

ЗАГАЛЬНА МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ МОДИФІКАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ З АВТОНОМНИМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕЖИМУ

Розглянута загальна методологія проведення досліджень з метою розробки теоретичних засад принципово нового процесу азотування в тліючому розряді, який забезпечував би можливість довільного комбінування його параметрів задля отримання модифікованих поверхонь з заданими експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: методологія, метод, тліючий розряд, автономні параметри, модифікований шар.

G.M. SOKOLOVA, I.M. PASTUKH
Khmelnitsky National University

GENERAL METHODOLOGY OF RESEARCH OF METAL SURFACES MODIFICATION PROCESSES IN A GLOW DISCHARGE WITH THE INDEPENDENT MODE PARAMETERS

Abstract – The basic methodological principles for implementation and study of the process of metal surfaces modification in a glow discharge with independent parameters are given. The possibility of using varied approaches to the choice of technological parameters depending on the required structure and properties of modified layer that opens up new perspectives in the study of process of metal surfaces modification is particularly emphasized.

The basis of the research methodology is the energy model of nitriding in a glow discharge. The essence of this model is formulated in the thesis of the priority of those surface modification subprocesses, which in concrete terms are the most energy-efficient. The method of hardware implementation of nitriding parameters independence is proposed. The methods used at various stages of the research are described.

Keywords: methodology, method, glow discharge, independent parameters, modified layer.

Вступ

Можливість регулювання процесу насичення поверхні, що є однією з основних переваг вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій (ВДГРТ) модифікації металевих поверхонь, дозволяє отримати зміцнені шари заданої структури та фазового складу, виходячи з умов наступної експлуатації деталей. Згадане регулювання здійснюється шляхом варіювання технологічними параметрами – насамперед, режимними (температура поверхні, тиск у розрядній камері, склад газової суміші, тривалість насичення), оскільки ними відносно легко керувати у виробничих умовах. Вплив режимних параметрів азотування на товщину, фазовий склад та властивості модифікованого шару проаналізовано у багатьох роботах, зокрема у [1 – 4]. Значно меншу увагу дослідники, як вітчизняні, так і зарубіжні, приділяють вивченню впливу на результати модифікації енергетичних параметрів (густина струму і напруга на електродах розрядної камери), попри те, що найбільш важливим технологічним фактором ВДГРТ, який визначає активність дифузійного насичення, “визнана густина енергії плазми, якою є питома потужність” [1, с. 33]. Не в останню чергу такий стан речей пояснюється неможливістю довільного керування енергетичними параметрами, адже у реальному процесі практично всі технологічні фактори взаємозалежні та взаємопов’язані, і чи не найсуттєвіші зв’язки взаємний вплив параметрів накладає саме на напругу та густину струму, оскільки їхньою комбінацією визначається температура процесу насичення. Цим пояснюється той факт, що теоретичні прогнози характеру формування модифікованих поверхневих шарів у значній мірі важко використати на практиці, адже комбінація вихідних параметрів впливу, яка теоретично відповідала б оптимальному характеру обробки, у більшості випадків не може бути реалізована. Таким чином, розробка теоретичних засад принципово нового процесу дифузійного насичення поверхні в тліючому розряді з автономними (взаємозалежними) параметрами відкриває абсолютно нові потенційні можливості інтенсивного та керованого формування поверхневих структур з характеристиками, які в першу чергу продиктовані умовами подальшої експлуатації виробів.

Аналіз джерел за темою дослідження

Аналіз робіт, у яких підсумовуються практичний досвід і теоретичні напрацювання провідних фахівців у галузі ВДГРТ модифікації металевих поверхонь [1 – 3], дозволяє зробити висновок, що головним їхнім недоліком насамперед є недосконалість та недостатня адекватність теоретичних моделей процесу (найбільш відомими з них є моделі Кольбеля-Лахтіна [1] та Арзамасова [2]) реальним процесам. Деякі з практично існуючих при цьому явищ не тільки не передбачені згаданими моделями, але й суперечать їм. Крім того, відомі моделі практично не опираються на аналітичні підходи, тому не становлять собою скільки-небудь серйозного підґрунтя для передбачення результатів обробки. Використовуваний при цьому механізм вибору параметрів технологічного режиму на основі аналізу бази даних раніше отриманих результатів обробки за досліджуваним методом важко віднести до категорії науково обґрунтованих.

