

УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

Кіндрачук М. В., д-р техн. наук, проф., *Кульгавий Е. А.*, *Данілов А. П.*, *Хлевна Ю. Л.*

Національний авіаційний університет

kindrachuk@ukr.net

Розглянуто методику визначення характеристик зношування у вигляді статистичних моделей. Застосування статистичного аналізу пов'язано із внутрішньою структурою процесу зношування, наведено приклад побудови характеристики у вигляді полінома другого ступеня. Подано установку випробування, її характеристики та схеми випробувань.

Ключові слова: математична модель, установка випробування, планування експерименту.

The method of definition of characteristics of deterioration in the form of statistical models is considered. Application of the statistical analysis is connected with internal structure of process of deterioration, the example of constructions of the characteristic in the form of a polynomial of the second degree is resulted. The following test setup, its characteristics, and circuit testing.

Keywords: mathematical model, installation testing, designed experiment.

Вступ

На сьогодні сформувався та набув розвитку новий підхід до оцінки значення матеріалу, що працює в умовах тертя в забезпеченні зносостійкості. Він передбачає провідну роль поверхні та її властивостей (а не об'ємних властивостей, як це було загально прийнято) у забезпеченні триботехнічних та міцнісних властивостей виробів [1].

Важливу роль, при цьому, відіграють самоутвірні трибологічні структури. Для їх вивчення необхідно мати установку та схеми випробування, що будуть забезпечувати якнайкращі умови створення трибоstruktur.

Постановка задачі

Під час дослідження триботехнічних пар виникають проблеми, які пов'язані з нерівноважністю та динамікою станів у трибологічному контакті, а також складністю в реалізації схем та умов випробування, що будуть описувати реальні умови роботи вузлів тертя. Це визначається не тільки здатністю інструмента, але і внутрішнім механізмом трибологічних процесів.

Мета роботи

1. Методика організації проведення експериментів, з використанням установки тертя, яка дає змогу отримати оптимальні умови для появи трибологічних структур з подальшим їх вивченням.

2. Аналіз установки схем випробування з різним коефіцієнтом перекриття.

3. Метод визначення параметрів зношування, аналіз отриманих даних.

Аналіз досліджень

Методи дослідження як в трибології, так і в інших науках умовно можна розділити на: теоретичні, теоретико-експериментальні і експериментальні [2].

Теоретичний метод побудований на узагальненні накопиченого досвіду або результатів експериментальних досліджень. Цей метод ґрунтується на математичному плануванні експериментів, регресійному і дисперсійному аналізі.

Теоретико-експериментальний метод припускає створення або розвиток теорії з подальшою перевіркою експериментом, уточненням і визначенням необхідних параметрів.

Експериментальний — припускає встановлення зв'язку між функціями і аргументами. Другий і третій перелічені методи досліджень тісно зв'язані між собою і часто виступають єдиним цілим. У будь-якому випадку, побудова теорії потребує експериментального підтвердження.

Проведення експериментів пов'язане з чималими фінансовими витратами і часто потребує тривалого часу. Для зменшення вищезазначених витрат, необхідно використовувати математичний апарат, без втрати якості та достовірності результатів.

Трибологічні процеси — тертя, знос, відмови відбуваються в трибологічних системах, коли в контакті діє навантаження і відбувається відносний рух твердих тіл. Якщо навантаження відсутнє або рух не відбувається, то й не відбуваються трибологічні процеси, тобто трибологічний процес обов'язково знаходиться, в якійсь точці двовимірного простору швидкостей і навантажень. Ураховуючи випадковість процесу зношування, що перебуває під впливом цілого комплексу змінних факторів, у цій статті обмежимося залежністю між навантаженням P , швидкістю V та зносом i .

Результати досліджень

Процес зношування в часі складається з двох нерівних етапів — *припрацювання* та *стаціонарного стану*.

На етапі припрацювання формуються трибологічні структури, потім процес флюктує у стаціонарному режимі з постійним середнім значенням і дисперсією. Надмірне збільшення трибоструктури обмежений ентропією, а нижній рівень — вільною енергією. Формули для швидкості зношування $i(t) = dI(t)/dt$ та зносу $I(t)$, як функції часу t , мають вигляд

$$i(t) = (i_0 - \langle i \rangle) \exp\left(-\frac{t}{T}\right) + \langle i \rangle; \quad (1)$$

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

де i_0 та $\langle i \rangle$ — початкове і середнє стаціонарне значення швидкості зношування; T — час релаксації припрацювання; $I(t)$ — знос.

Експоненти в правій частині формули (1) і (2) описують еволюційний процес припрацювання, при цьому тривалість припрацювання оцінює час релаксації T , а внесок припрацювання в знос — функціонал $I_0 = (i_0 - \langle i \rangle) T \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right]$.

