

ЕНЕРГЕТИЧНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ АЗОТУВАННЯ У ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ

Г. М. СОКОЛОВА, І. М. ПАСТУХ

Хмельницький національний університет

Проаналізовано моделі азотування в тліючому розряді (АТР), побудовані методом планування експерименту з використанням як чинників варіювання температури, тиску, складу газової суміші та тривалості процесу. Обґрунтована необхідність враховувати вплив енергетичних параметрів – напруги та густини струму, а метод планування експерименту тут обмежений, тому неприйнятний до моделювання АТР. Запропоновані альтернативні підходи до формування комплексу вихідних чинників, що базуються на енергетичній моделі процесу і враховують вплив на результати модифікації інтенсивності перебігу основних субпроцесів досліджуваного процесу – утворення нітрідів, розпорошення поверхні та дифузії.

Ключові слова: азотування, тліючий розряд, моделювання, енергетична модель.

Керованість процесу як можливість отримати задані характеристики поверхні шляхом варіювання параметрів режиму вважають однією з основних переваг азотування в тліючому розряді (АТР). Водночас тут не вдається передбачити якісні зміни модифікованої поверхні, а також спрогнозувати товщину азотованого шару, мікротвердість поверхні тощо. Встановити зв'язки між цими характеристиками та чинниками, що їх визначають, можна за математичними моделями. Втім, математичне моделювання АТР “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” [1].

Виявлено [1–4], що усі спроби прогнозування кількісних показників модифікації пов'язані із методом планування експериментів (ПЕ). Але він висуває низку вимог до чинників досліджуваного процесу, які не завжди можна дотримати на практиці. Результатом цього є ігнорування їх впливу і, як наслідок, недостатня точність, а інколи й недостовірність математичних моделей. Зокрема, в моделях АТР такими чинниками варіювання вважають винятково режимні параметри (температуру, тиск, склад газової суміші та тривалість процесу), тоді як вплив енергетичних – напруги та густини струму – повністю ігнорують. Це можна пояснити взаємозалежністю технологічних параметрів режиму АТР: кожній їх комбінації відповідає конкретна комбінація енергетичних, внаслідок чого останні розглядають як некеровані чинники процесу і, як правило, не фіксують. Нижче досліджено правомірність такого підходу.

Матеріали та методи. На установці, призначеній для АТР у безводневих газових середовищах, виконали дві серії експериментів. Перша охопила дев'ять дослідів і спрямована на з'ясування залежності кількісних характеристик модифікованих шарів від напруги та густини струму під час азотування з незалежними параметрами режиму. Для забезпечення незалежності режимних параметрів від енергетичних установку оснащено спеціальним нагрівальним приладом, що нада-

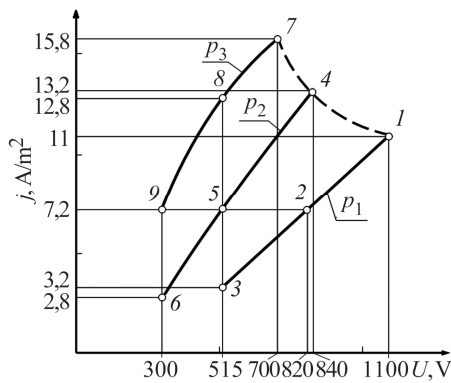


Рис. 1. Взаємозв'язок між енергетичними параметрами процесу.

Fig. 1. The relationship between the energy parameters of the process.

досліджували за тих самих режимних параметрів, що й під час першої серії (точки 1, 4, 7), але застосовуючи підвіску іншої форми та розмірів, що спричинило зміну напруги та густини струму: $U_1 = 680$ V, $j_1 = 15,3$ A/m²; $U_2 = 610$ V, $j_2 = 16,4$ A/m²; $U_3 = 540$ V, $j_3 = 17,2$ A/m². Тривалість азотування в обох випадках 4 h.

Використовували найуживаніші для АТР конструкційні сталі марок 45, 40Х та 38Х2МЮА. Форма зразків циліндрична, Ø5 mm, довжина 20 mm. Мікротвердість поверхні вимірювали приладом ПМТ-3. Травили сталі, щоб виявити структуру азотованого шару, у 3%-му спиртовому розчині азотної кислоти. Розмір нітридної зони визначали за допомогою мікроскопа МІМ-10. Товщину шару розраховували як середнє арифметичне результатів вимірювань у 50 точках зразка.

