

DOI 10.31891/2307-5732-2019-271-2-11-16

УДК 669.1:537.5

М. Є. СКИБА, М. С. СТЕЧИШИН, М. В. ЛУК'ЯНИЮК, В. П. ОЛЕКСАНДРЕНКО

Хмельницький національний університет

БЕЗВОДНЕВЕ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З НЕЗАЛЕЖНИМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕСУ

Приведено аналіз переваг безводневого азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами процесу, оцінені результати виконаних в цьому напрямку досліджень, намічено перспективи, що відкривають додаткові можливості в плані оптимізації режимів азотування, для забезпечення результатів модифікації максимальної відповідності вимогам підвищення працездатності об'єктів обробки в заданих умовах експлуатації.

Ключові слова: безводневе азотування в тліючому розряді, нітридна зона, незалежні параметри процесу, густина струму, модифікація.

M. YE. SKYBA, M. S. STECHYSHYN, M. V. LUKIANIUK, V. P. OLEKSANDRENKO

Khmelnytskyi National University

HYDROGEN-FREE NITRIDING IN GLOW DISCHARGE WITH INDEPENDENT PARAMETERS OF THE PROCESS

On the basis of developed energetic theory of hydrogen-free nitriding in glow discharge (HFNGD) with independent modes of saturation of metal surfaces by nitrogen, that was approved by laboratory and industrial tests, the results of metallographic, spectroscopic, X-ray structure and frictional analysis research are obtained. The results of made researches shown that autonomous modes of NFNGD provide influence not only of mode parameters (temperature, composition of gas mixture, its pressure and time of nitriding), but also energetic parameters of adjustment and control of the process (density of current and voltage in gas-discharge camera). It enables to considerably decrease the energy intensity of the process and to expand the possibilities of NFNGD for the alteration of the physical and chemical properties of the nitrided surfaces. The influence of the mode parameters are analysed in the paper: temperature, composition of gas environment and pressure, on the structure and phase composition of nitrided layers and their properties. The series of research were carried out to study the influence of the current density, voltage and specific power of the electrical discharge in gas-discharge camera on the NFNGD process. It was established that the formation of nitrides occurs at the low levels of energies, and the process of surface dispersion becomes more active at high voltages. For the diffusion of nitrogen to the depth of the metal, sufficiently high levels of current density is necessary. Thus, structure and phase composition of nitrides layers are formed by combination of technological and energetic parameters.

Key words: hydrogen-free nitriding in glow discharge, nitride zone, independent process parameters, current density, modification.

У якості одного з ефективних методів поверхневої модифікації металів традиційно використовується азотування в тліючому розряді з взаємозалежними параметрами [1]. Серед всіх характеристик технології найбільші умови зв'язку на інші показники режиму накладає температура поверхні, оскільки для її підтримання необхідна деяка конкретна комбінація електричних параметрів розряду. Забезпечення певної температури поверхні за рахунок факторів, альтернативних розряду, дозволяє не тільки реально оптимізувати процес, але покращити його керованість в аспекті досягнення запланованих результатів. Таким чином, азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами відкриває принципово нові можливості як теоретичного, так і технологічного планів. У першу чергу, це стосується покращення керованості модифікаційним процесом, його оптимізації відповідно до вимог подальшої експлуатації. Не дивлячись на очевидні нові можливості, які відкриває застосування цього процесу, він практично не досліджувався ні в теоретичному, ні в експериментальному планах, що не сприяє використанню всіх його потенційних можливостей. Теоретичні дослідження виконані насамперед на основі розробленої енергетичної моделі процесу, котра у значній мірі більш адекватно пояснює всі субпроцеси, які є складовими загального модифікаційного процесу. Комбінування енергетичних параметрів азотування в тліючому розряді як у часі, так і за співвідношенням відкриває нові можливості керованого формування фазової структури поверхневого модифікованого шару відповідно до вимог експлуатації [2].

Процес абсолютно екологічно чистий і порівняно з іншими варіантами, включаючи традиційне азотування в тліючому розряді з взаємозалежними параметрами, енергетично більш вигідний, оскільки у зв'язку з можливістю оптимізації технології витрати енергії скорочуються, що, в свою чергу, позитивно впливає на економіку виробництва.

Результати НДР впроваджуються у виробництво і можуть використовуватися в усіх галузях, де виникає потреба в підвищенні характеристик міцності, зносостійкості, мало- і багатоциклової витривалості, корозійної стійкості металевих виробів (металообробка, авіабудування, деревообробка, виробництво виробів з пластмас і т. ін.).

