

Б.А. Ляшенко, д.т.н., проф.

А.В. Рутковський, к.т.н.

О.Ю. Кумуржі, м.н.с.

*Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України*

В.С. Антонюк, д.т.н., проф.

Д.О. Качинський, магістрант

В.С. Томащук, магістрант

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»*

## ЗАСТОСУВАННЯ ЙОННО-ПЛАЗМОВОГО ТЕРМОЦИКЛІЧНОГО АЗОТУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ВИСОКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

*Наведено результати йонно-плазмового термоциклічного азотування при формуванні зміцненої поверхні високолегованої сталі, які дозволили збільшити твердість робочої поверхні до 9–12 ГПа, порівняно з традиційними методами; підвищити продуктивність процесу в 3–5 разів та сформувати поверхневий нітридний шар без мікротріщин. Отримані дані про зносостійкість зміцнених шарів в умовах абразивного зношування показали ефективність застосування методу для поверхневого зміцнення високолегованих сталей.*

**Ключові слова:** високолеговані сталі; поверхня; зносостійкість; йонно-плазмове термоциклічне азотування; нітридний шар.

**Вступ. Постановка проблеми.** Підвищення надійності елементів машин і механізмів є основним завданням збільшення ресурсу їх роботи. Якість і надійність деталей вузлів тертя ефективно забезпечується як застосуванням захисних покриттів, так і формуванням зміцнених поверхневих шарів, товщина яких вимірюється від часток мікрметрів до декількох міліметрів.

Одним з напрямків вирішення завдання підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей з високолегованих сталей є використання досягнень в області зміцнення поверхні, що забезпечуються новітніми енергозберігаючими та екологічно безпечними технологіями, що допомагають вирішувати питання модифікації поверхні на етапах створення, експлуатації та ремонту конструкційних елементів обладнання [1].

Застосування дифузійного зміцнення поверхневих шарів, високоякісними технологіями дозволяє забезпечити зміцнення деталей з високолегованих конструкційних сталей. Однак традиційні технології йонно-плазмового азотування мають ряд істотних недоліків: високі питомі потужності споживання електроенергії, а також відносно тривалий цикл процесу [2].

Однією з технологій, що відповідають сучасним вимогам, є йонно-плазмове термоциклічне азотування (ІПТА). Йонно-плазмове термоциклічне азотування – ефективний метод зміцнюючої хіміко-термічної обробки деталей у вакуумі з високолегованих конструкційних сталей, нержавіючих сталей, титанових сплавів.

На відміну від традиційного вакуумного азотування, запропонована технологія ІПТА використовує газові середовища, в яких відсутній аміак, виключена воднева крихкість поверхні, технологія дозволяє зміцнювати необхідні ділянки деталей [1, 3].

**Мета роботи:** вивчення впливу методу йонно-плазмового термоциклічного азотування на робочі поверхні високолегованих сталей.

**Викладення основного матеріалу.** В Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України розроблено метод поверхневого зміцнення деталей йонно-плазмовим термоциклічним азотуванням, що заснований на теорії термічної втоми, аномального масопереносу за механічного навантаження та ефекту дискретного енерговведення.

Метод має такі переваги:

– використовується нагрівання лише поверхневого шару деталі без прогріву її серцевини. Нагрівання відбувається за рахунок енергії тліючого розряду, тому немає необхідності використовувати термічні печі;

– циклічне нагрівання та охолодження деталі викликають термічні напруження в поверхневому шарі, що в 2–3 рази прискорює дифузійні процеси і, відповідно, скорочується час азотування;

- форма і розміри деталі, чистота їх поверхні залишаються без змін, тому відпадає необхідність фінішної механічної обробки;
- дозволяє обробляти поверхні деталей як простих, так і складних форм;
- скорочення тривалості обробки, циклічний характер швидкісного, дискретного енерговідведення і нагрівання лише поверхневого шару скорочують витрати електроенергії до 10 разів;
- метод є екологічно чистим, оскільки в процесі обробки не застосовуються небезпечні для здоров'я людини і навколишнього середовища речовини.

Для реалізації методу йонно-плазмового термоциклічного азотування в Інституті проблем міцності ім. Г.С Писаренко НАН України створено принципово нове устаткування [3] – універсальна установка «ВПА-1», що призначена для модифікації поверхні конструкційних, інструментальних, нержавіючих сталей (рис. 1).

