

## ТРИБОТЕХНІЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОГЕННИХ КАРБІДОВІСНИХ ПОКРИТТІВ

Кіндрачук М. В., Кульгавий Е. А., Перро Д. І., Подлесний В. О.

Національний авіаційний університет

kindrachuk@ukr.net

*Визначено триботехнічні характеристики гетерогенних покриттів за властивостями самоутворювальних у контакті дисипативних структур. Наведено характеристики зносу покриттів в аналітичній формі, а також результати дослідження трибологічних структур.*

*Tribological properties of heterogeneous coatings defined by the properties of self-generated in contact dissipative structures. In the work are present characteristics of wear coatings in analytical form, and also results of analysis of tribological structures.*

### Сутність проблеми

У статті досліджували процес зносу детонаційних покриттів порошками систем: TiC-Co, TiC-Ni, TiC-Ni-Mo, а також, вивчали трибологічні структури, самоутворювальних у контакті під час тертя і визначальні рівні трибологічних характеристик в антифрикційних системах. Порошок товщиною 30—50 мкм наносили на підготовлену поверхню зразків з титанового сплаву VT-22. Як детонуючий газ використовували суміш кисню з ацетиленом. Отримували покриття товщиною 250—300 мкм, потім шліфували до товщини 200 мкм, проводили трибологічні випробування, за їх результатами визначали характеристики зносу, а також досліджували структуру поверхонь тертя.

### Методика досліджень

Рухомі з'єднання силових циліндрів гідросистем та амортизаційних стояків шасі літаків працюють в умовах граничного змащення рідиною АМГ-10. Букси амортизаційних стійок шасі літаків і втулки силових циліндрів гідросистем виготовлені з бронзи БрАЖМц 10-3-1,5, а зв'язані деталі з хромованої сталі 30ХГСА.

Моделюючи реальні умови, методика дослідження полягала у випробуванні детонаційних покриттів на титановому сплаві VT-22 при терті в рідині АМГ-10 за гальванічним хромом на VT-22 і за бронзою БрАЖМц 10-3-1,5.

Випробування покриттів проводили на установці СМТ за схемою тертя ковзання зразка, поверхня тертя якого з нанесеним покриттям виконана у вигляді сектора. Ця поверхня ковзає по зовнішній твірній обертового кільцевого контртіла діаметром 50 мм, коефіцієнт перекриття дорівнює 0,2. Установка дає змогу в широкому діапазоні змінювати навантаження на зразок та швидкість ковзання при проведенні експерименту.

**Мета** експерименту — отримання характеристик зносу детонаційних покриттів і контртіла, порівняння їх з іншими покриттями та визначення ефективності методу. Найбільш зручною формою одержання, зберігання і використання триботехнічних характеристик є математичні

моделі регресійного аналізу. Для зменшення обсягу експерименту розроблені плани, які оптимально використовують простір незалежних змінних.

Параметри моделей оцінюють шляхом обробки результатів експерименту методом найменших квадратів. Як математична модель процесу зносу  $i(X)$  в роботі використовувався многочлен другого ступеня на двовимірному просторі швидкостей і навантажень у вигляді:

$$i(X) = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2,$$

де  $X_1$  — нормована швидкість;  $X_2$  — нормоване навантаження;  $b_i$  — вектор коефіцієнтів регресії визначення яких є метою експерименту.

Використання ротатбельного плану другого порядку для двох факторів та визначення інтервалів відновлення трибоструктур  $\tau$  сприяло мінімізуванню кількості експериментальних точок при визначенні параметрів моделі.

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, яка обмежена аномальними станами, в яких велика ймовірність відмови.

### Результати дослідження та їх обговорення

Для визначення області однорідних процесів було проведено спеціальний експеримент та встановлено, що ця область обмежена термостабільними властивостями мастила при навантаженні 15 МПа і швидкості 1,3 м/с.

Для кожного покриття реалізовано центральний ротатбельний план другого порядку для двох факторів, у якому швидкість ковзання  $X_1$  варіювала в діапазоні 0,2—1,2 м/с, навантаження  $X_2$  — в діапазоні 2—12 МПа.

План складався з семи експериментальних точок і десяти дослідів, по одному досліді в кожній точці правильного шестикутника і чотири досліди в центрі експерименту. Кожен дослід припрацювався на шляху тертя 2 км і заліковувався під час випробування 10 км. Перед по-

чатком досліду, після припрацювання і завершення досліду, зразки промивали спиртом, висушували, вимірювали і зважували.

