

УДК 623.746: 629.7.083.003.13 (045)

Б.А. Ляшенко, О.В. Радько,  
А.К. Скуратовський

## **ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСНИХ ПОКАЗНИКІВ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ЧЕРЕЗ ЗАС- ТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХ- НОЛОГІЙ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ**

### **Вступ**

На сьогодні на промислових підприємствах України знаходиться багато різних типів машин і механізмів іноземного та вітчизняного виробництва, які експлуатуються понад 25 років (особливо в авіаційній галузі). Одним із перспективних напрямків вирішення проблеми збільшення ресурсних показників старіючого парку машин є широке використання нових і вдосконалення наявних технологічних методів відновлення та зміцнення робочих поверхонь їх конструкційних елементів.

В сучасних умовах постійного дефіциту енергоносіїв особливої актуальності набуває використання енергозберігаючих технологій поверхневого зміцнення. Однією з таких технологій є газотермоциклічне іонне азотування (ГТЦ ІА) в пульсуючому режимі [1], при якому значно скорочуються час дифузійного насичення, витрати електроенергії, реакційних газів, покращується якість обробки деталей з одночасним підвищенням їх експлуатаційних властивостей. Так, застосування даної технології для деталей із сталі 30ХГСА сприяє підвищенню їх зносостійкості у 1,7–2,1 раза [2]. Проте з аналізу літературних джерел [3, 4] видно практично повну відсутність інформації щодо дослідження впливу поверхневого зміцнення деталей машин за допомогою цього методу на їх ресурсні показники. Такий стан справ не дає змоги вважати оптимальними багато конкретних рішень щодо визначення способів і режимів поверхневого зміцнення та призводить до недостатньо ефективного використання потенційних можливостей підприємств машинобудівної галузі стосовно зменшення витрат на дорогі запасні частини, леговані сталі, кольорові метали та інші дефіцитні матеріали.

### **Постановка задачі**

Метою даної статті є дослідження структурно-фазового складу поверхневих шарів та одно-

го з показників довговічності – середнього технічного ресурсу деталей, зміцнених імпульсним ГТЦ ІА (на прикладі сталі 38Х2МЮА), та надання практичних рекомендацій про доцільність застосування цього методу на машинобудівних підприємствах.

### **Методика поверхневого зміцнення**

Іонноазотуюча обробка здійснювалась на установці ВІПА-1, яка містить у своєму складі автоматизовану систему контролю та керування технологічним процесом [1] за таким режимом: склад реакційної суміші – 90 %N<sub>2</sub> + 5 %C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> + 5 %Ar; температура технологічного процесу – 500–600 °С; тиск реакційної суміші у вакуумній камері – 100–115 Па; тривалість дифузійного насичення – 2,5–3 год.

### **Методика визначення фазового складу зміцнених поверхневих шарів**

Фазовий склад азотованих шарів визначався за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-4-13С із фокусуванням за Брегом–Брентано у Fe-характеристичному випромінюванні. Дифракційні максимуми реєструвались у дискретному режимі з кроком 0,1°, час експозиції в точці становив 2 с. Фотографування зображень структур проводилося за допомогою металографічного мікроскопа Neophot і скануючого електронного мікроскопа-мікроаналізатора РЕММА-101А при напрузі прискорення 30 кВ.

### **Методика дослідження довговічності**

У теорії надійності однією із складових комплексної властивості об'єкта є довговічність, яка визначається як його властивість виконувати потрібні функції до переходу в граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту [5]. Основними показниками довговічності є середній ресурс (гама-відсотковий ресурс) і середній термін служби (гама-відсотковий термін служби).

Для оцінки впливу застосування оптимізованого технологічного процесу імпульсного ГТЦ ІА на довговічність сталевих конструкційних елементів машин проводилося визначення математичного сподівання середнього напрацювання на перехід у граничний стан зміцнених експериментальних зразків із сталі 38Х2МЮА. Дослідження виконувались на машині тертя [6], схему якої показано на рис. 1.

