

УДК 661.666.2

Жученко О.А.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Цапар В.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАФІТУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Проаналізовані техніко-економічні показники, які можуть бути використані як критерії оптимального керування процесом графітування вуглецевих виробів, показана доцільність використання прибутку за кампанію графітування як критерій оптимальності та його використання в штатному і нештатному режимах роботи. Виявлено, що найбільш загальним показником ефективності процесу графітування є його рентабельність за нормативний час, а основним показником якості процесу графітування є ступінь графітування вуглецевих виробів. Сформульовані обмеження на технологічні змінні і на показники якості готових виробів, задачі керування.

Ключові слова: графітування, критерій оптимального керування, задача керування, рентабельність, ступінь графітування.

Постановка проблеми. У народному господарстві України виробництво вуглецевих виробів відіграє важливу роль, оскільки продукція даного виробництва широко використовується в різних визначальних для країни галузях промисловості, технологічні процеси яких нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Зокрема, до таких виробництв відносяться підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші [1].

Виробництво вуглецевих виробів є у значній мірі ресурсо- та енергозатратним [2–4]. Саме тому задача підвищення ефективності даного виробництва є актуальною науково-технічною задачею особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

Виклад основного матеріалу. Одним із визначальних технологічних процесів виробництва вуглецевої продукції є процес графітування. На його долю припадає до 80% загальних енерговитрат виробництва, що становить 8...10 МВт-годин на 1 тону продукції [5]. Перевитрати енергоресурсів пояснюються тим, що фактично неможливо контролювати перебіг даного процесу в реальному часі у зв'язку з високим температурним режимом його ведення, що не дозволяє використовувати промис-

лові вимірювальні прилади. Тому, по-перше, для гарантованого забезпечення нормативної якості готової продукції кампанія графітування, як правило, триває довше, ніж потрібно. По-друге, сам процес графітування практично ведеться вручну, без зворотного зв'язку, що не забезпечує його оптимальність із точки зору як економічних показників, так і показників якості готової продукції. І, нарешті, зовсім складна ситуація виникає в разі відключення енергопостачання, що в промислових умовах протягом однієї кампанії графітування трапляється досить часто, а іноді навіть неодноразово.

Названі вище обставини свідчать про те, що задача підвищення ефективності процесу графітування вуглецевих виробів може бути ефективно розв'язана тільки шляхом створення сучасної системи оптимального керування ним на основі аналізу поточного стану технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Непродуктивні витрати теплоти в процесі графітування вуглецевих виробів тим менші, чим швидше відбувається розігрів керна печі (більша частка енергії витрачається на нагрівання виробів) [2]. Усі відомі способи керування піччю графітування в тій чи іншій формі реалізують ідею прискореного підведення потужності (а, отже, і

розігріву керн печі) при гарантованому забезпеченні цілісності виробів.

Існуючі промислові системи керування процесом графітування в печах Ачесона здебільшого належать до категорії людино-машинних (автоматизованих) і найчастіше реалізують метод керування за електротехнічними параметрами [5]. Даний спосіб оснований на припущенні, що температура керн знаходиться в прямій залежності від кількості енергії, підведеної до печі [2].

Керування процесом здійснюють за задалегідь розробленим регламентом, що включає початкову потужність печі, графік погодинного нарощування потужності та питомі витрати енергії для визначення моменту припинення кампанії графітування. Додатково практикують вимірювання температури периферії керн для уточнення моменту припинення кампанії графітування.

Регламент графітування вуглецевої продукції кожного типу розробляють експериментально на основі тривалої практики або розраховують приблизно за допомогою математичної моделі температурного поля для кожної окремої конструкції печі графітування. При цьому береться до уваги той факт, що скорочення тривалості кампанії означає зменшення тепловтрат та підвищення ефективності процесу графітування, але пришвидшення розігріву керн збільшує нерівномірність температурного поля в об'ємі заготовок, що збільшує термонапруження [6].

Швидкість розігріву обмежують так, щоб за відсутності достовірної інформації про температурний стан керн унеможливити руйнування виробів (внаслідок термонапружень) у випадках будь-яких збурювальних впливів. Тому спосіб часто призводить до значних перевитратам електроенергії, а під час змушених простоїв відсутні надійні рекомендації щодо продовження процесу.

