

ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ АЗОТУВАННЯ У ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ

Наведено критичний аналіз існуючих математичних моделей процесу азотування у тліючому розряді. Запропоновані альтернативні підходи до формування комплексу вихідних факторів математичних моделей досліджуваного процесу, що базуються на енергетичній моделі процесу і дозволяють враховувати вплив на результати модифікації не тільки режимних параметрів, але й інтенсивності перебігу основних субпроцесів азотування у тліючому розряді – утворення нітридів, дифузії та розпорошення поверхні.

Ключові слова: математична модель, метод планування експерименту, енергетичні параметри, азотування в тліючому розряді.

G.M. SOKOLOVA
Khmelnitsky National University

FORECASTING OF NITRIDING IN GLOW DISCHARGE RESULTS ON THE BASIS OF ENERGY MODEL OF THE PROCESS

A critical analysis of mathematical models of the nitriding in glow discharge process (NGD), formed by experimental design using operational parameters (temperature, pressure, gas mixture composition and duration of the process) as varying factors is performed. It was experimentally established that reducing of energy parameters (voltages on the electrodes of the camera and the current density) causes a significant reduction of the depth of the nitrated layer, thickness of the compound layer and surface microhardness, in the conditions of the process implementation with both dependent and independent parameters mode. On this basis it was proved the necessity of consideration of NGD energy parameters in the mathematical modelling and in this context – inferiority of experimental design method and unacceptability of its application to the simulation of said process. It was proposed alternative approaches to formation of the initial factors complex based on energy model of NGD process, that take into account the influence of the intensity of the main subprocesses (the formation of nitrides, surface sputtering and diffusion) on the modification results

Keywords: mathematical model, experimental design, power options, nitriding in glow discharge

Вступ

Керованість процесу як можливість отримання заданих характеристик поверхні шляхом варіювання параметрами режиму вважається однією з основних переваг технології азотування у тліючому розряді (АТР). Разом із тим, слід зауважити, що вона не виходить за межі передбачення якісних змін модифікованої поверхні; що ж стосується прогнозування кількісних характеристик результатів азотування – наприклад, товщини азотованого шару, мікротвердості поверхні тощо, – то на сьогодні це питання залишається далеким від вирішення. У загальному випадку задача встановлення зв'язків між кількісними характеристиками результатів досліджуваного процесу з одного боку та факторами, що їх визначають, з іншого, може бути вирішена за допомогою формування математичних моделей. Втім, математичне моделювання процесу АТР, як справедливо зауважують автори [1], “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”.

Аналіз джерел за темою дослідження

Автори роботи [1] для встановлення зв'язку між вихідними параметрами процесу та товщиною модифікованого шару пропонують використовувати метод математичного планування експериментів. Треба зауважити, що ця ідея не вирізняється оригінальністю – метод планування (якщо точніше – плани другого порядку Хартлі) для аналогічних цілей був застосований у роботі [2] ще в 1990 р.

Взагалі аналіз літературних джерел [1–4] свідчить, що усі спроби вирішення задачі прогнозування кількісних показників, які визначають трибологічні властивості сталевих поверхонь, азотованих у тліючому розряді, так чи інакше пов'язані із методом планування експериментів (ПЕ), який дозволяє отримувати моделі процесів, використовуючи факторне планування та регресійний аналіз. Такий стан речей навряд чи можна визнати прийнятним, оскільки окрім загальновідомих недоліків згаданого методу [5], він ще й висуває ряд вимог до показників, які виступають у ролі факторів досліджуваного процесу. Вказані вимоги далеко не завжди можуть бути дотримані на практиці, результатом чого є ігнорування впливу окремих факторів і, як наслідок, недостатня точність, а інколи й недостовірність отриманих математичних моделей, яскравим прикладом чого і виступають існуючі спроби моделювання процесу АТР, в яких факторами варіювання приймаються виключно режимні параметри – температура, тиск, склад газової суміші та тривалість процесу, тоді як вплив енергетичних параметрів повністю ігнорується.

Постановка завдання

У роботі підіймається питання прийнятності застосування методу планування експерименту для математичного моделювання процесу АТР і аналізується практична цінність отриманих цим методом моделей. Пропонуються альтернативні підходи до формування комплексу вихідних факторів, що базуються на енергетичній моделі процесу і дозволяють враховувати вплив на результати модифікації не лише

режимних та енергетичних параметрів, але й інтенсивності перебігу основних субпроцесів досліджуваного процесу – дифузії, розпорощення поверхні та нітридоутворення.