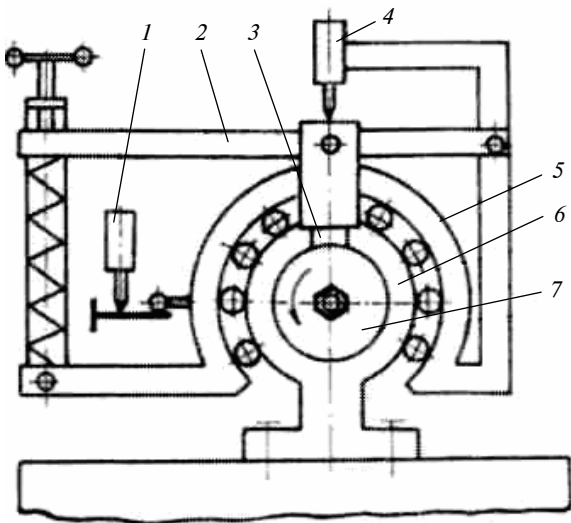


Рис. 1. Схема машини тертя

Машина складається з корпусу 6, всередині якого встановлено основний вал. На зовнішній поверхні корпусу співвісно з валом змонтовано з можливістю коливання каретку 5, на якій закріплено важільну систему навантаження. На рухомому важелі 2 системи навантаження розміщено досліджуваний зразок 3, який притискається протарованою пружиною до зовнішньої циліндричної поверхні контртіла 7, виконаного у вигляді змінного ролика, встановленого на основному валу. Привід здійснюється електродвигуном через клинопасову передачу із змінними шківками. Для зменшення взаємних перекосів робочих поверхонь зразка і контрзразка забезпеченням можливості самоустановки зразка опорну базову поверхню тримача зразка виконано у вигляді клина, ребро якого розміщене перпендикулярно осі обертання. При обертанні контрзразка виникає сила тертя, спрямована на повернення каретки і зразка навколо осі. Це зусилля сприймається динамометричною пружиною, протарованою за величиною сили тертя. Під дією сили тертя на відміну від машини тертя [7], в якій застосовується поперечний супорт і стаціонарний важільний навантажувальний пристрій, вісь зразка не зміщується при повороті каретки відносно лінії дії нормального зусилля. Це дає можливість підвищити точність вимірювання сили тертя за рахунок вилучення складової від вектора сили притискування зразка, оскільки при цьому до сили тертя не додається складова від вектора сили притиснення зразка, яка залежить від кута повороту каретки під дією сили тертя. Сила тертя і сумарний лінійний знос зразка і

контртіла безперервно вимірюються та реєструються за допомогою індуктивних датчиків переміщень 1 і 4 моделі 234-М та електронної вимірювальної системи моделі 217 (виробництво заводу "Калібр").

Для скорочення тривалості експерименту вибрано жорсткі умови: питоме навантаження становило 25 МПа, швидкість ковзання – 0,4 м/с, мастильне середовище – мастило ЦИАТИМ-201. За критерій переходу досліджуваних зразків до граничного стану було обрано досягнення величини їх зносу 0,2 мм. Отже, напрацювання зразка  $\tau_c$  на перехід у граничний стан визначався як час від початку його роботи до досягнення зносу зразка 0,2 мм. Таку величину максимально припустимого зносу було взято виходячи із встановлених у технічній документації припустимих значень цього параметра на прикладі реальних конструкційних елементів авіаційної техніки. Величина зносу вимірювалась через кожні 10 хв роботи машини тертя. Знос визначався як відношення різниці у вазі зразка перед випробуваннями та після них до добутку густини сталі 38Х2МЮА ( $\rho = 7710 \text{ кг/м}^3$ ) на площу контакту зразка з контртілом. Розміри зміцнених за наведеною вище технологією зразків становили  $5 \times 5 \times 10 \text{ мм}$ . Термооброблені ролики-контртіла з цієї ж сталі мали зовнішній діаметр 40 мм (режим термообробки: гартування  $T = 930\text{--}950 \text{ }^\circ\text{C}$  в оливі, відпуск  $T = 600\text{--}675 \text{ }^\circ\text{C}$ , твердість 35–37 HRC). Зважування проводилось на лабораторних аналітичних терезах ВЛР-200. Перед ним зразки промивались бензином Б-70 та просушувались. Контакт пари тертя відбувався за схемою "диск-колодка". Для цього робочі поверхні зразків виконувались у формі вгнутого циліндра діаметром 40 мм (рис. 2). Шорсткість поверхонь зразків залежно від режиму обробки становила  $R_a = 0,29\text{--}0,41 \text{ мкм}$ , а роликів-контртіл –  $R_a = 0,53 \text{ мкм}$ .

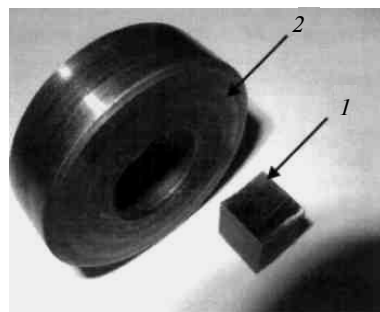


Рис. 2. Елементи пари тертя: 1 – зразок; 2 – ролик-контртіло

Математичне сподівання середнього напрацювання зразків на перехід у граничний стан  $\bar{\tau}_j$ , яке за даних умов проведення експерименту, по суті, дорівнювало їх середньому напрацюванню на заміну або середній технічний ресурс (згідно з ДСТУ 2860–94 під технічним ресурсом розуміється сумарне напрацювання об'єкта від початку його експлуатації чи відновлення після ремонту на перехід у граничний стан), визначалось за формулою

$$\bar{\tau}_i = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N},$$

де  $\tau_i$  – напрацювання на перехід у граничний стан  $i$ -го зразка;  $N$  – кількість досліджуваних зразків.

