

УДК 620.193.16

DOI: 10.18372/0370-2197.2(87).14728

М. С. СТЕЧИШИН<sup>1</sup>, М. М. ЛУК'ЯНЮК<sup>1</sup>, Н. М. СТЕЧИШИНА<sup>1</sup>, В. С. КУРСКОЙ<sup>1</sup>  
М. І. ЦЕПЕНЮК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Хмельницький національний університет

<sup>2</sup>Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КАРБООЗОТОВАНОЇ СТАЛІ ХВГ

*У статті розроблена технологія карбоазотування в плазмі тліючого розряду в безводневих середовищах, однією з переваг якої є керованість технологічними параметрами процесу з метою досягнення оптимальних фізико-механічних властивостей зміцнених матеріалів і, як наслідок, підвищення їх експлуатаційних характеристик.*

**Ключові слова:** карбоазотування, безводнє азотування в тліючому розряді (БАТР), сталь ХВГ, зносостійкість.

**Вступ.** У техніці широко застосовуються деталі машин й інструмент, які працюють в умовах інтенсивного зношування. Підвищення їх ресурсу дозволить в значній мірі скоротити витрати на експлуатацію, ремонт і відновлення, що дасть значний економічний ефект. Відомі на сьогодні технології вимагають подальшої фінішної обробки деталей та інструменту, вимагають витрат значних енергетичних ресурсів і є екологічно шкідливими як для обслуговуючого персоналу, так і для оточуючого середовища [1]. Запропонована технологія карбоазотування в тліючому розряді значно зменшує енерговитрати, а також є екологічно чистою, дозволяє прогнозувати експлуатаційні властивості оброблюваних об'єктів.

Розробка теоретичних основ процесу карбоазотування в тліючому розряді з використанням положень фізики електричного розряду в газі, дослідження впливу окремих факторів процесу: складу газового середовища, температури, міжелектродного потенціалу, густини струму та напруги на головні параметри процесу дає можливість на цій базі створення моделі керування технологією карбоазотування з наперед заданими експлуатаційними характеристиками зміцненого шару [2].

Результати досліджень впроваджені в виробництво можуть бути використані в металообробці, авіабудуванні, деревообробці, сільгоспмашинобудуванні, виробництві твердих сплавів, автомобілебудуванні, інших загальних та спеціальних галузях машинобудування, інструментальному виробництві (ріжучий інструмент, штампи, прес-ливарні форми тощо) де виникає потреба в покращенні властивостей металевих виробів.

Прогнозні припущення щодо розвитку об'єкта досліджень – подальше вивчення впливу параметрів технології зміцнення поверхні на довговічність конструктивних елементів машин при різних умовах експлуатації.

**Мета роботи** – розробка теоретичних основ фізики низькотемпературних газорозрядних технологій в тліючому розряді та обґрунтування технологічних положень застосування сумісної карбонітридної обробки металевих об'єктів для суттєвого підвищення їх ресурсу при економії матеріальних, трудових та енергетичних ресурсів.

**Методика проведення досліджень.** Дослідження процесу карбоазотування в тліючому розряді проводилися на експериментальній установці, яка забезпечує зміцнення як зразків так і промислових деталей діаметром до 400 мм і довжиною до 1000 мм.

Розрядна камера виготовлена із нержавіючої сталі з подвійними стінками і водяним охолодженням. Завантаження камери проводиться через верхню прийму, при піднятій і відведеній в сторону кришці. Для спостереження за процесом зміцнення в камері передбачено два вікна (одне з них використовується для встановлення пірометричного датчика температури АПР – 3).

В початковий момент після завантаження камери насос НВПР – 16 – 066 відкачує камеру до тиску 1,33 Па, потім її продувають азотом. Після відкачування на електроди подається висока напруга і на протязі деякого часу проводиться іонна очистка деталей. Після виходу на напругу 1200 В і закінчення мікродугових розрядів, що свідчить про достатній рівень очищення, включають систему подачі газу і виходять на необхідний режим роботи. В сталому режимі необхідне розрідження в камері підтримується насосом 2НВП – 5ДМ.