Результати та їх обговорення. Виявили, що зниження енергетичних параметрів негативно впливає на результати АТР: зменшуються мікротвердість поверхні, товщина азотованого шару та нітридної зони (табл. 1). ПЕ під час математичного моделювання АТР з незалежними параметрами слід визнати неприйнятним з таких причин:

– визначення основного рівня та інтервалів варіювання неминуче зумовить вихід за межі області припустимих значень напруги і густини струму; це підтверджує рис. 1: зменшення напруги до $U = 515$ V, прийнятне для азотування за тиску p_3 , призводить до посередніх результатів, коли процес здійснюють за тиску p_2 , і однозначно неприйнятне за тиску p_1 . Аналогічні висновки справедливі і за зниження густини струму до 7,2 A/m²;

– однією з вимог, що висувають до чинників досліджуваного процесу під час ПЕ, є їхня незалежність, тобто можливість встановити чинник на будь-якому рівні незалежно від інших, але навіть після забезпечення незалежності напруги та густини струму від комбінації режимних параметрів, керування ними обмежується варіюванням одного з них у деяких межах. Що ж стосується АТР без додаткового джерела підігріву, то тут немає жодної можливості змінювати напругу та густину струму. Їх повністю визначає комбінація режимних параметрів.

За таких обставин під час моделювання АТР слід з'ясувати доцільність враховувати вплив напруги та густини струму на результати азотування за відсутності додаткового джерела підігріву.

Правомірність ігнорування енергетичних параметрів можна заперечити через неприйнятно вузьку область застосування моделей, де чинниками є винятково режимні параметри, які по суті лише математично описують експеримент: технологічний процес, виконаний за тих самих значень режимних параметрів,

ло можливість довільно керувати напругою; область значень густини струму при цьому залежала від комбінації температури (для експерименту прийняли $T = 560^\circ\text{C}$), складу газового середовища (суміш азоту та аргону, відповідно, 80 та 20%) та тиску ($p_1 = 53$ Pa, $p_2 = 107$ Pa, $p_3 = 160$ Pa). Характер зміни енергетичних параметрів за цих умов наведено на рис. 1. Точки 1–9 відповідають режимам експериментів, причому досліди 1, 4, 7 виконано із залежними параметрами, тобто без додаткового джерела підігріву.

Під час другої серії експериментів (три досліди) з'ясували вплив енергетичних параметрів розряду на результати АТР із залежними параметрами, тому

але на іншій установці, або з використанням іншої підвіски, призведе до зовсім інших результатів, що абсолютно нівелює прийнятність моделі.

Таблиця 1. Характеристики результатів азотування із незалежними параметрами (режими див. рис. 1)

Ре- жим	Товщина модифікованого шару, mm			Товщина нітридної зони, μm			Твердість поверхні $HV_{0,1}$		
	Сталь 45	40X	38X2МЮА	Сталь 45	40X	38X2МЮА	Сталь 45	40X	38X2МЮА
1	0,45	0,40	0,20	3,44	5,88	7,86	563	796	1041
2	0,40	0,30	0,15	3,33	2,42	6,27	509	676	1015
3	0,30	0,075	0,05	0	0	0	269	412	282
4	0,45	0,30	0,20	3,75	3,64	8,00	523	647	1019
5	0,35	0,20	0,01	1,73	3,20	3,20	442	444	420
6	0,30	0	0,01	0	0	0	383	230	331
7	0,50	0,30	0,25	5,33	8,76	7,13	594	842	1098
8	0,30	0,25	0,15	3,46	6,60	5,96	563	625	641
9	0	0	0	0	0	0	239	238	263

Це підтверджують результати другої серії експериментів (табл. 2), здійснені за тих самих температури, тиску, складу газової суміші та тривалості процесу, як і під час першої.

