

АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МОДИФІКАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ В ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ З АВТОНОМНИМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ

Розглянута проблема побудови аналітичних моделей процесу азотування металевих поверхонь у тліючому розряді. Підкреслена необхідність врахування енергетичних параметрів режиму обробки як факторів, що виступають характеристиками ефективності основних субпроцесів, якими визначаються розмір, структура та фазовий склад модифікованого шару, а отже й його експлуатаційні властивості. З метою побудови аналітичної моделі впливу параметрів азотування на його результати запропоновано методику моделювання багатофакторних процесів шляхом послідовного виключення факторів у середовищі MathCAD.

Ключові слова: моделювання, аналітична модель, багатофакторний процес, тліючий розряд, автономні параметри, модифікований шар.

G.M. SOKOLOVA, I.M. PASTUKH
Khmelnytsky national university

ANALYTICAL MODELLING OF METAL SURFACES MODIFICATION PROCESSES IN A GLOW DISCHARGE WITH THE INDEPENDENT MODE PARAMETERS

Abstract – The problem of forming of analytical models of metal surfaces nitriding in a glow discharge is considered. The necessity of considering the power mode parameters as factors acting performance characteristics of the main subprocesses that determined the size, structure and phase composition of the modified layer is underlined.

The literature on the subject of research is reviewed. The critical analysis of the existing analytical models of nitriding in a glow discharge is made. The importance of ensuring of independence of mode parameters is underlined.

In order to form analytical models that links nitriding parameters with the results of nitriding in a glow discharge the method of multifactorial process modelling by successive exclusion of impacts in the environment of MathCAD is offered. The advantages and disadvantages of the proposed method of modelling is analyzed.

Keywords: modelling, analytical model, multifactorial process, glow discharge, independent parameters, modified layer.

Вступ

Моделювання процесу азотування у тліючому розряді (АТР) відбувається у два етапи: на першому розробляється фізична модель, тобто обираються вихідні положення, що пояснюють фізичні аспекти процесу модифікації поверхні, а на другому – модельованому фізичному процесу ставиться у відповідність система математичних співвідношень, що описує як перебіг окремих його стадій, так і залежність результатів азотування (товщини модифікованого шару, фазового складу, мікротвердості тощо) від технологічних параметрів обробки.

Серед фізичних моделей процесу АТР уже стали класичними моделі Ю.М. Лахтіна та Б.М. Арзамасова, принципова відмінність між якими полягає у різних підходах до вирішення питання про первинність утворення у поверхневому шарі металу нітридної або дифузійної зони. Згідно з підходом, характерним для школи Ю.М. Лахтіна, вважається, що утворення азотистого α -твердого розчину починається після утворення нітридів на поверхні, причому нітриди, разом із газовою фазою, є самостійним джерелом азоту [1]. Цей підхід, характерний і для німецької школи (Kolbel, Keller, Edenhofer), був підданий критиці Б.М. Арзамасовим. Більш обґрунтованим він вважає механізм первинного формування на поверхні металу твердого розчину, концентрація насичуючого елемента в якому з часом зростає, і лише при досягненні границі його розчинності у металі утворюється надлишкова фаза [2].

У [3] наведено енергетичний аналіз згаданих теоретичних моделей АТР, який вказує на певну невідповідність їх реальним процесам. Зазначено, що процеси, описувані цими моделями, слід розглядати як окремі випадки одного більш складного процесу, причому пріоритет кожного з них залежить від конкретних умов обробки. Суттєвим недоліком обох моделей є відсутність аналітичного обґрунтування. У вказаній роботі пропонується енергетична модель процесу АТР, ключовим положенням якої є тезис про енергетичну доцільність, згідно з яким у першу чергу реалізується той з декількох можливих процесів, який у даних умовах є енергетично більш вигідним.