Система приготування робочої суміші забезпечує безперервну подачу газової суміші в певному процентному відношенні. Робоча суміш повинна бути очищена від механічних домішок, кисню і вологи. Для очищення від механічних домішок служать фільтри. Задане процентне відношення в суміші забезпечує вузол дозування, очищення від кисню проводиться в нагрітому до температури 500 °С кисневому очиснику, від вологи – здійснюють цеолітові уловлювачі.

Кожний режим карбоазотування складався з циклу операцій: підготовчі операції до зміцнення (очистка камери і деталей від іржі, окалин, знежирення поверхонь) та проведення процесу зміцнення (створення вакууму в камері  $10^{-2}$  мм рт. ст., продувка камери робочою сумішшю, відкачування суміші, очищення деталей при напрузі 1200 В, запуск робочої суміші, проведення основного режиму при встановлених значеннях тиску і температури).

Випробування на зносостійкість проводились на установці торцевого тертя. Схема установки, форма і розміри зразків наведені в роботі [3]. Параметри досліджень на зносостійкість: середовище – масло Індустріальне 20, швидкість ковзання  $V = 1,24$  м/с, питома навантаження  $p = 4$  МПа.

Для дослідження впливу технологічних параметрів процесу карбоазотування на зносостійкість застосовувався план Хартлі другого порядку [4]. Дослідження проводились на зразках із сталі ХВГ, зміцнених методом карбоазотування в тліючому розряді.

Товщина карбоазотованого шару визначалась металографічним методом за допомогою мікроскопа МИМ 10 та шляхом вимірювання мікротвердості по глибині зміцненого зразка.

**Результати дослідження та їх обговорення** З метою визначення оптимальної кількості пропану в насичуючому середовищі і тиску в розрядній камері проведено ряд технологічних режимів зміцнення сталі ХВГ. Технологічні параметри процесу утворення карбідного шару в тліючому розряді: температура процесу  $T = 580$  °С, тривалість зміцнення  $\tau = 4$  год, тиск в камері  $P$  змінювався від 67 Па до 333 Па, вміст пропану в насичуючому середовищі в об'ємній частці від 3 % до 15 % (надалі в тексті буде використано скорочений запис складу газової суміші, наприклад, 15 %  $C_3H_8$ ). Газова суміш  $Ar + C_3H_8$ .

У процесі досліджень зразків із сталі ХВГ отримані залежності поверхневої мікротвердості карбідного шару від технологічних параметрів процесу зміцнення – тиску в розрядній камері та вмісту пропану.

Попередні дослідження впливу вмісту пропану в середовищі і тиску в розрядній камері показали, що для сталі ХВГ існує оптимальне значення вмісту пропану в насичуючому середовищі (від 8 % до 10 %) та тиску в розрядній ка-

мері близько 200 Па при яких поверхнева мікротвердість буде максимальною. При збільшенні вмісту пропану в насичуючому середовищі поверхня зразків покривається сажею, що ускладнює проникнення насичуючих газів в поверхню металу і утворенню зміцненого шару.

З метою виявлення впливу варіанту технологічного процесу карбоазотування на фізико-механічні характеристики сталі ХВГ проведено три варіанти технологічного процесу зміцнення цих сталей:

1) насичення вуглецем ( $\tau = 120$  хв, середовище – 88 % Ar + 12 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) + насичення азотом ( $\tau = 120$  хв, середовище – 25 % Ar + 75 % N<sub>2</sub>);

2) насичення азотом ( $\tau = 120$  хв, середовище – 25 % Ar + 75 % N<sub>2</sub>) + насичення вуглецем ( $\tau = 120$  хв, середовище – 88 % Ar + 12 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>);

3) сумісне насичення поверхні азотом і вуглецем ( $\tau = 240$  хв, середовище – 88 % (Ar + N<sub>2</sub>) + 12 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>).

Температура процесу та тиск в розрядній камері у всіх трьох варіантах технологічного процесу зміцнення залишалися незмінними.