Таблиця 2. Характеристики результатів азотування із залежними параметрами

Ре- жим	Товщина модифікованого шару, mm			Товщина нітридної зони, μm			Твердість поверхні $HV_{0,1}$		
	Сталь 45	40X	38X2МЮА	Сталь 45	40X	38X2МЮА	Сталь 45	40X	38X2МЮА
1	0,50	0,40	0,25	6,87	7,80	5,26	661	916	1084
2	0,45	0,35	0,25	2,91	5,55	2,72	625	886	1067
3	0,50	0,40	0,30	5,54	9,25	5,39	678	918	1151

Суттєву відмінність між характеристиками відповідних азотованих шарів пояснюють тим, що результативність АТР визначають не лише параметри режиму, але й міжкатодна відстань, форма та розміри підвіски і досліджуваного зразка, локальні включення на його поверхні тощо [5]. Безпосереднє введення їх у математичну модель призвело б до неймовірного ускладнення її формування і подальшого користування. Проте їх можна врахувати опосередковано, увівши у модель енергетичні параметри, які відтворюють вплив усіх вказаних чинників.

Серед уже згаданих моделей АТР, сформованих методом ПЕ, є одна [1], яка враховує енергетичні параметри процесу, а точніше – питому потужність розряду. Виявлено [6] екстремальну залежність між цим показником та тиском газового середовища. Втім, слід зауважити, що цей висновок ґрунтується на результатах азотування мідних трубок завдовжки 30 mm з внутрішніми діаметрами 1,6; 3,6 та 5,7 mm. Але, враховуючи специфіку азотування отворів малого діаметра, пов'язану з ефектом порожнистого катода, поширювати його результати на деталі будь-якої конфігурації недоцільно. Зокрема, аналізуючи рис. 2, логічно припустити, що за подальшого збільшення внутрішнього діаметра азотованого зразка

досліджувана залежність взагалі втратить екстремальний характер, а тому висновки авторів праці [6] викликають певні сумніви.

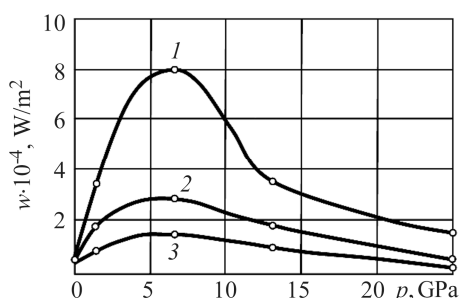


Рис. 2. Залежність питомої потужності розряду від тиску азоту під час іонної обробки мідних трубок різного діаметра [6]: 1 – 1,6 mm; 2 – 3,6 mm; 3 – 5,7 mm.

Fig. 2. Dependence of power density levels on nitrogen pressure during ion treatment of copper tubes of different diameters [6]: 1 – 1.6 mm; 2 – 3.6 mm; 3 – 5.7 mm.

Про це свідчать і результати, подані у праці [7]: залежності між потужністю і тиском для різних температур і газових сумішей, отримані під час випробувань зразків еліпсоїдної форми (що забезпечувало відсутність концентраторів поля), не мають екстремального характеру.

Крім того, правомірність застосування у праці [1] питомої потужності як чинника варіювання викликає сумніви з огляду на можливість довільного комбінування її значень із різними значеннями тиску: це суперечить положенню [8], згідно з яким “кожній потужності розряду відповідає певний тиск газового середовища”. Отже, під час математичного моделювання АТР доцільніше як вихідні чинники використовувати напругу і густину струму. Але тоді з’являється інша проблема – велика кількість чинників, частина яких пов’язана нелінійними залежностями, ускладнює побудову моделі.

Рационально вибрати сукупність вихідних чинників моделювання можна, вводячи опосередковані показники, що враховували б вплив усіх технологічних параметрів АТР. Для цього можна використати аналітичні показники, запропоновані в енергетичній моделі [9]: відносні енергетичні чинники (ВЕЧ), що характеризують основні субпроцеси (утворення нітридів, розпоршувальну та дифузійну дію) [10]. Їх вибір можна обґрунтувати так:

- значення ВЕЧ визначають з урахуванням технологічних параметрів режиму, що дає можливість опосередковано оцінити їхній вплив на результати азотування;
- під час визначення ВЕЧ утворення нітридів враховують вміст легувальних елементів [7], тобто цей показник містить інформацію про матеріал зразка;
- між комбінацією трьох вказаних ВЕЧ для заданого матеріалу та комбінацією технологічних параметрів режиму існує однозначний зв’язок, що дає можливість будувати моделі для пошуку оптимальних умов виконання досліджуваного процесу;
- пропонувані показники несуть інформацію про фізику процесу, оскільки їх розраховують як суму добутків значень енергетичних рівнів на значення відносного потоку з урахуванням ймовірнісних характеристик як самої енергії, так і геометрії взаємодії часток потоку, що падає, і поверхні [7].