В енергетичній моделі АТР введено низку аналітичних показників, котрі характеризують головні субпроцеси: утворення нітридів, розпорошення поверхні, дифузії азоту в глибину поверхневого шару. Оцінка ефективності кожного з цих субпроцесів проводиться на основі розрахунку відносних енергетичних факторів (ВЕФ) того чи іншого субпроцесу. Умовно їх можна розділити на дві групи: фактори утворення нітридів в приповерхневому шарі та фактори, які відображають здатність потоку іонізованих та нейтральних часток, що бомбардують поверхню, сприяти її розпорошенню чи дифузії часток вглибину поверхневого шару. Зазначені показники характеризують складові процесу азотування якісно, тобто дають можливість проаналізувати вплив параметрів технології на структуру та властивості модифікованого шару з позиції “краще – гірше, більше – менше”, але не дозволяють отримати кількісні значення кінцевих результатів азотування. Вирішення цієї задачі потребує побудови аналітичних моделей, тобто створення математичного

апарату, який давав би змогу встановити однозначний кількісний зв'язок між параметрами режиму АТР (температурою, тиском, складом газової суміші, тривалістю азотування, напругою на електродах камери та густиною струму) і величинами, що виражають кінцевий результат азотування (мікротвердість поверхні, товщина нітридної зони, зносостійкість та ін.).

Аналіз джерел за темою дослідження

За період використання технології азотування було зроблено чимало спроб надати формалізований опис окремих стадій процесу насичення поверхні азотом та явищ, що його супроводжують. Наведені у [4] результати деяких з них (моделювання кінетики росту нітридів у зоні внутрішнього азотування, прогнозування складу зони сполук, розрахунок міцності зон внутрішнього азотування, моделювання кінетики дифузійного насичення азотом при газовому азотуванні та ін.) свідчать про недостатню їх адекватність досліджуваному процесу – в окремих випадках розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними становить 10–15 %. Аналіз робіт з моделювання азотування, наведений у роботі [5], приводить її автора до аналогічного висновку: він говорить про “значні обмеження по моделюванню азотованого шару на сталях” і фіксує неприпустимо високу похибку прогнозованих характеристик. Таким чином, попри значну кількість робіт, присвячених досліджуваному питанню, та великий накопичений досвід, задачу аналітичного моделювання процесу азотування доводиться вважати далекою від вирішення.

Що ж стосується математичного моделювання процесу АТР, то як справедливо зауважують автори роботи [6], воно і “досі не вийшло за межі розв'язання рівняння дифузії і визначення коефіцієнтів дифузії у фазах на чистому залізі, тобто воно обмежується лише процесами в оброблюваному матеріалі, ... не звертаючись до технологічних параметрів обробки”. Слід зауважити, що порівняно з моделюванням рідинного, газового та інших видів азотування моделювання процесу АТР має свою специфіку, оскільки вимагає врахування характеристик тліючого розряду, що виступає у якості інтенсифікатора елементарних підпроцесів, які відповідають за утворення модифікованого шару. Однак, якщо вплив режимних параметрів (температури, тиску, складу газової суміші та тривалості процесу) на результати АТР досліджувався багатьма вченими, то енергетичні параметри (напруга на електродах камери та густина струму) у переважній більшості робіт навіть не фігурують, хоча очевидно, що сама природа процесу вимагає їх фіксації.