Керування процесом графітування шляхом зміни напруги печі в залежності від кількості підведеної енергії можна доповнювати зміною режиму охолодження футеровки – керування за температурою футеровки. Для цього необхідно організувати визначення температури футеровки впродовж кампанії [7].

У праці [8] запропоновано швидко нагрівати керн до досягнення температури в області футеровки 800...1000°C (що відповідає межі термостійкості матеріалу футеровки), а потім примусовим охолодженням запобігати розігріву футеровки до небезпечних температур. При цьому заготовки розігріваються до більш високих температур (на межі керн з теплоізоляцією температура може

сягати 2800...3000°C), що сприяє підвищенню якості кінцевої продукції. Використання додаткового керування, на думку автора, дозволить скоротити тривалість кампанії та час охолодження печі, а також істотно зменшити витрати теплоізоляційної шихти.

Цей спосіб не має широкого вжитку, оскільки на великовантажних печах максимум теплового навантаження на футеровку печі графітування припадає на час після припинення підведення потужності [9]. Крім того, в таких печах повітряне охолодження практично не впливає на розподіл енергії в керні, а інтенсивність охолодження футеровки, при під'єднанні системи охолодження до витяжної магістралі, збільшується тільки на 1,45%. Головним недоліком способу є висока ймовірність руйнування заготовок внаслідок термонапружень, що виникають при швидкому неконтрольованому розігріві керн.

У промисловій практиці охолодження вмикають на початку кампанії графітування і вимикають після охолодження печі.

Більш точний метод ведення процесу графітування та його припинення засновано на безпосередньому вимірюванні температури керн печі (керування за досягнутою температурою керн).

Розподіл на температурні зони запропонований у [10], де перша зона, яка знаходиться в області температур до 1000...1200°C, дозволяє швидко підведення потужності без ризику утворення дефектів в заготовках. У другій зоні, що відповідає діапазону температур 1000...1700°C, відбуваються значні зміни лінійних розмірів заготовок і швидкість треба істотно обмежити (до 22...25°C/год.). У третій зоні, коли температури перевищують 1700°C, через значне збільшення теплопровідності виробів, утворення критичних термонапружень мало ймовірно і швидкість нагрівання можна знову підвищити.

Даний спосіб в промислових умовах не застосовується, оскільки визначення температури вище 1500°C є серйозною технічною проблемою. Крім того, значна нерівномірність розподілу температурного поля в заготовках не дозволяє однозначно виділяти температурні зони, а використання усереднених температурних показників робить спосіб неефективним.

Автори [11] експериментально визначили градієнти температур, при яких виникає термічне напруження, що перевищує границі міцності матеріалу заготовок діаметром 200 мм. Визначено, що найбільш сприятливою для утворення тріщин є температурна зона 800...1500°C. Для цієї

зони запропоновано підтримувати безпечно значення градієнту температур шляхом періодичного переривання підведення потужності (приблизно на 30 хв.).

Для розробки раціонального регламенту підведення потужності запропоновано [12] як критерій, що визначає швидкість підведення енергії, використовувати відносний градієнт температур по радіусу заготовки. При цьому припустимий перепад температури, як функцію температури, визначено шляхом моделювання експериментальної кампанії графітування електродних заготовок того ж діаметру.

Реалізація даного способу потребує використання адекватної моделі температурного поля печі графітування, що здатна працювати в реальному часі. При цьому критичні значення температурних градієнтів визначаються експериментально для кожного типу продукції. Тому спосіб використовують тільки для корекції існуючих або розробки перспективних регламентів графітування.

Автори [12] вважають, що крива активного опору пічного контуру повністю відображує основні процес у печі і її стала ділянка відповідає досягненню максимальних температур в керні, що дає змогу визначати час припинення підведення потужності до печі. На підставі цього [13] запропоновано спосіб керування процесом графітування та визначення моменту закінчення кампанії за характером зміни та досягнутим кінцевим значенням омичного опору печі. Крім визначення моменту припинення кампанії графітування, тут пропонується визначати середню температуру керна як величину, обернено пропорційну омичному опору. Спосіб використовується в області високих температур (вище 1100°C), де опір печі, на думку авторів, змінюється за логарифмічним законом.

