

А.К.Скураговський<sup>1</sup>, канд.техн.наук, О.В. Радько<sup>2</sup>, канд.техн. наук, О.А. Корнієнко<sup>2</sup>, канд.техн.наук  
 1 – НТУ України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна;  
 2 – Національний авіаційний університет, м.Київ, Україна

## ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МІКРОТВЕРДІСТЬ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ІОННОАЗОТОВАНИХ СТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

*Исследовано влияние предварительной термообработки на микротвёрдость и износостойкость стали 30ХГСА после упрочнения импульсным газотермоциклическим ионным азотированием. Показано, что твердость и износостойкость стали 30ХГСА, ионноазотированной с предварительной термообработкой, увеличиваются по сравнению с аналогичной сталью, ионноазотированной без предварительной термообработки. Делается вывод о необходимости учёта полученных данных при использовании ионноазотирующей обработки для восстановления и упрочнения деталей машин.*

*The effect of preliminary heat treatment on microhardness and wear resistance of 30ХГСА steel after hardening by pulse gas thermocyclic ion nitriding has been analyzed. It has been proven that hardness and wear resistance of 30ХГСА steel after ion nitriding with preliminary heat treatment increase as compared to similar steel after ion nitriding without preliminary heat treatment. It has been concluded that the results obtained could be used in ion nitriding treatment for restoration and strengthening of machinery.*

### Вступ.

Терміни служби машин і механізмів значною мірою залежать від довговічності вузлів тертя [1]. Довговічність-властивість виробу зберігати працездатність до граничного стану (неможливості його подальшої експлуатації). Довговічність конструкції залежить від умов її роботи. Перш за все це опір зносу при терті і контактна міцність (опір матеріалу поверхневого зносу, що виникає при терті кочення з ковзанням). Крім того, довговічність виробу залежить від межі витривалості, що залежить у свою чергу від стану поверхні і корозійної стійкості матеріалу. Деталі сучасних машин працюють у широкому діапазоні навантажень, швидкостей тертя та температур. Це обумовлює необхідність використання матеріалів зі складним комплексом фізико-механічних властивостей, які досягаються за рахунок створення нових та удосконалення існуючих технологій поверхневого зміцнення. Конструктори при виборі матеріалу для будь-якої конструкції або виробу не можуть враховувати тільки один або два будь-які критерії, що характеризують властивості матеріалу, їм необхідно знати його конструктивну міцність тобто, певний комплекс механічних властивостей, що забезпечує тривалу і надійну роботу матеріалу в умовах його експлуатації. Вважається, що як мінімум потрібно враховувати чотири критерії: жорсткість конструкції, міцність матеріалу, надійність і довговічність матеріалу в умовах роботи даної конструкції. Технологічні способи нанесення зміцнюючих покриттів [2] дозволяють суттєво підвищити довговічність деталей [3]. При цьому зменшуються витрати енергетичних і матеріальних ресурсів. Саме тому машинобудівні підприємства проявляють великий інтерес до нових технологій поверхневого зміцнення деталей.

Одним з найбільш перспективних методів поверхневого зміцнення є іонне азотування (ІА) [4], зокрема його удосконалений варіант – газотермоциклічне ІА (ГТЦ ІА) у пульсуючому режимі [5], при якому, завдяки поєднанню переваг використання пульсуючого струму та газотермічних циклів насичення поверхневих шарів сталевих деталей азотом, значно скорочується час дифузійного насичення, витрати електроенергії, реакційних газів, підвищується безпека та якість обробки деталей.

Аналіз досліджень і публікацій щодо використання імпульсного ГТЦ ІА для зміцнення і відновлення деталей машин [6–7] свідчить про те що, незважаючи на переваги методу, застосування його на теперішній час обмежене через недостатню кількість інформації стосовно впливу різних параметрів технологічного процесу на характеристики оброблених матеріалів. Зокрема, майже відсутні відомості щодо впливу попередньої термообробки сталевих матеріалів на мікротвердість та зносостійкість поверхневих шарів при їх зміцненні імпульсним ГТЦ ІА.

### Постановка задачі.

Метою даної роботи є дослідження впливу попередньої термічної обробки на мікротвердість та зносостійкість поверхневих шарів високоякісної конструкційної легованої сталі 30ХГСА, зміцненої імпульсним ГТЦ ІА. На сьогоднішній день сталь 30ХГСА може ефективно замінювати марки 35ХМ, 40ХН і 35ХГСА. Досить високі технічні характеристики сталі 30ХГСА дозволяють виготовляти із неї вали, осі, зубчасті колеса, корпуси обшивки, а також лопатки компресорних машин, які функціонують при температурах до 200°С. Слід зазначити, що вироби зі сталі 30ХГСА можуть ефективно працювати при значокмінних навантаженнях і низьких температурах.

