

УДК 669.1:537.5

М. С. СТЕЧИШИН, Г. М. СОКОЛОВА, Ю. М. БЛИК

*Хмельницький національний університет, Україна***ВПЛИВ ЕНЕРГЕТИЧНИХ І РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ФАЗОВУ СТРУКТУРУ І МІКРОТВЕРДІСТЬ ІОННО-АЗОТОВАНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ**

На основі аналізу експериментальних даних досліджено залежність основних кількісних показників азотованих в тліючому розряді сталевих поверхонь від енергетичних параметрів розряду – густини струму та напруги на електродах камери. Виявлено, що зниження енергетичних параметрів призводить до зміни фазового складу модифікованої поверхні, а також до зменшення глибини азотованого шару, товщини нітридної зони та мікротвердості поверхні. Обґрунтовано некоректність застосування методів багатофакторного планування експерименту при вивченні процесу азотування в тліючому розряді з взаємозалежними режимними і енергетичними параметрами

Ключові слова: *зносостійкість, азотування, тліючий розряд, енергетичні параметри*

Вступ. Азотування у тліючому розряді (АТР) відноситься до числа найбільш освоєних та широко використовуваних технологій модифікації поверхні металів. Керованість процесу, що дає можливість отримання заданих характеристик поверхні шляхом зміни параметрів режиму вважається однією з основних переваг цієї технології. Вказані параметри поділяються на дві групи – режимні (температура поверхні, тиск у розрядній камері, склад газової суміші, тривалість насичення) та енергетичні (густина струму і напруга на електродах розрядної камери). Якщо вплив режимних параметрів на результати АТР досліджувався багатьма вченими, то енергетичні параметри, за поодинокими виключеннями [1–6], у спеціальній літературі, як вітчизняній, так і зарубіжній, взагалі не розглядаються. Такий стан речей не є випадковим і може бути пояснений взаємозалежністю, що існує між усіма параметрами технологічного режиму АТР: в загальному випадку кожній комбінації режимних параметрів відповідає цілком конкретна комбінація енергетичних, внаслідок чого останні здебільшого розглядаються як некеровані і тому дослідниками, як правило, не фіксуються. Очевидно, що при забезпеченні незалежності параметрів технології відкриваються широкі 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. Найбільш розповсюдженим варіантом апаратної реалізації цього підходу є використання так званих камер “з гарячими стінками”. Найбільш повно їхня будова і принцип дії описані у роботі [7]. Ключова особливість конструкції цих камер, що відрізняє їх від камер “з холодними стінками”, в яких температура садки забезпечується виключно розрядом, відображена вже у самій їхній назві – стінки таких камер підігріваються спеціальними електричними пристроями, що дозволяє реалізувати процес АТР в області більш низьких напруг і таким чином уникнути ризику виникнення дугового розряду, який може пошкодити модифіковану поверхню. Суттєве спрощення керу-

вання процесом є ключовим моментом, на якому зосереджують увагу дослідники, описуючи переваги вказаного типу обладнання, але при цьому жоден з них не розглядає питання, яким чином зниження енергетичних параметрів позначається на характеристиках модифікованого шару.

Постановка проблеми. Ігнорування основних кількісних характеристик тліючого розряду, що виступає у якості інтенсифікатора елементарних підпроцесів, які відповідають за утворення азотованого шару, по суті означає нехтування специфікою АТР, наслідком чого є втрата тих унікальних можливостей керування процесом модифікації, які становлять чи не основну перевагу цієї технології порівняно з іншими видами азотування. У зв'язку із цим постає задача визначення впливу напруги та густини струму на показники, що в сукупності визначають фізико-механічні характеристики зміцненої поверхні: структуру та фазовий склад, загальну глибину, товщину нітридної зони, твердість модифікованої поверхні, а також її розподіл по глибині шару.

