

DOI 10.31891/2307-5732-2019-277-5-7-12

УДК 669.1:537.5

М.Є. СКИБА, Н.М. СТЕЧИШИНА, Н.К. МЕДВЕДЧУК,
М.С. СТЕЧИШИН, В.В. ЛЮХОВЕЦЬ
Хмельницький національний університет

БЕЗВОДНЕВЕ АЗОТУВАННЯ У ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

В роботі розглянуто актуальність застосування поверхневих методів зміцнення деталей машин. Особливу увагу приділено сучасним методам зміцнення, заснованим на дії концентрованих потоків енергії на поверхні металів, зокрема методу без водневого азотування в тліючому розряді (БАТР). Розглянута історія виникнення та розвитку технологій азотування. Показані переваги БАТР, а також основний напрямок досліджень у Подільському науковому фізико-технологічному центрі при ХНУ, що базується на енергетичній теорії процесів БАТР.

Ключові слова: безводневе азотування в тліючому розряді (БАТР), технологічний процес, дифузія, зносостійкість, автономні і взаємопов'язані режими, структура, фазовий склад.

M.YE. SKYBA, N.M. STECHYSHYNA, N.K. MEDVEDCHUK, M.S. STECHYSHYN, V.V. LIUKHOVETS
Khmelnitskyi National University

HYDROGEN-FREE NITRIDING IN GLOW DISCHARGE AS METHOD OF IMPROVEMENT OF WEAR RESISTANCE OF STRUCTURAL STEELS

The paper considers the urgency of the use of surface methods for strengthening the parts of machines. Particular attention is paid to modern methods of strengthening (based on the action of concentrated energy streams on the surface of metals), in particular the method of hydrogen-free nitriding in glow discharge (HNGD). The history of emergence and development of nitrogen technologies are considered. The advantages of HNGD, as well as the main direction of research in the Podilsky Scientific Physics and Technology Center at KhNU are shown (which are based on the energy theory of HNGD processes). By ensuring the independence of the energy parameters of HNGD technology, wide additional possibilities appear for both the intensification of the process and the qualitative management of the consequences of the modification. In this case, regardless of the condition of temperature maintaining, it is possible to suppress or vice versa to intensify certain subprocesses, and through them to create different structures of the modified layer. The idea of the possibility of independent control and regulation of HNGD by mode and energy parameters is the basis of this work. In world practice, the problem of ensuring the independence of temperature from the energy parameters of the NGD mode is solved by the introduction of a heating source, which is alternative to a glow discharge. The most common hardware implementation of this approach is the use of so-called hot-wall cameras.

Key words: hydrogen-free nitriding in the glow discharge (HNGD), technological process, diffusion, wear resistance, autonomous and interrelated modes, structure, phase composition.

ВСТУП

Сучасний рівень розвитку машинобудування характеризується інтенсифікацією експлуатаційних режимів машин та обладнання, що значно підвищує вимоги до їх надійності та довговічності. Особливе місце під час вирішення цієї проблеми належить питанням зносостійкості, адже більшість машин (85...90 %) виходять з ладу не через поломки, а в результаті зношування поверхонь окремих деталей та вузлів [1]. Оскільки затрати на ремонт і технічне обслуговування машин у кілька разів перевищують їх вартість, це призводить до значних економічних збитків. Так, втрати коштів у машинобудуванні промислово розвинених держав, пов'язані з проблемою тертя і зношування, досягають 8 % національного доходу [2]. Втім, необхідність пошуку шляхів мінімізації цієї проблеми пояснюється не лише питанням економічної доцільності, але й прагненням дотримання принципу енергозбереження, адже за даними експертів від чверті до третини усієї виробленої людством протягом року енергії витрачається на подолання сил тертя у рухомих з'єднаннях машин [3].

Мета роботи – дослідження впливу процесів БАТР на структуру, фазовий склад і зносостійкість металів, історія виникнення та розвитку процесу азотування.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розв'язання задачі зниження витрат потужності на тертя та зношування у машинах і підвищення їхньої надійності та довговічності – основний комплекс заходів, пов'язаний з вибором матеріалів пар тертя, а необхідність дотримання раціонального співвідношення між їхньою вартістю та належним рівнем експлуатаційних характеристик сприятиме зростанню ролі різних методів зміцнення поверхневих шарів, оскільки саме від стану поверхні залежить ресурс деталей машин.