Хімічний склад в % матеріала 30ХГСА

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.28 - 0.34	0.9 - 1.2	0.8 - 1.1	до 0.3	до 0.025	до 0.025	0.8 - 1.1	до 0.3

## Температура критичних точок матеріала 30ХГСА

$$Ac_1 = 760, \quad Ac_3(Ac_m) = 830, \quad Ar_3(Arc_m) = 705, \quad Ar_1 = 670, \quad Mn = 352$$

Механічні властивості при  $T=20^\circ\text{C}$  матеріала 30ХГСА

Сортамент	Розмір	Напр.	$s_b$	$s_T$	$d_5$	$y$	KCU	Термообр.
-	мм	-	МПа	МПа	%	%	кДж/м <sup>2</sup>	-
Пруток	Æ 25		1080	830	10	45	490	Загартування 880°C, олива, відпуск 540°C, вода,
Лист відпал.			500-750		14			

## Фізичні властивості матеріала 30ХГСА

T	$E \cdot 10^{-5}$	$\alpha \cdot 10^6$	$\lambda$	$\rho$	C	$R \cdot 10^9$
Град	МПа	1/Град	Вт/(м·град)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·град)	Ом·м
20	2.15		38	7850		210
100	2.11	11.7	38	7830	496	
200	2.03	12.3	37	7800	504	
300	1.96	12.9	37	7760	512	
400	1.84	13.4	36	7730	533	
500	1.73	13.7	34	7700	554	
600	1.64	14	33	7670	584	
700	1.43	14.3	31		622	
800	1.25	12.9	30		693	
T	$E \cdot 10^{-5}$	$\alpha \cdot 10^6$	$\lambda$	$\rho$	C	$R \cdot 10^9$

## Методика досліджень.

Поверхнєве зміцнення зразків розміром  $5 \times 5 \times 10$  мм зі сталі 30ХГСА здійснювалося на установці ВПА-1 [8] за наступними режимами ГТЦ ІА: тиск реакційного газу  $p = 50 \dots 250$  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  $t = 1,5 \dots 4$  годин. Одна частина зразків зміцнювалася без попереднього термооброблення (ТО), інша – з попередньою термообробленими за стандартною технологією (гартування при  $870 \dots 890^\circ\text{C}$  у оливі, відпускання при  $510 \dots 570^\circ\text{C}$ , твердість  $37 \dots 38$  HRC).

МікродюрOMETричні дослідження проводилися на металографічних шліфах згідно з ГОСТ 9450-76 за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М. Кут між протилежними гранями алмазної пірамідки складав  $136^\circ$ , навантаження –  $0,98$  Н, час витримування під навантаженням –  $20$  с, крок вимірювання по товщині зразка –  $30 \dots 40$  мкм.

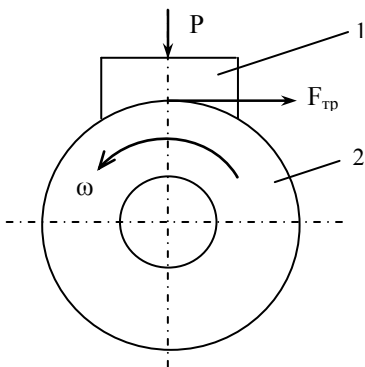


Рис. 1. Схема контакту пари тертя «диск-колодка»: 1 – зразок; 2 – ролик-контртіло

Триботехнічні характеристики іонноазотованих шарів визначалися на машині тертя [9] за наступних умов: мастильне середовище – мастило ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74); питоме навантаження  $P = 2,5 \dots 25$  МПа; швидкість ковзання  $V = 0,4; 0,7; 1,0; 1,3$  м/с. Зміцнені зразки притискалися до термооброблених роликів-контртіл діаметром  $40$  мм зі сталі 30ХГСА (режим термооброблення – гартування при  $870 \dots 890^\circ\text{C}$  у оливі, відпускання при  $510 \dots 570^\circ\text{C}$ , твердість  $37 \dots 38$  HRC). Контакт пари тертя відбувався за схемою «диск-колодка» (Рис.1). Для цього робочі поверхні зразків виконувалися у формі угнутого циліндра діаметром  $40$  мм.

