

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(103).18694

В. В. ХАРЧЕНКО, М. В. КИДРАЧУК, В. Є. МАРЧУК, А. О. ЮРЧУК,  
І. В. КОСТЕЦЬКИЙ

*Національний авіаційний університет*

## КОМБІНОВАНА ОБРОБКА І МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ АЗОТОВАНИХ ПОКРИТТІВ НА ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ ВТ-6

*Досліджено вплив попередньої лазерної обробки на інтенсивність азотування, структуру та характеристики зносу азотованих покриттів на титановому сплаві ВТ6. Показано, що попередня обробка зменшує час азотування, при цьому збільшується товщина азотованого шару. Інтенсивність зношування визначають самоутворювальні в контакті трибологічні структури дисипативного типу, що формуються з ультра-дисперсних продуктів взаємодії речовин твердих тіл і змащення. Зносостійкість покриттів, отриманих із попередньою обробкою, у півтора-два рази вища, ніж покриттів, отриманих традиційним методом.*

**Ключові слова:** титановий сплав, знос, азотування, лазерна обробка, інтенсивність зношування, азотований шар

**Вступ і стан проблеми.** Внаслідок високої питомої міцності та термостійкості титанові сплави відіграють велику роль в авіаційній техніці та ракетобудуванні. Для виготовлення амортизаційних стійок шасі, силових циліндрів гідравлічних систем, бандажних полиць лопаток компресорів та інших деталей, потрібні також хороші антифрикційні властивості. Титанові сплави схильні до задирок і схоплювання. Тому їхнє застосування в таких системах, як букса-шток амортизаційної стійки, втулка-шток силового циліндра та інших деталей, що працюють в умовах тертя, неможливе без покриттів з хорошими антифрикційними властивостями. Хороший комплекс антифрикційних властивостей мають азотовані покриття. У цій роботі визначали перспективи отримання та застосування азотованих покриттів на високоміцному титановому сплаві ВТ6, досліджували структуру, триботехнічні властивості та механізм зношування азотованих покриттів під час тертя в гідравлічній рідині АМГ-10 по сталі ШХ15.

**Постановка задачі.** Процес азотування титанових сплавів тривалий і здійснюється за високих температур, що негативно позначається на механічних властивостях; при цьому отримують покриття глибиною до 50 мкм. Відомо, що попередня обробка поверхні сталей лазером збільшує інтенсивність азотування та глибину азотованого шару [1]. У роботі для збільшення швидкості та глибини насичення азотом провели попередню лазерну обробку (ЛО) поверхні титанових сплавів, дослідили структуру та антифрикційні властивості азотованих після попередньої обробки покриттів.

Триботехнічні випробування покриттів проводили за тертя ковзання в гідравлічній рідині АМГ-10 по сталі ШХ15. Вибір обумовлений тим, що трибосполучення гідравлічних систем літаків працюють в умовах граничного змащення рідиною АМГ-10 або її аналогами. Авіаційне масло гідравлічне (АМГ-10) працює в інтервалі температур доквілля від мінус 60 до + 55 °С, виробляється на основі глибоко-деароматизованої фракції з низьким рівнем застигання, одержуваної з продуктів гідрокрекінгу суміші парафінових нафт, яка

складається з нафтових та ізопарафінових вуглеводнів. Олива АМГ-10 містить згущувальну (Вініпол ВБ-2) і антиокислювальну (Альфафтол) присадки, а також спеціальний відмітний органічний барвник (Судан С22Н16N2O).

**Мета роботи** - вивчення впливу попередньої ЛО поверхні титанового сплаву на інтенсивність і глибину азотування, а також на триботехнічні характеристики азотованих покриттів.