У [5] наведено енергетичний аналіз згаданих теоретичних моделей, який вказує на певну невідповідність їх реальним процесам. Зазначимо, що ці моделі слід розглядати як окремі випадки одного,

більш складного процесу, причому пріоритет кожного з них залежить від конкретних умов обробки. У вказаній роботі пропонується нова, енергетична, модель процесу модифікації металевих поверхонь у тліючому розряді, у якій теорія вказаних процесів вперше формується на основі положень фізики газового розряду та принципу пріоритету енергетичних підходів. Саме ці положення дозволяють по-новому розглядати всі технології насичення металевих поверхонь дифузантами з врахуванням окремих складових підпроцесів, що розкриває більш тонкий механізм їхньої взаємодії та взаємного впливу і дає можливість, конкретизуючи роль кожного з факторів і комбінуючи їх в аспекті послідовності, тривалості фаз та їх співвідношення, досягти оптимальних кінцевих результатів обробки, причому в точній відповідності з прогнозними характеристиками обробки.

Постановка завдання

Практична апробація енергетичної моделі підтвердила можливість як прогнозування результатів модифікації при певній комбінації параметрів технологічного режиму, так і можливість оптимізації вибору цих характеристик. Проте ця перевага в багатьох випадках не може бути реалізована з тієї причини, що далеко не всяка комбінація параметрів в умовах конкретної садки може бути досягнутою апаратно, оскільки всі вони в реальному процесі взаємопов'язані та взаємозалежні.

Серед всіх характеристик технології найбільші умови зв'язку на інші аналогічні показники режиму накладає температура поверхні, оскільки для підтримання її необхідна деяка конкретна комбінація електричних параметрів розряду. Забезпечення певної температури поверхні за рахунок факторів, альтернативних розряду, дозволить не тільки реально оптимізувати процес, але покращити його керованість в аспекті досягнення запланованих результатів.

У статті підіймається питання розробки загальної методології проведення досліджень, що дозволили б сформувані фундаментальні теоретичні засади модифікаційних технологій на основі вакуумно-дифузійних газорозрядних процесів, в яких би досліджувався механізм процесів формування модифікованих поверхневих шарів під впливом тліючого розряду з автономними параметрами.

Виклад основного матеріалу

Методологія дослідження як система базисних принципів досягнення поставленої мети, а також методів, способів та засобів їх реалізації, визначається насамперед його завданнями. Задача розробки теоретичних засад та апаратної реалізації принципово нового процесу азотування в тліючому розряді, який забезпечував би можливість довільного комбінювання його параметрів з метою отримання модифікованих поверхонь з заданими експлуатаційними характеристиками, може бути вирішена у кілька способів. Перший полягає у встановленні безпосереднього взаємозв'язку між вихідними параметрами азотування та експлуатаційними властивостями модифікованого шару; другий спосіб, опосередкований, передбачає встановлення взаємозв'язку між вказаними параметрами та фазовими структурами, здатними забезпечити необхідну зносостійкість поверхневого шару, а також енергетичними факторами, що виступають характеристиками ефективності основних субпроцесів (утворення нітридів, розпорощення поверхні, дифузії азоту вглиб поверхневого шару), відповідальних за формування вказаних структур. Оскільки рішення поставленого завдання є багатоваріантним, то в науково-експериментальному плані можливі дослідження за декількома напрямками, що відображено на рис. 1.

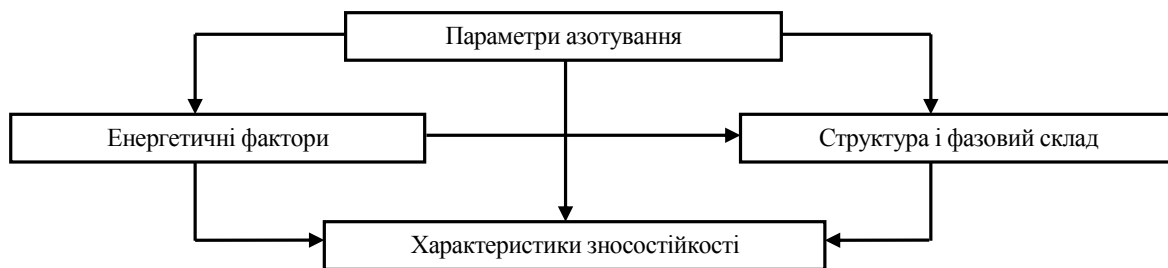


Рис. 1. Схема досліджень

В основу методології проведення досліджень покладено енергетичну модель процесу АТР. Основна концепція цієї моделі у формі системи аналітичних критеріїв пройшла експериментально-теоретичну апробацію і показала якісну адекватність цих критеріїв реальним результатам. Сутність енергетичної моделі сформульована в тезі про пріоритетність тих субпроцесів у модифікації поверхні, які в конкретних умовах енергетично найбільш доцільні.