Покриття наносили на поверхню зразків, обробляли до шорсткості  $R_a = 0,32$  мкм і випробували для контртіла з бронзи БрАЖМц 10-3-1,5 і гальванічного хрому. Параметри шорсткості поверхні оцінювали з застосуванням профілографів «Калібр» і мікроінтерферометра МП-4. Поверхневі структури, хімічний склад поверхонь та продуктів зносу вивчали методами оптичної і растрової мікроскопії.

На еволюційному етапі припрацювання трибосистеми переходять зі стану, що задається технологією, у стаціонарний стан, що визначається самим процесом. У формуванні потоків речовини основну роль відіграють процеси самоорганізації та утворюючі в контакті трибологічні структури дисипативного типу.

Схематично механізм утворення трибосистем можна зобразити у вигляді, за координаційного числа кристалічної ґратки, що дорівнює восьми, поверхневі атоми мають від семи до одного зв'язку з внутрішніми атомами твердого тіла і від одного до семи вільних зв'язків. Енергія некомпенсованих зв'язків утворює надлишкову поверхневу енергію і поверхневий натяг твердих тіл. У контакті між атомом однієї поверхні і атомами контртіла можуть утворюватися від одного до семи зв'язків. Якщо кількість зв'язків з атомами контртіла перевищує кількість внутрішніх зв'язків, то при відносному русі твердих тіл атом переноситься на іншу поверхню. Під час тертя відбувається безупинне перенесення атомів між поверхнями. Ці активні атоми вступають у хімічний зв'язок з атомами контртіла і мастила.

У гідросистемах вітчизняних літаків застосовується мастило АМГ-10 (авіаційне гідравлічне масло, ГОСТ 6794-53) рідина нафтового походження, що отримується шляхом виділення вузької газової фракції з початком кипіння не нижче 200 °С. Ця фракція піддається кислотному та земельному очищенню, загущується ваніполом ВВ-2 до в'язкості 10 сст (7 % за вагою) за температури 50 °С з додаванням антиокиснювальної присадки (альфанафтол 0,005 %) і потім зафарбовується жирним барвником (судан).

Рідина АМГ-10 придатна для застосування в діапазоні температур від -60 до +125 °С з короткотривалими перегрівками до 150 °С. До позитивних якостей цієї рідини належать відсутність агресивно-корозійної дії на металеві деталі гідроагрегатів та хороші протизносні властивості.

У процесі тертя відбувається деструкція довгих молекул, полярно-активні молекули рідини АМГ-10, стикаючись з поверхнею металу, потрапляють в її електричне силове поле і приєднуються до активних її центрів, формуючи адсорбований шар орієнтованих молекул. Елек-

тричне поле поверхонь прагне зорієнтувати полярні молекули в напрямку поля, збільшуючи поляризацію молекул з дипольним моментом та індукуючи такий момент у неполярних молекул, який також адсорбується на поверхні.

Молекули високомолярних складових гідрорідини мають складну ланцюгову структуру. У процесі тертя відбувається їх деструкція з утворенням радикалів, гідроксильних і полярних груп. Такі уламки взаємодіють активними частинами з аналогічними молекулами, а також з переносними атомами металів.

У процесі тертя відбувається окиснення й утворюються: кислоти, альдегіди, нафтенові окиси, асфальтові окиси, ангідриди, закисні кислот, ароматичні асфальтени, інші продукти полімеризації.

У трибологічному контакті відбувається багатоступеневий синтез, у результаті якого утворюються кінцеві продукти фізико-хімічних перетворень: оксиди, сульфід, фосфати, кокси, метал—органічні солі, комплекси та інше у вигляді молекул, кластерів, міцел і ультрадисперсних частинок. На цьому синтез не завершується, у неврівноважних умовах трибологічного контакту виникають процеси самоорганізації. Основну роль у цьому відіграє ефект переміжності Я. Зельдовича, згідно з яким у флуктуючих випадковим чином потенційних полях у випадкових місцях, у випадковий час виникають піки ймовірності потенціалу.

В умовах еволюційного процесу припрацювання навіть найслабшим пікам потенціалу відповідають різкі піки концентрації переміщуваної речовини. У неврівноважених умовах трибологічного контакту, в різних місцях випадковим чином виникають скупчення частинок кінцевих продуктів, що стають центрами. До них приєднуються нові частинки і поступово формуються структури у вигляді окремих ділянок, сіток, осередків, клино- і хвилеподібних шарів товщиною від нано- до мікрометрів. Зменшення ентропії, під час утворення когерентних об'єднань часток, багаторазово компенсується її виробництвом у процесі тертя і зростанням при відведенні тепла з системи.