Для отримання необхідних триботехнічних характеристик поверхонь тертя використовуються різноманітні технологічні методи модифікації матеріалів, основними з яких є термічна (ТО) та хіміко-термічна обробка (ХТО), поверхнево-пластична деформація, нанесення покриттів, електронно-променева та ультразвукова обробка, лазерне зміцнення та ін. [4–7].

Традиційно найбільш ефективними методами підвищення зносостійкості та механічних

властивостей сталей залишаються ТО та ХТО, що дозволяє суттєво змінювати структуру (або структуру, фазовий та хімічний склад), а отже й властивості металів і насамперед їх поверхонь у необхідному напрямку. Та в останні часи перевага надається впровадженню методів керованої модифікації поверхонь, заснованих на дії концентрованих потоків енергії на поверхні [8]. Найбільший розвиток отримали вакуумні, іонні та лазерні технології, що будучи перспективними з точки зору формування структури і властивостей, одночасно характеризуються і найменшою енергоємністю [9], тобто є найбільш економічно доцільними. Ці методи модифікації поверхонь пройшли кілька етапів, що призвели до створення великої кількості технічних рішень, обумовлених як специфікою процесів, так і конструктивними особливостями використовуваного обладнання.

Одним з найбільш освоєних та широко використовуваних у світовій практиці є метод безводневого азотування у тліючому розряді (БАТР).

Взагалі азотування – це процес дифузійного насичення поверхневого шару сталей і сплавів азотом при нагріванні у відповідному середовищі, що застосовується з метою підвищення зносостійкості, корозійної та корозійно-механічної зносостійкості, механічних і втомних характеристик, жаростійкості та жароміцності.

Перші систематичні дослідження процесу азотування були проведені на початку ХХ ст. Зокрема, була встановлена можливість взаємодії заліза з аміаком і виявлено підвищення поверхневої твердості та корозійної стійкості сталі при нагріванні в атмосфері аміаку. Основні принципи технології азотування сформульовані російським академіком М.П. Чижевським. Розроблені ним схема лабораторної установки та методика проведення експериментів стали прообразом обладнання для пічного азотування та технології процесу, що широко застосовувалися протягом усього ХХ ст. У роботі М.П. Чижевського [10] уперше були досліджені критичні точки в системі Fe–N, кінетичні закономірності процесу азотування, структура та властивості азотомістких сплавів заліза, описані властивості нітридів заліза, хрому, титану, алюмінію і т. д.

Початок промислового впровадження азотування пов'язаний з розробкою німецьким інженером А. Фрі спеціальних азотованих сталей (нітралоїв), які в результаті насичення мали високу поверхневу твердість [11]. Подальше освоєння процесу супроводжувалось вдосконаленням технологій, пошуками нових насичувальних середовищ, інтенсифікацією процесу, розширенням областей використання азотування тощо. На сьогодні, за даними міжнародного товариства з термічної обробки та покриттів металів [12], азотування є одним з основних методів зміцнення металів, використання якого постійно зростає.

Азотування має багато різновидів. Вибір процесу того чи іншого виду визначається технологічністю, можливістю регулювання фазового складу модифікованого шару, швидкістю насичення, тривалістю підготовчих стадій, рівнем автоматизації, вартістю, наявністю обладнання, дотриманням вимог з охорони довкілля тощо.

З огляду на все зростаючу важливість впливу на вартість обробки енергетичного фактора, надзвичайно перспективним слід визнати БАТР. Суть БАТР полягає в наступному: у розрідженій азотомісткій атмосфері між катодом (деталлю) та анодом (стінками вакуумної камери) збуджується аномальний тліючий розряд, що ініціює утворення активного середовища, що складається з іонів, нейтральних частинок, атомів і молекул робочої суміші, що знаходяться у збудженому стані і цей падаючий потік, бомбардуючи поверхню катода, нагріває її до температури насичення, що забезпечує формування на поверхні матеріалу азотованого шару. При цьому головним процесом, що модифікує поверхню, є дифузія [12]. Технологічний процес БАТР включає наступні операції [13]: знежирювання оброблюваних деталей; встановлення деталей на пристосування, які у разі потреби одночасно мають слугувати і для локального захисту від азотування; очищення поверхні деталі катодним розпорощенням; вихід на задану температуру азотування і витримка для отримання необхідної товщини шару.

