

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.1(102).18417

М. В. КІНДРАЧУК¹, Н. М. СТЕБЕЛЕЦЬКА², В. В. ХАРЧЕНКО¹, М. А. ГЛОВИН¹,
І. В. КОСТЕЦЬКИЙ¹

¹Національний авіаційний університет

²ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут»

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗНОШУВАННЯ ДЕТОНАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ТИТАНОВОМУ СПЛАВІ VT-22

У роботі подано результати експериментальних досліджень процесу зносу детонаційних покриттів та контртіла й порівняно їх з іншими видами покриттів, отримано характеристики зносу. Описано характеристики зносу покриттів в аналітичній формі, а також результати дослідження трибологічних структур. Триботехнічні характеристики детонаційних покриттів визначено, враховуючи властивості дисипативних структур, що самоутворюються у контакті при терті. Визначено ефективність методу дослідження процесу зносу детонаційних покриттів. Встановлено, що при терті покриттів по хрому сумарний знос пари тертя істотно менший, ніж при терті по бронзі. Це відбувається за рахунок найкращих триботехнічних властивостей хрому в галузі експерименту. Коефіцієнт тертя покриттів електрохімічним хромом має той же порядок, що і при терті по бронзі. Сумарна інтенсивність зносу покриття і контртіла при терті по хрому децю нижча, ніж при терті по бронзі. Так як при терті покриттів по хромованому сплаву VT-22 трибологічні структури утворюються зі складних оксидів, асфальтенів, коксів та ін., тому триботехнічні характеристики таких систем децю нижчі, ніж у системах, що включають бронзу.

Ключові слова: титанові сплави, детонаційні покриття, знос, трибологічні структури, трибологічні смстєми.

Стан проблеми. Жорстка економія розмірів та маси є однією з основних вимог при конструюванні авіаційної техніки. Внаслідок високої питомої міцності перспективними матеріалами виготовлення силових елементів конструкції літаків є титанові сплави. Для найважливіших елементів систем управління і посадки, гідравлічних систем та ін., крім високої міцності, потрібні також хороші антифрикційні властивості, так як вузли тертя значною мірою визначають ресурс, надійність і безпеку авіаційних систем [1].

Титанові сплави схильні до схоплювання і задирів, тому застосування їх в елементах конструкції, що мають рухливі з'єднання, визначається триботехнічними властивостями покриттів. Нанесення покриттів на титанові сплави пов'язане зі значними труднощами, які визначаються поганими адгезійними властивостями титану, схильністю до наводження, чутливістю до концентраторів напруг і температурних флуктуацій [2]. Тому нанесення гальванічних покриттів - досить складний і нестійкий процес, що включає етапи зневоднення відпалу, а також обмеження по фазовому складу, зернистості. Нанесення хіміко-термічних покриттів пов'язане з високими температурами, зміною структури, механічних властивостей, форми та розмірів деталей. У зв'язку з цим проводиться широкий пошук покриттів для титанових сплавів, що мають хороші антифрикційні властивості, що не погіршують інші характеристики.

Перспективні для цих цілей покриття, одержувані методами газотермічного напилення – газополум'яні, плазмові, детонаційні [3,4]. Переваги цих покриттів перед іншими методами полягають у високій продуктивності процесів напилення, незначній температурі поверхні покриваючого виробу, універсальності використовуваних матеріалів, можливості нанесення шарів товщиною до декількох міліметрів, що може бути використане для відновлення та ремонту зношених деталей, а також для покриття деталей складної конфігурації.

Детонаційні покриття наносять за допомогою спеціальних пристроїв – «гармат», в камері згоряння яких збуджується детонація киснево-ацетиленової або іншої подібної суміші. У камеру згоряння запускається суміш і розпилюється порошок матеріалу, що наноситься. Суміш підпалюють електричною іскрою, і детонаційна хвиля, що виникає, з надзвуковою швидкістю викидає частинки на поверхню твердого тіла. Швидкість частинок порошку на відстані 75 мм від зрізу ствола може досягати 7-20 м/с, температура – 4000 °С. У процесі нанесення покриттів температура деталі, на яку наноситься покриття, зазвичай не перевищує 200 °С, що є істотним позитивним фактором. Для нанесення покриттів детонаційним методом створено автоматичні установки з тривалістю детонації близько 10^{-4} секунди, частотою пострілів 3-4 секунди. За один цикл напилення наноситься покриття товщиною ~ 6 мкм, пляма напилення 3 – 4 см. Детонаційний метод дозволяє використовувати для нанесення покриттів різноманітні матеріали: метали, сплави, тугоплавкі сполуки, карбіди, оксиди, різноманітні композиції. Ефективними матеріалами для нанесення детонаційних покриттів на титанові сплави є порошки карбіду титану, що містять в якості зв'язки до 30% нікелю, кобальту, молібдену [5,6]. Металева зв'язка покращує адгезію покриття до основи і триботехнічні характеристики, збільшує ударну міцність.