Виклад основного матеріалу

Основними вимогами, які висуваються до сукупності факторів при ПЕ, є їхня сумісність та незалежність. Перша вимога означає, що всі комбінації здійсненні, тобто можуть бути реалізовані на практиці; друга передбачає можливість встановлення фактора на будь-якому рівні незалежно від рівнів інших факторів. Традиційно незалежність факторів тлумачиться як відсутність кореляції між ними, при цьому стверджується, що ця вимога “не означає, що між значеннями факторів немає ніякого зв’язку; достатньо аби цей зв’язок не був лінійним” [6, с. 54]. Останнє зауваження навряд чи має сенс, оскільки використання методу ПЕ стає неможливим при наявності будь-якого зв’язку між факторами процесу, навіть нелінійного, прикладом чого може слугувати спроба планування експерименту з метою дослідження процесу АТР з незалежними параметрами.

Як відомо, у загальному випадку усі параметри технологічного режиму АТР є взаємозалежними та взаємопов’язаними, причому найбільші обмеження на керування процесом азотування накладає температура, оскільки її значення визначається комбінацією напруги і густини струму. Очевидно, що при забезпеченні незалежності параметрів технології відкриваються додаткові можливості як для інтенсифікації процесу, так і для якісного керування наслідками модифікації. У світовій практиці проблема забезпечення незалежності температури від енергетичних параметрів режиму АТР вирішується введенням джерела підігріву, альтернативного тліючому розряду. Втім навіть за таких умов незалежність вказаних факторів залишається досить умовною. Перш за все, варто зауважити, що змінюватись може значення лише одного з вказаних показників – або напруги, або густини струму, – але при цьому на область його варіювання буде впливати комбінація решти параметрів. Так, при постійних температурі та складі газової суміші область припустимих значень напруги залежатиме від тиску у розрядній камері і буде обмежена, по-перше, максимальним значенням напруги, яке відповідає процесу без альтернативного джерела підігріву, а по-друге, деяким мінімальним значенням, при якому процес АТР зберігає свою ефективність.

Як свідчать результати експериментальних досліджень, зниження значень енергетичних параметрів негативно позначається на результатах АТР, призводячи до зниження мікротвердості поверхні, товщини азотованого шару та нітридної зони, а також до погіршення трибологічних характеристик (зростання інтенсивності зношування, збільшення коефіцієнта тертя тощо). Планування експерименту для такого процесу за традиційною методикою, що передбачає визначення основного рівня та інтервалів варіювання, слід визнати неприйнятним, оскільки це зумовить вихід за межі області припустимих значень напруги і густини струму – за нижні (що неприпустимо з точки зору прийнятності результатів азотування) або за верхні (що неможливо в принципі). Наочним підтвердженням наведеного положення може слугувати рис. 1, на якому наведено залежності між напругою і густиною струму при різних значеннях тиску. Точки 1, 2, 3 відповідають комбінації параметрів при азотуванні без додаткового джерела підігріву. Зменшення значення напруги до U_x , цілком прийнятне з точки зору результатів азотування при тиску p_1 , може призвести до негативних наслідків, якщо процес АТР проводитиметься при тиску p_2 , і є однозначно неприйнятним при тиску p_3 . Аналогічні висновки будуть справедливими і при зниженні густини струму до значення j_x .

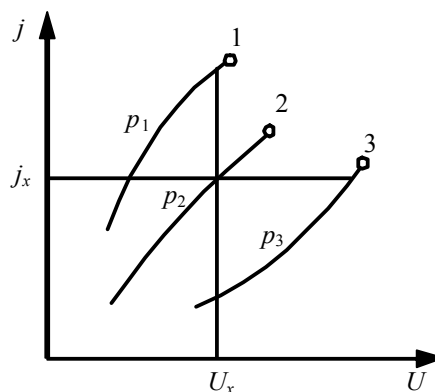


Рис. 1. Залежність між енергетичними параметрами процесу АТР

Отже, навіть при забезпеченні незалежності напруги та густини струму від температури, керування ними обмежується можливістю варіювання одного з вказаних параметрів у деяких межах; значення другого визначається комбінацією решти параметрів. Що ж стосується процесу АТР, який реалізується без додаткового джерела підігріву, то він взагалі не надає ані найменших можливостей змінювати значення напруги та густини струму. У цьому випадку енергетичні характеристики з певною часткою умовності можна розглядати як результуючі параметри процесу – їхні значення цілком визначаються комбінацією режимних параметрів, причому визначаються однозначно.

За таких обставин при моделюванні процесу АТР постають два питання: 1) чи варто врахувати вплив напруги та густини струму на результати азотування (особливо за відсутності додаткового джерела підігріву)? 2) якщо так, то яким чином це можна зробити?