Важливість впливу енергетичних характеристик тліючого розряду на результат азотування врахована у роботах [6–8], де пропонується для встановлення зв'язку між вхідними параметрами АТР та товщиною модифікованого шару використовувати метод математичного планування. При цьому факторами варіювання приймалися тиск газового середовища, міжелектродна відстань та питома потужність розряду, а температура та тривалість обробки з метою скорочення кількості експериментів залишалися постійними. Втім, запропонована авторами матриця планування викликає деякі запитання. Як відомо, метод планування експерименту містить певні вимоги до сукупності факторів, однією з яких є “незалежність факторів, тобто можливість встановлення фактора на будь-якому рівні незалежно від рівнів інших факторів” [9, с. 54]. Забезпечення незалежності факторів впливу при АТР являє собою серйозну наукову задачу, розв'язання якої обіцяє широкі перспективи в плані оптимізації режимів азотування, здатних забезпечити результати модифікації, що найкраще відповідають вимогам підвищення працездатності об'єктів обробки в заданих умовах експлуатації. Але сама постановка цієї задачі має певні фізичні межі: цілком можливо за рахунок введення альтернативного джерела підігріву забезпечити незалежність температури від енергетичних факторів, але при цьому область варіювання енергетичних параметрів для конкретної комбінації температури і тиску залишатиметься обмеженою певними комбінаціями значень напруги і сили струму. Оскільки прийнята у якості фактора варіювання питома потужність розряду визначається саме напругою та силою струму ($w = UI/S$, де U – напруга; I – сила струму; S – площа поверхні об'єкта модифікації), то залишається незрозумілим, яким чином авторам запропонованої моделі вдалося провести експеримент, при постійній температурі довільно комбінуючи значення тиску та питомої потужності. Втім, проведена авторами оцінка адекватності отриманого рівняння, дозволила їм заявити, що воно “з високим ступенем достовірності може бути використано при визначенні товщини азотованого шару у межах, що розглядаються”. Зважаючи на крайню вузькість цих меж, практичну цінність подібних моделей навряд чи можна визнати достатньо високою, адже головна мета математичного моделювання – надати необхідну інформацію про досліджуваний об'єкт без проведення додаткових експериментів, що навряд чи можливо за умови, що область застосування моделі обмежується одним матеріалом (сталь 13X11H2B2MФ), однаковим складом середовища (95 % N₂ та 5 % H₂), конкретною температурою (590 °C) та визначеною тривалістю процесу (1 год). Це визнають і самі автори, зауважуючи, що “для інших температурних і часових умов необхідно будувати свою матрицю планування” [6, с. 321]. Моделі, побудовані за тією самою методикою для інших сталей та інших режимів азотування, наведені у [7].

У роботі [5] запропоновані аналітичні залежності для визначення товщини фаз азотованого шару конструкційних сталей та розподілу твердості по глибині цього шару. Втім, опубліковані у [8] результати розрахунків вказаних величин та їх порівняння з експериментальними даними свідчать про наявність достатньо високої похибки (до 9,2 %).

Постановка завдання

Наявні аналітичні моделі процесу АТР характеризуються низькою точністю, надто вузькою областю застосування та недостатньою методичною достовірністю. Деякі з них передбачають використання низки спеціальних показників (коефіцієнт дифузії, кінетичний коефіцієнт, термодинамічний коефіцієнт активності азоту в сталі при наявності легуючих елементів і т.п), що характеризують окремі стадії азотування або явища, які його супроводжують, тим не менш надто ускладнюють, а часом і унеможливають їх широке практичне застосування з метою прогнозування результатів обробки. У жодному випадку не піддаючи сумніву важливість дослідження фізичних закономірностей перебігу процесу АТР для прогнозування властивостей модифікованих шарів, тим не менш, можна з упевненістю стверджувати, що в умовах реального виробництва першочергового значення набуває наявність математичного апарату, що відображав би безпосередній взаємозв'язок між параметрами керування процесом та його кінцевими результатами. Тому практика застосування АТР та подібних технологій диктує необхідність їх представлення у якості “чорної скриньки”, тобто системи, що розглядається як така, що має “вхід” для введення початкової інформації та “вихід” для відображення результатів роботи, причому стан виходів функціонально залежить від стану входів. Внутрішня будова та механізм роботи системи за такого підходу ігноруються. Широко застосовуваний метод планування експерименту, хоча й задовольняє цій умові, має уже згадані обмеження у методичному плані та області застосування. Таким чином, практика вимагає звернення до методів, які б дозволили сформувати аналітичну модель процесу АТР, що була б позбавлена вказаних недоліків.