У даній роботі досліджували процес зносу детонаційних покриттів, нанесених порошками систем: TiC-Ni, WC-Ni, WC-NiP, а також вивчали трибологічні структури, що самоутворюються в контакті при терті і визначають рівень трибологічних характеристик в антифрикційних системах. Порошки розмірами 30 - 50 мкм наносили на підготовлену поверхню зразків виготовлених з титанового сплаву ВТ-22, а суміш кисню з ацетиленом використовували як детонуючий газ. Одержували покриття товщиною 250-300 мкм, тоді шліфували до товщини 200 мкм, проводили трибологічні випробування, за їх результатами визначали характеристики зносу, а також досліджували структуру поверхонь тертя.

Методика досліджень. Рухливі з'єднання силових циліндрів гідросистем та амортизаційних стійок шасі літаків працюють в умовах граничного змащення рідиною АМГ-10. Букси амортизаційних стійок шасі літаків і втулки силових циліндрів гідросистем виготовляють з бронзи БрАЖМц 10-3-1,5, а спряжені деталі - з хромованої сталі 30ХГСА. Моделюючи реальні умови, методика дослідження включала випробування детонаційних покриттів на високоміцному титановому сплаві ВТ-22 при терті в гідрорідині АМГ-10 по гальванічному хрому на ВТ-22 і по бронзі БрАЖМц 10-3-1,5. Дослідження покриттів проводили на пристрої 2070 СМТ-1 за схемою тертя ковзання зразка, поверхня тертя якого з нанесеним покриттям виконана у вигляді сектора. Дана поверхня ковзає по зовнішній твірній обертового кільцевого контртіла діаметром 50 мм,

коефіцієнт перекриття рівний 0,13. Пристрій дозволяє в широкому діапазоні змінювати швидкість ковзання та навантаження на зразок під час проведення експерименту.

Мета експерименту полягала в тому, щоб дослідити зношування детонаційних покриттів та контртіла, отримати характеристики зносу, порівняти їх з іншими видами покриттів та оцінити ефективність застосованого методу.

Математичні моделі регресійного аналізу є вигідним й ефективним інструментом для отримання, використання та зберігання триботехнічних характеристик. Розробили плани для спрощення експерименту, які оптимально використовують простір незалежних змінних [7]. Методом найменших квадратів оцінюють параметри моделей шляхом опрацювання результатів експерименту. В якості математичної моделі процесу зносу в роботі використовували поліном другого ступеня на двовірному просторі швидкостей і навантажень у вигляді

$$i(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2,$$

де: x_1 – нормована швидкість; x_2 – нормоване навантаження; \vec{b} – вектор коефіцієнтів регресії, визначення яких є метою експерименту. Використання центрального ротабельного плану другого порядку для двох факторів дозволило мінімізувати кількість експериментальних точок при визначенні параметрів моделі.

Результати дослідження. Моделі регресійного аналізу не включають тимчасових співвідношень, тому їх можна використовувати як характеристики стаціонарних однорідних процесів. Для кожної трибологічної системи на просторі швидкостей і навантажень існує область стаціонарних станів, обмежена аномальними станами, в яких велика ймовірність відмови. Для визначення області однорідних процесів було проведено спеціальний експеримент, у результаті чого встановлено, що ця область обмежена термостабільними властивостями мастила при навантаженні 15 МПа та швидкості 1,3 м/с. Для кожного покриття було реалізовано центральний ротабельний план другого порядку для двох факторів, у яких швидкості ковзання (x_1) варіювали в діапазоні 0,2–1,2 м/с, навантаження (x_2) – у діапазоні 2–12 МПа. План включав сім експериментальних точок і десять дослідів, по чотири досліди в центрі експерименту й одному досліді в кожній точці правильного шестикутника. Кожен дослід складався з припрацюванням на шляху тертя 2 км і залікового випробування - 10 км. Перед початком кожного досліді, після припрацювання та закінчення попереднього досліді зразки промивали спиртом, висушували, вимірювали розміри та зважували.