**Методика досліджень.** Попередню ЛО зразків з титанового сплаву ВТ6 проводили на установці «ЛАТУС-31» з трьома швидкостями проходження лазерного променя: 0,3, 0,8 і 1,3 м/с, азотували на установці «ВПА-1» у середовищі 80 % N<sub>2</sub> + 20 % Ar [2]. Готувалося дві партії випробовуваних зразків: одну частину зразків азотували без попередньої ЛО, другу - з попередньою ЛО.

Випробування покриттів проводили на модернізованій установці 2070 СМТ-1 за умови тертя за схемою тертя ковзання зразка, поверхня тертя якого з нанесеним покриттям виконана у вигляді сектора. Ця поверхня ковзає по зовнішній утворюючій обертового кільцевого контртіла зі сталі ШХ15 діаметром 50 мм, твердість матеріалу 63-64 HRC, коефіцієнт перекриття дорівнює 0,13. Установка дає змогу в широкому діапазоні змінювати навантаження і швидкість ковзання.

Характеристики процесу зносу азотованих покриттів представляли функцією відгуку у вигляді полінома другого ступеня на двомірному просторі швидкостей і навантажень. Для визначення параметрів математичної моделі процесу зношування кожного покриття було поставлено експеримент. Реалізовано центральний ротатбельний план другого порядку для двох чинників, у якому швидкості ковзання варіювали в діапазоні 0,2-1,2 м/с, навантаження - в діапазоні 2-12 МПа. План включає сім експериментальних точок по одному досліді в кожній точці і чотири досліді в центрі експерименту, які використовували для визначення дисперсії процесу. Кожен дослід складається з припрацювання на шляху тертя 2 км і стаціонарного процесу - 10 км. Після закінчення припрацювання і досліді вимірювали зразки і визначали величину лінійного зносу. Поверхні тертя, структуру та склад покриттів досліджували методами оптичної та електронної мікроскопії; мікротвердість структурних складових визначали на мікротвердості ПМТ-3М, а також на мікротвердорі ПМТ-3М, а також на Віккерс М-400 Hardness Tester фірми «LECO». Вихідна мікротвердість зразків із ВТ6 становила 221 кгс/мм<sup>2</sup>, після азотування - 322 кгс/мм<sup>2</sup> і після проведення попередньої лазерної обробки з подальшим азотуванням - 401 кгс/мм<sup>2</sup>. Фрактографічні дослідження проводилися на скануючому електронному мікроскопі JSM-6610.

**Результати досліджень.** Трибологічні системи відкриті, вони обмінюються з навколишнім простором енергією, речовиною та інформацією; трибологічні процеси нерівноважні, їх реалізація завжди супроводжується продукуванням ентропії, що потім зростає в процесі відведення тепла в навколишній простір. Одним з основних понять теорії нерівноважних процесів є введення терміна «атрактор», тобто множина в просторі станів, що притягує, (у трибології це множина точок простору швидкостей і навантажень)[3]. У рівноважних системах виробництво ентропії дорівнює нулю; атрактором є стани, що відповідають максимуму ентропії або мінімуму вільної енергії. Якщо граничні умови не дають змоги системі досягти рівноваги, то вона нерівноважна, для неї характерне виробництво ентропії, а атрактором є стаціонарні стани [4]. У