На цьому етапі переважає прагнення вільної енергії до мінімуму, у контакті відбувається агрегація часток, які переносяться; внутрішні потоки речовини спрямовані на формування трибоструктури і збільшення її об'єму, а потік речовини із системи зменшується, поки не досягне стаціонарного рівня. У стаціонарному стані трибоструктура флюктує біля середнього значення, протягом однієї флюктуації частина речовини виходить із системи у вигляді продуктів зношування, а потім трибоструктура відновлюється.

Якщо трибоструктура відновлюється на часовому інтервалі τ , то знос $I(t)$ 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 навести у вигляді

$$I(t) = \langle i \rangle t \pm \eta \sigma \tau (t/\tau)^{\frac{1}{2}}; \quad (3)$$

$$\langle i \rangle = I(t)/t \pm \eta \sigma \tau (t/\tau)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

де $\langle i \rangle$ — середнє значення стаціонарного процесу; σ — середньоквадратичне відхилення; η — гауссівська величина з одиничною дисперсією.

Згідно з виразами (3) і (4) дисперсія зношування збільшується в часі пропорційно t/τ ; а дисперсія оцінки середнього $\langle i \rangle$ зменшується як $(t/\tau)^{-1}$. Оцінка $\langle i \rangle$ стає точнішою зі збільшенням часу дослідження, а оцінка на часових інтервалах менших τ не має сенсу, внаслідок її невизначеності. Інтервал кореляції τ у різних трибосистемах може досягати декількох десятків і навіть сотень годин. Це означає, що тривалість досліджень під

час оцінки параметрів інтенсивності зношування визначається не тільки дозволяючою здатністю інструмента, але і внутрішньою структурою самого процесу. Оптимальна тривалість дослідження повинна знаходитися в діапазоні від трьох до шести інтервалів τ .

Для кожної антифрикційної системи на просторі швидкостей і навантажень існує область, у кожній точці якої визначено стійкий стаціонарний стан. Ця область обмежена аномальними станами, у яких значимою стає ймовірність відмови.

В області стаціонарних станів швидкість зношування має властивість однорідності, розподілена за нормальним законом і не залежить від часу. Тому цей процес можна представити статистичними моделями регресійного аналізу у вигляді полінома другого ступеня [3].

Моделі регресійного аналізу не включають тимчасових співвідношень, тому їх можна використовувати як характеристики стаціонарних однорідних процесів.

Проведення багатофакторних експериментів передбачає такі етапи робіт:

- попереднє вивчення об'єкта досліджень;
- вибір факторів і плану експериментів;
- кодування факторів;
- розробка матриці планування експериментів;
- проведення експериментів;
- аналіз та обробка отриманих результатів;
- визначення коефіцієнтів регресії;
- оцінка значущих коефіцієнтів регресії;
- побудова поліномної моделі та перевірка її

на адекватність.

Область варіювання визначається шляхом побудови спеціального експерименту, за принципом імітації роботи вузла тертя. При цьому варіюються рівні кожного з факторів до значень, що порушують однорідність процесу. В кожній точці ставиться не менше п'яти дослідів. Отримані результати є базою при порівняльних випробуваннях нових матеріалів. Отже, отримання максимуму інформації при найменших витратах — основна мета планування експерименту.

Знаходження функцій, що задають зв'язок між факторами P, V та параметрами зношування i , область однорідності процесів зручно описувати виразом у вигляді полінома.

Факторний план одночасно варіює всі фактори таким чином, що ефект кожного фактора оцінюється за всією сукупністю дослідів.

Оскільки необхідно оцінити два фактори, виникає задача проведення двофакторного експерименту [4].

Модель процесу двофакторного експерименту другого порядку має вигляд:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_1 x_1^2 + b_2 x_2^2,$$

де y — досліджуваний фактор; x_1 і x_2 — варійовані фактори; $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{22}, b_{12}$ — емпіричні коефіцієнти, які потребують визначення за результатами багатфакторного експерименту.

Для того, щоб оцінити всі коефіцієнти квадратичної моделі, треба мати плани, в яких кожен фактор варіюється не менш ніж на трьох рівнях. Існує велике різноманіття планів двофакторних експериментів другого порядку. Вони за рівнем відображення реальності процесів, що описуються, майже рівноцінні, але відрізняються обсягом експериментальних робіт.

Розглянемо як альтернативу три плани, що найбільш часто трапляються:

1) двофакторний ортогональний центральний композиційний план (ОЦКП) другого порядку, реалізація якого передбачає:

- кількість варіантів дослідів — 9;
- три рівня експериментів (+1, 0, -1);

2) центральний некомпозиційний план другого порядку, для реалізації якого необхідно:

- провести 10 варіантів експерименту;
- забезпечити параметри x_2 на рівнях 0,866 і -0,866;

3) центральний композиційний рототабельний план (ЦКРП) другого порядку для двох факторів, який широко використовується в інженерній практиці. Цей план реалізується:

- проведенням 10 дослідів;
- забезпеченням параметрів регульованого фактора в найвищих точках із значеннями x_1 — (+0,5) (-0,5); та x_2 — (+0,87) (-0,87).

Порівняно з іншими планами, критерій оптимальності мають композиційні рототабельні плани другого порядку (рис. 1).