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта досліджень – подальші дослідження теорії і практики процесів азотування в тліючому розряді з незалежними параметрами режимів.

Об'єкт дослідження – теорія і практика процесів модифікації металевих поверхонь в тліючому розряді з незалежними параметрами азотування.

Мета роботи – розробка теоретичних основ процесів керованого формування триботехнічних систем шляхом модифікації металевих поверхонь в тліючому розряді з незалежними параметрами, які б узагальнювали теоретичні положення практичної розробки процесів вакуумно-дифузійної газорозрядної поверхневої обробки металів та їх сплавів, експериментальна перевірка теоретичних положень з напрацюванням рекомендацій щодо практичного впровадження процесів АТР (азотування в тліючому розряді).

Вплив параметрів АТР на властивості модифікованого шару

Можливість регулювання процесу насичення поверхні, що є однією з основних переваг АТР, дозволяє отримати модифікований шар заданої структури та фазового складу: на основі азотистого α -твердого розчину як із зовнішньою нітридною зоною, так і без неї, або ж нітридну зону на основі лише ϵ -або лише γ' -фази. Товщина та фазовий склад модифікованого шару визначають властивості азотованої сталі. Нітридна зона, що містить лише γ' -фазу, характеризується достатньо високою пластичністю, зона ж, що містить ϵ -фазу, має меншу пластичність, але вищу корозійну стійкість. Однофазна нітридна зона покращує механічні властивості азотованої поверхні на відміну від двофазної ($\epsilon + \gamma'$) зони, що характеризується підвищеною крихкістю. Втім, за високої швидкості тертя (вище 3 м/с) зона ($\epsilon + \gamma'$) відіграє позитивну роль, запобігаючи адгезійній взаємодії деталей пари тертя [3]. 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.

Наведені положення свідчать про те, що товщина і фазовий склад модифікованого шару мають регулюватися з урахуванням конкретних умов експлуатації деталі. Так, для деталей, що працюють у корозійному середовищі та в умовах зношування при малих контактних навантаженнях необхідний азотований шар із розвинутою нітридною зоною, що забезпечує високий опір корозії і припрацювання поверхонь тертя.

Азотований шар безнітридної зони рекомендується для деталей, що працюють при високих динамічних навантаженнях в умовах зношування при високому тиску; корозійна стійкість та опір абразивному зношуванню в умовах сухого тертя при цьому будуть знижені [4].

Регулювання процесу модифікації поверхні при АТР здійснюється шляхом варіювання технологічними параметрами азотування, які 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). Крім того, на результати азотування впливають міжелектродна відстань, конфігурація деталей, їх розміри та спосіб розташування у садці [3]. Вплив режимних параметрів азотування на товщину, фазовий склад та властивості модифікованого шару проаналізовано у роботах [1, 3–5], а саме:

– **Вплив температури.** Азотування конструкційних сталей у тліючому розряді, як правило, проводять при температурах від 500 °С до 600 °С, що не викликає небажаних фазових перетворень, які призводять до значних деформацій деталей [3].

Сталі, з яких виготовляють деталі, що працюють на зношування при невеликих контактних навантаженнях (сталі 20, 45, 20Х, 40Х та ін.), азотують при температурах від 520 °С до 570 °С (залежно від способу попередньої термообробки). При цьому значного підвищення твердості не відбувається, але покращуються антифрикційні властивості, опір знакозмінним навантаженням та корозії.

Леговані сталі, що застосовуються для виготовлення деталей, експлуатаційна надійність яких визначається поверхневою твердістю (наприклад, сталь 38Х2МЮА), зазвичай азотуються при температурах від 500 °С до 520 °С [4]. При температурах насичення вище 550 °С твердість поверхні знижується. Взагалі збільшення вмісту легуючих елементів сприяє підвищенню поверхневої твердості модифікованого шару, але його товщина при цьому зменшується. Товщина азотованого шару конструкційних сталей, причому як нітридної, так і дифузійної зони, з підвищенням температури збільшується, однак при температурах вище 600 °С вона може зменшуватись внаслідок виникнення на катоді явища термоелектронної емісії.

– **Вплив складу газової суміші.** Більшість технологічних операцій АТР за аналогією з пічним азотуванням початково проводилися в атмосфері аміаку, що не тільки призводило до екологічних проблем, але й сприяло насиченню поверхні воднем, викликаючи тим самим окрихчення поверхні металу. Тим не менш аміак і сьогодні знаходить широке застосування у якості робочої суміші під час проведення АТР (насамперед, в установках виробництва Росії та Болгарії). Для сучасних західноєвропейських та американських установок більш характерним є використання газової суміші азоту і водню, до якої за необхідності можуть додаватися аргон, метан чи пропан.