На поверхню зразків наносили покриття, обробляли до шорсткості $R_a = 0,32$ мкм і випробовували по контртілу з бронзи БрАЖМц 10-3-1,5 і гальванічному хрому. Параметри шорсткості поверхні оцінювали із застосуванням профілографів ВЕІ – «Калібр» та мікроінтерферометра МП-4. Структури поверхонь, їх хімічний склад і продукти зносу вивчали методами растрової та оптичної мікроскопії.

На кожному наступному етапі припрацювання трибосистеми переходять зі стану, що задається технологією, в стаціонарний стан, що визначається самим процесом. У створенні потоків речовини важливу й основну роль відіграють процеси самоорганізації і трибологічні структури диссипативного типу, що

утворюються в контактi. Схематично механiзм утворення трибоструктур можна представити в такому виглядi: при координацiйному числi кристалiчних грат, що рiвне восьми, поверхневі атоми мають вiд одного до семи вiльних зв'язкiв i вiд семи до одного зв'язку з внутрiшнiми атомами твердого тiла. Енергiя некомпенсованих зв'язкiв утворює надлишкову поверхневу енергiю i поверхневий натяг твердих тiл. Вiд одного до семи зв'язкiв можуть утворитися у контактi мiж атомами контртіла й атомом однієї поверхні. Якщо кiлькiсть зв'язкiв з атомами контртіла перевищує кiлькiсть внутрiшнiх зв'язкiв, то при вiдносному русi твердих тiл атом переноситься на iншу поверхню. При терті вiдбувається безперервне перенесення атомiв мiж поверхнями, тобто дані активні атоми вступають у хiмiчний зв'язок з атомами контртіла та мастила.

Для проведення експериментальних дослiджень як мастило використовували АМГ-10 (авіацiйне масло гiдрравлічне, ГОСТ 6794-53) - рiдина нафтового походження, отримана шляхом видiлу вузької газової фракцiї з початком кипiння не нижче 200 °С. При виборі цієї рiдини керувалися тим фактом, що саме АМГ-10 донедавна застосовувалась у гiдрравлічних системах вiтчизняних лiтакiв.

У процесі тертя вiдбувається деструкцiя довгих молекул, полярно-активні молекули рiдини АМГ-10, зiштовхуючись з поверхнею металу, потрапляють у її електричне силове поле i приєднуються до активних її центрiв, формуючи адсорбований шар орієнтованих молекул. Електричне поле поверхонь прагне орієнтувати полярні молекули в напрямку поля, збiльшує поляризацiю молекул з дипольним моментом й iндукує такий момент у неполярних молекул, які також адсорбуються на поверхні.

Молекули високомолекулярних складових гiдрорiдини мають складне ланцюгове структурування, в процесі тертя вiдбувається їх руйнування структури з утворенням радикалiв, гiдроксильних та полярних груп. Такі осколки взаємодіють активними частинами з атомами металiв, що переносяться, а також з аналогічними молекулами. Внаслiдок процесу тертя вiдбувається окислення, й утворюються: кислоти, нафтенові окиси, альдегiди, ангiдриди, закисі кислот, асфальтові окиси, ароматичні асфальтени та iнші продукти полiмеризацiї. У трибоконтакті вiдбувається багатоступiнчастий синтез, в результаті якого утворюються кiнцеві продукти фiзико-хiмiчних перетворень: сульфiди, окиси, фосфати, металорганiчні солі, кокси, комплекси й iнше у виглядi кластерiв, молекул, мицел i ультрадисперсних частинок. На цьому етапi синтез не закінчується, у нерiвноважних умовах трибоконтракту з'являються процеси самоорганiзацiї. У цьому вiдiграє основну важливу роль ефект перемижування Я. Зельдовича, згiдно якого у флуктуючих непередбаченим чином потенцiйних полях у випадковий час, у непередбачених мiсцях виникають пiки iмовiрності потенцiалу [8]. В умовах еволюцiї процесу припрацювання навiть найслабшим пiкам потенцiалу вiдповiдають рiзкі пiки концентрацiї речовини, що переноситься. У нерiвноважних умовах трибологiчного контакту в рiзних мiсцях випадковим чином виникають скупчення частинок кiнцевих продуктiв, які стають центрами, до них приєднуються нові частинки та поступово утворюються структури у виді окремих сiток, дiлянок, осередкiв, клино - та хвилеподiбних шарiв товщиною вiд нано до мiкрометрiв. Коли частинки утворюють когерентні об'єднання, ентропiя зменшується. Однак, це зменшення багаторазово компенсується зростанням

