

¹Б. А. Ляшенко, д-р. техн. наук, проф.,
²В. І. Мірненко, д-р. техн. наук, старш. наук. співроб.,
³Є. К. Солових, канд. техн. наук, проф.,
²О. В. Радько, старш. викл.

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ АЗОТУ В ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ СТАЛІ 30ХГСА ПІСЛЯ ІОННОГО АЗОТУВАННЯ НА ЇЇ ТРИБОТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

²Національна академія оборони України

³Кіровоградський державний технічний університет

Досліджено хімічний склад та триботехнічні характеристики сталі 30ХГСА, зміцненої імпульсним газотермоциклічним іонним азотуванням. Виявлено наявність оптимального з огляду на мінімальні інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя діапазону поверхневої концентрації азоту, який становить 6,3–7,8 % (залежно від умов роботи трибоз'єднання). Установлено зменшення коефіцієнта тертя й інтенсивності зношування у 1,5–1,9 та 1,7–2,1 разу відповідно.

Вступ. Підвищення триботехнічних характеристик авіаційних матеріалів через керування їх структурно-фазовим та хімічним складом за рахунок застосування захисних зносостійких покриттів – пріоритетний напрям у сучасному авіавиробництві. Традиційні методи зміцнення, такі як хіміко-термічна обробка, не забезпечують належної якості деталей, отже потрібно застосовувати передові технології поверхневого зміцнення, зокрема з використанням концентрованих потоків енергії. Однією з таких технологій є іонне азотування (ІА), яке динамічно розвивається як в дослідницькому, так і в промисловому напрямках. Удосконалений варіант ІА – імпульсне газотермоциклічне ІА (ГТЦ ІА) [1] – завдяки поєднанню переваг використання пульсуючого струму та газотермічних циклів насичення поверхневих шарів деталей азотом дозволяє значно скоротити час дифузійного насичення, витрати електроенергії, реакційних газів, підвищити якість обробки деталей з одночасним підвищенням їх триботехнічних характеристик.

Проте широке застосування імпульсного ГТЦ ІА стримується недостатнім вивченням закономірностей впливу структурно-фазового й хімічного складу, напруженого стану і механічних властивостей іонно-азотованих шарів на їх триботехнічні характеристики.

Постановка завдання. Мета роботи – дослідження впливу поверхневої концентрації азоту в іонно-азотованих шарах сталі 30ХГСА на їх триботехнічні характеристики.

Методика досліджень. Дифузійне насичення азотом зразків розміром $5 \times 5 \times 10$ мм з авіаційної сталі 30ХГСА проводили за допомогою установки ВПА-1 [2] за шістьнадцятьма режимами ГТЦ ІА. Параметри технологічного процесу варіювали у таких межах: тиск реакційного газу $p = 50\text{--}250$ Па; температура процесу $T = 400; 500; 600$ °С; склад реакційного газу – $95\%N_2 + 5\% C_3H_8; 90\%N_2 + 5\%C_3H_8 + 5\%Ar; 80\%N_2 + 5\%C_3H_8 + 15\%Ar$; час обробки $t = 1,5\text{--}4$ год. Одну частину зразків зміцнювали без попередньої термічної обробки (ТО), другу – з попередньою ТО (гартування за температури $870\text{--}890^\circ\text{C}$ в оливі, відпускання за $510\text{--}570$ °С, твердість 37–38 HRC).

Хімічний склад поверхонь зразків визначали за допомогою растрового електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА-101А (за методикою кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу) та оже-мікрозонда марки «JEOL» JAMP-10S (оже-спектроскопія).

Триботехнічні характеристики іонно-азотованих шарів визначали на машині тертя [3] за таких умов: мастильне середовище – мастило ЦІАТИМ-201; питоме навантаження $P = 2,5\text{--}25$ МПа; швидкість ковзання $V = 0,4; 0,7; 1,0; 1,3$ м/с. Зміцнені зразки притискали до термооброблених роликів-контртіл діаметром 40 мм зі сталі 30ХГСА (режим ТО – гартування за температури $870\text{--}890^\circ\text{C}$ в оливі, відпускання зв $510\text{--}570$ °С, твердість 37–38 HRC). Контакт пари тертя відбувався за схемою «диск–колодка».