Методики дослідження. Експериментальні дослідження проводились на промисловій установці УАТР-1, призначеній для азотування у тліючому розряді діодного типу на постійному струмі у безводневих газових середовищах. Установка була оснащена спеціальним нагрівальним приладом, що надало можливість довільно керувати значенням напруги; область значень густини струму при цьому визначалась комбінацією температури (для експерименту прийнято $T = 560$ °C), складу газового середовища (суміш азоту та аргону, відповідно 80 % та 20 %) та тиску (табл. 1). Тривалість азотування становила 4 год.

Таблиця 1

Параметри режимів азотування у тліючому розряді

Параметр режиму	Номер експерименту								
	1*	2	3	4*	5	6	7*	8	9
Тиск p , Па	53,2			106,4			159,6		
Напруга U , V	1100	820	515	840	515	300	700	515	300
Густина струму j , A/m^2	11	7,2	3,2	13,2	7,2	2,8	15,8	12,8	7,2

*Примітка. Результати експериментів, проведених без додаткового нагрівання зразків

Характер зміни енергетичних параметрів за цих умов наведено на рис. 1 (цифрами позначені відповідні номери експериментів).

Точки 2, 3, 5, 6, 8, 9 відповідають режимам експериментів, проведених з додатковим підігрівом поверхонь азотування, а точки 1, 4, 7 – експериментам, проведеним без його застосування.

Контроль температури проводився за допомогою пірометра моделі АПІРС-М. Вимірювальна система пірометра тарувалась в умовах, аналогічних реальному тліючому розряду.

Для дослідження були вибрані конструкційні сталі марок 45, 40Х та 38Х2МЮА як найбільш часто використовувані для АТР. Дослідження елементного складу сталей виконані на енергодисперсійному рентгенофлуоресцентному спектрометрі «Спрут» виробництва «Укррентген» з SDD детектором X-123 (Amptek, США). Ідентифікація марки сталі здійснювалася шляхом визначення восьми хімічних елементів (C, Al, Si, P, S, Ti, Cr, Mn). Вхідний контроль хімічного складу показав, що дослідженню були піддані зразки, що повністю відпові-

дають стандартам на відповідні сталі: ГОСТ 1050–88 (для сталі 45) та ГОСТ 4543–71 (для сталей 40X та 38X2МЮА).

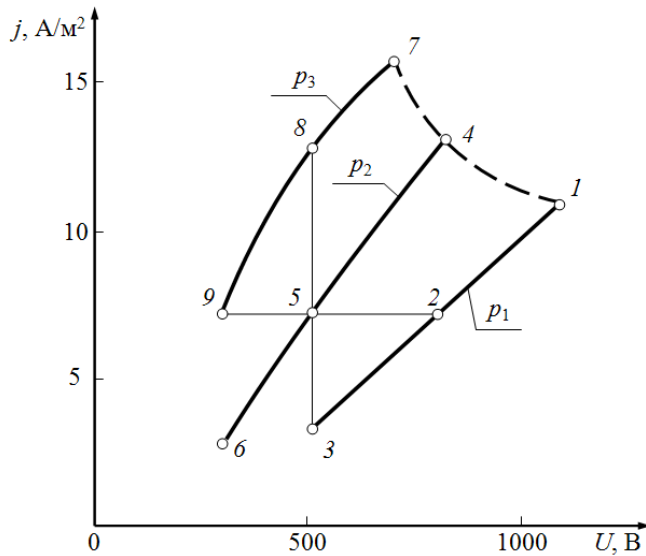


Рис. 1. Взаємозв'язок між енергетичними параметрами процесу

Зразки були досліджені на здатність поглинання аргону у процесі азотування в розрідженій активованій газовій суміші. Присутності аргону у поверхневих шарах сталей виявлено не було. Розчинність аргону у досліджуваних сталях відсутня, імплантації іонізованого аргону при використаних енергетичних параметрах не спостерігалось, тому усі отримані результати пов'язані виключно з взаємодією на межі розділення активованого азоту газової суміші з поверхнею сталі.

Після азотування контрольні зразки, циліндричної форми діаметром 5 мм і довжиною 20 мм розрізались по діаметральній площині при режимах різання, які не призводили до їх нагрівання, що гарантувало незмінність структури модифікованого поверхневого шару.