Утворювальні структури функціонують тільки безпосередньо в процесі тертя. Однак про їх існування свідчать дуже тонкі аморфізовані шари на поверхнях тертя, які можна безпосередньо спостерігати і досліджувати після завершення процесу.

Коли вплив ентропії та енергії стають порівнянними, система переходить у стаціонарний стан, який функціонує за нелінійними законами синергетики.

Стійкість стаціонарних станів визначає конкуренція між вільною енергією і ентропією, дотримується сталий стаціонарний баланс, за якого

періодичний вплив вільної енергії та ентропії в трибоструктурі стає переважним.

Роль ентропії як потенціалу полягає в тому, що під її впливом речовина наближається до рівномірного розподілу, це призводить до часткового оборотного руйнування трибоструктури і винесення деякої кількості її речовини з системи у вигляді продуктів зносу. Обсяг і ентропія трибоструктури зменшуються, переважним стає прагнення вільної енергії до мінімуму. Відбувається взаємодія виступаючих ділянок твердих тіл, відділення речовини твердих тіл, приєднання їх до трибоструктури, об'єм трибоструктури збільшується і цикл повторюється.

Величина зносу — зміни лінійних розмірів твердих тіл визначається участю їх речовини у формуванні трибоструктур. Потік цієї речовини, усередненої за площиною контакту, дорівнює швидкості зносу

$$i(t) = \frac{dI(t)}{dt}.$$

У стаціонарному стані — це процес з постійними середнім і дисперсією; показником стійкості тут є знак другої похідної  $d^2i/dt^2$ , яка повинна бути протилежна за знаком відхиленню  $i(t)$  від середнього значення. Саме ж середнє значення є точкою перегину функції  $i(t)$ , в якій вільна енергія та ентропія міняються місцями за ступенем впливу на процес.

Рівень стаціонарного стану визначає не вся створювана ентропія, а тільки та її мала частина, яка пов'язана з речовиною трибоструктури. За постійної температури вона пропорційна об'єму і може як збільшуватися, так і зменшуватися. Повна ентропія в процесі тертя завжди зростає.

Конкуренція вільної енергії  $F$  і ентропії  $S$ , яку можна подати рівнянням  $F = E - TS$ , породжує в далеких від рівноваги умовах, стійкі періодичні процеси.

У координатах  $F - TS$  таким процесам відповідають моделі Лотки—Вольтера, Брюсселятор та ін. Якщо трибоструктура поновлюється на тимчасовому інтервалі  $\tau$ , то знос на цьому інтервалі можна розглядати як незалежну вели-

чину. Тоді, згідно з центральною граничною теоремою, при  $t \gg \tau$  знос  $I(t)$  має нормальний розподіл і його можна подати у вигляді:

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

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

де:  $\langle i_t \rangle$  — середнє значення стаціонарного процесу;  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення;  $\eta$  — гауссівська величина з одиничною дисперсією.

Щодо попереднього виразу середньоквадратичне відхилення зносу зростає в часі пропорційно  $(t/\tau)^{1/2}$ , а наступна функція показує, що середньоквадратичне відхилення  $\langle i_t \rangle$  зменшується як  $(t/\tau)^{-1/2}$ .

Таким чином, оцінка швидкості зносу залежить від внутрішньої структури процесу та тривалості дослідження. Вона точніша зі збільшенням часу випробування, а оцінка на тимчасових інтервалах, менших  $\tau$ , не має сенсу внаслідок її невизначеності.

Інтервал відновлення трибоструктури  $\tau$  в трибосистемах різних, це потрібно враховувати при визначенні тривалості випробувань під час оцінювання швидкості зносу. Вона визначається не тільки роздільною здатністю інструменту, але і внутрішньою структурою самого процесу. Оптимальна тривалість дослідження  $t$  перебуває в діапазоні трьох—шести інтервалів  $\tau$ .

У досліджуваних трибосистемах час  $\tau$  відповідає шляху тертя 2000—2500 м, тому базовий обрано шлях тертя 10 км, як характеристика процесу. Для кожної трибосистеми було реалізовано центральний рототабельний план другого порядку для двох факторів, за результатами експерименту визначено параметри характеристик і отримано моделі, які правильно відображають процес зносу в області експерименту.

У таблиці наведено математичні моделі інтенсивності зносу для покриттів і контртіла, середні значення коефіцієнта тертя  $\mu$ , а також значення середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  за результатами чотирьох дослідів у центрі експерименту.