Шорсткість поверхонь зразків залежно від режиму обробки становила  $R_a = 0,29 \dots 0,41$  мкм, а роликів-контртіл –  $R_a = 0,53$  мкм.

Для порівняльної оцінки зносостійкості матеріалів у вказаних умовах розраховували вагову інтенсивність зношування  $K_V$  як відношення вагового зношування, що відбулося на шляху тертя  $1000$  м, до площі контакту. Величина вагового зношування визначалася як різниця у вазі зразка до та після трибовипробувань. Зважування проводилося на лабораторних аналітичних терезах ВЛР-200. Перед зважуванням зразки промивали бензином Б-70 (ГОСТ 1012-72) та просушували.

## Результати досліджень та їх обговорення.

Дослідження мікротвердості зміцнених імпульсним ГТЦ ІА поверхневих шарів з попередньою термообробкою виявили зростання її значень на поверхні і в глибину зміцненого шару до границі переходу дифузійного шару у вихідну матрицю матеріалу (на глибині близько  $300$  мкм), що на  $20\%$  більше ніж у зразків,

## Результати досліджень та їх обговорення.

Дослідження мікротвердості зміцнених імпульсним ГТЦ ІА поверхневих шарів з попередньою термообробкою виявили зростання її значень до  $1050$  МПа на поверхні і в глибину зміцненого шару до границі переходу

дифузійного шару у вихідну матрицю матеріалу (на глибині близько 300 мкм), що на 20% більше ніж у зразків, оброблених імпульсним ГТЦ ІА без попередньої ТО (Рис. 2). Для легованих сталей, представником яких є 30ХГСА, таке підвищення мікротвердості можна пояснити утворенням твердих нітридів нітридоутворюючими елементами у процесі азотування [10]. В результаті аналізу результатів проведених мікродюрOMETРИЧНИХ досліджень можна зробити висновок, що структурно-фазові перетворення, які відбуваються у матеріалі під час попередньої термообробки, створюють оптимальні передумови для наступного проникнення в поверхневі шари досліджуваної сталі іонів азоту під час зміцнення імпульсним ГТЦ ІА. Таким чином, відбувається формування більш твердої, а отже і більш зносостійкої іонноазотованої дифузійної зони, яка, у свою чергу, складається з двох зон: нітридної зони та зони внутрішнього азотування.

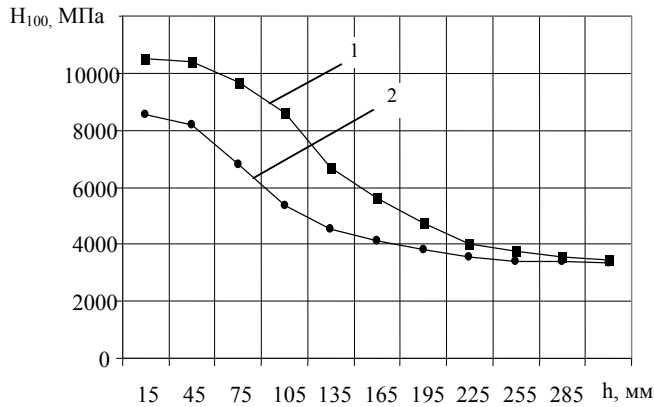


Рис. 2. Зміна мікротвердості по товщині азотованого шару: 1 – ТО + ГТЦ ІА (80%N<sub>2</sub>+5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub>+ 5%Ar; T=600°C; P=175 Па; t=2,5 год); 2 – ГТЦ ІА (80%N<sub>2</sub>+5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub>+5%Ar; T=600°C; P=175 Па; t=2,5 год)

Основною складовою нітридної зони є ε-фаза (гексагональний карбонітрид Fe<sub>2</sub>з(NC)), яка розташована безпосередньо на поверхні. Далі, у глибину, розташована γ' - фаза (гранецентрований нітрид Fe<sub>4</sub>N), яка має чисто нітридний характер через слабку розчинність у цій фазі вуглецю. Зона внутрішнього азотування складається з α - твердого розчину (об'ємноцентрований азотистий ферит), який спостерігається аж до виходу на матрицю. В деяких випадках у приповерхневих шарах спостерігаються стовбчасті виділення карбонітридних фаз, причому більша їх кількість спостерігається у зразків, що пройшли попередню термообробку.