Для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів у таких умовах розраховували вагову інтенсивність зношування I як відношення вагового зношування, що сталося на шляху тертя 1000 м, до площі контакту. Величину вагового зношування визначали як різницю маси зразка до та після трибовипробувань. Зважування проводили на лабораторних аналітичних терезах ВЛР-200. Перед зважуванням зразки промивали бензином Б-70 та просушували.

Результати досліджень. У результаті дослідження хімічного складу зміцнених імпульсним ГТЦ ІА сталевих зразків встановлено наявність та рівномірний розподіл на їхній поверхні таких хімічних елементів: С, N, Fe, Si, Cr та Mn. Концентрації азоту та вуглецю становили масових часток 5,95–8,25 та 0,38–2,01 %

відповідно (залежно від параметрів імпульсного ГТЦ ІА).

Пошаровий рентгеноспектральний аналіз показав (рис. 1), що концентрація вуглецю на поверхні становить близько 2 % (у масових частках) та зменшується до мінімальних значень на глибині порядку 10–12 мкм, що пояснює утворення у нітридній зоні карбонітридної ε -фази (гексагонального карбонітриду $\text{Fe}_{2-3}(\text{NC})$) за рахунок інтенсивної дифузії вуглецю від основи до поверхні. Концентрація ж азоту на глибині 10 мкм сягає значення 8 %, що відповідає ε -фазі, далі вона зменшується до значень відповідно γ' -фази (гранецентрованого нітриду Fe_4N) та α -твердого розчину.

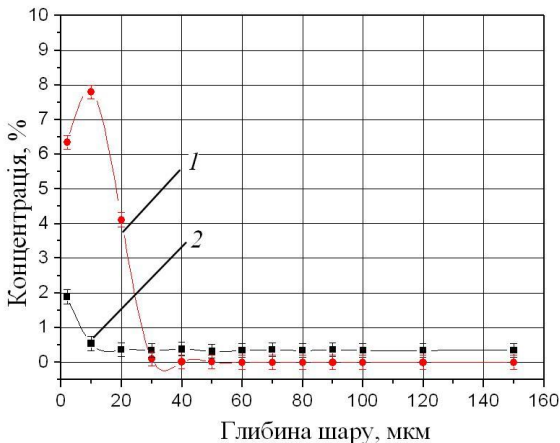


Рис. 1. Концентраційний розподіл азоту (1) та вуглецю (2) у приповерхневих шарах зразка, зміцненого ГТЦ ІА (90% N_2 + 5% C_3H_8 + 5% Ar ; $T = 500^\circ\text{C}$; $P = 125$ Па; $t = 3$ год)

Змінюючи параметри технологічного процесу імпульсного ГТЦ ІА та вихідний стан матеріалу, можна створювати будь-який профіль легування та фазовий склад дифузійної зони.

Порівняльні дослідження трибологічної поведінки сформованих зносостійких поверхневих шарів виявили (рис. 2, 3), що характер залежностей інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя від питомого навантаження за різних швидкостей ковзання та параметрів технологічного процесу в зміцнених ГТЦ ІА зразків (з попередньою ТО і без неї) та у термооброблених зразків (без зміцнення ГТЦ ІА) подібний. Такий вигляд залежностей добре узгоджується із сучасними загальноприйнятими поглядами на закономірності процесів тертя та зношування.

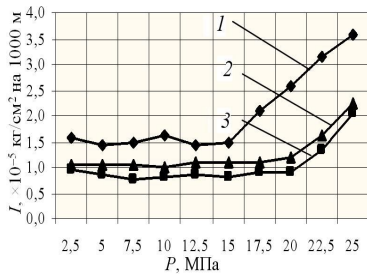


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування I сталі 30ХГСА від питомого навантаження P за швидкості ковзання $V = 1,0$ м/с: 1 – ТО (гартування за 870°C в оливі, відпускання за 550 °С); 2 – ГТЦ ІА (95%N₂ + 5%С₃Н₈; $T = 600^\circ\text{C}$; $P = 200$ Па; $t = 2,5$ год); 3 – ТО + ГТЦ ІА