Виклад основного матеріалу

Для створення математичного апарату, який дозволив би оцінити результати АТР як функції параметрів режиму азотування, пропонується методика побудови аналітичних моделей багатofакторних процесів шляхом послідовного виключення факторів впливу у середовищі MathCAD, загальні положення якої викладені в роботі [10]. Отримана у результаті використання вказаної методики модель може розглядатися як емпірична, оскільки у ній параметри режиму АТР пов'язуються з величинами, які характеризують його результати, через безрозмірні емпіричні коефіцієнти, що не мають чіткого фізичного сенсу.

Послідовність формування такої моделі може бути представлена у вигляді наступного алгоритму:

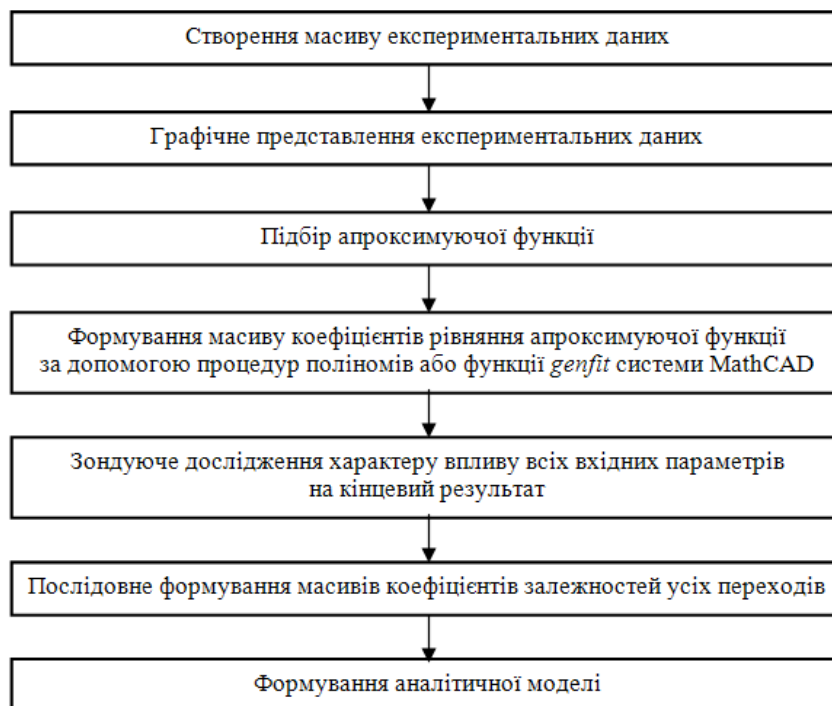


Рис. 1. Алгоритм побудови аналітичної моделі багатofакторного процесу

Сутність вказаної методики розглянемо на прикладі формування моделі процесу, що визначається трьома факторами впливу – P , A , T , причому для кожного з факторів впливу встановлено відповідно p , a , t рівнів градацій, тобто вказані фактори можуть приймати значення $P_1, P_2, \dots, P_p; A_1, A_2, \dots, A_a; T_1, T_2, \dots, T_t$ відповідно.

Аналітична модель впливу вихідних факторів на кінцеві результати процесу створюється шляхом обробки експериментальних даних, отриманих в результаті проведення серії дослідів.

Масив експериментальних даних R являє собою матрицю розміру $r \times s$, де r – кількість експериментів, відмінних за умовами проведення, $r = p \cdot a \cdot t$; s – кількість результатів вимірювань досліджуваного показника при заданих умовах експерименту.

Експериментальні дані відображаються графічно, що дає можливість підібрати апроксимуючу функцію. Точність її підбору визначає відповідність кінцевих результатів даним вихідної матриці. Обчислювальна система MathCAD надає широкі можливості для застосування різних типів залежностей за допомогою вмонтованих в неї функцій, але найчастіше використовуються дві: поліном та довільна функція.