Цікавим є той факт, що як для зразків, зміцнених з попередньою термообробкою, так і для зміцнених без неї існують деякі діапазони температури азотування та тиску реакційного газу вакуумній камері, за яких мікротвердість поверхневих шарів сягає

своїх максимальних значень, причому межі цих діапазонів є аналогічними для обох варіантів обробки: для температури цей діапазон знаходиться у межах 530...570 °С, для тиску реакційного газу – у межах 190...220 Па.

Зі збільшенням часу дифузійного насичення мікротвердість поверхневого шару в обох випадках зменшується, причому більш інтенсивно – після 2 годин обробки. Необхідно зазначити, що після 4 годин дифузія азоту у метал в обох випадках майже припиняється, тому проведення процесу імпульсного ГТЦ ІА більше цього часу є економічно недоцільним.

Стосовно впливу на мікротвердість складу реакційного газу встановлено, що максимальних значень як для зразків, зміцнених з попередньою термообробкою, так і для зміцнених без неї, вона набуває за умови використання наступної суміші 90%N<sub>2</sub> + 5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub> + 5%Ar, а мінімальних – за використання суміші, яка складається з 80%N<sub>2</sub> + 5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub> + 15%Ar.

Дослідження товщини іонноазотованого шару від технологічних параметрів імпульсного ГТЦ ІА показали відсутність діапазонів по температурі азотування та по тиску реакційного газу, аналогічних тим, які мали місце на кривих залежностей поверхневої мікротвердості від цих параметрів, для обох варіантів обробки. Товщина дифузійного шару майже параболічно зростає зі збільшенням температури азотування (збільшується коефіцієнт дифузії та енергія іонів азоту, що дозволяє їм проникати на більшу глибину), часу насичення та тиску реакційного газу у вакуумній камері, причому своїх максимальних значень вона досягає за наступного складу робочої суміші: 90%N<sub>2</sub> + 5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub> + 5%Ar.

Результати досліджень трибологічних властивостей іонноазотованих поверхневих шарів сталі 30ХГСА представлені на Рис. 3.

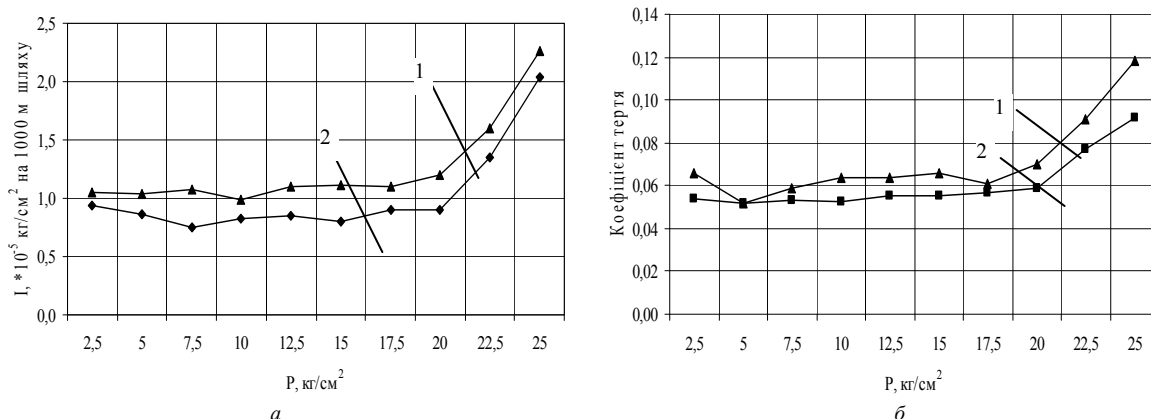


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування (а) та коефіцієнта тертя (б) зразків від питомого навантаження P при швидкості ковзання V = 1,0 м/с: 1 – ГТЦ ІА (95%N<sub>2</sub>+ 5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub>; T = 600°C; p = 200 Па; t = 2,5 год); 2 – ТО + ГТЦ ІА (95%N<sub>2</sub>+5%С<sub>3</sub>Н<sub>8</sub>; T = 600°C; p = 200 Па; t = 2,5 год)