Мікротвердість вимірювалась на мікротвердомірі ПМТ-3 з фіксацією значень $HV_{0,1}$ як на поверхні, так і на певній відстані від поверхні в глибину зразка, а саме: 0, 25, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 мкм.

Травлення сталей для виявлення структури азотованого шару проводилось в 3-відсотковому спиртовому розчині азотної кислоти HNO_3 . Вимірювання нітридної зони проводилося за допомогою металографічного мікроскопа МІМ-10. Товщина шару розраховувалась як середнє арифметичне значень вимірювань, проведених у 50 точках досліджуваного зразка.

Рентгеноструктурний аналіз здійснювався на рентгенівському дифрактометрі загального призначення ДРОН-3 у фільтрованому випромінюванні залізного анода, в діапазоні кутів $2\theta = 20 \div 100^\circ$ з кроком сканування $0,1^\circ$ і часом експозиції 10 с. Рентгенозйомка виконувались в глибину від азотованих торців циліндричних зразків.

Результати дослідження та їх обговорення. У таблиці 2 наведені результати досліджень поверхневої твердості, товщини модифікованого шару та нітридної зони сталей, азотованих в тліючому розряді з незалежними параметрами режиму.

Таблиця 2

**Характеристики модифікованого шару сталей,
азотованих в тліючому розряді з незалежними параметрами режиму**

Номер експерименту	Товщина модифікованого шару, мм			Товщина нітридної зони, мкм			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	1058
2	0,40	0,30	0,15	3,33	2,42	6,27	509	676	1041
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	360
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

Аналіз експериментальних даних свідчить, що зменшення значень напруги і густини струму призводить до зниження поверхневої мікротвердості сталей. Що ж стосується розподілу мікротвердості по глибині модифікованого шару, то при незначних відмінностях у градієнті її зміни абсолютні значення мікротвердості зразків, азотованих при вищих енергетичних показниках, є вищими по всій глибині шару.

Збільшення вмісту легуючих елементів (у тому числі азотоактивних – насамперед, хрому) приводить до того, що характер вказаної залежності стає більш яскраво вираженим, що можна пояснити зростанням інтенсивності процесу утворення нітридів, які гальмують процес дифузії азоту вглиб матеріалу і тим самим перешкоджають утворенню азотованих шарів.

Прийнявши мікротвердість у якості базового параметра з метою оцінки товщини азотованого шару (ГОСТ 20495–75), можна зробити висновок, що для неї зберігається та сама тенденція – зі зниженням енергетичних параметрів процесу АТР товщина азотованого шару зменшується. Ця закономірність характерна і для товщини нітридної зони, що проілюстровано рис. 2 (на прикладі сталі 40X, режими 7, 8, 9), де показані структури азотованих сталей, сформованих у результаті проведення технологічного процесу при рівних значеннях режимних параметрів ($T = 560$ °C, 80 % азоту та 20 % аргону, $\tau = 4$ год) та відмінних енергетичних (табл. 1).

Дані рентгеноструктурного аналізу свідчать про те, що структура та фазовий склад азотованих сталей теж залежать від енергетичних параметрів розряду.

Відомо, що при АТР одночасно відбуваються основні конкуруючі, взаємодоповнюючі і взаємозаперечуючі субпроцеси [2]: утворення нітридів, дифузійне насичення поверхневого шару азотом і розпорошення поверхні. Енергетичні умови перебігу головних субпроцесів суттєво відрізняються. Так, утворення нітридів відбувається при низьких енергіях, натомість процес розпорошення поверхні активізується при високих значеннях напруги. Співвідношенням інтенсивностей перебігу основних субпроцесів визначаються структура та фазовий склад модифікованих шарів. Залежно від поточної комбінації параметрів режиму формування модифікованого шару може відбуватися за різними напрямками, причому в кожній конкретній ситуації інтенсивність перебігу вказаних субпроцесів, а отже й інтенсивність утворення тієї чи іншої фази, може бути різною не лише

за величиною, але й за знаком, оскільки попередньо створена фаза може знаходитись під впливом деструктивних явищ.