Відправною точкою дослідження є необхідність забезпечення пріоритетності формування тієї чи іншої фазової структури за рахунок того з параметрів технологічного режиму, який в найбільшій мірі сприятиме відповідному субпроцесу, при цьому пріоритет становитимуть параметри, які відносяться до групи енергетичних. Основні показники, які характеризують електричний розряд в газі – густина струму та напруга, – відображають відповідно кількісну та енергетичну сторони потоків, котрі бомбардують поверхню, тому можливість їх довільного комбінювання сприятиме саме тим субпроцесам, які в певний момент обробки стимулюють утворення запрограмованої фазової структури. Такий концептуальний підхід дозволяє конкретизувати роль кожного з вихідних параметрів, що дозволить не тільки оптимізувати процес, але покращити його керованість в аспекті досягнення запланованих результатів.

Загальна методологія досліджень, відповідна сформованим вище завданням, наведена на рис. 2.



Рис. 2. Алгоритм загальної методології досліджень

Деякі елементи наведеного алгоритму не потребують роз'яснень, оскільки передбачають звернення до широко відомих методик. Так, металографічні дослідження, метою яких є встановлення взаємозв'язку між якісними і кількісними характеристиками структури металевих матеріалів з одного боку та їхніми фізичними, механічними, експлуатаційними та іншими властивостями з іншого боку, традиційно проводяться у чотири етапи: 1) відбір проб; 2) підготовка проб; 3) власне металографічний аналіз, що може включати мікроскопію (аналіз зображення з метою виявлення структури матеріалу); вимірювання твердості; рентгеноструктурний аналіз та ін.; 4) обробка результатів аналізу. Процедура виконання робіт на кожному з цих етапів детально висвітлена у спеціальній літературі. Крім того, для металографічного аналізу розроблений і використовується цілий ряд стандартів [6].

Натомість формування системи критеріїв оцінювання результатів азотування та аналітичне моделювання вимагають розробки спеціальних методик або вдосконалення та доопрацювання існуючих. Як приклад може бути наведена методика побудови аналітичних моделей багатфакторних процесів шляхом послідовного виключення факторів впливу у середовищі MathCAD, що дозволяє встановити вплив вихідних параметрів досліджуваного процесу на його кінцевий результат. Сутність цієї методики викладена в [5].

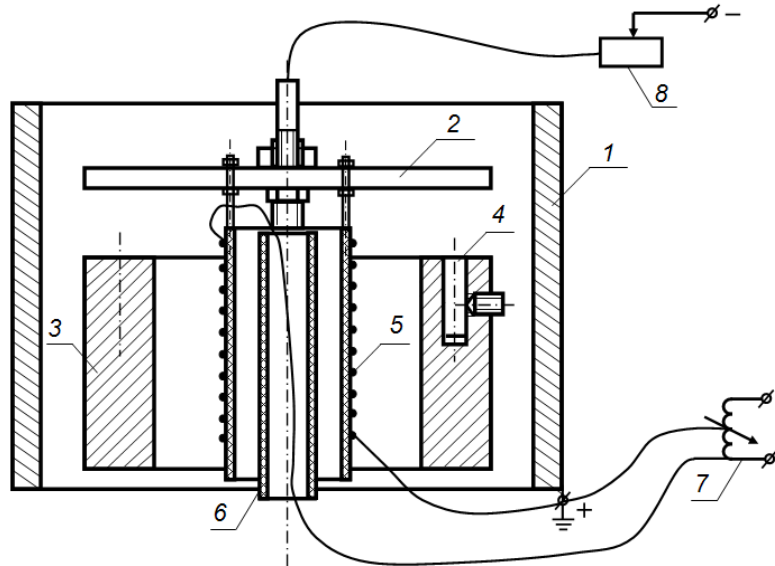
Певну складність становить методика проведення трибологічних досліджень (елемент алгоритму “Дослідження зносостійкості”), що повинні надати якісну картину зміни інтенсивності зношування матеріалів по глибині модифікованого шару та її залежності від режимів азотування, а також забезпечити можливість формування аналітичних підходів до відтворення цієї картини при зміні вихідних факторів впливу. У цьому плані чи не найбільш суттєвою методичною проблемою є неможливість врахування усіх факторів, котрі здійснюють вплив на пару тертя в умовах експлуатації, і як наслідок, неможливість адекватного відтворення умов перебігу процесів, що при цьому відбуваються. Це пояснюється не лише багатоманітністю та складністю цих процесів, але й відсутністю серед науковців єдиних поглядів на механізм зношування та критерії зносостійкості матеріалів. Таким чином, хоча вибір визначальних факторів дослідження металів на тертя та зношування і відіграє вирішальну роль у формуванні методики експерименту з дослідження зносостійкості, у ньому неминуче присутній суб'єктивний чинник, що насамперед виявляється у наданні переваги одному або кільком з великого числа запропонованих у спеціальній літературі варіантів.

