

## **Секція: НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МЕХАНІЗМІВ І МАШИН**

**УДК 620.178.15/179.119**

**Павло Булах, к.т.н.; Володимир Швець, к.т.н.; Анатолій Рутковський, к.т.н.; Володимир Данилюк, к.т.н.; Євген Кондряков, к.т.н.; Андрій Котляренко, к.т.н.**  
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, Україна

### **ОЦІНКА ВПЛИВУ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРУБЧАТИХ ЗРАЗКІВ ІЗ СТАЛІ 40ХН2МА**

Анотація. Приведено результати досліджень щодо оцінки впливу різних режимів обробки за технологією іонно-плазмового азотування на підвищення зносо- та корозійної стійкості зразків трубчастих елементів конструкції виготовлених із сталі 40ХН2МА, що працюють в умовах динамічного, термоциклічного навантаження та впливу навколишнього середовища.

Ключові слова: однорідність, модифікований шар, іонно-плазмово азотування, корозійна стійкість, зносостійкість, твердість, метод LM-твердості.

**Pavlo Bulakh, Ph.D.; Volodymyr Svhets, Ph.D.; Anatolii Rutkovskiy, Ph.D.; Volodymyr Danylyuk, Ph.D.; Ievgen Kondryakov, Ph.D.; Andrii Kotliarenko, Ph.D.**

### **ASSESSING THE EFFECT OF ION-PLASMA THERMOCYCLIC NITRIDATION ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF TUBULAR SAMPLES MADE FROM 40KH2MA STEEL**

Abstract. The results of studies on the assessment of the impact of different treatment regimes using ion-plasma nitriding technology on the enhancement of wear and corrosion resistance of samples of tubular structural elements made of 40KH2MA steel, which operate under conditions of dynamic, thermocyclic loading, and environmental exposure, are presented.

Keywords: homogeneity, modified layer, ion-plasma nitriding, corrosion resistance, wear resistance, hardness, LM-hardness method.

Особливі екстремальні умови експлуатації вузлів та агрегатів різної техніки призводять до зменшення строку їх надійної експлуатації, тому в теперішній час продовжують розвиватись методи підвищення їх міцності, зокрема, шляхом зміцнення поверхневого шару з використанням новітніх методів модифікування поверхні матеріалу, що за рахунок дифузійних процесів дозволяють формувати необхідні зміни властивостей матеріалу у глиб від поверхні деталі на зазначену відстань.

Для зміни механічних властивостей поверхневого шару металу елементів конструкцій в Інституті проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України була розроблена технологія іонного-плазмового термоциклічного азотування (ІПТА) [1, 2], яка має ряд основних переваг порівняно з відомими методами азотування, а саме: висока якість зміцненого модифікованого поверхневого шару і відсутність деформації деталі після застосування процесу; прискорення загальної тривалості процедури обробки і, як наслідок, зниження енерговитрат.

В представленому дослідженні вирішується задача підвищення зносо- та корозійної стійкості зразків трубчастих елементів конструкції виготовлених із сталі 40ХН2МА ( $D=28$  мм,  $\delta=10$  мм) (рис.1), що працюють в умовах динамічного і термоциклічного навантаження, а також додаткового впливу навколишнього середовища. Під дією представлених вище умов роботи, елементи конструкції змінюють свої робочі характеристики, що може призвести до зниження строку їх експлуатації.



Рисунок 1 –Трубчатий зразок, оброблений за технологією ПТА.

У роботі проведено серію досліджень з оцінки впливу різних режимів обробки ПТА на експлуатаційні характеристики (їх зміна) та технічний стан трубчастих зразків з метою досягнення оптимальних експлуатаційних властивостей.

Оцінку проводили за допомогою розроблених експериментальних методик та унікального експериментального обладнання.

Для оцінки впливу технології ПТА на корозійну стійкість зразків було розроблено конструкцію та виготовлено кліматичну камеру, що дає можливість відтворити необхідну експозицію соляного туману і умови, що відповідають стандарту ДСТУ ISO 9227:2015 [3] (рис. 2). Для проведення випробувань на зносостійкість спроектовано та виготовлено спеціальне устаткування для кріплення трубчастих зразків на газово-повітряному стенді ПК80М [4].

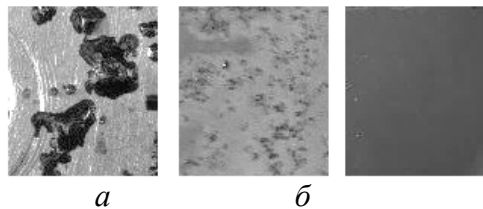


Рисунок 2 – Приклади зразків без обробки (а) та оброблених за різними режимами технології ПТА (б, в) після випробувань за ДСТУ ISO 9227:2015.

Висновки щодо контролю металу зразків, як у вихідному стані, так і після кожного режиму обробки ПТА проводили на основі комплексний підходу, що включає металографічний аналіз та розроблений і стандартизований в Інституті метод ЛМ-твердості, де за параметр, який відображає ступінь розсіювання характеристик металу, прийнято коефіцієнт гомогенності металу  $m$  [5, 6]:

$$m = 0,4343 \times d(n) \times \left[ \frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

де  $d(n)$  – параметр, який визначають залежно від кількості  $n$  вимірювань;  $H_i$  - значення твердості за  $i$ -м вимірюванням;  $\overline{\lg H}$  – середнє значення логарифма твердості за результатами  $n$  вимірювань.