При азотуванні в аміаку утворюється модифікований шар з поверхневою нітридною зоною, що переважно складається з γ' -фази. Отримання дифузійного шару безнітридної зони досягається за рахунок розведення аміачної або азотно-водневої атмосфери аргонном. Введення аргону до газової суміші у кількості менше 40 % не впливає на товщину структурних складових азотованого шару, при подальшому збільшенні його вмісту відбувається зменшення товщини нітридної зони і збільшення зони внутрішнього азотування. При 80 % аргону нітридна зона не утворюється взагалі, подальше розбавлення суміші аргонном призводить до зменшення товщини азотованого шару [4].

У [1] наведені залежності глибини азотованого шару від складу насичуючого середовища при безводневого азотуванні в тліючому розряді (БАТР). Зберігаючи всі основні переваги азотування у

водневомістких середовищах, БАТР підвищує пластичні властивості поверхні за рахунок виключення явища водневого окрихнення, додатково знижує витрату енергії та матеріалів, поліпшує умови праці та є екологічно чистим.

– **Вплив тиску.** Залежність товщини модифікованого шару від тиску в газорозрядній камері має екстремальний характер. Підвищення тиску робочої атмосфери зменшує інтенсивність процесу катодного розпорощення поверхневих шарів металу, що призводить до утворення і росту нітридної зони, яка справляє бар'єрний ефект на дифузійний рух азоту вглибину металу. З іншого боку, значне зниження тиску, інтенсифікуючи процес катодного розпорощення, може призвести до повного припинення процесу дифузійного насичення. Таким чином, для будь-якого процесу АТР існує оптимальний тиск p_{opt} робочого газу, що забезпечує його найбільшу насичуючу здатність, а отже й отримання азотованого шару найбільшої товщини. Цей тиск пов'язаний із міжелектродною відстанню d співвідношенням [3]:

$$P_{\text{opt}}/d = \text{const}, \quad (1)$$

що дозволяє розраховувати вказаний тиск під час обробки заданої деталі на будь-якій промисловій установці.

Досліджуючи вплив тиску на глибину модифікованого шару при БАТР, Каплун В.Г. зазначає, що для певних умов азотування існує оптимальне значення тиску, що забезпечує максимальну глибину азотування. Зі зміною температури процесу та складу насичуючого середовища значення оптимальних тисків змінюються [1, 2].

Вплив тривалості процесу. У результаті численних експериментальних досліджень було встановлено, що залежність товщини шару h від тривалості насичення τ підкоряється параболічному закону [3]:

$$h = D\sqrt{\tau}, \quad (2)$$

де D – кінетичний коефіцієнт, який враховує реакцію оброблюваної поверхні на зміну зовнішнього середовища.

Таким чином, з часом швидкість зростання товщини шару зменшується аж до повного припинення.

Вплив енергетичних параметрів. Якщо вплив режимних параметрів на результати АТР досліджувався багатьма вченими, то енергетичні параметри, за поодинокими виключеннями [2, 6, 7], у спеціальній літературі, як вітчизняній [2, 6, 8], так і зарубіжній [10 – 13], взагалі не фігурують. Як це не парадоксально, але питання впливу напруги та густини струму на структуру та фазовий склад азотованого шару, його глибину, товщину нітридної зони, твердість модифікованої поверхні, її трибологічні характеристики залишилося поза увагою дослідників, наслідком чого є той факт, що керованість процесу АТР на сьогодні не виходить за рамки, властиві пічному азотуванню – регулювання будови та властивостей модифікованої поверхні здійснюється виключно за рахунок варіювання режимними параметрами. Ігнорування основних кількісних характеристик тліючого розряду, що виступає у якості інтенсифікатора елементарних підпроцесів, які відповідають за утворення модифікованого 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.

Такий стан речей є тим більш дивним, що вирішальна роль енергетичних параметрів у процесі АТР ніколи не ставилася під сумнів. Так, у роботі [3] вони названі «найважливішими факторами керування дифузійним насиченням в умовах існування тліючого розряду». Один з авторів вказаної роботи, Б.М. Арзамасов, запропонував розглядати густину енергії плазми (ГЕП) у якості додаткового технологічного фактора керування процесом АТР ще у 1979 р., причому кількісною характеристикою ГЕП було названо питому потужність тліючого розряду, яка оцінюється формулою:

$$w_{\text{уд}} = UI/S, \quad (3)$$

де U – напруга, кВ; I – сила струму, А; S – площа поверхні зразка, см².