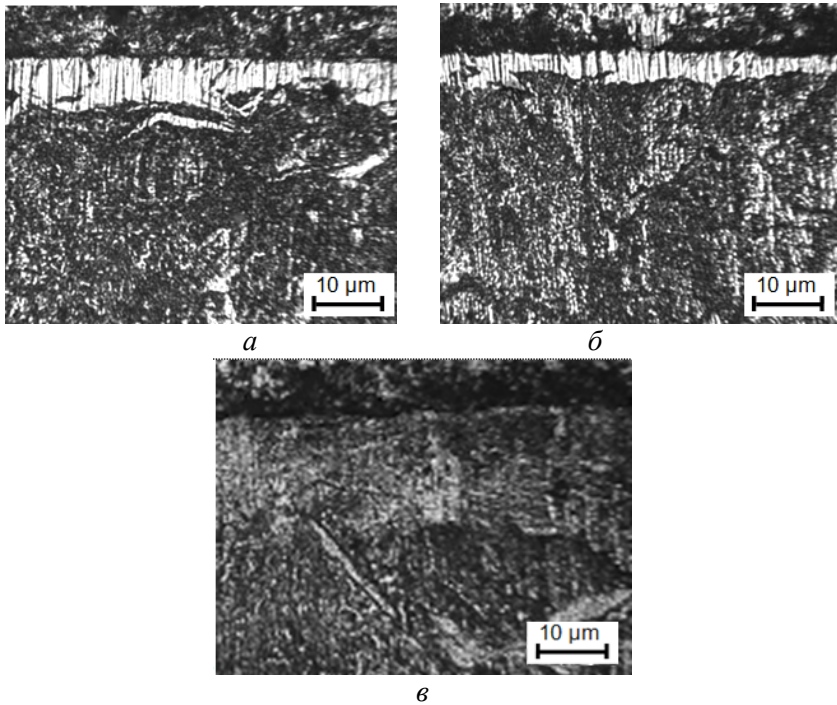


Рис. 2. Нітридна зона сталі 40X, азотованої у тліючому розряді:
а – режим 7; б – режим 8; в – режим 9

Наприклад, при підвищенні енергії падаючого потоку попередньо утворений прошарок нітридів розпорошується, а це у свою чергу стимулює процес дифузії азоту вглиб поверхні. Якщо ж енергія потоку часток виявляється недостатньою для розпорошення утворюваного нітридного шару, останній виступає у ролі своєрідного бар'єру, що унеможливує процес дифузії. Останній факт пояснює неприйнятно низькі показники модифікованих поверхонь, отриманих при проведенні експериментів за режимами 3, 6, 9.

Згідно з результатами рентгеноструктурного аналізу при максимальних значеннях енергетичних параметрів формується азотований шар, що містить ϵ -, γ' - і α -фази. Зниження напруги і густини розрядного струму призводить до збільшення частки γ' -фази (Fe_4N) у нітридній зоні модифікованого шару і відповідно – до зменшення частки ϵ -фази (Fe_2N). При мінімальних значеннях енергетичних параметрів утворення нітридів на поверхні не спостерігалось, азотований шар містить тільки α -фазу (рис. 3).

Відомо, що товщина і фазовий склад нітридної зони визначають її властивості, а отже, в кінцевому підсумку, і властивості азотованої сталі. Так, нітридна зона, що містить лише γ' -фазу, характеризується достатньо високою пластичністю, зона ж, що містить ϵ -фазу, має меншу пластичність, але вищу корозійну стійкість. Найвища пластичність відповідає шару без нітридної зони. В цілому, чим тоншою є нітридна зона, тим більш пластичним є азотований шар, але тим нижчий опір абразивному зношуванню, особливо в умовах сухого тертя [9].