Ці способи прості в застосуванні, але мають надзвичайно низьку точність, оскільки крива опору печі переважно характеризує процеси в пересипці (опір об'єму пересипки значно переважає опір вуглецевих заготовок). Крім того, використання узагальнених показників знижує якість керування і потенційно здатне призвести як до перевитрат електроенергії, так і до руйнування виробів.

У праці [5] запропонований алгоритм керування процесом графітування та закінчення кампанії за величиною ступеня графітування в характерній точці простору печі. Дана величина розраховується за математичною моделлю, яка

являє собою систему диференціальних рівнянь у частинних похідних. Розв'язок такої математичної моделі потребує значного часу навіть для сучасних обчислювальних засобів. Ця обставина суттєво обмежує застосування даного методу в системах керування реального часу. Крім того, визначення розташування характерної точки є суб'єктивним, що може позначитися на кінцевих результатах графітування.

Дослідження [7–13] присвячені побудові, розрахунку та оптимізації систем електроживлення печей Ачесона з урахуванням особливостей і взаємозв'язків процесів електромагнітного та електротеплового перетворення електричної енергії. У даних дослідженнях не розглядається безпосередньо графітування як технологічний процес, призначений для виробництва вуглецевої виробів, не приділяється увага питанням якості готової продукції.

Постановка завдання. Вагомим недоліком згаданих вище систем керування процесом графітування вуглецевих виробів є та обставина, що вони не забезпечують оптимальних техніко-економічних показників даної технологічної стадії виробництва, що, як правило, призводить до зниження ефективності її функціонування.

Загальна задача оптимізації виробництва вуглецевих виробів сформульована у праці [14]. Задача керування процесом графітування вуглецевих виробів повинна формулюватись у відповідності до поставленої загальної задачі. Постанова задачі керування процесом графітування повинна включати формулювання критерія оптимального керування та обмежень на технологічні параметри процесу та показники його якості.

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

Аналіз техніко-економічних показників як критеріїв оптимального керування процесом графітування

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

Найбільш загальним показником ефективності процесу графітування є його *рентабельність* за нормативний час (тиждень, місяць, рік, кампанію графітування).

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

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

Прибуток від реалізації продукції розраховується таким чином:

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

де a_i, F_i – ціна одиниці та кількість одиниць i -го виду готової продукції відповідно;

δ_i – собівартість одиниці i -го виду заготовок, що підлягають графітуванню;

N – кількість видів продукції, що графітується;

Q_E – експлуатаційні витрати на виробництво.

Собівартість продукції складається із вартості експлуатаційних витрат і собівартості заготовок

$$C_B = Q_E + \sum_{i=1}^N b_i F_i. \quad (3)$$

Враховуючи, що собівартість заготовок формується на попередніх стадіях виробництва і не залежить від режимів роботи печі графітування, а також із метою підвищення чутливості критерію (1) до технологічних змінних, реалізація яких на об'єкті керування забезпечить функціонування останнього в оптимальному технологічному режимі, доцільно замість собівартості продукції C_B використовувати експлуатаційні витрати Q_E [14]. У цьому випадку *модифікований показник рентабельності* буде мати вигляд:

$$R = \frac{Q_B}{Q_E}$$

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, заготовок, що підлягають графітуванню, та готової продукції.

Характерною особливістю *собівартості готової продукції* (3) як критерію оптимального керування є штучне зменшення складової частини, 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 графітування може вимірюватись кількісно (в штуках виробленої продукції):

$$F_{\text{зар}} = \sum_{i=1}^N F_i,$$

або масово (кг, тон):

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i F_i}{F_{\text{зар}}},$$

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

Під час вибору одиниці вимірювання продуктивності процесу графітування очевидно, що більш об'єктивним є оцінювання продуктивності кількісним методом (штук), але тоді треба говорити про продуктивність по кожному окремому виду продукції, що ускладнює загальне оцінювання ефективності процесу графітування, або оцінювати продуктивність як середню (арифметичну, зважену тощо) величину серед усіх видів продукції.