Порівняно з такими розповсюдженими способами ХТО, як цементація, нітроцементація, ціанування і газове азотування у печах, метод БАТР має наступні переваги: істотне скорочення тривалості обробки; можливість отримання шарів заданої структури і фазового складу; мінімальна серед усіх відомих процесів даного класу енергоємність; відсутність формозміни оброблюваних об'єктів; можливість обробки глухих і наскрізних отворів; повторюваність результатів; екологічність, покращення санітарно-гігієнічних умов виробництва; зниження собівартості обробки.

БАТР відноситься до технологій універсального застосування, оскільки є ефективним методом модифікації не лише деталей з конструкційних сталей, але й штампової та ливарної оснастки, а також різального інструменту. Під час обробки конструкційних сталей БАТР дозволяє істотно знизити короблення та деформацію деталей, які неминуче виникають при інших видах ХТО, наприклад, при цементації та нітроцементації. Останнє дозволяє уникнути фінішної обробки, і відповідно, зменшення товщини модифікованого шару. Для деяких виробів, наприклад, довгомірних валів, шестерень великого діаметра, БАТР є єдиним способом отримання готового виробу з мінімальною кількістю браку.

Промислове застосування методу азотування в тліючому розряді (АТР) почалося у 50–60-х роках ХХ ст., після того, як Б. Берхгаузом було отримано перший патент на винайдений ним спосіб стабілізації тліючого розряду “сильного” струму [11].

Слід зазначити, що спочатку технологія отримала назву азотування в тліючому розряді, проте поступово цей термін трансформувался в поняття “іонне азотування” та “іонно-плазмове азотування”, що в принциповому плані не зовсім коректно. По-перше, оскільки іони є суттєвим фактором не лише цієї

технології [14], а по-друге, головні субпроцеси, що є характерними та визначальними для результатів обробки, відбуваються в області катодного падіння, яка за визначенням не може бути плазмою, оскільки плазма відповідає квазінейтральному стану іонізованого середовища. Крім того, встановлено, що істотну роль в модифікації металевої поверхні відіграють не тільки заряджені частинки, якими є іони, що бомбардують поверхню, але й швидкі нейтральні частки, що виникають у газовому середовищі в результаті резонансної перезарядки [15]. З огляду на вище зазначені положення більш коректним є саме початковий термін – азотування в тліючому розряді.

Теоретичні основи фізики газового розряду, у тому числі й тліючого, розглянуті у роботах [16, 17].

На теренах колишнього СРСР метод АТР почали вивчати у 1962 р. Розробки наукових основ процесу, промислових технологій та обладнання були виконані школами Ю.М. Лахтіна, Б.М. Арзамасова та Каплуна В.Г. [11, 13, 18]. Зокрема були детально вивчені умови створення оптимального тліючого розряду в установках для ХТО і його вплив на активацію хімічних процесів, встановлені залежності параметрів дифузійного шару залежно від режиму АТР, розроблена і впроваджена у виробництво ціла гамма обладнання різних конструктивних схем та призначення. У 70-і роки Ю.М. Лахтін та Я.Д. Коган виконали систематичні дослідження з уточнення структури моделі азотованого шару [19], у результаті чого була запропонована модель, що передбачає поділ азотованого шару на зону сполук (нітридний шар у поверхневій зоні, що може бути представлений ϵ -фазою – $Me_{2-3}N$ або γ' -фазою – Me_4N) та дифузійну зону, що розташована під зоною сполук – зона внутрішнього азотування (азотистий α -твердий розчин $\alpha-Me_{[N]}$).