Коефіцієнти залежності довільного виду визначаються за допомогою вмонтованої в програму MathCAD функції *genfit*, для роботи якої потрібно сформувати матрицю, елементами якої є сама функція та її часткові похідні, подані у послідовності наведення коефіцієнтів у рівнянні. Одержані значення коефіцієнтів переносяться в проміжну матрицю M_X .

Вибір комбінації коефіцієнтів проводиться за критерієм мінімальної суми квадратів відхилень розрахункових значень апроксимуючої функції від експериментальних даних.

Масив коефіцієнтів першого переходу M_X є матрицею розміру $r \times z_1$ (тобто $(p \cdot a \cdot t) \times z_1$), де z_1 – кількість коефіцієнтів у рівнянні апроксимуючої функції.

Наступним кроком є визначення характеру впливу кожного фактора, що проводиться з метою визначення послідовності їх виключення. Взагалі ця послідовність може бути довільною, проте тут слід враховувати той факт, що складність моделі залежить від кількості коефіцієнтів в рівняннях кожного переходу, а вона у свою чергу визначається саме типом залежності впливу кожного фактора – так, при лінійній залежності таких коефіцієнтів буде два, при поліноміальній залежності другого степеня – три і т. д. Тому з метою спрощення моделі варто найбільш складні залежності включати в її структуру останніми, а в алгоритм обчислення – першими. Саме для цього на початку формування моделі проводиться зондуєчне дослідження характеру впливу всіх вхідних параметрів на кінцевий результат і той з них, який впливає лінійно або взагалі не змінює результату, приймається в якості першого фактора виключення.

При виборі типу залежності слід уникати спрощення характеру впливу та округлення коефіцієнтів, оскільки це неминуче призведе до зниження точності моделі. Характер впливу кожного фактора при всіх варіантах комбінацій з іншими факторами впливу повинен бути однотипним, тобто тип рівняння не повинен змінюватися за формою при переході на інші значення цього фактора впливу. Так, якщо, наприклад, при певному значенні параметра T вплив фактора P на кінцевий результат описується поліноміальною залежністю другого степеня, то такого ж типу залежність повинна бути в тому випадку, коли параметр T приймає інше значення. Це правило не обов'язкове тільки для того фактора впливу, який виключається останнім.

Вдалість вибору типу залежності можна контролювати як візуально на графіку, так і аналітично за допомогою коефіцієнта кореляції.

Розглянемо випадок, коли у якості об'єкта другого переходу прийнято параметр P , залежність коефіцієнтів масиву M_X від якого описується поліномом другого порядку.

У систему MathCAD введена функція для забезпечення поліноміальної регресії при довільному степені полінома регресії *regress* (VX, VY, n). Вона створює єдиний апроксимуючий поліном, коефіцієнти якого обчислюються за всією сукупністю заданих точок. На практиці не рекомендується робити степінь апроксимуючого полінома вище четвертої-шостої, оскільки при цьому сильно зростає похибка реалізації регресії. Крім того, слід враховувати, що аналітичне представлення у вигляді полінома можна використовувати тільки у певному діапазоні аргументу, оскільки при виході за його межі екстраполяція може дати нереальний результат.

Масив коефіцієнтів другого переходу M_P є матрицею розміру $((a \cdot t) \times (z_1 \cdot z_2))$, де z_2 – кількість коефіцієнтів у рівнянні залежності коефіцієнтів масиву M_X від P . Аналогічно при виборі у якості об'єкта третього переходу фактора A , масив коефіцієнтів M_A є матрицею розміру $(t \times (z_1 \cdot z_2 \cdot z_3))$, де z_3 – кількість коефіцієнтів у рівнянні залежності коефіцієнтів масиву M_P від A .