трибології граничні умови задають швидкість і навантаження; для кожної антифрикційної системи на просторі швидкостей і навантажень існує область, у кожній точці якої визначено сталий стаціонарний стан-атрактор, до якого система спонтанно прагне на етапі припрацювання. Ця область обмежена аномальними станами, в яких досить висока ймовірність відмови [5]. Зовнішнє навантаження в трибологічному контакті сприймається пружними силами зв'язків між поверхневими атомами твердих тіл. Під час відносного руху поверхонь виникає обмінний процес, коли наявні зв'язки рвуться, а інші зв'язки, в цей момент - утворюються. Якщо енергія зв'язків з атомами контртіла перевищує енергію внутрішніх зв'язків, то атом переноситься на іншу поверхню. Таким чином, під час тертя відбувається безперервне перенесення іонів між поверхнями, ці активні іони вступають у хімічний зв'язок з атомами контртіла і мастила. Відбувається багатоступеневий синтез, внаслідок якого утворюються кінцеві продукти фізико-хімічних перетворень: нітриди, оксиди, сульфіді, фосфати, кокси, металорганічні солі та комплекси у вигляді молекул, кластерів і нанорозмірних частинок. Розрив наявних і утворення нових зв'язків, теплові коливання атомів викликають флуктуації потенціалу, трибологічний контакт можна вважати концентрованим проявом випадкового потенційного поля. У нерівноважних умовах трибологічного контакту виникають процеси самоорганізації, основну роль у яких відіграє ефект переміжуваності Я. Зельдовича. Зельдовича, згідно з яким у потенційних полях, що флуктують випадковим чином, у випадкових місцях, у випадковий час виникають піки потенціалу. В умовах еволюційного процесу найслабшим пікам відповідають різкі піки концентрації речовини, що переноситься [6]. Таким чином, на етапі припрацювання в трибологічному контакті виникають скупчення частинок, що стають центрами; до них приєднуються нові частинки та поступово формуються структури у вигляді окремих ділянок, сіток, осередків, клино- та хвилеподібних шарів товщиною від нано- до мікрометрів. У кожній антифрикційної системи на площині швидкостей і навантажень існує ділянка, в якій самоутворювальні трибологічні структури дисипативного типу забезпечують існування стійких стаціонарних станів. У кожній точці цієї області на еволюційному етапі припрацювання трибологічна система мимоволі переходить зі стану, що задається технологією, у стаціонарний стан, який визначається самим процесом. При цьому інтенсивність зносу змінюється від початкового до стійкого стаціонарного рівня; основну роль у цьому відіграють процеси самоорганізації, внаслідок яких у контакті утворюються трибологічні структури дисипативного типу. Ці структури є результатом багатоступеневого синтезу, в якому беруть участь речовини твердих тіл і мастила, що утворюють трибологічну систему. Трибоструктури задають рівень трибологічних процесів у стаціонарних станах, стійкість яких визначає конкуренція енергії та ентропії, на початковому етапі переважає вплив вільної енергії [7].

Виникнення і спонтанне зростання трибологічної структури має супроводжуватися зменшенням її вільної енергії, а будь-яка зміна фазового складу має бути спонтанним процесом, який відбувається з виробництвом ентропії, рушійною силою є результуюче зменшення вільної енергії Гіббса. Формування дисипативних структур визначають термодинамічний і кінетичний чинники. Частинки, що переносяться, мають надлишок енергії Гіббса ( $\Delta G$ ), тому вони мимоволі об'єднуються в структури, зменшуючи  $\Delta G = \sigma \cdot s$  (де  $\sigma$  - поверхневий натяг;  $s$  - площа поверхні), шляхом адгезії з поверхнею,