У цій ситуації треба зазначити, що певні переваги має оцінювання продуктивності як середньої зваженої величини

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i F_i}{F_{\text{зар}}},$$

тому що при цьому з'являється можливість опосередковано враховувати економічну доцільність виробництва того чи іншого виду продукції. Стартові оцінки вагових коефіцієнтів β_i можуть

бути розраховані за формулою $\beta_i = \frac{a_i}{q_i}$. Коригування цих коефіцієнтів може відбуватися в залежності від попиту на той чи інший вид продукції.

Недоліком використання даного критерію є те, що він не враховує затрати на виробництво, а отже збільшення продуктивності може призвести до невиправданого збільшення енерго- та ресурсовитрат.

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

$$P_{\text{пр}} = Q_E / G_{\text{пр}}, \quad (4)$$

$G_{\text{пр}}$ – дійсна продуктивність або у вигляді $G_{\text{зар}}$ у разі оцінювання продуктивності в одиницях ваги, або $F_{\text{зар}}$ (F) при кількісному оцінюванні.

Основним показником якості процесу графітування є *ступінь графітування* вуглецевих виробів. Цей показник на сьогодні фактично визначає тривалість процесу графітування, а, значить, у значній мірі енергетичні витрати на нього. Процес ведеться до досягнення заданого ступеня графітування виробів. Використання цього показника як критерія оптимальності процесу графітування не враховує ні ресурсо-, ні енерговитрати на ведення даного процесу, тому він не в повній мірі може характеризувати технологічний процес. Ступінь графітування доцільно використовувати як обмеження в процесі пошуку оптимального режиму роботи.

Постановка задачі керування. На підставі проведеного вище аналізу техніко-економічних показників, які можуть бути використані як критерії оптимального керування процесом графітування вуглецевих виробів, а також враховуючи, що процес графітування є фінальним технологічним процесом у даному виробництві, у відповідності до загального критерію оптимізації виробничих процесів [14] можна зробити висновок, що ефективність ведення даного процесу найбільш доцільно оцінювати за критерієм прибутку за кампанію графітування (2).

Зважаючи на те, що процес графітування ведеться фактично «всліпу», бо на сьогодні не існує автоматичних технічних засобів вимірювання температур, при яких відбувається безпосередньо процес графітування, синтез оптимального керування даним процесом повинен здійснюватися для двох режимів роботи – штатного і нештатного. Під нештатним режимом роботи треба розуміти режим, коли відбувається аварійне відключення електроживлення. У промислових умовах така ситуація, на жаль, має місце практично на протязі кожної кампанії графітування [5].

Короткочасні зупинки печі (до 20 хв.) практично не спричиняють істотних змін у динаміці технологічного процесу і не потребують додаткових заходів коригування [5]. При цьому пуск печі після тривалої зупинки (більше 1 год.) з електричною напругою, визначеною у відповідності до штатного режиму, потенційно здатен викликати небезпечні термічні напруження у виробі.

Результатом синтезу оптимального керування процесом графітування у штатному режимі роботи є програма підведення потужності в часі та загальна тривалість процесу.

Для певного завантаження печі перший та другий доданки критерію оптимальності (2) є відомими сталими величинами. Третій доданок (експлуатаційні витрати) визначається таким чином:

$$Q_E = \int_0^T P(\tau) d\tau = \int_0^T I(\tau)U(\tau) d\tau, \quad (10)$$

де T – тривалість процесу графітування; $P(\tau)$, $I(\tau)$, $U(\tau)$ – відповідно, потужність, напруга та сила електричного струму в залежності від поточного часу τ .

У формулі (10) відсутні такі складові частини експлуатаційних витрат як витрати на охолодження печі, витрати на завантаження та розвантаження, у зв'язку з тим, що вони незрівнянно менші за витрати електроенергії безпосередньо на графітування, які входять у формулу (10).