При виключенні на четвертому переході фактора впливу T , масив коефіцієнтів M_T є вектор-рядком розміру $(1 \times (z_1 \cdot z_2 \cdot z_3 \cdot z_4))$, де z_4 – кількість коефіцієнтів у рівнянні залежності коефіцієнтів масиву M_A від T . Для спрощення подальшого використання цей вектор-рядок доцільно трансформувати у масив виду $((z_1 \cdot z_2 \cdot z_3) \times z_4)$, тоді елементи кожного рядка цього масиву являтимуть собою послідовно згруповані коефіцієнти кожного з рівнянь четвертого переходу.

Для випадку, коли досліджуваний процес визначається трьома факторами, вплив кожного з яких описується поліномом другого степеня, а апроксимуюча функція – поліномом третього степеня, структура моделі матиме вигляд (2.1) – (2.4). З огляду на громіздкість моделі та однотипність її структури для третього та четвертого переходів наведені лише перші та останні рівняння.

Рівняння четвертого переходу (усього $l_4 = z_1 \cdot z_2 \cdot z_3$ рівнянь):

$$\begin{aligned} K_{111}(T) &:= K_{1111} + K_{1112} \cdot T + K_{1113} \cdot T^2; \\ K_{112}(T) &:= K_{1121} + K_{1122} \cdot T + K_{1123} \cdot T^2; \end{aligned} \quad (2.1)$$

...

$$K_{413}(T) := K_{1131} + K_{1132} \cdot T + K_{1133} \cdot T^2.$$

Рівняння третього переходу (усього $l_3 = z_1 \cdot z_2$ рівнянь):

$$\begin{aligned} K_{11}(A, T) &:= K_{111}(T) + K_{112}(T) \cdot A + K_{113}(T) \cdot A^2; \\ K_{12}(A, T) &:= K_{121}(T) + K_{122}(T) \cdot A + K_{123}(T) \cdot A^2; \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\dots$$

$$K_{43}(A, T) := K_{431}(T) + K_{432}(T) \cdot A + K_{433}(T) \cdot A^2.$$

Рівняння другого переходу (усього $l_2 = z_1$ рівнянь):

$$\begin{aligned} K_1(P, A, T) &:= K_{11}(A, T) + K_{12}(A, T) \cdot P + K_{13}(A, T) \cdot P^2; \\ K_2(P, A, T) &:= K_{21}(A, T) + K_{22}(A, T) \cdot P + K_{23}(A, T) \cdot P^2; \\ K_3(P, A, T) &:= K_{31}(A, T) + K_{32}(A, T) \cdot P + K_{33}(A, T) \cdot P^2; \\ K_4(P, A, T) &:= K_{41}(A, T) + K_{42}(A, T) \cdot P + K_{43}(A, T) \cdot P^2. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Рівняння першого переходу:

$$Y(x) = K_1(P, A, T) + K_2(P, A, T) \cdot x + K_3(P, A, T) \cdot x^2 + K_4(P, A, T) \cdot x^3. \quad (2.4)$$

Система індексації коефіцієнтів у рівнянні описується виразом $K_{(k_1)(k_2)\dots(k_n)}$, де n – загальна кількість цифр в індексі коефіцієнта, яка дорівнює порядковому номеру переходу (за умови, що першим вважається перехід, на якому формується початкова матриця з вихідними коефіцієнтами); k_n – порядковий номер коефіцієнта у тому рівнянні n -го переходу, з якого визначається коефіцієнт $K_{(k_1)(k_2)\dots(k_{n-1})}$ рівняння $(n-1)$ -го переходу, з якого у свою чергу визначається коефіцієнт $K_{(k_1)(k_2)\dots(k_{n-2})}$ рівняння $(n-2)$ -го переходу і т. д.; причому $k_n = 1, 2, \dots, z$, де z – кількість коефіцієнтів у рівнянні цього переходу. Тобто, індекс коефіцієнта K_{312} , наприклад, означатиме, що йдеться про другий коефіцієнт рівняння третього переходу, з якого визначається перший з коефіцієнтів (K_{31}) рівняння другого переходу, з якого у свою чергу визначається третій коефіцієнт (K_3) рівняння першого переходу.