Аналіз нечисленних існуючих математичних моделей процесу АТР свідчить про одностайність дослідників у відповіді на перше питання – вона є негативною, – після чого друге питання, зрозуміло, уже втрачає будь-який сенс. Втім, правомірність ігнорування енергетичних параметрів може бути заперечена неприйнятно вузькою областю застосування моделей, у яких факторами виступають виключно режимні параметри процесу АТР; по суті усі вони є лише математичним описом проведеного експерименту – технологічний процес, проведений за тих же значень температури, тиску, складу газової суміші та тривалості, але в іншій установці, призведе до геть інших результатів і відповідно абсолютно нівелює будь-яку точність моделі.

Річ у тім, що факторами, які визначають результативність процесу АТР, виступають не лише параметри режиму, але й такі показники, як міжкатодна відстань, форма та розміри підвіски і досліджуваного зразка (або деталі), наявність локальних виключень на його поверхні і багато інших (перелік факторів, які є визначальними при АТР, наведений американським дослідником Девідом Пайєм (David Pye) у роботі [7], включає тринадцять найменувань). Зрозуміло, безпосереднє урахування усіх цих факторів у математичній моделі, навіть якщо припустити таку можливість, призвело б до неймовірного ускладнення як процесу її формування, так і подальшого користування нею.

Тим не менш, врахувати всі зазначені фактори можна, але опосередковано, а саме – увівши у модель енергетичні параметри процесу, адже якщо значення режимних параметрів можуть бути встановлені цілком довільно на будь-якому рівні, припустимому для процесу АТР, то значення напруги і густини струму (цілком конкретне при азотуванні без додаткового джерела підігріву чи області їх варіювання – при його наявності) змінюються залежно від міжкатодної відстані, форми підвіски, розмірів деталі, наявності на ній локальних виключень і т.д. Тобто енергетичні параметри по суті несуть у собі інформацію не лише про кількісні та якісні характеристики розряду, але й відображають вплив усіх перерахованих факторів. У цьому контексті залежність напруги і густини струму від інших факторів виступає тією їхньою особливістю, що неодмінно має бути врахована при математичному моделюванні процесу.

Слід зауважити, що серед уже згаданих моделей АТР, сформованих методом ПЕ, є одна [1], яка враховує енергетичні параметри процесу, а точніше – питому потужність розряду. Цей показник був уведений Б.М. Арзамасовим як кількісна характеристика густини енергії плазми (ГЕП), яку він запропонував розглядати у якості додаткового технологічного фактора керування процесом АТР. Наведені у роботі [8] результати досліджень свідчать про існування екстремальної залежності між ГЕП, яка є критерієм насичуючої здатності газового середовища, та його загальним тиском. Автори [8] (Б.М. Арзамасов та Т.А. Панайоті) зазначають, що тиск газового середовища, який відповідає максимальній питомій потужності розряду, забезпечує отримання модифікованого шару найбільшої в заданих умовах товщини. Втім, слід зауважити, що наведені висновки базуються на результатах дослідів з азотування мідних трубок довжиною 30 мм внутрішнього діаметра 1,6; 3,6 та 5,7 мм, але специфіка азотування отворів малого діаметра, пов'язана з ефектом полого катоду, навряд чи дозволяє поширювати його результати на деталі будь-якої конфігурації. Так, аналізуючи наведені на рис. 2 графіки, логічно буде припустити, що подальше збільшення внутрішнього діаметра азотованого зразка призведе до того, що досліджувана залежність взагалі втратить екстремальний характер, а тому висновки авторів [8] викликають певні сумніви.

На користь останнього говорить і той факт, що описані у [9] експерименти, покликані дослідити залежність потужності від тиску, але проведені зі зразками еліпсоїдної форми (що забезпечувало відсутність концентраторів поля), призвели до зовсім інших результатів (рис. 3).

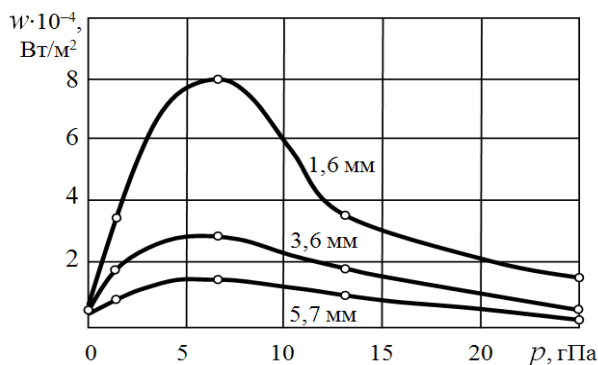


Рис. 2. Залежність питомої потужності розряду від тиску азоту при іонній обробці мідних трубок різного діаметра [8]