Отже, для штатного режиму роботи задача оптимального керування процесом графітування може бути сформульована у вигляді

$$Q_E \rightarrow \min$$

при обмеженнях

$$U(\tau) \leq U_{\max},$$

$$I(\tau) \leq I_{\max},$$

$$\max \{ \sigma(x, y, z, \tau) \} \leq \sigma_{\max},$$

$$\min \{ \beta(x, y, z, \tau) \} \geq \beta_{\min},$$

де x, y, z , – просторові координати печі графітування; U_{\max}, I_{\max} – відповідно, максимально допустимі напруга та сила електричного струму; σ_{\max} – максимально допустиме термічне напруження матеріалу виробів; β_{\min} – задане значення ступеня графітування виробів. У такій постановці дана задача розв'язується у [5].

Складнішою є задача, коли одночасно завантажуються декілька печей графітування з різними геометричними та енергетичними характеристиками. Тоді критерій оптимальності виглядає таким чином:

$$Q_{\text{заг}} = \sum_{j=1}^M Q_B^j,$$

де Q_B^j – прибуток від проведення кампанії графітування у j -й печі; M – кількість печей, що завантажуються.

У нештатному режимі роботи може виникнути ситуація, коли з точки зору економічної доцільності вигідніше частину продукції пустити в брак з подальшою переробкою, ніж прагнути отримати всю продукцію потрібної якості. Останні намагання можуть призвести до перевитрат енергоресурсів, а значить, до зниження прибутку процесу графітування.

У цій ситуації критерій оптимальності (2) трансформується в такий:

$$Q_B^{\text{мод}} = \sum_{i=1}^N a_i (F_i - F_i^{\text{брак}}) - \sum_{i=1}^N b_i F_i + Q_E + \sum_{i=1}^N d_i F_i^{\text{брак}}, \quad (11)$$

де $F_i^{\text{брак}}$ – кількість бракованої продукції i -го типу.

При цьому експлуатаційні витрати повинні бути представлені у вигляді

$$Q_E = Q_E^I + Q_E^{II},$$

де $Q_E^I = \int_0^{T_1} P(\tau) d\tau$ – експлуатаційні витрати до аварії;

$Q_E^{II} = \int_0^{T_2} P(\tau) d\tau$ – експлуатаційні витрати після аварії;

T_1, T_2 – тривалість кампанії графітування до та після аварії;

d_1 – зменшення собівартості заготовок за рахунок переробки браку.

З урахуванням вибраного критерію (2) дана задача може бути розширена. Для досягнення

більшої ефективності процесу графітування до керувальних змінних $P(\tau)$ та T доцільно додати F_i , $i=1,2,\dots,N$, тобто розглядати графітування тих чи інших вуглецевих виробів із точки зору прибутку від реалізації технологічного процесу. При цьому можуть бути введені обмеження, які враховують потребу у виробництві певної кількості окремих виробів. Тоді кількість i -го виробу записується у вигляді $F_i = F_i^{zad} + F_i^{omn}$, $i = 1, 2, \dots, N$,

де F_i^{zad} – потрібна кількість продукції i -го типу; F_i^{omn} – кількість продукції i -го типу, яка підлягає оптимізації.

Якщо розглядати нештатний режим, то, безумовно, результати розрахунків за критерієм (11) будуть залежати від того, які саме заготовки плануються у брак. Виходячи з того, що температурний режим печі графітування відрізняється суттєвою неоднорідністю, то до бракованої продукції при розрахунках перш за все треба віднести заготовки, які знаходяться в зоні найнижчих температур.

Висновки. У статті проаналізовані техніко-економічні показники, які можуть бути використані як критерії оптимального керування процесом графітування вуглецевих виробів. На основі проведеного аналізу показана доцільність використання прибутку за кампанію графітування як критерій оптимальності.

Сформульовані обмеження як на технологічні змінні, так і на показники якості готових виробів.

Розглянуто застосування вибраного критерія оптимальності в умовах штатного та нештатного режимів роботи.

Сформульовані в статті задачі керування характеризуються значною складністю, обумовленою фактичною відсутністю автоматичних пристроїв для вимірювання параметрів процесу безпосередньо під час графітування. Це робить неможливим побудову системи керування процесом графітування вуглецевих виробів за класичною схемою із зворотним зв'язком.