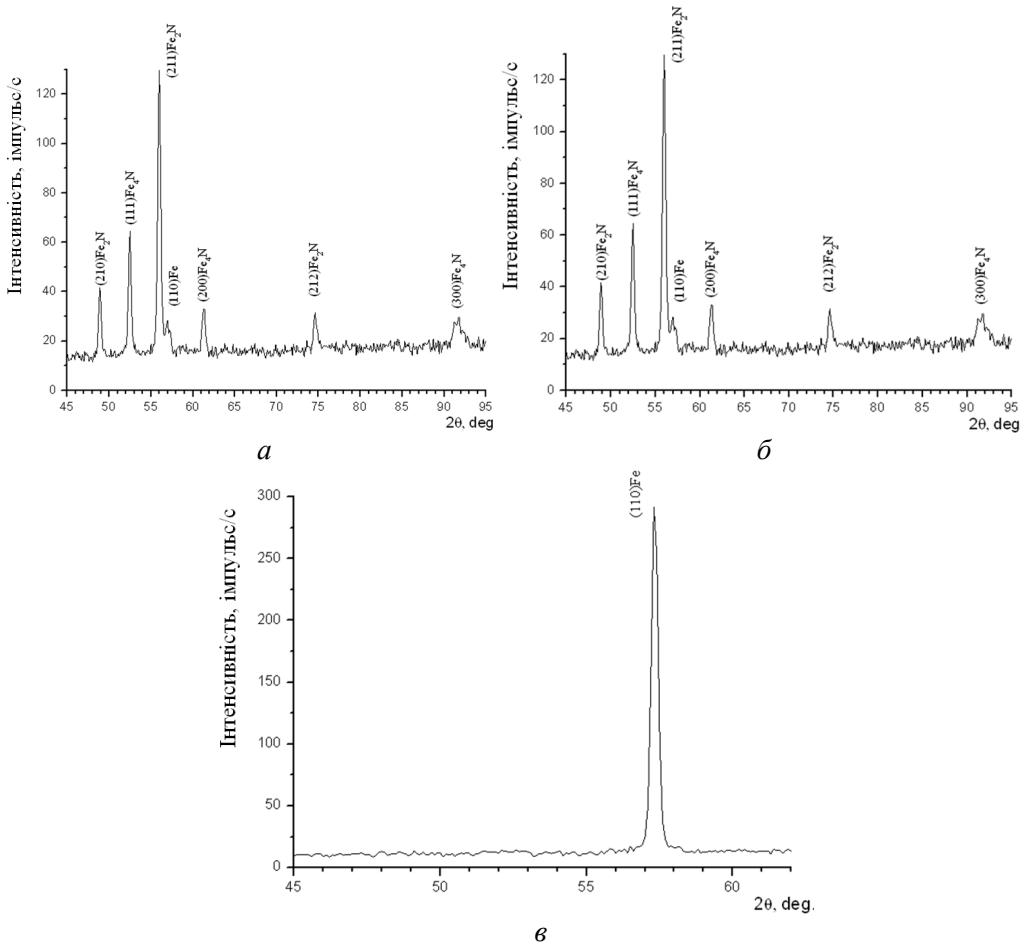


Рис. 3. Ділянки дифрактограм зразків сталі 40X:
 а – режим 7; б – режим 8; в – режим 9

Таким чином, для деталей, що працюють у корозійному середовищі та на зношування при малих контактних навантаженнях процес АТР повинен проводитись при максимально можливих значеннях напруги та густини струму, що забезпечить утворення ϵ -фази і, відповідно, високий опір корозії та припрацювання поверхонь тертя. Зниження значень енергетичних параметрів при проведенні АТР призведе до збільшення частки γ' -фази, а отже, може бути рекомендоване для деталей, що працюють при високих динамічних навантаженнях в умовах зношування при високому тиску; корозійна стійкість при цьому буде знижена.