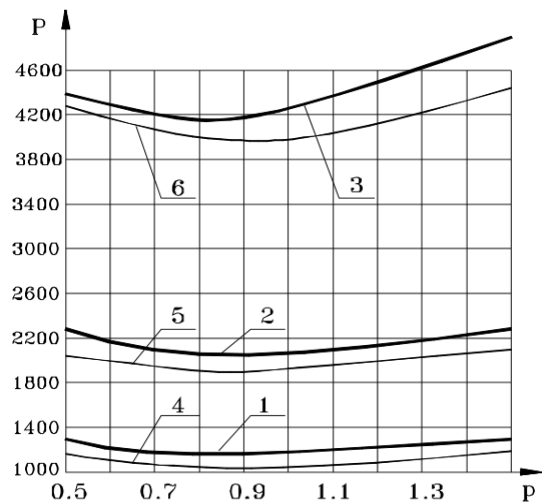


Рис. 3. Залежність активної потужності від тиску в режимі термостабілізації (товсті лінії – N75Ar25, тонкі – N10Ar90): 1, 4 – температура 400 С°; 2, 5 – 500 С°; 3, 6 – 600 С° [9]

Правомірність застосування у роботі [1] питомої потужності як фактора варіювання викликає

сумніви і з точки зору можливості довільного комбінування її значень із різними значеннями тиску. Як уже зазначалося, при наявності додаткового джерела підігріву область варіювання енергетичних параметрів для конкретної комбінації температури і тиску залишатиметься обмеженою певними комбінаціями значень напруги і сили струму. Оскільки питома потужність розряду визначається саме напругою та силою струму ($w = UI/S$ де U – напруга, кВ; I – сила струму, мА; S – площа поверхні зразка, см²), то залишається незрозумілим, яким чином авторам пропонуваної моделі вдалося провести експеримент, при постійній температурі довільно комбінуючи значення тиску та питомої потужності. Слід зауважити, що довільне комбінування тиску і питомої потужності у камері без додаткового джерела підігріву неможливе взагалі; якщо ж для проведення експериментів використовувалась камера з підігрівом, то авторам згаданої роботи варто було б надати пояснення щодо того, яким чином ними визначалася комбінація напруги і струму, що у підсумку давала необхідне значення питомої потужності. Разом із тим, не можна не звернути увагу на той факт, що подібне комбінування суперечить наведеному у роботі [10] положенню, згідно з яким “кожній потужності розряду відповідає певний тиск газового середовища”. Зважаючи на те, що автори аналізованої моделі неодноразово посилаються на вказану роботу, причому наведені у ній висновки критично ними не оцінюються і приймаються як незаперечний факт, згадане протиріччя потребує пояснення.

У будь-якому випадку можна констатувати, що застосування питомої потужності у якості вихідного фактора при математичному моделюванні процесу АТР залишається надто неоднозначним з точки зору чистоти методики побудови моделі, тому більш доцільним, а головне – більш обґрунтованим, буде використання з цією метою напруги і густини струму.

У загальному випадку математичному моделюванню процесу має передувати створення його фізичної моделі, тобто формулювання деяких вихідних положень, що пояснюють фізичні аспекти об'єкта дослідження. Лише після цього модельованому фізичному процесу має ставитись у відповідність система математичних співвідношень, що описує як перебіг окремих його стадій, так і залежність результатів від вихідних факторів впливу.

Серед фізичних моделей процесу АТР уже стали класичними моделі Ю.М. Лахтіна та Б.М. Арзамасова, але жодна з них не є аналітично обґрунтованою, що фактично зводить їх до рівня гіпотез. Щодо запропонованої І.М. Пастухом енергетичної моделі, то введені у ній аналітичні показники характеризують складові процесу азотування лише 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 створення математичного апарату, який давав би змогу встановити однозначний кількісний зв'язок між вказаними показниками і величинами, що виражають кінцевий результат азотування.

З точки зору математичного моделювання процесу АТР серед сімнадцяти запропонованих у роботі [9] аналітичних показників, найбільший інтерес становлять три, а саме – відносні енергетичні фактори (ВЕФ), що виступають характеристиками основних субпроцесів – нітридоутворення, розпорозувальної та дифузійної дії.