коалесценції - злиття, коагуляції. У нерівноважних умовах трибологічного контакту відбувається конкуренція вільної енергії та ентропії. За малих об'ємів трибоструктури домінує внесок вільної енергії; у міру зростання її значення зменшується і визначальним стає вплив ентропії. У результаті встановлюється стійкий стаціонарний стан, за якого періодично зростання трибоструктури змінюється її зменшенням, водночас деяка частина її речовини виходить із системи у вигляді продуктів зносу дисперсністю 1-100 нм, які можна отримати тільки за допомогою методу синтезу, а не руйнуванням. Дисипативні структури існують у трибологічному контакті тільки в динамічному стані безпосередньо в процесі тертя, про їхнє існування свідчать найтонші аморфізовані шари на поверхнях тертя, які можна безпосередньо спостерігати й дослідити після закінчення процесу. До них належать відомі шари Бельбі, структури Гаркунова, полімерні, склоподібні, оксидні плівки тощо. Одночасно з неоднорідністю концентрації речовини, пов'язаною з утворенням трибоструктури, виникає зустрічний дифузійний процес. Цей процес контролює ентропійний потенціал, він полягає у вирівнюванні концентрації речовини на площі контакту, водночас відбувається часткове оборотне руйнування структури та винесення деякої кількості її речовини у вигляді продуктів зносу. Досягнувши стаціонарного рівня, трибологічна структура флюктує близько постійного середнього значення з постійною дисперсією, максимальний обсяг трибологічної структури обмежений ентропією, а мінімальний - вільною енергією. Коли об'єм трибоструктури зменшується, відбувається безпосередня взаємодія виступаючих ділянок твердих тіл, взаємоперенесення іонів, утворення кінцевих продуктів, поповнення речовини трибоструктури і процес повторюється. Досвід експлуатації трибосполучень свідчить про те, що область допустимих навантажень мінімальна в початковий момент, вона розширюється в процесі припрацювання і досягає максимуму в стаціонарному стані. Для прискорення припрацювання його здійснюють за максимально допустимих навантажень, ці навантаження поступово збільшують у процесі припрацювання, тобто що далі система від стаціонарного стану, то сильніше вона прагне до цього стану. Використовуючи лінійне наближення рівняння переносу Больцмана, можна уявити інтенсивність зносу  $i(l)$  на шляху тертя в такому вигляді:

$$\frac{di(l)}{dl} = -\frac{(i_0 - \langle i \rangle)}{L}.$$

Розв'язок цього рівняння при  $i(0) = i_0$  має вигляд:

$$i(l) = (i_0 - \langle i \rangle) \exp\left(-\frac{l}{L}\right) + \langle i \rangle \quad (1)$$

Розв'язуючи рівняння (1) за  $I(0) = 0$ , отримуємо для інтегрального процесу зношування

$$I(l) = (i_0 - \langle i \rangle) L \left[ 1 - \exp\left(-\frac{l}{L}\right) \right] + \langle i \rangle l, \quad (2)$$

де  $i_0$  та  $\langle i \rangle$  - відповідно початкове та середнє стаціонарне значення інтенсивності зношування;  $L$  - шлях релаксації припрацювання;  $I(l)$  - знос;  $l$  - шлях тертя.

Експоненти правої частини рівнянь (1) і (2) описують еволюційний етап припрацювання, функціонал

$$I_0 = (i_0 - \langle i \rangle) L \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{L}\right) \right]$$

визначає внесок припрацювання при зношуванні, тривалість припрацювання оцінює шлях релаксації  $L$ . Середні значення інтенсивності зношування  $\langle i \rangle$  та дисперсії  $\sigma^2$  після припрацювання не залежать від часу, вони залежать тільки від внутрішніх властивостей трибосистеми. Графіки функцій (1) і (2) зображено на рис. 1.

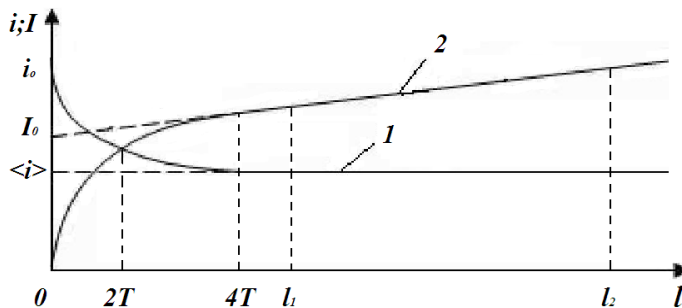


Рис 1. Залежності інтенсивності  $i(l)$  (крива 1) та зношування  $I(l)$  (крива 2) від шляху тертя  $l$ :  $i_0$  і  $\langle i \rangle$  – відповідно початкове і середнє стаціонарне значення швидкості зношування;  $T$  – час релаксації припрацювання;  $4T$  – завершення припрацювання

Граничні умови трибологічної системи двох твердих тіл, що контактують, і мастила - визначають швидкість і навантаження, які в реальних вузлах тертя можуть змінюватися залежно від експлуатаційних режимів і випадкових флуктуацій, разом зі станами змінюється також інтенсивність зносу. Тому як характеристику процесу спрацьовування розглядають залежність інтенсивності спрацьовування стаціонарного процесу від швидкості та навантаження; оцінювали тривалість процесу спрацьовування, а також спрацьовування на етапі спрацьовування [8].