Випробуванням підлягали 20 термооброблених зразків і 20 зразків після термообробки з наступним зміцненням імпульсним ГТЦ ІА.

### Результати досліджень

Пошаровий рентгенофазовий аналіз азотованого шару зміцнених ГТЦ ІА зразків показав наявність у ньому (в більшості випадків) двох зон: нітридної зони та дифузійного підшару – зони внутрішнього азотування. Основною складовою нітридної зони є  $\epsilon$ -фаза (гексагональний карбонітрид  $\text{Fe}_{2,3}(\text{NC})$ ), яка розміщена безпосередньо на поверхні. Далі, у глибині нітридної зони розміщена  $\gamma'$ -фаза (гранецентрований нітрид  $\text{Fe}_4\text{N}$ ), яка має чисто нітридний характер через погану розчинність у ній вуглецю. Зона внутрішнього азотування складається з  $\alpha$ -твердого розчину (об'ємноцентрований азотистий ферит), який спостерігається аж до виходу на матрицю. Глибина нітридної зони становить 7–12 мкм, загальна глибина дифузійного шару – 200–390 мкм (залежно від режиму обробки). Мікроструктуру зразка після імпульсного ГТЦ ІА показано на рис. 3.

У деяких випадках у приповерхневих шарах спостерігаються стовпчасті виділення карбонітридних фаз, причому більша кількість із них спостерігається у зразках, що пройшли попередню термообробку.

Відомо, що за опір зношуванню відповідають у першу чергу будова і якість нітридного шару, в той час як опір механічним навантаженням (статичним, знакозмінним, ударним тощо) визначається структурою зони внутріш-

нього азотування. Саме наявність у нітридній зоні значної кількості  $\epsilon$ -фази пояснює підвищення зносостійкості [2] зміцнених зразків, адже добре відомим є позитивний вплив високої твердості карбонітриду  $\text{Fe}_{2,3}(\text{NC})$  на зносостійкість.

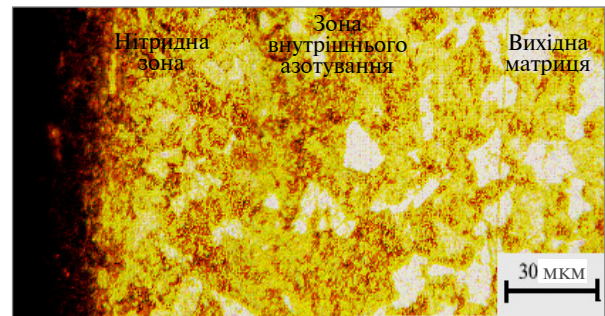


Рис. 3. Типова мікроструктура поверхні зразка, зміцненого імпульсним ГТЦ ІА

Результати проведених досліджень напрацювання оброблених зразків на перехід у граничний стан наведено в таблиці.

Таблиця. Напрацювання зразків із сталі 38Х2МЮА на перехід у граничний стан

| Зразки після ТО |               |              |               | Зразки після ТО + ГТЦ ІА |               |              |               |
|-----------------|---------------|--------------|---------------|--------------------------|---------------|--------------|---------------|
| № зразка $i$    | $\tau_i$ , хв | № зразка $i$ | $\tau_i$ , хв | № зразка $i$             | $\tau_i$ , хв | № зразка $i$ | $\tau_i$ , хв |
| 1               | 180           | 11           | 200           | 1                        | 440           | 11           | 410           |
| 2               | 190           | 12           | 210           | 2                        | 430           | 12           | 430           |
| 3               | 210           | 13           | 180           | 3                        | 440           | 13           | 440           |
| 4               | 190           | 14           | 180           | 4                        | 420           | 14           | 430           |
| 5               | 170           | 15           | 210           | 5                        | 410           | 15           | 420           |
| 6               | 180           | 16           | 190           | 6                        | 440           | 16           | 440           |
| 7               | 190           | 17           | 190           | 7                        | 420           | 17           | 430           |
| 8               | 180           | 18           | 200           | 8                        | 430           | 18           | 430           |
| 9               | 200           | 19           | 180           | 9                        | 420           | 19           | 420           |
| 10              | 170           | 20           | 180           | 10                       | 430           | 20           | 440           |

В результаті проведених триботехнічних досліджень встановлено, що значення середнього технічного ресурсу дорівнювали 189 хв для термооброблених без імпульсного ГТЦ ІА зразків та 430 хв – для іонноазотованих зразків. Особливий інтерес даний факт становить для авіаційної промисловості: адже відомо, що, наприклад, для більшості конструкційних елементів планера літальних апаратів призначений технічний ресурс не встановлюється, він дорівнює технічному ресурсу самого планера, який,

у свою чергу, визначається за умови забезпечення безвідмовної роботи найменш надійних його елементів.