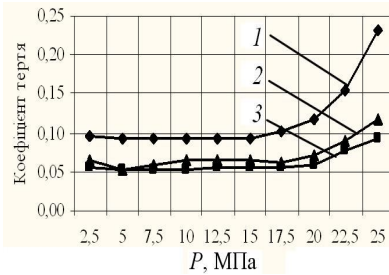


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тертя сталі 30ХГСА від питомого навантаження P за швидкості ковзання $V = 1,0$ м/с: 1 – ТО (гартування за температури 870 °С у оливі, відпускання за 550 °С); 2 – ГТЦ ІА (95%N₂ + 5%С₃Н₈; $T = 600^\circ\text{C}$; $P = 200$ Па; $t = 2,5$ год); 3 – ТО + ГТЦ ІА

Однак, ці залежності мають і суттєві відмінності.

По-перше, підвищене зношування у термооброблених зразків без зміцнення імпульсним ГТЦ ІА розпочинається вже за значень питомого навантаження 13–14 МПа, тоді як у зміцнених імпульсним ГТЦ ІА – за 18–19 МПа. Таким чином, збільшується зона сталості зносостійкості, що зумовлює до розширення діапазону нормальної роботи деталей з підвищенням питомих навантажень.

По-друге, з аналізу кривих видно, що за однакових значень питомих навантажень та швидкостей ковзання інтенсивність зношування зміцнених імпульсним ГТЦ ІА зразків за своїм абсолютним значенням у 1,7–2,1 а коефіцієнт тертя у 1,5–1,9 разу менші, ніж у термооброблених. З аналізу цих кривих видно, що найкращі триботехнічні характеристики мають поверхневі шари, зміцнені ГТЦ ІА після попередньої ТО. Таким чином, можна зробити висновок, що попередня ТО позитивно впливає на антифрикційні властивості матеріалу.

Зношування контртіла у парі із зміцненими зразками порівняно із його зносом під час роботи з просто термообробленими незначно підвищувалося, що зумовлено незмінною мікротвердістю контртіла за одночасного підвищення мікротвердості зміцнених зразків. Проте таке підвищення зношування контртіла було на порядок меншим, ніж зниження зношування зміцнених зразків, отже, на сумарний знос пари тертя суттєвого впливу воно не мало.

Дослідженнями залежності інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя від концентрації азоту на поверхні зміцнених зразків встановлено, що існує діапазон концентрації, за якого трибологічні характеристики мають мінімальні значення (рис. 4–6). Як видно з наведених графіків діапазон оптимальної за триботехнічними критеріями концентрації азоту перебуває у межах 6,3–7,8 % (залежно від режимів роботи сформованих поверхонь).

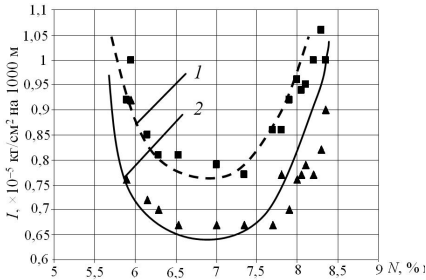


Рис. 4. Залежність інтенсивності зношування зразків після ГТЦ ІА + ТО від концентрації азоту за $P = 5$ МПа: 1 – $V = 1,0$ м/с; 2 – $V = 0,7$ м/с

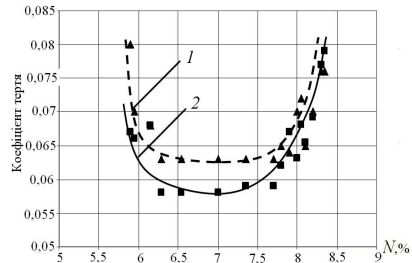


Рис. 5. Залежність коефіцієнта тертя зразків, зміцнених ГТЦ ІА з попередньою ТО від концентрації азоту, якщо $V = 0,4$ м/с: 1 – $P = 20$ МПа; 2 – $P = 10$ МПа