Виклад основного матеріалу. Отже, БАТР, 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, при високій швидкості тертя (вище 3 м/с) зона ($\epsilon + \gamma'$) відіграє позитивну роль, запобігаючи адгезійній взаємодії деталей пари тертя [18]. 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 без нітридної 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 [12].

Регулювання процесу зміцнення поверхні при БАТР здійснюється шляхом варіювання технологічними зміною параметрів 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 [18]. Вплив режимних параметрів азотування на товщину, фазовий склад та властивості модифікованого шару проаналізовано у роботах [11, 13, 18, 20 та ін.], 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 [18].

Сталі, з яких виготовляють деталі, що працюють на зношування при невеликих контактних навантаженнях (сталі 20, 45, 20X, 40X 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 знакозмінімним навантаженням та корозії.

Леговані сталі, що застосовуються для виготовлення деталей, експлуатаційна надійність яких визначається поверхневою твердістю (наприклад, сталь 38X2MЮА), зазвичай азотуються при температурах від 500 °С до 520 °С [13]. 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 БАТР 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 по сьогодні знаходить широке застосування у якості робочої суміші при проведенні БАТР (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 [12].

У [11] наведені залежності глибини азотованого шару від складу насичуючого середовища при безводневому азотуванні в тліючому розряді (БАТР). Зберігаючи всі основні переваги азотування у водневомістких середовищах, БАТР підвищує пластичні властивості поверхні за рахунок виключення явища водневого окрихчення, 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 приводить 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.

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 [11].

- Вплив тривалості процесу. У результаті численних експериментальних досліджень було встановлено, що залежність товщини шару h від тривалості насичення τ підкоряється параболічному закону [18]. Таким чином, з часом швидкість зростання товщини шару зменшується аж до повного припинення.

- Вплив енергетичних параметрів. Якщо вплив режимних параметрів на результати БАТР досліджувався багатьма вченими, то енергетичні параметри, за поодинокими виключеннями [20, 21], у спеціальній як вітчизняній, так і зарубіжній літературі, взагалі не фігурують. Як це не дивно, 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. Ігнорування основних кількісних характеристик тліючого розряду, що виступає у якості інтенсифікатора елементарних підпроцесів, які відповідають за утворення модифікованого шару, по суті означає нехтування специфікою БАТР, наслідком чого є втрата тих унікальних можливостей керування процесом модифікації, які становлять чи не основну перевагу цієї технології порівняно з іншими видами азотування.

Разом з тим, вирішальна роль енергетичних параметрів у процесі АТР ніколи не ставилася під сумнів. Так, у роботі [18] вони названі "найважливішими факторами керування дифузійним насиченням в умовах існування тліючого розряду", де у якості додаткового технологічного фактора керування процесом БАТР було названо питому потужність тліючого розряду.

Наведені у роботі [20] результати досліджень свідчать про існування екстремальної залежності між питомою потужністю розряду та його загальним тиском. Автори 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 [21], навряд чи дозволяє поширювати його результати на деталі будь-якої конфігурації. Так, наші дослідження [20] не підтверджують наявності екстремальної залежності між тиском газової суміші та густиною потужності розряду (рис. 1).

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 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 та тиск газового середовища [18].

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 [12].

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”. 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.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день активні теоретичні та експериментальні дослідження процесів БАТР проводяться в Подільському науковому фізико-технологічному центрі при Хмельницькому національному університеті. Наукові та практичні дослідження опираються на енергетичну теорію проходження процесів БАТР, що дозволило значно розширити технологічні рамки азотування за рахунок автономності енергетичних характеристик азотування (густини струму та напруження в газорозрядній камері) [20, 21].