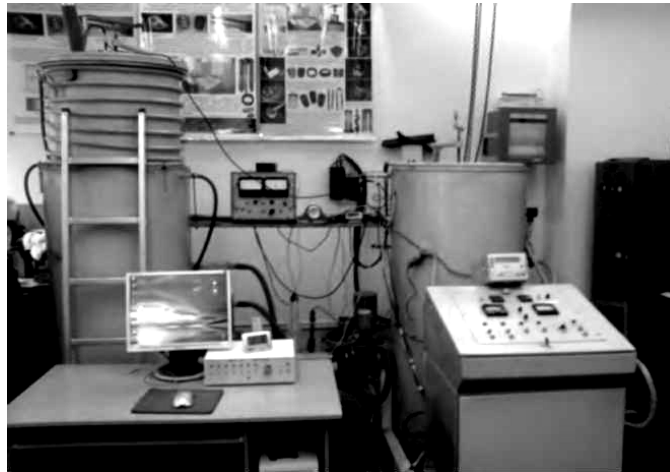


Рис. 1. Загальний вигляд установки «ВПА-1»

Метод ПТА заснований на зміні напружено-деформованого стану поверхні (постійному накопиченні від циклу до циклу позитивних змін в структурі металів за рахунок впливу імпульсів короткої тривалості та великої амплітуди) й реалізується за допомогою вакуумної установки «ВПА-1».

В основі запропонованої технології лежить процес, пов'язаний з дискретним введенням енергії, виникненням і релаксацією напружень в оброблюваному матеріалі, накопиченням дефектів кристалічної будови, за рахунок чого істотно збільшується кінетика дифузії, що призводить до її аномального протікання. Внаслідок цього створюються умови для перерозподілу компонентів у твердому розчині, подрібнення фаз, а, отже, для підвищення твердості, міцності та ударної в'язкості.

Для експериментальних досліджень використовували зразки, виготовлені зі сталей 40Х13 і 12Х18Н9Т розмірами 30х30 мм і товщиною 10 мм. Азотування зразків проводили в суміші газів азоту і аргону (у співвідношенні 20–80 %) за двома технологічними методами: ізотермічним і термоциклічним.

Режими обробки: робочий тиск –  $P = 25 \div 150$  Па; температура процесу –  $T = 550$  °С (при ізотермічному режимі) і  $T = 550 \pm 25$  °С,  $T = 550 \pm 50$  °С,  $T = 550 \pm 100$  °С (при термоциклічному режимі), термін азотування –  $t = 50 \div 360$  хв. Охолодження зразків проводили в камері при тиску  $P = 1,5 - 2,0$  Па.

Реалізація розробленого методу ПТА досягається за допомогою сформованих імпульсів струму, що здійснюють дискретне введення енергії. Таке технологічне рішення дозволяє скоротити час нагрівання деталі і час процесу дифузійного насичення поверхні.

Експериментально визначено, що застосування термоциклічного режиму є більш ефективним, порівняно з ізотермічним (рис. 2).

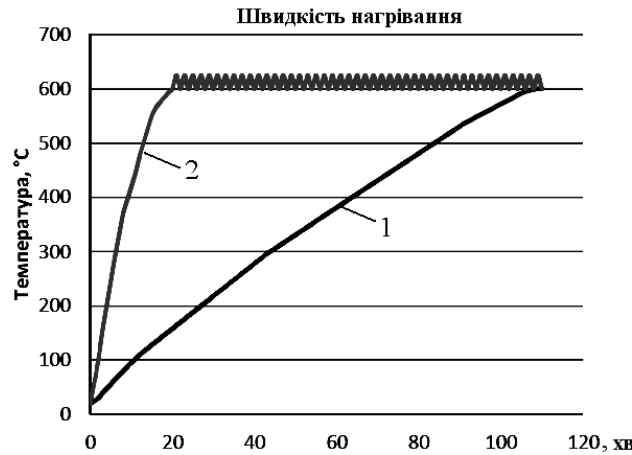


Рис. 2. Залежність швидкості нагрівання зразків методом йонно-плазмового термічного азотування при ізотермічному (1) і імпульсному (2) режимах

На рисунку 3 представлено сумарні значення мікронапружень, що виникають в шарі матеріалу сталі 40X13 залежно від температури процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування.

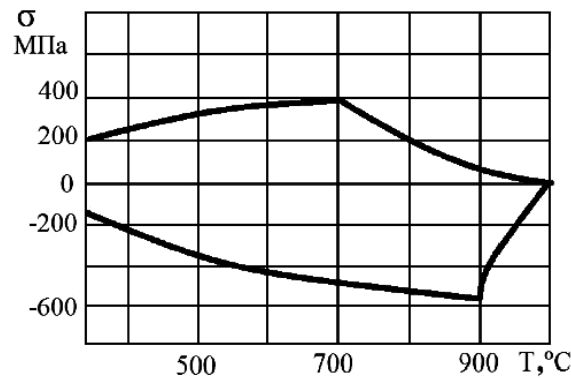


Рис. 3. Діаграма накопичення напружень в основі матеріалу сталі 40X13 залежно від температури процесу йонно-плазмового термоциклічного азотування

Експериментальні дослідження зразків зі сталі 12X18H9T показали, що максимальної твердості поверхневого шару можна досягти при йонно-плазмовому термоциклічному азотуванні в режимі з циклічністю обробки  $\pm 50$  °C (рис. 4).