Наведені у роботі [6] результати досліджень свідчать про існування екстремальної залежності між ГЕП, яка є критерієм насичуючої здатності газового середовища, та його загальним тиском. Автори (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 [9], навряд чи дозволяє поширювати його результати на деталі будь-якої конфігурації. Так, аналізуючи наведені на рис. 1 графіки, можна припустити, що подальше збільшення внутрішнього діаметра азотованого зразка призведе до того, що досліджувана залежність взагалі втратить екстремальний характер, а тому підтвердження наведених авторами [6] висновків (або їх спростування) потребує подальших досліджень.

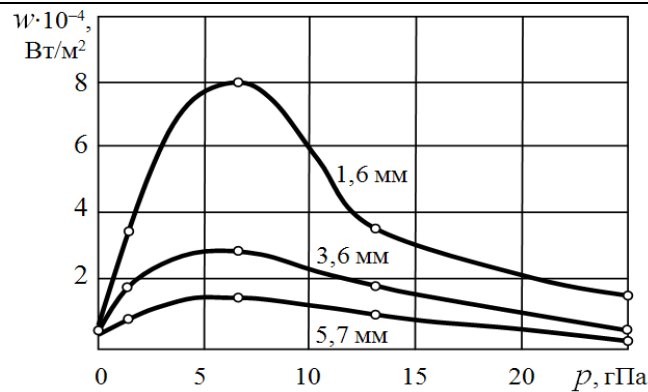
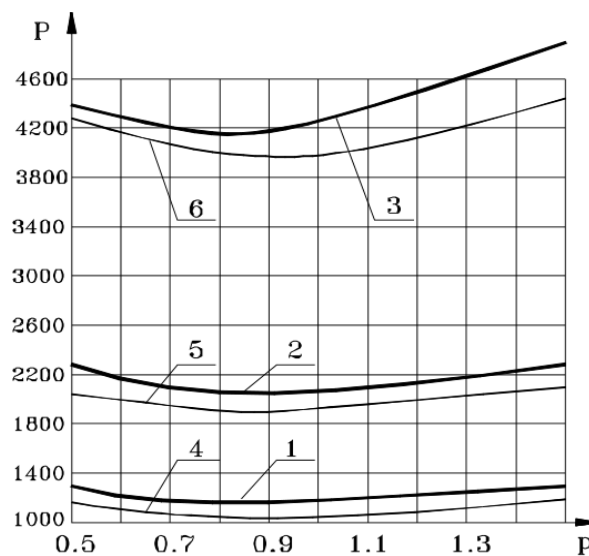


Рис. 1. Залежність питомої потужності розряду від тиску азоту за іонної обробки мідних трубок різного діаметра [6]

На користь останнього говорить і той факт, що описані у [2] експерименти покликані дослідити залежність потужності від тиску, але проведені зі зразками еліпсоїдної форми (що забезпечувало відсутність концентраторів поля) призвели до зовсім інших результатів (рис. 2).

У будь-якому випадку можна констатувати, що питання впливу на характеристики азотованого в тліючому розряді шару енергетичних характеристик – напруги на електродах камери та густини струму – у спеціальній літературі залишається невисвітленим, а тому потребує цілеспрямованих досліджень.



(товсті лінії – N-75%, Ar-25%, тонкі – N-10%, Ar-90%);

1, 4 – температура 400 °C; 2, 5 – 500 °C; 3, 6 – 600 °C [2]

Рис. 2. Залежність активної (споживаної) потужності від тиску в режимі термостабілізації

Це підтверджує і той факт, що навіть у тих вкрай нечисленних роботах, де енергетичні параметри згадуються, уся пов'язана з ними інформація зазвичай подається у формі супутніх даних, недостатньо конкретних, аби з них можна було робити однозначні висновки щодо їхнього впливу на характеристики модифікованого шару. Так, викладені у роботі [5] результати дослідження взаємозв'язку середньої енергії іонів з напругою та тиском включають дані щодо залежності товщини нітридної зони від напруги розряду (400 В і 1000 В), але відсутність інформації про склад газової суміші, а також спосіб зміни напруги за умови дотримання постійних значень температури та тиску не дозволяють розглядати їх як основу для встановлення відповідних закономірностей. Те саме можна сказати і про дані, наведені у роботах [7] та [10], в яких досліджувалося питання впливу густини струму на товщину азотованого шару. Отримані авторами результати суперечать один одному – згідно з [10] підвищення густини струму сприяє зростанню товщини модифікованого шару, а згідно з [7] – його зменшенню, а тому з'ясування цього питання потребує проведення подальших досліджень.