Як показали проведені дослідження, варіант технологічного процесу зміцнення значно впливає на фізико-механічні характеристики зміцненого шару. У всіх трьох варіантах технологічного процесу зміцнений шар складається із поверхневої карбонітридної зони та дифузійної зони внутрішнього азотування, але властивості цих зон при різних варіантах технологічного процесу різні. Так, при зміцненні сталей по першому режиму ( $\tau = 120$  хв, середовище ( 88 % Ar + 12 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>);  $\tau = 120$  хв, середовище ( 25 % Ar + 75 % N<sub>2</sub>), T = 580 оС, p = 266 Па) товщина карбонітридної зони максимальна, а зона внутрішнього азотування має невелику товщину. Це пояснюється тим, що створений на поверхні сталі карбонітридний шар на першому етапі обробки виконує функцію екранування поверхні від проникнення в поверхневий шар металу іонів азоту.

При зміцненні по другому режиму (  $\tau = 120$  хв, середовище (25 % Ar + 75 % N<sub>2</sub>);  $\tau = 120$  хв, середовище ( 88 % Ar + 12 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), T = 580 °С, p = 266 Па ) як карбонітридна зона, так і зона внутрішнього азотування мають найбільшу товщину, але при такому зміцненні в дифузійній зоні утворюються карбонітридні включення у вигляді сітки, які значно знижують пластичність шару і при динамічних навантаженнях являються центрами зародження мікротріщин.

Найбільш оптимальним варіантом карбоазотування в тліючому розряді є одночасне насичення поверхні металу азотом і вуглецем. При цьому на поверхні сталі утворюється композиційний шар, який складається із зовнішньої карбонітридної зони і розвинутої дифузійної зони без виділення по межах зерен  $\epsilon$  – фази, що підвищує опір абразивному і адгезійному зношуванню, а також корозійній втомі. Товщина карбонітридної зони і зони внутрішнього азотування, і як наслідок, товщина всього зміцненого шару при одночасному насиченні поверхневого шару азотом і вуглецем мають меншу товщину ніж при поетапному зміцненні, але характеризуються більш якісними фізико-механічними характеристиками (поверхневою твердістю, пластичністю) та більш плавним зниженням твердості по товщині шару. Тому при карбоазотуванні в тліючому розряді варіант одночасного насичення поверхні сталей азотом і вуглецем прийнято за основний.

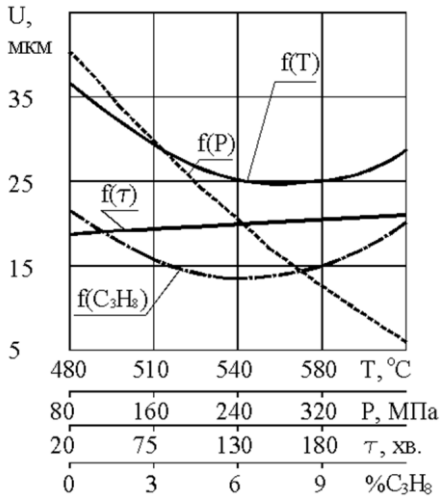


Рис. 1. Залежність зношування сталі ХВГ від технологічних параметрів карбоазотування в тліючому розряді

На рис. 1 показані залежність зносу зразків із сталі ХВГ, від параметрів технологічного процесу карбоазотування в тліючому розряді ( $T$  – температура,  $P$  – тиск,  $C_3H_8$  – вміст пропану в суміші, % об.) Із графіків видно, що режим зміцнення неоднозначно впливає на процес зносу як по величині так і по характеру. Такі залежності показують не тільки ступінь впливу того чи іншого технологічного параметру на трибологічну характеристику поверхні зміцненого металу, але і дозволяють оптимізувати технологічний процес карбоазотування по даній характеристиці з врахуванням реальних умов досліджень та марки матеріалу. Так, для сталі ХВГ найвища зносостійкість в умовах проведених досліджень зафіксовано

при карбоазотуванні в тліючому розряді по режиму:  $T = 540^\circ\text{C}$ ,  $p = 240 \text{ Па}$ ,  $\tau = 20 \text{ хв}$ , кількість пропану в насичуючому середовищі – 6 %  $C_3H_8$ .

Дослідження показали, що зносостійкість карбоазотованих зразків по деяких режимах значно вища порівняно із азотованими зразками. Це пояснюється тим, що при зміцненні методом карбоазотування в тліючому розряді по різних технологічних режимах на поверхні зразків утворюються шари із різним фазовим складом, твердістю, пластичністю та іншими фізико-механічними властивостями. При оптимальному їх співвідношенню для даних умов зношування отримуємо мінімальну інтенсивність зношування пари тертя як в період припрацювання, так і в період нормального зношування. По мірі утворення вторинних структур (ВС), які екранують поверхню тертя, інтенсивність зношення зменшується і після завершення їх утворення стає мінімальною, яка є характерною для періоду нормального зношування.