Отже, середній технічний ресурс зміцнених імпульсним ГТЦ ІА зразків виявився в 2,3 раза більшим, ніж у термооброблених без імпульсного ГТЦ ІА. Це дає можливість при проведенні капітального ремонту роботи на даних агрегатах проводити через один запланований ремонт (або кожен другий ремонт) та збільшувати періодичність проведення робіт з технічного обслуговування, істотно зменшуючи, таким чином, витрати на експлуатацію авіаційної техніки. Крім того, підвищення довговічності зміцнених сталевих деталей літальних апаратів стає однією з передумов для переходу на прогресивну систему технічного обслуговування та ремонту за станом, що є особливо актуальним на сучасному етапі розвитку авіаційної техніки.

### Висновки

В результаті проведення досліджень зразків із сталі 38Х2МЮА після імпульсного ГТЦ ІА встановлено, що в зміцнених поверхневих

шарах є дві зони: нітридна і внутрішнього азотування, які складаються з  $\epsilon$ -фази,  $\gamma'$ -фази та  $\alpha$ -твердого розчину. Глибина нітридної зони становить 7–12 мкм, а загальна глибина дифузійного шару – 200–390 мкм (залежно від режиму обробки).

Виявлено, що завдяки впливу іонноазотуючої обробки на властивості зміцнених поверхневих шарів відбувається збільшення середнього технічного ресурсу оброблених деталей у 2,3 раза. Використання результатів проведених досліджень на практиці при відновленні і зміцненні поверхонь сталевих деталей машин робить можливим підвищення їх довговічності з одночасним істотним зменшенням витрат на ремонт.

З огляду на позитивний вплив підвищення довговічності конструкційних елементів із сталі 38Х2МЮА після застосування імпульсного ГТЦ ІА на надійність зміцнених деталей вважається за доцільне проведення подальших досліджень щодо визначення можливостей застосування технологічного процесу для широкої номенклатури конструкційних матеріалів.

Б.А. Ляшенко, О.В. Радько, А.К. Скуратовский

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Исследованы структурно-фазовый состав и долговечность деталей из стали 38Х2МЮА, упрочненных с использованием технологии газотермоциклического ионного азотирования. Показано, что благодаря влиянию ионноазотирующей обработки на свойства упрочненных поверхностных слоев происходит увеличение среднего технического ресурса обработанных деталей в 2,3 раза.

B.A. Lyashenko, O.V. Radko, A.K. Skuratovskiy

THE INCREASE OF RESOURCE INDEXES OF STEEL MACHINERY BY APPLYING ENERGY SAVING SURFACE STRENGTHENING TECHNOLOGIES

This paper studies a structural-phase composition and durability of 38Х2МЮА steel fabrication strengthened by the technology of gasthermocyclic ionic nitriding. Through experiments conducted, we demonstrate that useful operating life of finished parts increases by 2,3 times due to the influence of ionic nitriding treatment on the properties of strengthened surface layers.

1. Патент 10014, Україна, МПК (2006) C23C 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. Ляшенко Б.А., Мірненко В.І., Скуратовський А.К., Радько О.В. Триботехнічні властивості зміцнених газотермоциклічним іонним азотуванням сталевих деталей авіаційної техніки // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2007. – № 5. – С. 98–102.
3. Пастух И.М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем разряде: состояние и перспективы // Пробл. трибологии. – 2004. – № 3. – С. 42–55.
4. Мельников О.В., Гаврелюк А.О., Галабурда О.А. Ионно-плазменное азотирование деталей АТ, изготовлен-

- ных из сталей и сплавов, в полом катоде // Совершенствование технологических процессов ремонта авиационной техники. – М.: Транспорт, 1997. – С. 39–51.
5. *Надійність* техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860–94. – [Чинний від 1994–12–28]. – К.: Держстандарт України, 1994. – 91 с.
6. *Патент 24695, Україна, МПК (2206) G01N3/56*. Машина тертя / А.К. Скуратовський; заявник та патентовласник НТУУ “КПІ”. – № 02330; Заявл. 03.03.2007; Опубл. 10.07.2007, Бюл. № 10.
7. *Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин* / В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Д.Я. Ровинский, Є.Д. Браун. – К.: Наук. думка, 1990. – 264 с.

Рекомендована Радою  
Механіко-машинобудівного інституту  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
6 листопада 2009 року