Наведені дані дозволяють зробити цілком очевидний висновок щодо впливу напруги та густини струму на характеристики модифікованого шару, що визначають собою зносостійкість азотованих у тліючому розряді сталей – він є не просто суттєвим, а вирішальним. Більше того – в області енергетичних параметрів режиму існує деяка межа, нижче якої проведення процесу АТР взагалі втрачає сенс, оскільки призводить до отримання неприйнятних результатів, і це попри те, що значення режимних параметрів залишаються постійними. Це зокрема означає, що комплекс традиційно фіксованих режимних параметрів (температура, тиск, склад газової суміші та тривалість процесу) не дає однозначного уявлення про умови проведення процесу АТР, а отже не може слугувати основою

для прогнозування його результатів. Цей факт знаходив своє неодноразове підтвердження, коли технологічні процеси, проведені за аналогічних значень режимних параметрів, але в різних установках (або навіть в одній установці, але з використанням іншої підвіски), призводили до абсолютно різних результатів. Це пояснюється тим, 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 [8], включає тринадцять найменувань). Зрозуміло, безпосереднє врахування усіх цих показників призвело б до неймовірного ускладнення керування процесом АТР. Проте, їх можна враховувати опосередковано, оскільки дія усіх перерахованих факторів впливає на енергетичні параметри процесу.

На підтвердження цієї тези була проведена додаткова серія експериментів. Зразки азотувалися у тій самій установці і при тих самих режимних параметрах, що й досліди 1*, 4*, 7* основної серії, але при цьому була використана підвіска іншої форми та розмірів. Це спричинило зміну значень напруги та густини струму, а саме: $U_{1'} = 680 \text{ В}$, $j_{1'} = 15,3 \text{ А/м}^2$; $U_{2'} = 610 \text{ В}$, $j_{2'} = 16,4 \text{ А/м}^2$; $U_{3'} = 540 \text{ В}$, $j_{3'} = 17,2 \text{ А/м}^2$. Результати цієї серії експериментів наведені у таблиці 3.

Таблиця 3

**Характеристики модифікованого шару сталей,
азотованих в тліючому розряді (додаткова серія експериментів)**

Номер експерименту	Товщина модифікованого шару, мм			Товщина нітридної зони, мкм			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
	0,45	0,40	0,20	3,44	5,88	7,86	563	796	1058
2*	0,45	0,35	0,25	2,91	5,55	2,72	625	886	1067
	0,45	0,30	0,20	3,75	3,64	8,00	523	647	1019
3*	0,50	0,40	0,30	5,54	9,25	5,39	678	918	1151
	0,50	0,30	0,25	5,33	8,76	7,13	594	842	1098

*Примітка. Чисельник – значення характеристик основної серії дослідів (табл. 2), знаменник – додаткової.

Суттєва відмінність між характеристиками відповідних азотованих шарів, отриманих у результаті проведення двох серій експериментів, ще раз підтверджує той факт, що результативність процесу АТР значною мірою визначається енергетичними характеристиками розряду, причому збільшення останніх призводить до підвищення твердості поверхні, товщини модифікованого шару та нітридної зони.

З огляду на отримані дані постає задача пошуку нових шляхів підготовки експериментів з АТР із незалежними параметрами та прогнозування його результатів, оскільки традиційні підходи, що передбачають побудову регресійних моделей у рамках методу планування експерименту, слід визнати неприйнятними з наступних причин:

– визначення основного рівня та інтервалів варіювання неминуче зумовить вихід за межі області припустимих значень напруги і густини струму; наочним підтвердженням наведеного положення може слугувати рис. 1: зменшення значення

напруги до $U = 515$ В, цілком прийнятне з точки зору результатів азотування при тиску p_3 , призводить до посередніх результатів, коли процес АТР проводиться при тиску p_2 , і є однозначно неприйнятним при тиску p_1 . Аналогічні висновки будуть справедливими і при зниженні густини струму до значення $j = 7,2$ А/м²;

– однією з вимог, що висуваються до сукупності факторів досліджуваного процесу при плануванні експерименту, є їхня незалежність, тобто можливість встановлення фактора на будь-якому рівні незалежно від рівнів інших факторів, але навіть при забезпеченні незалежності напруги та густини струму від комбінації режимних параметрів, керування ними обмежується можливістю варіювання одного з вказаних параметрів у деяких межах.