ентропії при виробництві у процесі тертя та відводі тепла із системи.

Утворені структури функціонують лише у процесі тертя. Однак про існування їх свідчать найтонші аморфізовані шари на поверхнях тертя, які можна спостерігати і досліджувати після закінчення процесу. На рис. 1 і 2 представлені трибологічні структури, що утворилися при терті детонаційних покриттів по хромованому сплаву ВТ-22. У трибологічних системах, що включають як елементи детонаційне покриття і бронзу, переважає електрохімічний механізм формування трибоструктур. Легуючі елементи бронзи розчиняються в мастилi, яке активізоване тертям, а атоми міді, що залишилися, багаторазово переносяться між поверхнями, що труться; з цих атомів на поверхнях утворюються аморфізовані верстви атомів чистої міді – «структури Гаркунова», вигляд такої структури перерізу представлений на рис. 3. Сформувавшись, трибоструктури функціонують у стаціонарному режимі за нелінійними законами синергетики, їх надмірне зростання обмежено ентропією, а нижній рівень – енергією. У процесі утворення трибоструктур на етапі припрацювання відбувається перерозподіл потоків речовини, деяка частка речовини, що переноситься витрачається на формування трибоструктур, потік речовини з трибосистеми зменшується, доки стабілізується на стаціонарному рівні.

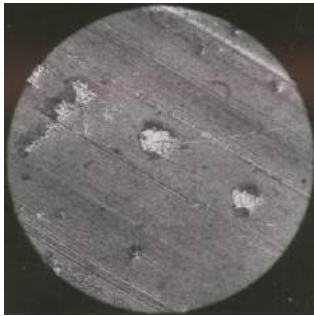


Рис. 1. Поверхня електролітичного хрому на ВТ-22 після тертя по детонаційному покриттю TiC–Ni $\times 350$



Рис. 2. Поверхня електролітичного хрому на ВТ-22 після тертя по детонаційному покриттю WC–NiP $\times 350$

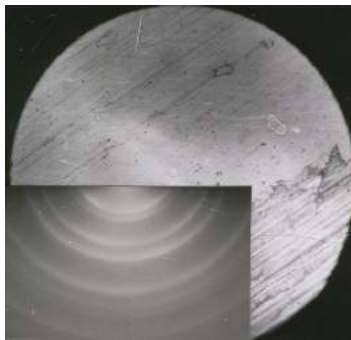


Рис. 3. Трибоструктура Гаркунова на поверхні бронзи БрАЖМц 10-3-1,5, переріз $\times 350$

Коли вплив ентропії та енергії стають порівнянними, система переходить у

стаціонарний стан, що функціонує за нелінійними законами синергетики. Стійкість стаціонарних станів визначає конкуренція між вільною енергією та ентропією, дотримується стійкий стаціонарний баланс, при якому періодично вплив вільної енергії та ентропії в трибоструктурі стає переважним. Роль ентропії як потенціалу полягає в тому, що під її впливом речовина прагне до рівномірного розподілу, це призводить до часткового оборотного руйнування трибоструктури і винесення деякої кількості її речовини з системи у вигляді продуктів зносу. Обсяг та ентропія трибоструктури при цьому зменшуються, переважаючим стає прагнення вільної енергії до мінімуму. Відбувається взаємодія ділянок твердих тіл, відділення речовини твердих тіл, приєднання їх до трибоструктури, обсяг трибоструктури збільшується і цикл повторюється. Величина зношування – зміна лінійних розмірів твердих тіл визначається участю їх речовини у формуванні трибоструктур. Потік цієї речовини, усереднений за площею контакту, дорівнює швидкості зносу $i(t) = dI(t)/dt$. У стаціонарному стані це процес зі сталими середнім та дисперсією, показником стійкості є знак другої похідної d^2i/dt^2 , яка повинна бути протилежна за знаком відхилення $i(t)$ від середнього значення. Саме ж середнє значення є точкою перегину функції $i(t)$, в якій вільна енергія та ентропія змінюються місцями за ступенем впливу на процес.

