А. К. Производство электродной продукции [Текст] / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и [др.]. – М.: Metallurgiya, 1985. – 129 с.
4. Лазарев, Т. В. Математическая модель процесса экструзии вязко-пластичной углеродной массы [Текст] / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // Весник НТУ «ХПІ», Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 31-37.

5. Завальнюк, И. П. Управление высокопроизводительной экструзией неоднородных материалов / И. П. Завальнюк // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы та системи. – 2010 – №1(25). – С. 141– 147.
6. Бельков, В. Н. Автоматизированное проектирование технических систем [Текст] / В. Н. Бельков, В. Л. Ланшаков. – М.: Академия естествознания, 2009. – 143 с.
7. Жученко, О.А. Statement of the optimization problem of carbon products production ем [Текст] / О. А. Жученко // Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів» Vol. 8, issue 2/2016. – С. 39-44
8. Пятов, В. В. Теоретические и технологические основы холодной экструзии порошковых материалов [Текст] / В. В. Пятов. – Витебск: УО «ВГТУ», 2002. – 237 с.

Olexsiy Zhuchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Mykola Khibeba, post-graduate
National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute”, Kyiv, Ukraine
Formation Process in the Production of Carbon Products Control Task Setting

A comparative analysis of technical and economic indicators as criteria for optimal formation process control has been done. It is shown that the use of discussed indicators has disadvantages associated with production peculiarities. The use of modified specific operating costs as such, that allows to fully evaluate carbon products formation process efficiency has been proposed. Formation process in the production of carbon products control task setting has been done.

Mathematically formulated control task setting includes selected optimality criterion and limitations. Optimality criterion based on the specific operating costs and takes into account costs that depend on technological mode and actual hydraulic press performance. The specific operating costs includes material costs of raw materials, energy costs for pressing tool actuator, that directly affects the pressing pressure and for press inner surface heating by mass cylinder inductor, molding and calibration die zones inductors and also candles for calibration zone corners additional heating. Actual hydraulic press performance defined as the part of all produced products that has good quality. Limitations on prepressing duration and pressure, pressing pressure and voltage applied to the heaters were formed as a result of forming process separate stages analysis.

Using these limitations when creating control system allows to keep product quality specified value and take into account device design features, electrode mass and formation process features. Control task solving should provide optimally formation process in the production of carbon products functioning in terms of resource and energy saving mode and as a result, improve production of carbon products efficiency in general.

production of carbon products, optimal control criterion, hydraulic press, electrode mass, extrusion

Одержано 03.10.17

УДК 631.33.02

М.Л. Засць, доц., канд. техн. наук

Житомирський національний агроекологічний університет, м. Житомир, Україна

E-mail: mzaec81@gmail.com

Оптимізація конструкційних параметрів сошника для підґрунтового-розкидної сівби зернових культур

Розглядається визначення оптимальної форми розподільника та процес розподілу насіння комбінованим розподільником у виді криволінійної призми. Від форми розподільника залежить якість розподілення насіння по ширині смуги, що засівається. Рівномірність розташування насіння по ширині захвату сошника буде характеризуватися швидкістю надходження насіння на похилу ділянку розподільника.

швидкість, сівба, розподільник, твірна, рівномірність

© М.Л. Засць, 2017