З аналізу отриманих кривих встановлено, що: по-перше, підвищене зношування у зразків зміцнених імпульсним ГТЦ ІА з попередньою термообробкою розпочинається за значень питомого навантаження порядку 18...19 МПа, тоді як у зміцнених без попередньої термообробки – при 16...17 МПа; таким чином, відбувається збільшення зони сталостійкості, що призводить до розширення діапазону нормальної роботи деталей при підвищенні питомих навантажень; по-друге, інтенсивність зношування зразків, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА з попередньою термообробкою в 1,2...1,25, а коефіцієнт тертя в 1,15...1,2 рази менші, ніж у зразків, зміцнених без попередньої термообробки відповідно. Відомо, що будова та якість нітридного шару впливають на опір зношуванню, а опір механічним навантаженням (статичним, згину, знакозмінним, ударним тощо) визначається структурою зони внутрішнього азотування. Можна зробити припущення, що саме наявність у нітридній зоні попередньо термооброблених зразків більшої кількості  $\epsilon$ -фази, пояснює підвищення їх зносостійкості відносно зносостійкості зразків, зміцнених без попередньої термообробки, адже добре відомим є позитивний вплив високої твердості карбонітриду  $Fe_{2,3}(NC)$  на зносостійкість.

#### **Висновки і перспективи подальших досліджень.**

В результаті порівняльних мікродюретричних та триботехнічних досліджень встановлено, що попередня термообробка поверхневих шарів сталі 30ХГСА перед зміцненням імпульсним ГТЦ ІА:

збільшує поверхневу мікротвердість матеріалу на 20%;

зменшує інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя в 1,2...1,25 та 1,15...1,2 рази відповідно;

розширює зону сталостійкості пари тертя, що, у свою чергу, призводить до розширення діапазону нормальної роботи деталей при підвищенні питомих навантажень.

Завдяки такому впливові попередньої термообробки на триботехнічні властивості поверхневих шарів оброблюваних матеріалів створюються передумови до зростання надійності та довговічності деталей машин та механізмів, відповідного збільшення їх термінів служби та ресурсів і зменшення витрат на обслуговування та ремонт.

Отримані результати необхідно враховувати під час розробки технологічних процесів зміцнення сталевих матеріалів із застосуванням імпульсного ГТЦ ІА.

Подальшою перспективою досліджень у напрямку підвищення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей широкої номенклатури конструкційних матеріалів через застосування сучасних енергозберігаючих технологій зміцнення та відновлення є визначення доцільності проведення термообробки поверхневих шарів після їх зміцнення ГТЦ ІА у пульсуючому режимі.

#### **Список літератури.**

1. Крылов К. А. Долговечность узлов трения самолетов. — М.: Транспорт, 1976. — 184 с.
2. Ляшенко Б.А., Клименко С.А. Тенденция развития упрочняющей поверхностной обработкой и положение в Украине. // Сучасне машинобудування. — 1999. - №1. — С.94-104.
3. Новиков Н.В., Бидный А.А., Ляшенко Б.А. и др. Методы упрочнения поверхностей машиностроительных деталей. — Киев: АН УССР ИСМ.- 1989. — 111 с.
4. Пастух И.М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем розряде: состояние и перспективы // Проблемы трибологии — 2004. — № 3. — С. 42–55.
5. Пат. 10014 Україна, МПК 7 С23С 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді: Ляшенко Б.А., Рутковський А.В., Мірненко В.І, Радько О.В.; Національна академія оборони України. — № 19782; Заявл. 19.09.06; Опубл. 15.12.06, Бюл. № 12 — 5 с.
6. Кудрин А.П., Лабунец В.Ф. Перспективные направления в области поверхностного упрочнения и восстановления деталей авиационной техники // Научноёмкие технологии. — 2002. — № 5. — С. 14–18.
7. Юркевич С.П., Прищепов Е.Г., Прядко А.С., Мышковец В.Н. Исследование свойств металлизации покрытий для восстановления деталей авиатехники из сталей 30ХГСН2А, 30ХГСА // Металлообработка — 2005. — № 5(29). — С. 22–24.
8. Впровадження технології підвищення питомої потужності автотракторних 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 пробл. міцності НАН України. — Інв. № 00574. —К., 2006. — 159 с.
9. Пат. 24695 Україна МПК (2206) G01N3/56. Машина тертя: Скуратовський А.К.; Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". — № у 2007 02330; Заявл. 03.03.2007; Опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10 — 4 с.
10. Формування зносостійких поверхневих шарів газотермоциклічним іонним азотуванням / Б. А. Ляшенко, В. І. Мірненко, А. К. Скуратовський, О. В. Радько // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение. — 2007. — № 5. — С. 139—146.