У результаті експерименту отримано характеристики, що описують середні значення інтенсивності стаціонарного зношування азотованих покриттів на титановому сплаві ВТ6, а також покриття, отриманого після попередньої обробки титану лазером; характеристики отримано у вигляді математичних моделей: інтенсивність зношування азотованих титанових зразків та інтенсивність зношування азотованих титанових зразків з попередньою лазерною обробкою [5].

$$i(\bar{x}) = 7,85 + 1,35x_1 + 3,1x_2 - 1,21x_1x_2 + 2,3x_2^2; \quad \sigma_i = 1,3$$

$$i(\bar{x}) = 4,6 + 1,8x_1 + 1,3x_2 - 1,7x_1x_2 - 1,1x_1^2 + 1,5x_2^2; \quad \sigma_i = 1,2,$$

де:  $x_1$  - нормована швидкість ковзання;  $x_2$  - нормоване навантаження;  $\sigma_i$  - середньоквадратичне відхилення.

Перевірка за критерієм Кохрена показала адекватність характеристик експериментальним даним.

У геометричній формі ці характеристики представлені у вигляді діаграм (рис. 2).

Знос покриттів під час приробітку відрізняється незначно:  $I_9 = 32$  мкм - знос азотованого покриття;  $I_0 = 27$  мкм - покриття з попередньою ЛО. Інтенсивність

стаціонарного зносу попередньо обробленого лазером азотованого покриття в 1,5-2 рази менша, ніж покриття без обробки. Рівень інтенсивності зносу в стаціонарному стані визначають властивості трибологічних структур, що формуються в нерівноважних умовах трибологічного контакту з іонів елементів твердих тіл і продуктів механодеструкції молекул мастила.

Сплав ВТ6 містить: 86,485-91,2 % Ti (основа); 3,5-6,8 % Al; 3,5-5,3 % V; до 0,3 % Zr; до 0,3 % Fe; до 0,15 % Si; до 0,1 % C; до 0,05 % N; до 0,015 % H<sub>2</sub>; до 0,2 % O<sub>2</sub>; 0,3 % інших домішок, має  $\alpha+\beta$  структуру мартенситного типу, тертя здійснюється по контртелу зі сталі ШХ15 (0,17-0,37 % Si; 0,25 % Cu; 0,20-0,40 % Mn; 0,30 % Ni; 0,027 % P; 1,30-1,65 % Cr; 0,020 % S), термообробленої на мартенсит.

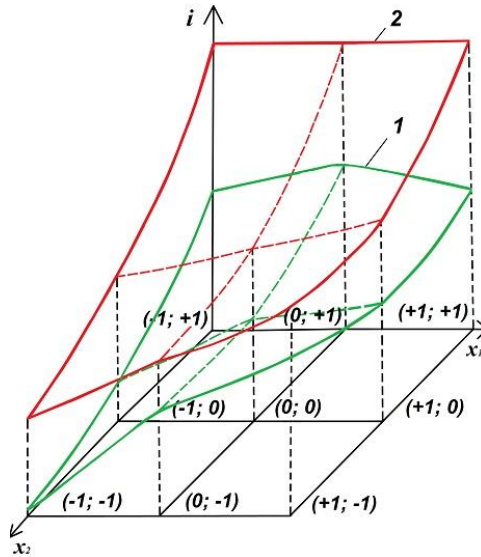


Рис. 2. Поверхні відгук: 1 - азотоване покриття на ВТ6; 2 - азотоване покриття на ВТ6 з попередньою ЛО; 2 - азотоване покриття на ВТ6;  $i(x)$  - інтенсивність зносу;  $x_1$  - швидкість ковзання;  $x_2$  - навантаження