Вторинні структури представляють собою нову фазу, яка спонтанно утворюється при терті в результаті взаємодії поверхневих шарів твердих тіл, мастильних матеріалів та газового середовища. Вторинним структурам характерні фрикційні властивості та властивості міцності, які нормалізують тертя та знос. Тонкі плівки вторинних структур відрізняються від вихідних матеріалів складом, структурою, властивостями. Формування ВС – це термодинамічний акт пасивації активованих тертям поверхневих шарів твердих тіл.

Вторинні структури, які утворюються в процесі тертя, захищають вихідний матеріал від механічної і фізико-хімічної деструкції. Зовнішні механічні чинники, що діють на поверхні тертя, призводять до руйнування екрануючої фази, але в той же час ці чинники і спряжені процеси переносу речовини із середовища забезпечують її регенерацію. В діапазоні нормального тертя процеси утворення і руйнування плівок ВС знаходяться в динамічній рівновазі і автоматично регулюються.

Наведені результати комплексних досліджень впливу основних технологічних факторів на зносостійкість сталі ХВГ (рис. 1) із застосуванням планування експериментів (план Хартлі) дозволяють визначити оптимальні технологічні режими карбоазотування в тліючому розряді для забезпечення максимальної зно-

состійкості досліджуваних сталей [5]. Такими режимами для сталі ХВГ є: температура карбоазотування від 540 °С до 580 °С, тиск – 400 Па, тривалість насичення – 20 хв, вміст пропану – 6 %.

Аналіз отриманих залежностей показує, що підвищена твердість матеріалу не завжди позитивно впливає на його зносостійкість. Значення технологічних параметрів процесу зміцнення, які забезпечують максимальну мікротвердість поверхні та товщину зміцненого шару не завжди співпадає із значеннями технологічних параметрів процесу по критерію максимальної зносостійкості. Величина зносу поверхонь тертя залежить не тільки від технологічних параметрів процесу, але і від експлуатаційних умов (тиску на поверхні тертя, швидкості ковзання і середовища). Тому з метою підвищення зносостійкості пар тертя для різних матеріалів і режимів карбоазотування в тліючому розряді необхідно знаходити не тільки оптимальні значення технологічних параметрів процесу, але і оптимальні експлуатаційні умови тертя.

### Висновки

1. Розроблена технологія карбоазотування в плазмі тліючого розряду в безводневих середовищах, однією з переваг якої є керованість технологічними параметрами процесу з метою досягнення оптимальних фізико-механічних властивостей зміцнених матеріалів і, як наслідок, підвищення їх експлуатаційних характеристик.
2. Експериментально доведено залежність твердості, товщини шару, структури, фазового складу карбоазотованого шару від основних параметрів технологічного процесу і на основі цих залежностей знайдені оптимальні режими зміцнення для конструкційної сталі ХВГ за критерієм максимальної зносостійкості.
3. Проведені дослідження зносостійкості зразків із сталі ХВГ зміцнених методом карбоазотування в тліючому розряді із застосуванням математичних методів планування експериментів (план Хартлі). Параметри технологічного процесу зміцнення (температура, тиск, склад насичуючого середовища, тривалість процесу) впливають на зносостійкість в широких межах і дозволяють оптимізувати процес за критерієм максимальної зносостійкості: температура карбоазотування від 540 С до 580°С, тиск – 400 Па, тривалість насичення – 20 хв, вміст пропану – 6 %, об.

### Список літератури

1. Каплун В. Г. Ионное азотирование в безводородных средах: монография / В. Г. Каплун, П. В. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 315 с.
2. 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, P. 527–536.
3. Стечишина Н.М. Вплив технологічних параметрів карбоазотування на зносостійкість сталі 45 / Н.М. Стечишина, В.В. Люховець, М.С. Стечишин // Проблеми тертя та зношування. – К.: НАУ, 2019, №3(84). – С.76-82.
4. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
5. Стечишин М.С. Фізико-хімічні властивості карбоазотованої сталі 40Х / М.С. Стечишин, В.П. Олександренко, М.В. Лук'янюк, А.В. Мартинюк, М.М. Лук'янюк, М.Я. Довжик, В.О. Герасименко // ФХММ: Львів. – 2019. – Т.56. - №6. - С.104-109.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2020.