Єдиною альтернативою в цій ситуації є використання математичної моделі об'єкту в системі керування процесом. Враховуючи, що під графітування характеризується значною температурною неоднорідністю, математично вона має описуватись моделями з розподіленими параметрами значної складності. Розрахунок таких моделей навіть засобами сучасної обчислювальної техніки потребує такого часу, який є недопустимим для систем керування реального часу.

Звідси випливають завдання для подальших досліджень: розроблення математичної моделі процесу графітування вуглецевих виробів та її спрощення з метою застосування в системах керування реального часу.

Список літератури:

1. Санников А.К., Сомов А.Б., Ключников В.В. Производство электродной продукции. М.: Металлургия, 1985. 129 с.
2. Rand B., Appleyard S.P., M. Yardim F. Design and Control of Structure of Advanced Carbon Materials for Enhanced Performance. Springer Science & Business Media, 2012. 347 p.
3. Savage G. Carbon-carbon composites, Chapman and Hall, 1993. 401 p.
4. Inagaki M., Meyer R.A. Chemistry and Physics of Carbon, Vol. 31 ed. New York, 1999, 149 p.
5. Коржик М.В. Математичне моделювання та автоматизоване керування процесом графітації в печач Ачесона: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. Київ, 2010. 230 с.
6. Чичулин Н.И. О режимах графитации электродных изделий: сб. научн. тр. Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции. Вып. 5. 1973. С. 114–121.
7. Самохин И.Н., Розенман И.М., Сасс-Тисовский В.Б. Опыт эксплуатации печей с принудительным охлаждением стен и подины при повышенной плотности тока в керне для производства конструкционного графита: сб. научн. тр. Вопросы графитации углеродистых материалов. 1968. С. 70–78.
8. Gupta G. S. Vasanth Kumar P. Rudolph V.R. Gupta, M. Heat-transfer model for the acheson process. Metallurgical and Materials Transactions A. 2001.
9. Знамеровский В.Ю., Бусов А.Н., Полухина М.В. Разработка математической модели печи графитации на стадии охлаждения. Совершенствование технологии электродного производства: Сб. научн. тр. Москва, 1988. С. 71–77.
10. Соседов В.П., Сасс В.Б. Тисовский А.С., О рациональном графике подъема мощности и температуры апроцессе графитации. Цветные металлы. № 2. 1967. С. 62–63.
11. Чичулин Н.И., Соседов В.П., Чалых Е.Ф., Давыдович Б.И. Исследование режимов нагревания электродных заготовок при графитации. Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции : Сб. научн. тр. Вып. 6. Челябинск. 1974. С. 128–134.
12. Знамеровский В.Ю., Яшкина В.В. Исследование режимов ввода энергии в печи графитации. Промышленная энергетика. № 11. 1985. С. 40–42.

13. Erwin D.L. Industrial Chemical Process Design. New York. 2002. 579 p.

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.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГРАФИТАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Проанализированы технико-экономические показатели, которые могут быть использованы как критерии оптимального управления процессом графитации углеродных изделий. Представлена целесообразность использования прибыли за кампанию графитации как критерия оптимальности и его использование в штатном и нештатном режимах работы. Выявлено, что наиболее общим показателем эффективности процесса графитации является его рентабельность за нормативное время, а основным показателем качества процесса графитации является степень графитирования углеродных изделий. Сформулированы ограничения на технологические переменные и на показатели качества готовых изделий, задачи управления.

Ключевые слова: графитация, критерий оптимального управления, задача управления, рентабельность, степень графитизации.

STATEMENT PROBLEM OF OPTIMAL CONTROL OF THE PROCESS OF GRAPHITING OF CARBONE PRODUCTS

The analyzed technical and economic indicators that can be used as criteria for optimal control of the process of graphite carbon products, shows the expediency of using profits for the graphing campaign as a criterion of optimality and its use in full-time and non-regular modes of operation. It is revealed that the most general indicator of the efficiency of the graphing process is its profitability over the normative time, and the main indicator of the quality of the graphing process is the degree of graphite carbon products. Formulated restrictions on technological variables and on indicators of quality of finished products, control tasks.

Key words: graphitization, optimal control criterion, task of management, profitability, degree of graphitization.