Азотування титанового сплаву відбувалося в розрідженому азоті з домішкою аргону, при цьому утворюється верхній тонкий нітридний шар завглибшки 20 мкм, потім - суміш нітридів і титан і, нарешті, твердий розчин азоту в  $\alpha$ -титані. Загальна глибина шару за 30 год - 0,08 мм. Попередня ЛО підвищує швидкість дифузії азоту, збільшуючи загальну глибину азотованого шару до 250 мкм. Властивості азотованих структур визначають нітриди - сполуки азоту, головним чином ковалентні з більш електропозитивними елементами AlN, VN, TiN.

Молекули, що складають АМГ-10, мають складну структуру, Вініпол використовують як в'язкісну присадку, ланцюг макромолекули Вініполу схильний до деструкції. У процесі тертя відбувається деструкція молекул з утворенням іонів водню, радикалів, гідроксильних і полярних груп, які взаємодіють з аналогічними молекулами і переносимими атомами металів - відбувається синтез молекул, кластерів, міцел. Присутність іонів водню створює відновлювальний ефект, тому не відбувається окислення. Продукти синтезу - частинки від молекулярних до нанорозмірів, маючи надлишок вільної енергії Гіббса, взаємодіють з поверхнями азотованого титанового сплаву, сталі ШХ15, а

також між собою утворюють трибологічну структуру дисипативного типу. Вона значною мірою запобігає безпосередній взаємодії твердих тіл, а після закінчення тертя її речовина залишається на поверхнях у вигляді аморфізованих нанорозмірних плівок. Склад плівок дуже складний, він містить елементи твердих тіл і мастила, вони міцно пов'язані з поверхнею металів, під час впливу твердим інденитором вони деформуються, але не продавлюються і не розриваються. Поблизу поверхні агрегати молекул-міцели розпадаються, утворюючи з нею хімічні, фізичні зв'язки і квазікристалічні шари частинок навіть без зовнішніх впливів. Поле металу може розщеплювати міцели і приєднувати їх до поверхні, тертя активізує цей процес, водночас молекули мастила можуть відриватися разом з атомами металу завдяки температурним флуктуаціям і зв'язкам, що виникають. При збільшенні навантаження зростає модуль пружності трибологічних структур, збільшується кількість зв'язків і асиметрія розподілу станів у зв'язках. Електронним дослідженням поверхонь тертя після випробувань встановлено, що на поверхні VT6 є атоми міді нікелю, які відсутні у складі титанового сплаву, а на поверхні сталі - атоми алюмінію і ванадію, які відсутні в ШХ15. Це означає, що трибологічну структуру формують усі елементи трибологічної системи, при цьому гідрорідина АМГ-10 діє вибірково, електронегативні елементи розчиняються в мастилі, а електропозитивні - утворюють на твердих поверхнях вторинні плівки.

**Висновки.** Досліджували процес спрацьовування в трибологічній системі: азотований титановий сплав VT6 - гідрорідина АМГ-10 - сталь ШХ15. Показано, що рівень зносу визначають трибологічні структури дисипативного типу, які самоутворюються на еволюційному етапі припрацювання. Скориставшись лінійним наближенням рівняння переносу Больцмана, встановили експоненціальний характер етапу припрацювання, на якому інтенсивність спрацьовування зменшується від початкового до сталого стаціонарного рівня і потім флюктує біля постійного середнього з постійною дисперсією. Рідина АМГ-10 вибірково взаємодіє з елементами. Електронегативні елементи розчиняються в мастилі, електропозитивні - переносяться на контртіло, взаємодіють із продуктами механодеструкції молекул мастила, беруть активну участь у формуванні трибоструктури, що зменшує рівень безпосередньої взаємодії твердих тіл у контакті.