Аналізуючи вплив параметрів технологічного режиму процесу АТР на його результати, варто зауважити, що усі вони є взаємозалежними та взаємопов'язаними. Так, склад газової суміші впливає на напругу запалювання тліючого розряду, а зміна напруги і густини струму впливає на температуру процесу насичення [3]. Очевидно, що при забезпеченні незалежності параметрів технології відкриваються широкі додаткові можливості як для інтенсифікації процесу, так і для якісного керування наслідками модифікації. У цьому випадку, наприклад, незалежно від умови підтримання температури можливе пригнічення, або, навпаки, інтенсифікація тих чи інших субпроцесів, а через них – створення різних структур модифікованого

шару [2].

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 (рис. 3) і принцип дії описані у [11, 12].

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

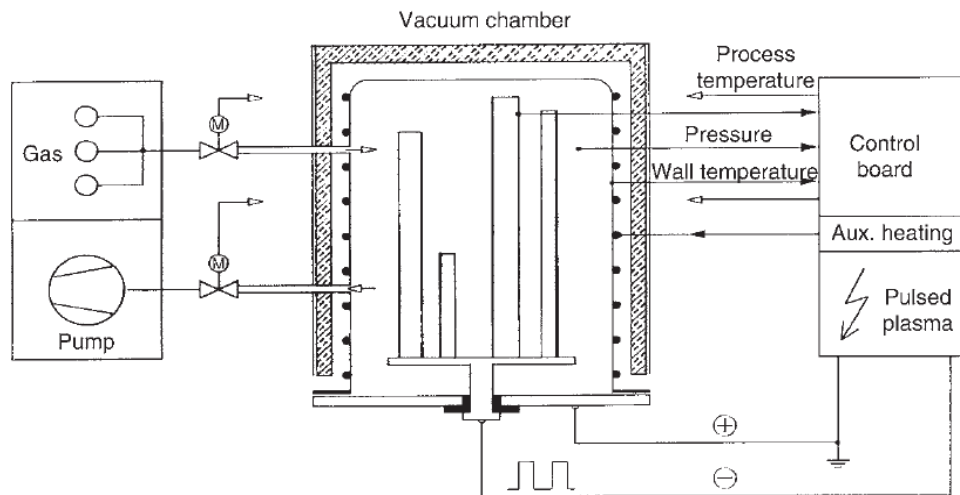


Рис. 3. Будова газорозрядної камери «з гарячими стінками» [11, 12]

Більше того, навіть у випадках, коли проведені експерименти дозволяють дослідити вказані залежності, автори ігнорують таку можливість.

Так, у роботі [13] порівняння властивостей азотованих шарів, отриманих на різних типах обладнання, подається у контексті дослідження впливу на процес АТР методу нагріву оброблюваної деталі – за рахунок розряду і, так званого, змішаного, що передбачає наявність джерела додаткового підігріву. Відмінності у характеристиках модифікованих шарів, отриманих після азотування за аналогічних режимних параметрів, у вказаній роботі пояснюються виключно різницею у конструктивному рішенні технологічного обладнання, хоча очевидно, що обидва досліджувані процеси відбуваються за різних енергетичних параметрів (які автор навіть не вважає за потрібне фіксувати), а тому логічно припустити, що саме вони справляють вирішальний вплив на результати модифікації.

Висновки

Таким чином, дослідження впливу енергетичних параметрів процесу АТР на його результати становить важливу наукову задачу, що відкриває додаткові можливості в плані оптимізації режимів азотування, здатних забезпечити результати модифікації, що найкраще відповідають вимогам підвищення працездатності об'єктів обробки в заданих умовах експлуатації.

Література

1. Каплун В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах : монография / В. Г. Каплун, П. В. Каплун. – Хмельницкий : ХНУ, 2015. – 315 с.
2. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
3. 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.
4. Лахтин Ю. М. Структура и прочность азотированных сплавов / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Металлургия, 1992. – 176 с.
5. Арзамасов Б. Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах / Б. Н. Арзамасов. – М. : Машиностроение, 1979. – 224 с.
6. Скиба М.Є. Дослідження процесів безводневого азотування в тліючому розряді / М.Є. Скиба, М.С. Стечишин, В.П. Олександренко, В.С. Курської, А.В. Мартинюк // Проблеми трибології. – Хмельницький, 2018. – № 2. – С. 6–16.