Рівень стаціонарного стану визначає не вся вироблена ентропія, а тільки та її мала частина, яка пов'язана з речовиною трибоструктури, при постійній температурі вона пропорційна обсягу і може як збільшуватися, так і зменшуватися, повна ж ентропія в процесі тертя завжди зростає. Конкуренція вільної енергії F та ентропії S , яку можна уявити рівнянням $F = E - TS$, породжує в далеких від рівноваги умовах стійкі періодичні процеси. У координатах $F - TS$ таким процесам відповідають моделі Лотки-Вольтера, броселлятор та інші[8].

Якщо трибоструктура відновлюється на часовому інтервалі τ , то знос на цьому інтервалі можна розглядати як незалежну величину. Тоді, відповідно до центральної граничної теореми, при $t \gg \tau$ знос $i(t)$ має нормальний розподіл і його можна подати у вигляді

$$I(t) = \langle i_t \rangle t \pm \eta \sigma \tau (t/\tau)^{\frac{1}{2}}; \quad (1)$$

$$\langle i_t \rangle = i(t)/t \pm \eta \sigma (t/\tau)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

де: $\langle i_t \rangle$ - середнє значення стаціонарного процесу; σ – середньоквадратичне відхилення; η – гауссівська величина з одиничною дисперсією.

У відповідності до виразу (1) середньоквадратичне відхилення зносу зростає в часі пропорційно, а функція (2) показує, що середньоквадратичне відхилення $\langle i_t \rangle$ зменшується, як $(t/\tau)^{-\frac{1}{2}}$. Таким чином, оцінка швидкості зносу залежить від внутрішньої структури процесу і тривалості дослідження. Вона точніша зі збільшенням часу випробування, а оцінка на тимчасових інтервалах, менших τ , не має сенсу через її невизначеність. Потрібно враховувати, що інтервал відновлення трибоструктури τ у трибосистемах різний при визначенні тривалості випробувань з оцінки швидкості зносу. Вона визначається як роздільною здатністю інструменту так і внутрішньої структурою самого

процесу. Оптимальна тривалість досліду t перебуває у діапазоні трьох – шести інтервалів τ . У досліджуваних трибосистемах час τ відповідає шляху тертя 2000-2500 м, тому як базовий був обраний шлях тертя 10 км. Для кожної трибосистеми був реалізований центральний ротатбельний план другого порядку для двох факторів, за результатами експерименту визначені параметри характеристик і отримані моделі, що адекватно відображають процес зносу в області експерименту.

У таблиці наведені математичні моделі інтенсивності зносу i для покриттів та контртіл, середні значення коефіцієнта тертя μ , а також значення середньоквадратичного відхилення σ за результатами чотирьох експериментів у центрі досвіду. У цій таблиці наведено середні значення безрозмірної величини інтенсивності зносу (1 мкм за 1 км шляху тертя).

Таблиця

Характеристики процесу зноса детонаційних покриттів на ВТ-22 при терті по бронзі БрАЖМц 10-3-1,5 и хромованому ВТ-22 у мастилі АМГ-10