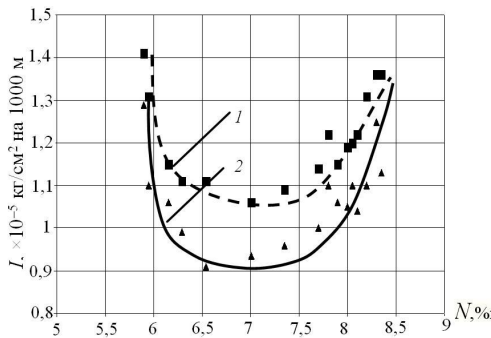


Рис. 6. Залежність інтенсивності зношування зразків, зміцнених ГТЦ ІА з попередньою ТО від концентрації азоту, якщо $V = 0,4$ м/с: 1 – $P = 20$ МПа; 2 – $P = 10$ МПа

Математично графіки залежностей такого вигляду можуть бути апроксимованими рівнянням квадратичного тричлена:

$$I(C_{\text{grain}}^N) = A_1 (C_{\text{grain}}^N)^2 + B_1 C_{\text{grain}}^N + C_1$$

$$\mu(C_{grain}^N) = A_{\mu}(C_{grain}^N)^2 + B_{\mu}C_{grain}^N + C_{\mu},$$

де C_{grain}^N – концентрація азоту на поверхні зміцнених сталевих зразків; A_I, B_I, C_I – коефіцієнти залежності інтенсивності зношування $I(C_{grain}^N)$ зразків, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА, від концентрації азоту на їх поверхні; $A_{\mu}, B_{\mu}, C_{\mu}$ – коефіцієнти залежності коефіцієнта тертя $\mu(C_{grain}^N)$ зразків, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА, від концентрації азоту на їх поверхні.

Діапазон концентрації азоту саме у таких межах можна пояснити тим, що за такої концентрації азоту поверхневі нітридні шари пар тертя складаються переважно з ϵ -фази, близької до своєї нижньої межі розчинності азоту. Така структура ϵ -фази дозволяє виключити її крихкість, пороутворення та наявність у шарі крихкого нітриду Fe_2N (ϵ -фаза є більш пластичною, але менш твердою, ніж грацецентрований нітрид Fe_4N). За вказаної концентрації твердість зміцненого шару наближується до твердості γ' -фази з одночасним збереженням пластичності ϵ -фази, створюючи, таким чином, оптимальні структурні передумови для підвищення зносостійкості деталей.

Висновки:

1. Показано, що у поверхневих шарах зміцнених імпульсним ГТЦ ІА зразків зі сталі 30ХГСА збільшується концентрація азоту та вуглецю до 5,95–8,25 та 0,38–2,01 % відповідно (залежно від параметрів імпульсного ГТЦ ІА).

2. Виявлено, що застосування імпульсного ГТЦ ІА забезпечує зменшення інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя сталі 30ХГСА у 1,7–2,1 та 1,5–1,9 разу відповідно порівняно із аналогічними характеристиками після традиційної обробки. Найкращі триботехнічні характеристики мають поверхневі шари після ГТЦ ІА з попередньою ТО.

3. Установлено наявність оптимального за триботехнічними критеріями діапазону поверхневої концентрації азоту у зміцнених поверхневих шарах сталі 30ХГСА. Залежно від режимів роботи сформованих поверхонь діапазон становить (у масових частках) 6,3–7,8 %. Отже, коригуючи хімічний склад трибоелементів завдяки обранню оптимальних режимів іонноазотувальної обробки, можна керувати процесом формування вторинних структур для забезпечення підвищення зносостійкості матеріалу у конкретних умовах

експлуатації. Саме у цьому напрямі доцільно проводить подальші дослідження з оптимізації технологічного процесу імпульсного ГТЦ ІА для підвищення зносостійкості деталей машин і механізмів.

Список літератури

1. *Пат. 10014 Україна*, МПК (2006) С23С 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Б.А.Ляшенко, А.В.Рутковський, В.І.Мірненко, О.В.Радько; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. – № 19782; заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. № 12.
2. *Впровадження технології підвищення питомої потужності авто-тракторних двигунів за рахунок застосування поршнів з теплозахисними покриттями, отриманими за допомогою енергозберігаючої технології вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми: Звіт про НДР (заключний) / Ін-т проблем міцності НАН України. – Інв. № 00574. – К., 2006. – 159 с.*
3. *Пат. 24695 Україна* МПК (2206) G01N3/56. Машина тертя / А.К.Скуратовський; заявник та патентовласник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – № u 2007 02330; заявл. 03.03.2007; Опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10.