**Інтенсивність зносу плазмових покриттів на ВТ-22 по хромованій сталі 45 з мастилом АМГ-10**

№ з/п	Покриття контртіла	Інтенсивність зносу покриття, інтенсивність зносу контртіла	$\sigma$	$\mu$
1	TiC-Co	$i(\bar{x}) = 13,5 - 2,1x_1 + 4,3x_2 + 1,2x_1x_2 + 2,3x_2^2$	2,5	0,14
	БрАЖМц10-3-1,5	$i(\bar{x}) = 23,2 + 2,3x_1 + 5,4x_2 - 1,5x_1^2 + 4,3x_2^2$	3,1	
2	TiC-Co	$i(\bar{x}) = 5,5 + 1,1x_1 + 3,0x_2 - 1,3x_1x_2 + 2,1x_2^2$	1,2	0,15

	Сталь 45 (хром)	$i(\bar{x}) = 8,8 + 1,7x_1 + 2,4x_2 - 1,5x_1x_2 + 1,6x_2^2$	1,7	
--	-----------------	---	-----	--

Закінчення таблиці

№ з/п	Покриття контртіла	Інтенсивність зносу покриття, інтенсивність зносу контртіла	$\sigma$	$\mu$
3	TiC-Ni-Mo	$i(\bar{x}) = 54,5 - 5,2x_1 + 2,1x_2 + 3,8x_1x_2 + 11x_1^2$	5,5	0,16
	БрАЖМц10-3-1,5	$i(\bar{x}) = 13 + 2,3x_1 + 3,1x_2 - 1,3x_1^2 + 2,0x_2^2$	1,65	
4	TiC-Ni-Mo	$i(\bar{x}) = 22 + 3,3x_1 + 4,5x_2 - 2,1x_1x_2 + 3,1x_2^2$	3,4	0,17
	Сталь 45 (хром)	$i(\bar{x}) = 24 + 2,8x_1 + 4,1x_2 - 2,4x_1^2 + 4,0x_2^2$	3,75	
5	TiC-Ni	$i(\bar{x}) = 16,5 + 2,3x_1 + 4,2x_2 - 2,6x_1x_2 + 2,8x_2^2$	1,8	0,16
	БрАЖМц10-3-1,5	$i(\bar{x}) = 41 + 4,8x_1 + 6,7x_2 - 48x_1x_2 + 2,3x_2^2$	5,8	
6	TiC-Ni	$i(\bar{x}) = 14 + 1,8x_1 + 4,7x_2 - 23x_1x_2 + 3,1x_2^2$	1,85	0,15
	Сталь 45 (хром)	$i(\bar{x}) = 19 + 3,1x_1 - 3,9x_2 + 2,2x_1^2 + 2,8x_2^2$	2,2	

Металографічне дослідження та аналіз експериментальних даних показує, що детонаційні покриття порошками карбідів з металевими зв'язками мають тонку гетерогенну структуру. Композиція карбідів і металевої зв'язки, що мають складну комбінацію механічних і електрохімічних властивостей, сприяє взаємодії поверхневих елементів детонаційних покриттів з молекулами мастила і контртіла, які були активізовані тертям.

### Висновки

Утворені в результаті багатоетапного синтезу трибологічні структури визначають рівень триботехнічних характеристик, які наближаються за властивостями до електротехнічного хромування.

Детонаційні покриття TiC-Ni-Mo і TiC-Co, а також покриття TiC-Ni мають при терті по бронзі більший робочий діапазон за швидкостями і навантаженням порівняно з плазмовими покриттями. Під час тертя покриттів по хрому сумарний знос

пари тертя істотно менше, ніж при терті по бронзі.

Відбувається це за рахунок кращих триботехнічних властивостей хрому в зоні експерименту. Коефіцієнт тертя покриттів по електрохімічному хрому має той же порядок, що і при терті по бронзі. Сумарна інтенсивність зносу покриття та контртіла під час тертя по хрому трохи нижче, ніж при терті по бронзі.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Зедгінідзе І. Г. Планування експерименту для дослідження багатокомпонентних систем / І. Г. Зедгінідзе. — М. : Наука, 1976. — 390 с.
2. Кульгавий Е. А. Триботехнічні характеристики та їх застосування. Проблеми трибології. — 2003. — Вип. 3. — С. 51—61.
3. Зельдович Я. Б. Перемижність у випадкових середях УФН / Я. Б. Зельдович. — Т. 152. — 1987. — Вип. 1. — С. 33—41.
4. Кульгавий Е. А. Трибосистеми у випадкових середовищах. Проблеми трибології. — 2004. — Вип. 3. — С. 8—12.

Стаття надійшла до редакції 16.10.09.