№	Покриття	Інтенсивність зносу покриття, $\times 10^{-9}$	σ	μ
	Контртіло	Інтенсивність зносу контртіла, $\times 10^{-9}$		
1	ТіС-Ni	$i(\bar{x}) = 4,4 + 0,6x_1 + 2,2x_2 - 1,3x_1x_2 + 0,9x_1^2$	0,85	0,17
	БрАЖМц 10-3-1,5	$i(\bar{x}) = 22,5 + 3,1x_1 + 5,2x_2 - 1,6x_1x_2 + 4,2x_2^2$	3,4	
2	ТіС-Ni	$i(\bar{x}) = 26 + 1,8x_1 + 4,6x_2 + 2,3x_1x_2$	4,8	0,17
	ВТ-22 (хромов.)	$i(\bar{x}) = 19 + 1,1x_1 + 5,2x_2 - 0,8x_1^2 + 3,3x_2^2$	2,7	
3	WC-Ni	$i(\bar{x}) = 15 - 1,6x_1 + 4,2x_2 - 1,2x_1x_2 + 2,7x_2^2$	3,3	0,19
	БрАЖМц 10-3-1,5	$i(\bar{x}) = 18 - 2,1x_1 + 3,6x_2 - 1,5x_1x_2 + 1,3x_1^2 + 1,1x_2^2$	3,1	
4	WC-Ni	$i(\bar{x}) = 7,7 - 1,6x_1 + 4,2x_2 - 1,3x_1x_2 + 2,1x_2^2$	1,4	0,19
	ВТ-22 (хромов.)	$i(\bar{x}) = 25,3 - 2,2x_1 + 6,7x_2 - 2,4x_1x_2 + 3,3x_2^2$	5,2	
5	WC-NiP	$i(\bar{x}) = 11 - 2,6x_1 + 3,9x_2 - 2,1x_1x_2 + 1,3x_1^2 + 2,8x_2^2$	2,1	0,19
	БрАЖМц 10-3-1,5	$i(\bar{x}) = 17 - 1,7x_1 + 4,6x_2 + 1,2x_1^2 + 2,4x_2^2$	3,2	
6	WC-NiP	$i(\bar{x}) = 20 - 1,6x_1 + 3,1x_2 - 0,7x_1x_2 + 1,4x_2^2$	3,5	0,21
	ВТ-22 (хромов.)	$i(\bar{x}) = 32 - 2,7x_1 + 5,2x_2 - 2,2x_1x_2 + 3,3x_2^2$	6,6	

Металографічне дослідження та аналіз експериментальних даних показують, що детонаційні покриття, нанесені порошками карбідів з металевими зв'язками, мають тонку гетерогенну структуру. Композиція карбідів і металевої зв'язки, що володіють складною комбінацією механічних і електрохімічних властивостей, сприяє взаємодії поверхневих елементів детонаційних покриттів з молекулами мастила і контртіла, активізованими тертям. Трибологічні структури, що утворюються в результаті багатоетапного синтезу, визначають рівень триботехнічних характеристик, наближених за характеристиками до

електротехнічного хромування. Детонаційні покриття TiC-Ni і WC-Ni, а також покриття WC-NiP мають при терті по бронзі ширший робочий діапазон за швидкостями і навантаженням в порівнянні з плазовими покриттями.

При терті покриттів по хрому сумарний знос пари тертя істотно менший, ніж при терті по бронзі. Відбувається це за рахунок найкращих триботехнічних властивостей хрому в галузі експерименту.

Коефіцієнт тертя покриттів електрохімічним хромом має той же порядок, що і при терті по бронзі. Сумарна інтенсивність зносу покриття і контртіла при терті по хрому дещо нижча, ніж при терті по бронзі.

Висновки. Триботехнічні властивості детонаційних покриттів при терті у гідродініні АМГ-10 визначають самоутворюючі в контакті триботехнічні структури диссипативного типу. У системах, які включають бронзу, такі структури утворюються в результаті вибіркового розчинення легуючих елементів бронзи активізованої тертям рідини АМГ-10. З атомів міді, що залишилися на поверхні, формуються структури Гаркунова (див. рис. 3).

Мінімальний рівень зносу мають системи TiC-Ni БрАЖМц 10-3-1,5 і WC-NiP БрАЖМц 10-3-1,5.

При терті покриттів по хромованому сплаву ВТ-22 триботехнічні структури утворюються зі складних оксидів, асфальтенів, коксів та ін. Триботехнічні характеристики таких систем дещо нижчі, ніж у системах, що включають бронзу.

Список літератури

1. Крылов К.А., Хаймзон М.Е. Долговечность узлов трения самолетов. – М.: Транспорт, 1976. – 183 с.
2. Аксенов А.Ф., Полицук И.Е., Кульгавый Э.А. Состояние и перспективы использования антифрикционных покрытий на титановых сплавах // Трение и износ. 1982. –Т.3.
3. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1982. – 215 с.
4. Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Л., Корж В.М. Инженерія поверхні.- К. Наук. Думка, 2007-558с.
5. Евтектичні композиційні матеріали на основі перехідних металів з тугоплавкими фазами втілення: [Панарін В.Є., Кіндрачук В.М, Лобода П.І., Тітов В.А. та інші].- К: НАУ, КПІ, 2015.-239с.
6. Самсонов Г.В., Эпик А.П. Тугоплавкие покрытия.–М.:Металлургия, 1973.– 400 с.
7. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. –М.:Наука, 1976. – 390 с.
8. Зельдович Я.Б. Перемежаемость в случайных средах УФН, . – 1987. – Т. 152, вып. 1–С. 33–41.