Література

1. Елагина О. Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учеб. пособие / О. Ю. Елагина. – М. : Университетская книга ; Логос, 2009. – 488 с.
2. Закалов О. В. Основы тертя і зношування у машинах : навчальний посібник / О. В. Закалов, І. О. Закалов. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 322 с.
3. Сафонов Б. П. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибоспращений : учеб. пособие / Б. П. Сафонов, А. В. Бегова. – Новомосковск : РХТУ, 2004. – 65 с.
4. Современная трибология: итоги и перспективы / отв. ред. К. В. Фролов. – М. : изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.
5. Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю. К. Машков, К. Н. Полещенко, С. Н. Поворознюк, П. В. Орлов. – М. : Наука, 2000. – 280 с.
6. Беркович И. И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский. – Самара : СГТУ, 2000. – 268 с.
7. Шевеля В. В. Трибохимия и реология износостойкости : монография / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко. – Хмельницький : ХНУ, 2006. – 278 с.
8. Прусаков Б. А. Проблемы материалов в XXI веке / Б. А. Прусаков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2001. – № 1. – С. 3–5.
9. Чижевский В. П. Железо и азот / В. П. Чижевский // Известия Томского технологического института. – 1913. – Т. 31. – № 3. – С. 1–91.
10. Гурвич Л. М. Современные энергосберегающие технологии термообработки / Л. М. Гурвич, И. Г. Терещенко // Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении : труды научно-практического симпозиума. – Харьков, 2000. – С. 219–221.
11. Каплун В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах : монография / В. Г. Каплун, П. В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 315 с.
12. Лахтин Ю. М. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г. И. Шпис, З. Бёмер. – М. : Металлургия, 1991. – 320 с.
13. Лахтин Ю. М. Химико-термическая обработка металлов : учебное пособие для вузов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М. : Металлургия, 1985. – 256 с.
14. Андреев А. А. Азотирование сталей в газовом дуговом разряде низкого давления / А. А. Андреев, В. М. Шулаев, Л. П. Саблев // Физическая инженерия поверхности. – 2006. – № 3–4. – С. 191–197.
15. Пастух И. М. Азотирование в тлеющем разряде: состояние и перспективы / И. М. Пастух, Г. Н. Соколова, Н. В. Лукьянюк // Проблемы трибологии. – 2013. – № 3. – С. 18–22.
16. Райзер Ю. П. Физика газового разряда : учеб. руководство / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1987. – 592 с.
17. Кудрявцев А. А. Физика тлеющего разряда : учебное пособие / А. А. Кудрявцев, А. С. Смирнов, Л. Д. Цендин. – СПб : Лань, 2010. – 512 с.
18. 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.

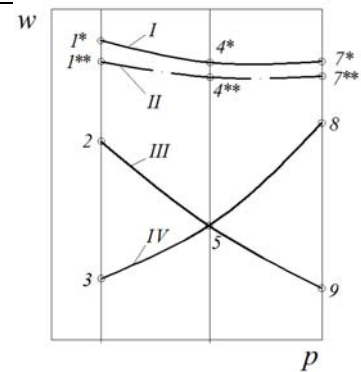


Рис. 1. Залежність питомої потужності розряду w від тиску газової суміші: I, II – без додаткового нагріву; III, IV – з автономними режимами (з додатковим нагрівом зразків)

19. Развитие азотирования в России. Третий период (1960–1980 гг.): Низкотемпературная химико-термическая обработка / О. А. Банных, В. М. Зинченко, Б. А. Прусаков, В. Я. Сыропятов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2000. – № 5. – С. 18–26.

20. 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.

21. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Пастух И. М. – Х. : ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.