Очевидно, що питання пошуку нових методів прогнозування кількісних характеристик азотованих в тліючому розряді шарів може бути вирішене лише у рамках математичного моделювання процесів із взаємозалежними факторами впливу. Серед методів, які дозволяють оперувати залежними факторами, на особливу увагу заслуговують метод математичного моделювання багатofакторних та багатopараметричних процесів у багатокomпонентних системах на базі конструктивної геометрії [10] та метод побудови графічних оптимізаційних моделей багатofакторних процесів засобами нарисної геометрії багатovимірного простору [11]. Детально питання моделювання процесів із взаємозалежними факторами розглянуто у роботі [12].

Висновки. Досліджено вплив енергетичних параметрів на фазовий структурний склад і його мікротвердість, що визначають собою фізико-механічні характеристики азотованого шару. Експериментальним шляхом встановлено, що зниження напруги на електродах камери та густини струму призводить до зниження глибини азотованого шару, товщини нітридної зони та мікротвердості поверхні. Виявлено, що при максимальних значеннях енергетичних параметрів формується азотований шар, що містить ϵ -, γ' - і α -фази. Зниження напруги і густини розрядного струму призводить до збільшення частки γ' -фази (Fe_4N) у нітридній зоні модифікованого шару і відповідно – до зменшення частки ϵ -фази (Fe_2N). При мінімальних значеннях енергетичних параметрів утворення нітридів на поверхні не спостерігається, азотований шар містить тільки α -фазу. На основі отриманих результатів обґрунтована необхідність врахування впливу енергетичних параметрів при математичному моделюванні процесу АТР, і в цьому контексті – обмеженість методів планування експерименту, що не враховують взаємозалежність енергетичних і режимних факторів іонного азотування в тліючому розряді.

Список літератури

1. Effect of nitriding current density on the surface properties and crystallite size of pulsed plasma-nitrided AISI 316L / J. C. Diaz-Guillen, E.E. Granda-Gutierrez, G. Vargas- Gutierrez, M. R. Diaz-Guillen // Journal of Materials Sciences and Chemical Engineering. – 2015. – No. 3. – pp. 45–51.
2. Pastukh I. M. Subprocesses Accompanying Nitriding in a Glow Discharge / I. M. Pastukh // Technical Physics, 2014, Vol. 59, No. 9. – pp. 1320–1325.
3. Pastukh I. M. Energy Model of Glow Discharge Nitriding / I. M. Pastukh // Technical Physics. – 2016. – Vol. 61, No. 1. – P. 76–83.
4. Pastukh I. M. Analytical Criteria for Controlling Glow-Discharge Nitriding / I. M. Pastukh, G. N. Sokolova // Technical Physics, 2016, Vol. 61, No. 11. – pp. 1661–1667.
5. Pastukh I. M. Average Velocity of Electrons in the Cathode Fall Region during Glow-

Discharge Nitriding / I. M. Pastukh, V. V. Liukhovets' // Technical Physics, 2017, Vol. 62, No. 4, pp. 527–536.

6. Моделирование процесса ионного азотирования / С. А. Герасимов, М. Г. Крукович, Е. А. Бадерко, Н. П. Клочков // Наука и образование. – 2013. – № 1. – С. 313–332.

7. 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.

8. Pye D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing / D. Pye. – Ohio: ASM International, 2003. – 260 p.

9. Лахтин Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.

10. Вергинская Н. Д. Математическое моделирование многофакторных и многопараметрических процессов в многокомпонентных системах на базе конструктивной геометрии: лекции / Н. Д. Вергинская. – Иркутск : Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2009. – 169 с.

11. Чижик М. А. Алгоритмы конструирования графических оптимизационных моделей многофакторных процессов / М. А. Чижик, К. С. Яковенко, В. Я. Волков // Омский научный вестник. – 2012. – № 1. – С. 17–20.

12. Соколова Г. М. Моделювання багатofакторних процесів з взаємозалежними факторами впливу / Г. М. Соколова // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2016. – № 1. – С. 117–120.

Стаття надійшла до редакції 13.04.2017

Стечишин Мирослав Степанович – д-р техн. наук, професор, завідувач секції «Обладнання харчових виробництв» кафедри машинознавства Хмельницького національного університету.