Попереднє ЛО титанового сплаву активізує процес подальшого азотування, що дає змогу зменшувати час азотування, при збільшенні товщини зносостійкого азотованого шару. Застосування попередньої ЛО на реальних деталях дає змогу збільшувати ресурс вузлів тертя та зменшити виробничі витрати під час їх виготовлення.

### Список літератури

1. Комбіновані методи інженерії поверхні: монографія / М.В. Кіндрачук, О.І. Духота, В.Є. Марчук, І.А. Гуменюк, В.В. Харченко.- К.: НАУ, 2024. – 160 с.
2. Кіндрачук М. В. Влияние предварительной лазерной обработки на процесс азотирования титанового сплава VT6 / М. В. Кіндрачук, А. Л. Шевченко, В. А. Костин и др. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 52. – С. 140–151.
3. Харченко В. Комбіновані методи інженерії контактних поверхонь трибологічних систем / І. Гуменюк, А. Корнієнко, М. Іваницький // Проблемы тертя та зношування. - 2024.- №1 (102). С. 23 - 27. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(102\).18414](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(102).18414)

4. Кіндрачук М.В. Матеріалознавство: підручник / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, Т.С. Клімова, І.Г. Черниш. – Київ, „НАУ – друк”. – 2012. – 500с.

5. Кіндрачук М. В. Підвищення зносостійкості плазмових евтектичних покриттів термоциклованим лазером/ В.В. Харченко, О. В. Тісов, І.А. Гуменюк, Н. М. Стебелецька, А. О. Юрчук, Л. А. Гловин // Проблеми тертя та зношування.- 2021.- №1. С. 78 – 85. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(90\).15250](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(90).15250)

6. Зельдович Я. Б. Переменяемость в случайных средах /Я. Б. Зельдович // УФН. – Т. 152, вып. 1. – 1987. – С. 33 – 41.

7. Kindrachuk M. V. Formuvannya diskretnoyi strukturi azotovanih pokrivtiv rivnoyi znosostijkosti/ V.V. Kharchenko, O.I. Duhota, I.A. Gumenyuk // Problemi tertya ta znoshuvannya - 2022. - №4 (97). S. 4-9. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(97\).16954](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(97).16954)

8. Tisov, O. Duplex Aging and Gas Nitriding Process as a Method of Surface Modification of Titanium Alloys for Aircraft Applications/ Łępicka, M., Tsybrii, Y., Kindrachuk, M., // Metals, 2022, 12(1), 100 <https://doi.org/10.3390/met12010100>

Стаття надійшла до редакції 12.05.2024.

**Харченко Володимир Володимирович** – завідувач лабораторії кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара,1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>.

**Кіндрачук Мирослав Васильович** – докт. техн. наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Марчук Володимир Єфремович** - доктор технічних наук, професор кафедри логістики Національного авіаційного університету, проспект Гузара, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: sunduk\_2005@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0140-5416>

**Юрчук Аліна Олександрівна** - канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net)

**Костецький Іван Володимирович** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара,1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2815-0230>.

**Kharchenko Volodymyr** - head of the laboratory of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering of the National Aviation University, 1 Lubomyr Huzar Avenue, Kyiv, Ukraine, 03058, +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>

**Myroslav Kindrachuk** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Volodymyr Marchuk** - doctor of Technical Sciences, professor Department of Logistics National Aviation University, Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: sunduk\_2005@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0140-5416>

**Yurchuk Alina** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computerized Electrical Systems and Technologies National Aviation University, 1 Lubomyr Huzar Ave.