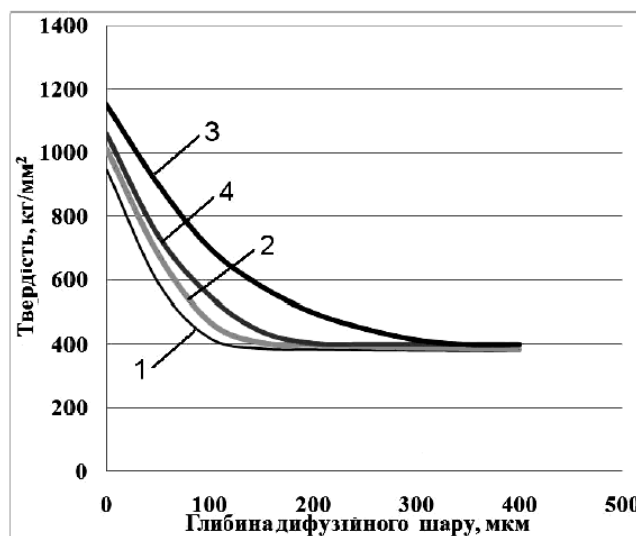


Рис. 4. Вплив протяжності циклів на глибину дифузійного шару: 1 – при ізотермічній обробці; 2 – при циклюванні  $\pm 25$  °C; 3 – при циклюванні  $\pm 50$  °C; 4 – при циклюванні  $\pm 100$  °C

Вимірювання мікротвердості за глибиною шару зразків, що виготовлені зі сталі 12X18H9T, виконували з навантаженням 100 м. Дослідження азотованого шару після травлення мікрошліфів показало, що колір цієї фази неоднорідний і змінюється у напрямку від поверхні до основи, що вказує на різний її склад. В азотованому шарі присутня дифузійна зона, що відрізняється рівномірністю (рис. 5).

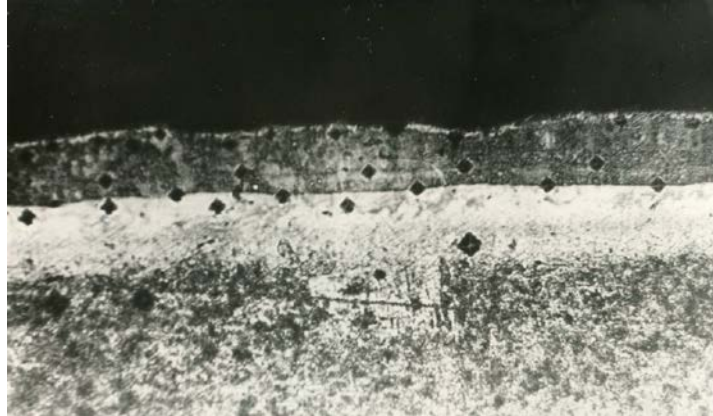


Рис. 5. Азотований шар зразка зі сталі 12X18H9T після травлення

Вивчення мікроструктури зразків зі сталі 12X18H9T, оброблених з режимами при температурі  $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тиску в камері  $P = 80\text{ Па}$  і тривалості процесу йонно-плазмового термічного азотування  $t = 50\text{ год}$ . показало (рис. 5), що загальна глибина азотованого шару становить 9–12 мкм, при цьому шар відрізняється високою щільністю і відсутністю мікротріщин

Розподіл мікротвердості зразка зі сталі 12X18H9T по глибині азотованого шару показав, що мікротвердість змінюється у напрямку від поверхні шару сірої фази до основи. Все це обумовлено дифузійними процесами на кордоні з основою, дифузією заліза і легуючих елементів (рис. 6).

При обробці з більш низькою температурою збільшується тривалість процесу і виникає нерівномірність азотованого шару. При цьому товщини зон азотованого шару становила для сірої фази 18–25 мкм, а для нітридної зони – 3–4 мкм.

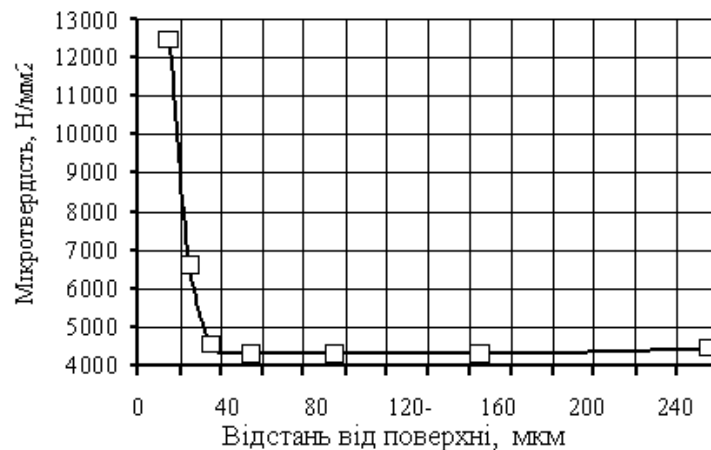


Рис. 6. Розподіл мікротвердості по глибині азотованого шару зразка зі сталі 12X18H9T, обробленого з режимом:  $T = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $P = 80\text{ Па}$ ;  $t = 50\text{ хв}$ .