7. Diaz-Guillen J. C. 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. – P. 45–51.
8. Stechyshyn M.S. Influence of the Ionic Nitriding of Steels in Glow Discharge on the Structure and Properties of the Coatings / M.S. Stechyshyn, A.V. Martynyuk, Y.M. Bilyk, V.P. Oleksandrenko, N.M. Stechyshyna // *Materials Science*. – 2017. – 53 (3). – P. 343–349.
9. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом / Б. И. Москалев. – М. : Энергия, 1969. – 186 с.
10. Spalvins T. Advances and Direction of Ion Nitriding / T. Spalvins // 2nd Ion Nitriding Conference, Ohio, September 18-20. – Ohio, 1989. – P. 3–11.
11. Pye D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing / D. Pye. – Ohio : ASM International, 2003. – 260 p.
12. Steel Heat Treatment. Metallurgy and Technologies / edited by G. E. Totten. – Portland, Oregon, USA : Taylor & Francis Group, 2006. – 834 p.
13. Ribet F. Influence of the Method of Heating on Ion Nitriding / F. Ribet // *Ion Nitriding : proceedings of an International conference of Ion Nitriding, Cleveland, Ohio, USA, 15–17 September 1986* / edited by T. Spalvins. – Ohio : International, 1987. – P. 83–96.

References

1. Kaplun V. G. Ionnoe azotirovanie v bezvodnorodnyh sredah : monografiya / V. G. Kaplun, P. V. Kaplun. – Hmel'nickij : HNU, 2015. – 315 s.
2. Pastuh I. M. Teorija i praktika bezvodnorodnogo azotirovanija v tlejušhem razrjadě / I. M. Pastuh. – Har'kov : NNC HFTI, 2006. – 364 s.
3. Ionnaja himiko-termičeskaja obrabotka splavov / B. N. Arzamasov, A. G. Bratuhin, Ju. S. Eliseev, T. A. Panajoti. – М. : Izd-vo MGTU im. N. Je. Bauman, 1999. – 400 s.
4. Lahtin Ju. M. Struktura i pročnosť azotirovanih splavov / Ju. M. Lahtin, Ja. D. Kogan. – М. : Metallurgija, 1992. – 176 s.
5. Arzamasov B. N. Himiko-termičeskaja obrabotka metallov v aktivizirovannyh gazovyh sredah / B. N. Arzamasov. – М. : Mashinostroenie, 1979. – 224 s.
6. Skyba M. Ie. Doslidžennia protsesiv bezvodnevoho azotuvannia v tliučomu rozriadi / M. Ie. Skyba, M.S. Stechyshyn, V.P. Oleksandrenko, V.S. Kurskoi, A.V. Martyniuk // *Problemy trybolohii. – Khmelnytskyi*, 2018. – № 2. – S. 6–16.
7. Diaz-Guillen J. C. 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. – P. 45–51.
8. Stechyshyn M.S. Influence of the Ionic Nitriding of Steels in Glow Discharge on the Structure and Properties of the Coatings / M.S. Stechyshyn, A.V. Martynyuk, Y.M. Bilyk, V.P. Oleksandrenko, N.M. Stechyshyna // *Materials Science*. – 2017. – 53 (3). – P. 343–349.
9. Moskalev B. I. Razrjad s polym katodom / B. I. Moskalev. – М. : Jenergiya, 1969. – 186 s.
10. Spalvins T. Advances and Direction of Ion Nitriding / T. Spalvins // 2nd Ion Nitriding Conference, Ohio, September 18-20. – Ohio, 1989. – P. 3–11.
11. Pye D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing / D. Pye. – Ohio : ASM International, 2003. – 260 p.
12. Steel Heat Treatment. Metallurgy and Technologies / edited by G. E. Totten. – Portland, Oregon, USA : Taylor & Francis Group, 2006. – 834 p.
13. Ribet F. Influence of the Method of Heating on Ion Nitriding / F. Ribet // *Ion Nitriding : proceedings of an International conference of Ion Nitriding, Cleveland, Ohio, USA, 15–17 September 1986* / edited by T. Spalvins. – Ohio : International, 1987. – P. 83–96.

Рецензія/Peer review : 14.1.2019 р.

Надрукована/Printed : 10.4.2019 р.

Стаття прорецензована редакційною колегією