**Kostetskyi Ivan** – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-2815-0230>.



V. V. KHARCHENKO, M. V. KINDRACHUK, V. E. MARCHUK, A. O. YURCHUK,  
I. V. KOSTETSKYI

### COMBINED TREATMENT AND WEAR MECHANISM OF NITRIDED COATINGS ON TITANIUM ALLOY VT-6

The wear process in the tribological system: nitrided titanium alloy - hydraulic fluid - steel is studied. It is shown that the level of wear is determined by tribological structures of the dissipative type, which are self-formed at the evolutionary stage of running-in. Using a linear approximation of the Boltzmann transfer equation, the exponential nature of the running-in stage was established, at which the wear intensity decreases from the initial to the steady-state level and then fluctuates around a constant mean with a constant variance. AMG-10 liquid selectively interacts with the elements. Electronegative elements dissolve in the lubricant, while electropositive elements are transferred to the counterbody, interact with the products of the mechanical destruction of lubricant molecules, and take an active part in the formation of the tribostructure, which reduces the level of direct interaction of the solids in contact. Preliminary laser treatment of titanium alloy activates the process of subsequent nitriding, which makes it possible to reduce the nitriding time while increasing the thickness of the wear-resistant nitrided layer. The use of laser pretreatment on real parts makes it possible to increase the service life of friction units and reduce production costs during their manufacture.

**Keywords:** titanium alloy, wear, nitriding, laser treatment, wear intensity, nitrided layer

#### Referenses

1. Kombinovani metodi inzheneriyi poverhni: monografiya / M.V. Kindrachuk, O.I. Duhota, V.Ye. Marchuk, I.A. Gumenyuk, V.V. Kharchenko.- K.: NAU, 2024. – 160 s.
2. Kindrachuk M. V. Vliyanie predvaritelnoy lazernoy obrabotki na process azotirovaniya titanovogo splava VT6 / M. V. Kindrachuk, A L. Shevchenko, V. A. Kostin i dr. // Problemi tertya ta znoshuvannya: nauk.-tehn. zb. – K.: Vid-vo NAU «NAU-druk», 2010. – Vip. 52. – S. 140–151.
3. Kharchenko V. Kombinovani metodi inzheneriyi kontaktnih poverhon tribologichnih sistem / I. Gumenyuk, A. Korniyenko, M. Ivanickij // Problemi tertya ta znoshuvannya. - 2024.- №1 (102). S. 23 - 27. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(102\).18414](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(102).18414)
4. Kindrachuk M.V. Materialoznavstvo: pidruchnik / M.V. Kindrachuk, V.F. Labunec, T.S. Klimova, I.G. Chernish. – Kiyiv, „NAU – druk”. – 2012. – 500s.
5. Kindrachuk M. V. Pidvishennya znosostijkosti plazmovih evtektichnih pokrittiv termociklyvannyam lazerom/ V. V. Kharchenko, O. V. Tisov, I.A. Gumenyuk, N. M. Stebelecka, A. O. Yurchuk, L. A. Glovin // Problemy tertya ta znoshuvannya.- 2021.- №1. S. 78 – 85. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(90\).152506](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(90).152506).
6. Zeldovich Ya. B. Peremezhaemost v sluchajnyh seredah /Ya. B. Zeldovich // UFN. – T. 152, vyp. 1. – 1987. – S. 33 – 41.
7. Kindrachuk M. V. Formuvannya diskretnoyi strukturi azotovanih pokrittiv rivnoyi znosostijkosti/ V.V. Kharchenko, O.I. Duhota, I.A. Gumenyuk // Problemi tertya ta znoshuvannya - 2022. - №4 (97). S. 4-9. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(97\).16954](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(97).16954)
8. Tisov, O. Duplex Aging and Gas Nitriding Process as a Method of Surface Modification of Titanium Alloys for Aircraft Applications/ Łępicka, M., Tsybrii, Y., Kindrachuk, M., // Metals, 2022, 12(1), 100 <https://doi.org/10.3390/met12010100>