Водночас, застосовуючи ВЕЧ як вихідні чинники впливу, можна суттєво зменшити кількість методів, придатних для формування математичної моделі АТР, оскільки ці показники взаємозалежні. Питання моделювання процесів із взаємозалежними чинниками розглянуто у праці [11].

ВИСНОВКИ

Проаналізовано математичні моделі АТР, побудовані методом планування експерименту з використанням як чинників варіювання режимних параметрів – температури, тиску, складу газової суміші та тривалості процесу. Встановлено, що зі зниженням енергетичних параметрів (напруги на електродах камери та густини струму) зменшуються глибина азотованого шару, товщина нітридної зони

та мікротвердість поверхні, причому за реалізації процесу і з залежними, і незалежними параметрами режиму. На цій основі обґрунтована необхідність враховувати під час математичного моделювання АТР вплив енергетичних параметрів. Тому метод планування експерименту тут неприйнятний. Запропоновані альтернативні підходи до формування комплексу вихідних чинників, що засновані на енергетичній моделі АТР і дають можливість враховувати вплив на результати модифікації інтенсивності перебігу основних субпроцесів – утворення нітридів, розпорошення поверхні та дифузії.

РЕЗЮМЕ. Проанализированы модели азотирования в тлеющем разряде (АТР), построенные методом планирования эксперимента с использованием в качестве факторов варьирования температуры, давления, состава газовой смеси и продолжительности процесса. Обоснована необходимость учитывать влияние энергетических параметров – напряжения и плотности тока, а метод планирования эксперимента здесь ограничен и поэтому неприемлем к моделированию АТР. Предложены альтернативные подходы к формированию комплекса исходных факторов, основанных на энергетической модели процесса АТР, которые учитывают влияние на результаты модификации интенсивности протекания основных subprocesses исследуемого процесса – образования нитридов, распыления поверхности и диффузии.

SUMMARY. A critical analysis of nitriding models in glow discharge (NGD), formed by experimental design methods using operational parameters (temperature, pressure, gas mixture composition, and process duration) as varying factors is performed. The necessity of energy parameters consideration in the mathematical modeling was proved. In this context the method of experiment planning here is limited and unacceptable for NGD modeling. An alternative new approaches to formation of the initial factors complex based on energy models of NGD that take into account the influence of main subprocesses intensity (the formation of nitrides, surface sputtering, and diffusion) on the modification results were proposed.

1. *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. *Каплун В. Г., Каплун П. В.* Ионное азотирование в безводородных средах. – Хмельницкий: ХНУ, 2015. – 316 с.
3. *Крукович М. Г., Бадерко Е. А., Клочков Н. П.* Упрочнение деталей азотированием и моделирование кинетики формирования диффузионных слоев при ионном процессе // Вестник науч.-иссл. ин-та железнодорож. транспорта. – 2012. – № 2. – С. 62–66.
4. *Крукович М. Г.* Моделирование кинетики роста и свойств азотированных слоев на сталях // Металловедение и терм. обработка металлов. – 2002. – № 2. – С. 18–19.
5. *Pye D.* Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing. – Ohio: ASM International, 2003. – 260 p.
6. *Арзамасов Б. Н., Панайоти Т. А.* Роль удельной мощности разряда при ионной химико-термической обработке сплавов // Металловедение и терм. обработка металлов. – 2000. – № 6. – С. 31–34.
7. *Пастух И. М.* Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
8. *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.
9. *Pastukh I. M.* Energy model of glow discharge nitriding // Techn. Phys. – 2016. – **61**, № 1. – P. 76–83.
10. *Pastukh I. M.* Subprocesses accompanying nitriding in a glow discharge // Techn. Phys. – 2014. – **84**, № 9. – P. 60–65.
11. *Соколова Г. М.* Моделювання багатofакторних процесів з взаємозалежними факторами впливу // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2016. – № 1. – С. 8–12.

Одержано 04.02.2016