Соколова Галина Миколаївна – молодший науковий співробітник науководослідної частини Хмельницького національного університету, e-mail galkasokol@mail.ua

Білик Юрій Мирославович – канд. техн. наук., доцент кафедри машинознавства Хмельницького національного університету.

M. S. STECHYSHYN, G. M. SOKOLOVA, Y. M. BILYK

IMPACT OF ENERGY AND OPERATIONAL PARAMETERS ON PHASE STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF ION-NITRIDED STRUCTURAL STEELS

On the basis of the analysis of experimental data the dependence of the main quantitative indicators for the steel surfaces that are nitrided in the glow discharge from discharge energy parameters - current density and voltage on the electrodes of the camera. Found that reducing energy parameters leads to change the phase composition of the modified surface and to reduce the depth of the nitrided layer thickness of the nitride surface area and micro hardness. Proved incorrect application of multivariate experimental design methods in the study of the process of nitriding in a glow discharge of interdependent regime and power parameters

References

- 1 Effect of nitriding current density on the surface properties and crystallite size of pulsed plasma-nitrided AISI 316L / J. C. Diaz-Guillen, E.E. Granda-Gutierrez, G. Vargas-Gutierrez, M. R. Diaz-Guillen // *Journal of Materials Sciences and Chemical Engineering*. – 2015. – No. 3. – pp. 45–51.
- 2 Pastukh I. M. Subprocesses Accompanying Nitriding in a Glow Discharge / I. M. Pastukh // *Technical Physics*, 2014, Vol. 59, No. 9. – pp. 1320–1325.
- 3 Pastukh I. M. Energy Model of Glow Discharge Nitriding / I. M. Pastukh // *Technical Physics*. – 2016. – Vol. 61, No. 1. – P. 76–83.
- 4 Pastukh I. M. Analytical Criteria for Controlling Glow-Discharge Nitriding / I. M. Pastukh, G. N. Sokolova // *Technical Physics*, 2016, Vol. 61, No. 11. – pp. 1661–1667.
- 5 Pastukh I. M. Average Velocity of Electrons in the Cathode Fall Region during Glow-Discharge Nitriding / I. M. Pastukh, V. V. Liukhovets // *Technical Physics*, 2017, Vol. 62, No. 4, pp. 527–536.
- 6 Modelirovaniye protsessa ionnogo azotirovaniya / S. A. Gerasimov, M. G. Krukovich, Ye. A. Baderko, N. P. Klochkov // *Nauka i obrazovaniye*. – 2013. – № 1. – S. 313–332.
- 7 Arzamasov B. N. Rol' udel'noy moshchnosti razryada pri ionnoy khimiko-termicheskoy obrabotke splavov / B. N. Arzamasov, T. A. Panayoti // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. – 2000. – № 6. – S. 31–34.
- 8 Pye D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing / D. Pye. – Ohio: ASM International, 2003. – 260 p.
- 9 Lakhtin YU. M. Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov / Y. M. Lakhtin, B. N. Arzamasov. – M. : Metallurgiya, 1985. – 256 s.
- 10 Vertinskaya N. D. Matematicheskoye modelirovaniye mnogofaktornykh i mnogoparametricheskikh protsessov v mnogokomponentnykh sistemakh na baze konstruktivnoy geometrii : lektzii / N. D. Vertinskaya. – Irkutsk : Izd-vo Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009. – 169 s.
- 11 Chizhik M. A. Algoritmy konstruirovaniya graficheskikh optimizatsionnykh modeley mnogofaktornykh protsessov / M. A. Chizhik, K. S. Yakovenko, V. Y. Volkov // *Omskiy nauchnyy vestnik*. – 2012. – № 1. – S. 17–20.
- 12 Sokolova G. M. Modelyuvannya bagatofaktornikh protsesiv z vzaïmozalezhnimi faktorami vplivu / G. M. Sokolova // *Vïsnik KHNU. Tekhnichni nauki*. – 2016. – № 1. – S. 117–120.