Особливу увагу слід приділити такому елементу наведеного на рис. 2 алгоритму загальної методології досліджень як “Експериментальне азотування”, що по суті є ключовим етапом дослідження, який визначає результати не лише усіх наступних його етапів, але й підсумки дослідження в цілому. На вказаному етапі особливого значення набуває реалізація двох основних завдань: по-перше, модифікація установки з метою забезпечення автономності керування параметрами процесу, а по-друге, раціональний вибір режимів азотування, які б дозволили не лише визначити оптимальні з точки зору отримання необхідних експлуатаційних властивостей значення окремих параметрів та їхніх комбінацій, але й уточнити

залежності результатів азотування від вказаних параметрів, встановлені раніше іншими дослідниками.

Апаратно взаємна незалежність (автономність) параметрів режиму може досягатись по-різному. Як варіант пропонується конструктивне рішення, представлене на рис. 3.

Корпус камери 1 слугує анодом, всередині якого розміщена підвіска 2, до неї під'єднаний стакан 3, у якому встановлюються зразки 4 з різних сталей. З внутрішньої сторони стакан нагрівається спіральним нагрівачем на керамічній трубці 5 з виводом одного з кінців ніхромової обмотки через центральну керамічну трубку 6. Степінь нагріву регулюється за допомогою автотрансформатора 7. Баластний реостат 8 застосовується для зміни співвідношень між струмом і напругою.



1 – корпус камери; 2 – підвіска; 3 – стакан; 4 – зразки; 5 – нагрівач; 6 – центральна керамічна трубка; 7 – автотрансформатор; 8 – баластний реостат
Рис. 3. Схема дослід з азотування у тліючому розряді з автономними параметрами

Взірці з досліджуваних сталей (сталь 45, 40X, 38X2МЮА) передбачається обробляти за різними технологічними режимами. З огляду на необхідність економії матеріальних та енергетичних ресурсів, а також прагнення оптимізувати тривалість досліджень, кількість експериментів доцільно звести до мінімально необхідної з точки зору досягнення цілей дослідження.

Дотримання зазначених умов цілком можливе при проведенні 21 технологічного процесу відповідно до режимів, наведених у таблиці 1, причому склад газової суміші та тривалість обробки приймаються постійними, а $T_1 < T_2 < T_3$; $p_1 < p_2 < p_3$; $U_1 < U_2 < U_3$; $j_1 < j_2 < j_3$. Значення режимних параметрів азотування (температура, тиск, склад газової суміші та тривалість процесу) можуть бути призначені, виходячи з типових технологічних режимів, наведених у [7], що були складені на основі досвіду, отриманого при проведенні багаторічних експериментальних і виробничих робіт. Вибір значень енергетичних параметрів вимагає проведення попередніх експериментів.

Таблиця 1

Матриця режимів азотування

Група режимів	Номер режиму	Температура, °C	Тиск, торр	Напруга, В	Густина струму, А/м ²
1	1	T_2	p_2	U_1	j_1
	2			U_1	j_2
	3			U_1	j_3
	4			U_2	j_1
	5			U_2	j_2
	6			U_2	j_3
	7			U_3	j_1
	8			U_3	j_2
	9			U_3	j_3
2	10	T_1	p_2	U_2	j_2
	11			U_1	j_3
	12			U_3	j_1
3	13	T_3	p_2	U_2	j_2
	14			U_1	j_3
	15			U_3	j_1
4	16	T_2	p_1	U_2	j_2
	17			U_1	j_3
	18			U_3	j_1
5	19	T_2	p_3	U_2	j_2
	20			U_1	j_3
	21			U_3	j_1

За такого підходу до організації експериментів порівняння результатів, отриманих після проведення

азотування за режимами групи 1, дозволить визначити вплив енергетичних параметрів на досліджувані властивості модифікованих шарів. Відповідно процеси, проведені за режимами груп 1 (3, 5 та 7-й режими), 2 та 3, дають можливість дослідити вплив температури, а груп 1 (3, 5 та 7-й режими), 4 та 5 – вплив тиску на вказані властивості, причому за умови, якою досі нехтували при аналогічних дослідженнях, а саме – незалежно від значень напруги і сили струму.