Контроль твердості здійснювався по тридцяти вимірах на поверхні зразків. За значення твердості брали середнє арифметичне значення.

Оскільки стабільність одержуваних при масових випробуваннях характеристик твердості значною мірою залежить від однорідності структури металу, то контроль можна проводити за параметрами розсіювання зазначених характеристик. Чим більша неоднорідність структури матеріалу, тим більше розсіювання вимірюваних параметрів. Великим значенням коефіцієнта гомогенності відповідає низький рівень розсіювання характеристик фізико-механічних властивостей і краще впорядкування структури. Розраховані значення коефіцієнтів гомогенності приведені в таблиці нижче.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів гомогенності після різних режимів іонно-плазмового термоциклічного азотування.

	Режим ПТА–1	Режим ПТА–2	Режим ПТА–3
Твердість, HRC	34,3	47,2	36,2
Коефіцієнт гомогенності, $m$	72,5	120,1	83,3

Зіставляючи значення коефіцієнтів гомогенності Вейбулла після окремих технологічних операцій можна оцінити якість обробки металу по всій поверхні зразка. На рис. 3 наведено гістограми зміни твердості та гомогенності матеріалу зразків при різних режимах азотування.

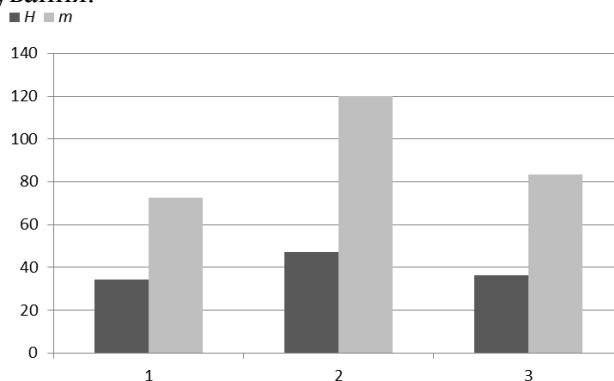


Рисунок 3 – Зміна твердості та гомогенності матеріалу зразків при різних режимах ПТА: 1 - ПТА-1; 2 - ПТА-2; 3 – ПТА-3.

Як бачимо, з представлених результатів (рис. 3), для контролю якості термічної та хіміко-термічної обробки матеріалу виробу така фізико-механічна характеристика, як твердість, є слабчутливою до структурних перетворень в металі. Більш показовим за інформативністю та достовірністю може бути параметр розсіювання значень твердості (коефіцієнт гомогенності), одержаних за результатами масових вимірів в однакових умовах. Найбільш однорідним виявився поверхневий шар, оброблений за режимом ПТА-3. Даний режим азотування підвищує однорідність поверхневого шару більш ніж в 1,5 рази, що підвищить міцність та ресурс досліджуваних виробів, що підтверджують і металографічні дослідження.

Таким чином, на основі проведених комплексних досліджень, проведено оптимізацію параметрів обробки ПТА трубчастого зразка із сталі 40ХН2МА, що дозволяє підвищити його стійкість до корозії, термодинамічного навантаження та зменшити розсіяння пошкоджень і, як наслідок, покращити експлуатаційні характеристики та збільшити довговічність конструкції.

### Перелік посилань

1. Б.А. Ляшенко, А.В. Рутковский О достоинствах технологии вакуумного азотирования. Оборудование и инструмент. 2005. № 12. С. 20 - 21.
2. Ляшенко Б. А., Рутковский А. В., Мирненко В. И., Радько О. В. Газотермоциклическое ионное азотирование в импульсном режиме поверхностных слоёв стальных деталей газотурбинных двигателей. Проблемы динамики і міцності в газотурбобудуванні: матер. 3-ї міжнар. наук. - техн. конф. (29 - 31 трав. 2007 р., НАН України, Ін-т пробл. Міцності, м. Київ). Київ, НАН України, Ін-т пробл. міцності. 2007. С. 121 - 122.
3. ДСТУ ISO 9227:2015 Випробування на корозію в штучних атмосферах. Випробування соляним туманом (ISO 9227:2012, IDT)
4. Kondryakov, E. O., V. E. Danylyuk, and V. V. Kharchenko. "Fracture Energy Characteristics of High-Strength Steels Penetrated with Armor-Piercing Strikers at Velocities Up to 1000 m/s." *Strength of Materials* (2023): 1-9
5. ДСТУ 7793-15 Матеріали металеві. Визначення рівня розсіяних пошкоджень методом ЛМ-твердості. К.: ДП «Укр. НДНЦ», 2016. 16 с.
6. О. М. Maslo, Р. О. Bulakh, V. P. Shvets, and A. A. Kotlyarenko, "Application of the LM-Hardness method to assess the current material state of structural elements", *Strength Mater.*, vol. 54, pp. 30–640, Nov. 2022.