Зміна кількості та характеру впливу вихідних параметрів не міняє сутності методики побудови аналітичної моделі, але, зрозуміло, впливає на кількість та тип рівнянь, що до неї входять.

З наведених положень відслідковується система формування рівнянь моделі будь-якої складності. Кількість рівнянь в кожному переході (за винятком першого, де завжди одне рівняння) дорівнює числу коефіцієнтів в попередньому або визначається як добуток кількостей коефіцієнтів у попередніх переходах:

$$l_1 = 1; \quad l_2 = 1 \cdot z_1; \quad l_3 = z_1 \cdot z_2; \quad l_4 = z_1 \cdot z_2 \cdot z_3 \dots l_n = z_1 \cdot z_2 \cdot \dots \cdot z_{n-1}. \quad (2.5)$$

Загальне число рівнянь в моделі є сумою кількостей рівнянь на всіх переходах:

$$l = 1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n. \quad (2.6)$$

Послідовність залежностей у створеній моделі обернена відносно послідовності операцій виключення факторів впливу. Це пов'язано з тим, що кінцевий результат визначається в останню чергу, першими ж в алгоритмі розрахунку є ті залежності, які стосуються фактора впливу, котрий виключається останнім.

При наявності значної кількості вихідних факторів впливу отримана модель може виявитися доволі громіздкою: кількість рівнянь може обчислюватись десятками, а коефіцієнтів – сотнями, що може розглядатися як недолік вказаної моделі, втім для сучасних обчислювальних систем розв'язання подібних задач не становить жодних труднощів. Так, підрахунок результатів за моделлю розподілу мікротвердості по глибині азотованого шару (система з 53 рівнянь [11]) відбувається у частки секунди. Між тим можливість врахування впливу довільної кількості факторів і прогнозування результатів АТР за будь-яких значень, які ці фактори можуть приймати, безсумнівно становить серйозну перевагу моделей, отриманих за наведеною методикою. Іншими суттєвими перевагами цих моделей є їхня універсальність (моделі для різних матеріалів розрізняються лише набором коефіцієнтів) та висока точність (при вдалому підборі апроксимуючої функції відхилення між розрахунковими та експериментальними даними становить менше 3 %).

Висновки

Розглянута проблема побудови аналітичних моделей процесу азотування металевих поверхонь у тліючому розряді. Підкреслена необхідність врахування енергетичних параметрів режиму обробки як факторів, що виступають характеристиками ефективності основних субпроцесів, якими визначаються розмір, структура та фазовий склад модифікованого шару, а отже й його експлуатаційні властивості. Наведено критичний аналіз існуючих моделей АТР. З метою побудови аналітичних моделей впливу параметрів азотування на його результати запропоновано методикою моделювання багатofакторних процесів шляхом послідовного виключення факторів у середовищі MathCAD.

Література

1. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.
2. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 400 с.
3. Фізико-технічна обробка поверхні металів безводневим азотуванням в тліючому розряді : дис. ... доктора технічних наук : 05.03.07 / Пастух Ігор Маркович. – Хмельницький, 2008. – 520 с.

4. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г.-И. Шпис, З. Бёмер. – М. : Metallurgiya, 1991. – 320 с.
5. Крукович М. Г. Моделирование процесса азотирования / М. Г. Крукович // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2004. – № 1. – С. 24–31.
6. Герасимов С. А. Моделирование процесса ионного азотирования / С. А. Герасимов, М. Г. Крукович, Е. А. Бадерко, Н. П. Клочков // *Наука и образование*. – 2013. – № 1. – С. 313–330.
7. Моделирование процессов в насыщающем пространстве при ионном азотировании / М. Г. Крукович, Е. А. Бадерко, Н. П. Клочков, А. С. Савельева [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://science-bsea.narod.ru/2012/mashin_2012_16/krukovich_model.htm
8. Упрочнение деталей азотированием и моделирование кинетики формирования диффузионных слоев при ионном процессе / М. Г. Крукович, Е. А. Бадерко, Н. П. Клочков // *Вестник ВНИИЖТ*. – 2012. – № 2. – С. 62–66.
9. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
10. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Х. : Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, 2006. – 364 с.
11. Пастух И. М. Мікротвердість модифікованого шару конструкційних сталей, азотованих в тліючому розряді / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, О. С. Здибель // *Вісник ХНУ*. – 2014. – № 2. – С. 7–11.

References

1. Lakhtin Y. M. Azotirovaniye stali / Y. M. Lakhtin, Y. D. Kogan. – M. : Mashinostroyeniye, 1976. – 256 s.
2. Ionnaya khimiko-termicheskaya obrabotka splavov / B. N. Arzamasov, A. G. Bratukhin, Y. S. Yeliseyev, T. A. Panayoti. – Moscow : Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 1999. – 400 s.
3. Fisiso-tekhnichna obrobka poverkhni metalliv bezvodnevym azotuvanniam v tliyuchomu rozrjadi: dysertatsia na zdobuttia naukovoogo stupenia doktora tekhnichnykh nauk: 05.03.07: zakhyschena 08.06.2008: zatv. 16.12.2008 / Pastukh Igor Markovich. – Khmelnytsky, 2008. – 520 s.
4. Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya / Y. M. Lahtin, Y. D. Kogan, H.-Y. Shpitz, Z. Bëmer. – Moscow: Metallurgiya, 1991. – 320 s.
5. Krukovich M.G. Modelirovaniye protsesa azotirovaniya / M. G. Krukovich // *Metallovedeniye and termicheskaya obrabotka metallov*. – 2004. – № 1. – P. 24-31.
6. Modelirovaniye protsesa ionnogo azotirovaniya / S. A. Gerasimov, M. G. Krukovich, E. A. Baderko, N. P. Klochkov // *Nauka i obrazovanie*. – 2013. – № 1. – S. 313–330.
7. Modelirovaniye protsesov v nasyischayuschem prostranstve pri ionnom azotirovanii / M. G. Krukovich, E. A. Baderko, N. P. Klochkov, A. S. Saveleva. URL: http://science-bsea.narod.ru/2012/mashin_2012_16/krukovich_model.htm
8. Uprochneniye detaley azotirovaniem i modelirovaniye kinetiki formirovaniya diffuzionnykh sloev pri ionnom protsesse / M. G. Krukovich, E. A. Baderko, N. P. Klochkov // *Vestnik VNIIZhT*. – 2012. 2. – S. 62–66.
9. Adler Yu. P. Planirovaniye eksperimmenta pri poiske optimalnykh usloviy / Yu. P. Adler, E. V. Markova, Yu. V. Granovskiy. – M. : Nauka, 1976. – 280 s.
10. Pastukh I. M. Theoriya i praktyka bezvodородnogo azotirovaniya v tleushchem razrjade. – Kharkov, Natsionalnyi nauchnyi tsentr “Kharkovskiy fiziko-tekhnicheskyy institut”, 2006 – 364 s.
11. Pastukh I. M. Mikrotverdst modiflkovanogo sharu konstruktlynykh staley, azotovanih v tliyuchomu rozrjadi / I. M. Pastuh, G. M. Sokolova, O. S. Zdibel // *Herald of Khmelnytsky National University*. – 2014. – № 2. – S. 7–11.

Рецензія/Peer review : 3.4.2015 р. Надрукована/Printed :15.4.2015 р.
Рецензент: стаття рецензована редакційною колегією