**Стечишин Мирослав Степанович** – д-р техн. наук, професор кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, [mmezoon@ukr.net](mailto:mmezoon@ukr.net)

**Лук'янюк Микола Миколайович** – здобувач, кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, [adm\\_mv@ukr.net](mailto:adm_mv@ukr.net).

**Стечишина Надія Мирославівна** – здобувач, кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, [n.stechyshyna@gmail.com](mailto:n.stechyshyna@gmail.com).

**Курской Володимир Сергійович** – канд. техн. наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії Хмельницького національного університету, vk702713@gmail.com.

**Михайло Іванович Цепенюк** - канд. техн. наук, доцент, кафедра технічної механіки та сільськогосподарських машин, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, tsepenyuk@bigmir.net.

*M. S. STECHYSHYN, M. M. LUK'YANYUK, N. M. STECHYSHYNA, V. S. KURSKOI, M. I. TSEPENYUK*

### WEAR RESISTANCE OF CARBOZATED STEEL HVG

The article develops the technology of carbon nitriding in the glow discharge plasma in anhydrous media, one of the advantages of which is the control of technological process parameters in order to achieve optimal physical and mechanical properties of reinforced materials and, consequently, improve their performance.

This work is a continuation of research conducted at the Podolsk Scientific Physics and Technology Center at Khmelnytsky National University: development of fundamentally new provisions for the theory of diffusion gas discharge processes of metal surface modification, which are based on the priority of energy approaches. From such positions, the theoretical foundations of the studied technologies have not been considered by any of the previous researchers, but such approaches open up completely new opportunities to reveal the subtle mechanism of phenomena that occur in the implementation of processes of this type, and then - to develop practical aspects of technology.

The dependence of the hardness, layer thickness, structure, phase composition of the carbozated layer on the main parameters of the technological process is experimentally proved and on the basis of these dependences the optimal modes of hardening for structural HVG steel are found. Investigations of wear resistance of HVG steel samples strengthened by the method of carbon nitriding in a glow discharge with the use of mathematical methods of experimental planning are carried out. The parameters of the technological process of hardening (temperature, pressure, composition of the saturating medium, the duration of the process) affect the wear resistance in a wide range and allow to optimize the process by the criterion of maximum wear resistance. As a result of optimization of the process of anhydrous carbon nitriding in the glow discharge plasma, technological modes of the saturation process were found, which provide maximum wear resistance of structural HVG steel: carbon nitriding temperature from 540 C to 580 ° C, pressure 400 Pa, saturation duration 20 min, propane content 6% about.

**Key words:** carbon nitriding, anhydrous nitriding in the glow discharge (BATR), HVG steel, wear resistance.

### References

1. Kaplun V. G. Ionnoe azotirovanie v bezvodnorodnyh sredah : monografija / V. G. Kaplun, P. V. Kaplun. – Hmel'nic'kij : HNU, 2015. – 315 s.
2. 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, P. 527–536.
3. Stechyshyna N.M. Vplyv tekhnolohichnykh parametriv karboazotuvannia na znosostiikist stali 45 / N.M. Stechyshyna, V.V. Liukhovets, M.S. Stechyshyn // Problemy tertia ta znoshuvannia. – K.: NAU, 2019, №3(84). – S.76-82.
4. Krasovskij G.I. Planirovanie jeksperimenta / G.I. Krasovskij, G.F. Filaretov. –Minsk : Izd-vo BGU, 1982. – 302 s.
5. Stechyshyn M.S. Fizyko-khimichni vlastyvoli karboazotovanoi stali 40Kh / M.S. Stechyshyn, V.P. Oleksandrenko, M.V. Luk'ianiuk, A.V. Martyniuk, M.M. Lukianiuk, M.Ia. Dovzhyk, V.O. Herasymenko // FKhMM: Lviv. – 2019. – T.56. - №6. - S.104-109.