Для оцінки ефективності методу йонно-плазмового термоциклічного азотування проведено порівняльні випробування на зносостійкість зразків оброблених в ізотермічному і термоциклічному режимах.

Випробування покриттів на зносостійкість проводили на експериментальній установці відповідно до ГОСТ 23.208-79. Процес тертя моделювався в присутності вільного нежорстко закріпленого абразиву [4].

Зразки зношувалися вільним абразивом – кварцовим піском ( $\text{SiO}_2$ ) зернистістю 200–250 мкм, вологість якого не перевищувала 0,16 %. Знос зразків заміряли ваговим методом на аналітичних вагах АДВ-200 з точністю до 0,0001 г. До і після випробувань зразки промивали в етиловому спирті, просушували і зважували. Експеримент проводили за швидкості ковзання  $V = 0,158$  м/с, навантаженні  $P = 20$  кг (при плечі  $L = 272$  мм) та шляху тертя  $S = 100$  м.

В результаті експериментальних досліджень (рис. 7) встановлено, що найбільша інтенсивність зносу спостерігалася у зразка без зміцнення. Встановлено, що при ізотермічному режимі азотування підвищує зносостійкість сталі 40X13 в піску в 2 рази, а обробка за методом ПТА підвищує зносостійкість сталі 40X13 у 3,5 рази, порівняно з необробленими зразками.

Проведені випробування показали перспективність йонно-плазмового термоциклічного азотування для підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів з високолегованих сталей, що працюють в умовах абразивного зношування.

**Висновки.** Застосування методу йонно-плазмового термоциклічного азотування дозволяє формувати поверхневий нітридний шар зі специфічними фізико-механічними і експлуатаційними властивостями без мікротріщин. При цьому підвищена зносостійкість зміцнених шарів в умовах абразивного зношування свідчить про перспективність застосування методу йонно-плазмового термоциклічного азотування для поверхневого зміцнення деталей машин і механізмів, з метою підвищення їх триботехнічних характеристик в різних абразивних середовищах.

#### Список використаної літератури:

1. Гаркунов Д.Н. Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов / Д.Н. Гаркунов, А.А. Поляков. – М. : Машиностроение, 1973. – 200 с.
2. Лахтин Ю.М. Азотирование сталей / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.
3. Рутковський А.В. Циклічна довговічність титанового сплаву ВТ1-0 з покриттям, отриманим методом йонно-плазмового термоциклічного азотування (ПТА) / А.В. Рутковський, О.Ю. Кумуржі, Я.В. Можеїтов // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – № 2 (32), т. 1. – С. 208–213.
4. Рутковський А.В. Износостойкость стали 40X13 после упрочнения методом термоциклического ионно-плазменного азотирования в условиях абразивного изнашивания / А.В. Рутковский, А.Ю. Кумуржи // Проблемы тертя та зношування. – 2012. – № 57. – С. 240–250.

АНТОНЮК Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

– інженерія поверхні.

E-mail: [vp@kpi.ua](mailto:vp@kpi.ua)

ЛЯШЕНКО Борис Артемович – доктор технічних наук, професор, завідувач лабораторії Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

– методи розрахунку та дослідження напружено-деформованого стану;

– механіка композитних матеріалів.

E-mail: [coating@ipp.kiev.ua](mailto:coating@ipp.kiev.ua)

РУТКОВСЬКИЙ Анатолій Віталійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

– зміцнення поверхні елементів конструкцій.

КУМУРЖІ Олександр Юрієвич – молодший науковий співробітник Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка Національної академії наук України.

Наукові інтереси:

– модифікування та зміцнення поверхневих шарів.

E-mail: [RutkovskyAV@nas.gov.ua](mailto:RutkovskyAV@nas.gov.ua)

КАЧИНСЬКИЙ Денис Олегович – магістрант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

– інженерія поверхні.

E-mail: [vp@kpi.ua](mailto:vp@kpi.ua)

ТОМАЦУК Віталій Станіславович – магістрант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».

– інженерія поверхні.

E-mail: [vp@kpi.ua](mailto:vp@kpi.ua)

Стаття надійшла до редакції 19.10.2015.