Стаття надійшла до редакції 15.02.2024.

M. V. KINDRACHUK, N. M. STEBELETSKA, V. V. KHARCHENKO, M. A. HLOVYN,
I. V. KOSTETSKYI

REGULAR WEAR DETONATION COATINGS ON TITANIUM ALLOY VT-22

The paper presents the results of experimental studies of the wear process of detonation coatings and counterbodies and compares them with other types of coatings, obtaining wear characteristics. The characteristics of wear of coatings are described in an analytical form, as well as the results of the study of tribological structures. The tribotechnical characteristics of detonation coatings are determined, taking into account the properties of dissipative structures that are self-formed in contact with friction. The effectiveness of the method of researching the process of wear of detonation coatings has been determined. It has been established that when coatings are rubbed against chrome, the total wear of the friction pair is significantly less than when rubbed against bronze. This is due to the best tribotechnical properties of chromium in the experimental field. The coefficient of friction of electrochemical chromium coatings is of the same order as when rubbing on bronze. The total intensity of wear of the coating and the counterbody when rubbing against chrome is somewhat lower than when rubbing against bronze. Since tribological structures are formed from complex oxides, asphaltenes, cokes, etc. during friction of coatings on chrome alloy VT-22, therefore the tribotechnical characteristics of such systems are somewhat lower than in systems that include bronze.

Keywords: titanium alloys, detonation coatings, wear, tribological structures, tribological systems.

Referenses

1. Krylov K.A. Khaimzon M.E. Dolhovechnost Uzlov Trenyia Samoletov. – M. Trans Port 1976. – 183 S.
2. Aksenov A.F., Polishchuk I.E., Kulgavii E.A. Sostoyanie i perspektivi ispolzovaniya antifraktsionnikh pokritii na titanovikh splavakh // Trenie i iznos. 1982. –T.3.
3. Bartenev S.S., Fedko Yu.P., Grigorov A.I. Detonatsionnie pokritiya v mashinostroe nii. – L.: Mashinostroyeniye, 1982. – 215 s.
4. Iushchenko K.A., Borysov Yu.S., Kuznietsov V.L., Korzh V.M. Inzheneriia poverkhnii.- K. Nauk. Dumka, 2007-558s.
5. Evteltychni kompozytsiini materialy na osnovi perekhidnykh metaliv z tuhoplavkymy fazamy vtilennia: [Panarin V.Ie., Kindrachuk V.M, Loboda P.I., Titov V.A. ta inshi].- K: NAU, KPI, 2015.-239s.
6. Samsonov G.V., Epik A.P. Tugoplavkie pokritiya.–M.:Metallurgiya, 1973.– 400 s.
7. Zedginidze I.G. Planirovanie eksperimeta dlya issledovaniya mnogokomponentnikh sistem. –M.:Nauka, 1976. – 390 s.
8. Zeldovich Ya.B. Peremezhhaemost v sluchainikh seredakh UFN, . – 1987. – T. 152, vip. 1– S. 33–41.

Kindrachuk Myroslav – 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>.

Stebeletska Nataliia – candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Technical Service SS NULES of Ukraine “Berezhany Agrotechnical Institute”, St. Akademichna, 20, Berezhany, Ukraine, 47501, E-mail: stebelletska@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2726-0932>.

Kharchenko Volodymyr – head of laboratory 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/0000-0001-6383-5337>.

Hlovyn Mykhailo – 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/0000-0003-2525-9767>.

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>.

Кіндрачук Мирослав Васильович — член-кореспондент НАН України, докт. техн. наук, професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел/факс: +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

Стебелецька Наталія Миронівна – канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної механіки та технічного сервісу ВП НУБіП України «Бережанський агротехнічний інститут» Тернопільська область, м. Бережани, вул. Академічна, 20, 47501, E-mail: stebeletska@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2726-0932>.

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>.

Гловин Михайло Андрійович – 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/0000-0003-2525-9767>.

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>.