Вибір у якості вихідних факторів створюваної математичної моделі вказаних показників може бути обґрунтований наступними положеннями:

- значення ВЕФ визначаються з урахуванням технологічних параметрів режиму, а тому дозволяють опосередковано оцінити вплив температури, тиску у камері, складу газової суміші, напруги та густини струму на результати азотування; при цьому кількість вихідних факторів зменшується з п'яти до трьох, що в разі спрощує процес формування моделі;
- при визначенні ВЕФ нітридоутворення враховується вміст легуючих елементів, тобто цей показник містить інформацію про матеріал зразка;
- між комбінацією трьох вказаних ВЕФ для заданого матеріалу та комбінацію технологічних параметрів режиму існує цілком однозначний зв'язок, що дозволяє будувати моделі, метою яких є пошук оптимальних умов проведення досліджуваного процесу; знайдена за значенням параметра оптимізації комбінація ВЕФ може бути трансформована у комбінацію п'яти технологічних параметрів режиму;
- пропонувані показники несуть у собі інформацію про фізику процесу, оскільки розраховуються як сума по всім енергетичним рівням добуток значень енергетичних рівнів на значення відносного потоку з урахуванням ймовірнісних характеристик як самої енергії, так і геометрії взаємодії часток падаючого потоку і поверхні. Це дозволяє розглядати досліджуваний процес, як “сіру скриньку”, тобто систему, принцип роботи якої у загальних рисах відомий і в певних межах може вважатися керованим. При цьому недостатня повнота інформації про систему (наприклад, про кількісні характеристики процесу масоперенесення [1, с. 316]) компенсується при експериментальному визначенні емпіричних коефіцієнтів у ході побудови математичної моделі.

Описаний підхід є значним кроком уперед порівняно із моделюванням процесу АТР, при якому у якості вихідних факторів впливу виступають технологічні параметри режиму, оскільки в останньому випадку досліджуваний процес виступає як “чорна скринька”, тобто система, що розглядається як така, що має “вхід” для введення початкової інформації та “вихід” для відображення результатів роботи; щодо внутрішньої будови та механізму роботи системи, то за такого підходу вони повністю ігноруються.

Разом із тим, слід зауважити, що застосування у якості вихідних факторів впливу відносних енергетичних факторів нітридоутворення, розпорозувальної та дифузійної дії суттєво звужує коло методів,

які можуть бути використані при формуванні математичної моделі процесу АТР, оскільки вказані показники є взаємозалежними. Серед методів, які дозволяють оперувати залежними факторами, на особливу увагу заслуговують метод математичного моделювання багатофакторних та багатопараметричних процесів у багатокомпонентних системах на базі конструктивної геометрії та метод побудови графічних оптимізаційних моделей багатофакторних процесів засобами нарисної геометрії багатовимірного простору. Детально питання моделювання процесів із взаємозалежними факторами розглянуто у роботі [11].

Висновки

Наведено критичний аналіз математичних моделей процесу АТР, побудованих методом планування експерименту з використанням у якості факторів варіювання режимних параметрів – температури, тиску, складу газової суміші та тривалості процесу. Обґрунтована необхідність врахування впливу енергетичних параметрів, і в цьому контексті – обмеженість методу планування експерименту та неприйнятність його застосування до моделювання процесу АТР. Запропоновані альтернативні підходи до формування комплексу вихідних факторів, що базуються на енергетичній моделі процесу і дозволяють враховувати вплив на результати модифікації інтенсивності перебігу основних субпроцесів досліджуваного процесу – нітридоутворення, розпорошення поверхні та дифузії.

Література

1. 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. 313–332.
2. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах : дис. ... доктора технических наук : 05.02.01 : защищена 8.06.1990 : затв. 16.12.1990 / Каплун Виталий Григорьевич. – Хмельницкий, 1990. – 451 с.
3. Крукович М. Г. 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.
4. Крукович М. Г. Моделирование кинетики роста и свойств азотированных слоев на сталях / М. Г. Крукович // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2002. – № 2. – С. 18–19.
5. Лапач С. Н. Основные проблемы построения регрессионных моделей / С. Н. Лапач, С. Г. Радченко // Математичні машини і системи. – 2012. – № 4. – С. 125–133.
6. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова и др. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
7. Pye D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing / D. Pye. – Ohio: ASM International, 2003. – 260 p.
8. Арзамасов Б. Н. Роль удельной мощности разряда при ионной химико-термической обработке сплавов / Б. Н. Арзамасов, Т. А. Панайоти // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2000. – № 6. – С. 31–34.
9. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Х. : ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
10. 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.
11. Соколова Г. М. Моделювання багатофакторних процесів з взаємозалежними факторами впливу / Г. М. Соколова // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2016. – № 1. – С. 117–120.

Рецензія/Peer review : 15.3.2016 р.

Надрукована/Printed : 19.4.2016 р.
Рецензент : д.т.н., проф. Пастух І.М.