References

1. Elagina O. Yu. Tehnologicheskie metody povysheniya iznosostojkosti detalej mashin : ucheb. posobie / O. Yu. Elagina. – M. : Universitetskaya kniga ; Logos, 2009. – 488 s.
2. Zakalov O. V. Osnovy tertiya i znoshuvannya u mashynakh : navchalnyi posibnyk / O. V. Zakalov, I. O. Zakalov. – Ternopil : Vyd-vo TNTU im. I. Puliuiia, 2011. – 322 s.
3. Safonov B. P. Inzhenernaya tribologiya: ocenka iznosostojkosti i resursa tribospyazhenij : ucheb. posobie / B. P. Safonov, A. V. Begova. – Novomoskovsk : RHTU, 2004. – 65 s.
4. Sovremennaya tribologiya: itogi i perspektivy / otv. red. K. V. Frolov. – M. : izd-vo LKI, 2008. – 480 s.
5. Trenie i modifizirovanie materialov tribosistem / Yu. K. Mashkov, K. N. Poleshenko, S. N. Povoroznyuk, P. V. Orlov. – M. : Nauka, 2000. – 280 s.
6. Berkovich I. I. Tribologiya. Fizicheskie osnovy, mehanika i tehniczeskie prilozheniya / I. I. Berkovich, D. G. Gromakovskij. – Samara : SGTU, 2000. – 268 s.
7. Shevelya V. V. Tribohimiya i reologiya iznosostojkosti : monografiya / V. V. Shevelya, V. P. Oleksandrenko. – Hmelnickij : HNU, 2006. – 278 s.
8. Prusakov B. A. Problemy materialov v HHI veke / B. A. Prusakov // *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. – 2001. – № 1. – S. 3–5.
9. Chizhevskij V. P. Zhelezo i azot / V. P. Chizhevskij // *Izvestiya Tomskogo tehnologicheskogo instituta*. – 1913. – T. 31. – № 3. – S. 1–91.
10. Gurvich L. M. Sovremennye energosberegayushie tehnologii termoobrabotki / L. M. Gurvich, I. G. Tereshenko // *Oborudovanie i tehnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov v mashinostroenii* : trudy nauchno-prakticheskogo simpoziuma. – Harkov, 2000. – S. 219–221.
11. Kaplun V. G. Ionnoe azotirovanie v bezvodnorodnyh sredah : monografiya / V. G. Kaplun, P. V. Kaplun. – Hmelnickij : HNU, 2015. – 315 s.
12. Lahtin Yu. M. Teoriya i tehnologiya azotirovaniya / Yu. M. Lahtin, Ya. D. Kogan, G. I. Shpis, Z. Byomer. – M. : Metallurgiya, 1991. – 320 s.
13. Lahtin Yu. M. Himiko-termicheskaya obrabotka metallov : uchebnoe posobie dlya vuzov / Yu. M. Lahtin, B. N. Arzamasov. – M. : Metallurgiya, 1985. – 256 s.
14. Andreev A. A. Azotirovanie stalej v gazovom dugovom razryade nizkogo davleniya / A. A. Andreev, V. M. Shulaev, L. P. Sablev // *Fizicheskaya inzheneriya poverhnosti*. – 2006. – № 3–4. – S. 191–197.
15. Pastuh I. M. Azotirovanie v tleyushem razryade: sostoyanie i perspektivy / I. M. Pastuh, G. N. Sokolova, N. V. Lukyanuk // *Problemy tribologii*. – 2013. – № 3. – S. 18–22.
16. Rajzer Yu. P. Fizika gazovogo razryada : ucheb. rukovodstvo / Yu. P. Rajzer. – M. : Nauka, 1987. – 592 s.
17. Kudryavcev A. A. Fizika tleyushhego razryada : uchebnoe posobie / A. A. Kudryavcev, A. S. Smirnov, L. D. Cendin. – SPb : Lan, 2010. – 512 s.
18. Ionnyaya himiko-termicheskaya obrabotka splavov / B. N. Arzamasov, A. G. Bratuhin, Yu. S. Eliseev, T. A. Panajoti. – M. : Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 1999. – 400 s.
19. Razvitie azotirovaniya v Rossii. Tretij period (1960–1980 gg.): Nizkotemperaturnaya himiko-termicheskaya obrabotka / O. A. Bannyh, V. M. Zinchenko, B. A. Prusakov, V. Ya. Syropyatov // *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. – 2000. – № 5. – S. 18–26.
20. Skyba M. Ye. Doslidzhennia protsesiv bezvodnevoho azotuvannya v tliiuchomu rozriadi / M. Ye. Skyba, M. S. Stechyshyn, V. P. Oleksandrenko, V. S. Kurskoi, A. V. Martyniuk // *Problemy trybolohii*. – Khmelnytskyi. – 2018. – № 2. – S. 6–16.
21. Pastuh I. M. Teoriya i praktika bezvodnorodnogo azotirovaniya v tleyushem razryade / Pastuh I. M. – H. : NNC HFTI, 2006. – 364 s.

Рецензія/Peer review : 17.05.2019 р.

Надрукована/Printed : 23.07.2019 р.

Стаття рецензована редакційною колегією