Встановлення чітких, однозначних залежностей між результатами процесу модифікації і кожним з технологічних параметрів, при апаратному забезпеченні автономності керування ними, надасть широкі можливості для абсолютно довільної їх комбінації з метою активізації будь-якого з основних субпроцесів (утворення нітридів, розпорошення поверхні, дифузії азоту вглиб поверхневого шару), що визначають розмір, структуру та фазовий склад модифікованого шару, а отже й його експлуатаційні властивості.

Висновки

Сформульовані основні методологічні засади з реалізації та дослідження процесу модифікації металевих поверхонь у тліючому розряді з автономними параметрами. Особливо підкреслено, що можливість варіативних підходів до задавання технологічних параметрів залежно від необхідної за умовами наступної експлуатації виробів структури модифікованого шару відкриває принципово нові перспективи у вивченні тонкого механізму явищ, які мають місце при реалізації процесів ВДГРТ модифікації металевих поверхонь, а в подальшому істотно розширять ареал застосування цих технологій з підвищенням якості обробки, так і характеристик продуктивності та ресурсоемкості. При цьому стає реальним не тільки встановити загальні теоретичні положення ефективності застосування різних методів автономізації параметрів режиму, але й розробити практичні аспекти оптимального їх застосування, в тому числі – енергоефективності.

Література

1. 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.
2. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.
3. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Г.-И. Шпис, З. Бёмер. – М. : Металлургия, 1991. – 320 с.
4. Научные основы технологии упрочнения деталей машин и инструмента ионным азотированием в безводородных средах : диссертация на соискание научной степени доктора технических наук : 05.02.01 / Каплун Виталий Григорьевич. – Хмельницкий, 1990. – 451 с.
5. Фізико-технічна обробка поверхні металів безводневим азотуванням в тліючому розряді : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.03.07 / Пастух Ігор Маркович. – Хмельницький, 2008. – 520 с.
6. Металлографические исследования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.modificator.ru/terms/metallography_research.html
7. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Х. : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.

References

1. Ionnyaya khimiko-termicheskaya obrabotka splavov / B. N. Arzamasov, A. G. Bratukhin, Y. S. Yeliseyev, T. A. Panayoti. – Moscow : Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 1999. – 400 s.
2. Lakhtin Y. M. Azotirovaniye stali / Y. M. Lakhtin, Y. D. Kogan. – M. : Mashinostroyeniye, 1976. – 256 s.
3. Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya / Y. M. Lahtin, Y. D. Kogan, H.-Y. Shpitz, Z. Bëmer. – Moscow: Metallurgiya, 1991. – 320 s.
4. Nauchnye osnovy tekhnologii uprochneniya detaley mashin i instrumenta ionnym azotirovaniyem v bezvodnorodnykh sredah: dysertatsia na soyskanye nauchnoy stupeniya doktora tekhnichnykh nauk: 05.02.01: zakhyschena 08/06/1990: zatv. 12.16.1990 / Kaplun Vitaliy Hryhorevych. - Khmelniitsky, 1990. - 451 s.
5. Fisisco-tekhnichna obrobka poverkhni metalliv bezvodnevym azotuvanniam v tliyuchomu rozrjadi: dysertatsia na zdobuttia naukovogo stupenia doktora tekhnichnykh nauk: 05.03.07: zakhyschena 08.06.2008: zatv. 16.12.2008 / Pastukh Igor Markovich. – Khmelniitsky, 2008. – 520 s.
6. Metallohrayficheskye issledovaniya. URL: http://www.modificator.ru/terms/metallography_research.html
7. Pastukh I. M. Theoriya i praktyka bezvodородного азотирования в тлеушchem razrjade. – Kharkov, Natsionalnyi nauchnyi tsentr “Kharkovskiy fiziko-tekhnicheskyy institut”, 2006 – 364 s.

Рецензія/Peer review : 30.1.2014 р.

Надрукована/Printed :25.1.2015 р.