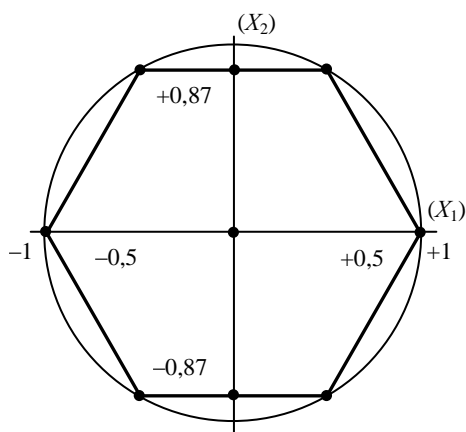


Рис. 1. Центральний рототабельний план другого порядку

ЦКРП другого порядку для двох факторів подано в таблиці, де фактор X_1 варіюється на п'ятих рівнях, а фактор X_2 — на трьох.

Матриця центрального рототабельного плану другого порядку для двох факторів

Номер дослідів	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	X_1X_2
1	-1	0	1	0	0
2	1	0	1	0	0
3	0,5	0,87	0,25	0,75	0,43
4	0,5	-0,87	0,25	0,75	-0,43
5	-0,5	0,87	0,25	0,75	-0,43
6	-0,5	-0,87	0,25	0,75	0,43
7—10	0	0	0	0	0

Для забезпечення експериментальної частини використовується установка тертя, що зображена на рис. 2.

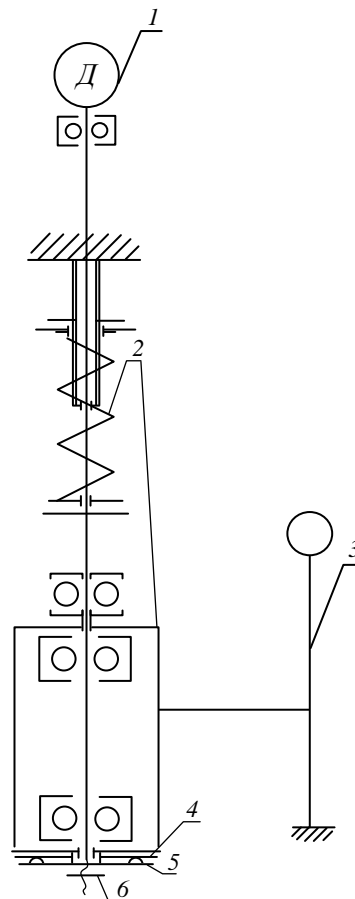


Рис. 2. Принципова схема установки тертя:
1 — двигун; 2 — механізм навантаження;
3 — тензосистема; 4 — зразок (нерухомий);
5 — контр зразок (рухомий); 6 — контрвайка

Машина тертя призначена для випробувань конструкційних матеріалів на тертя та зношування і визначення їх триботехнічних характеристик.

Ця установка складається з приводу 1 з регулюванням швидкості обертання від 1 м/с до

37 м/с; механізму навантаження 2 з діапазоном навантаження 1 – 40 МПа, що навантажує зразок 4 при контактному терті з рухомим контр зразком 5. Контрзразок фіксується на валу приводу контргайкою 6. Сила тертя визначається за допомогою тензосистеми — 3.

Конструкцією передбачено випробування кільцеподібних зразків з внутрішнім діаметром 20 мм, за наступними схемами: «кільце—сектор» (рис. 3), «кільце—кільце» (рис. 4) та «кільце—сфера» (рис. 5).

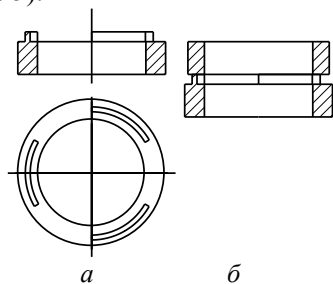


Рис. 3. Випробування пари тертя «кільце—сектор»: а — рухомий зразок—сектор; б — схема тертя

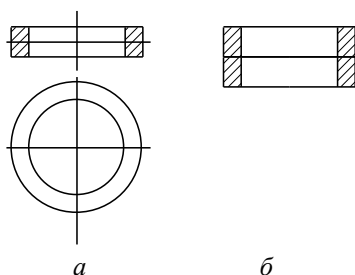


Рис. 4. Випробування пари тертя «кільце—кільце»: а — рухомий зразок—кільце; б — схема тертя

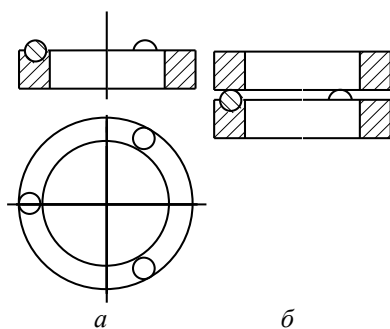


Рис. 5. Випробування пари тертя «кільце—сфера»: а — рухомий зразок—сфера; б — схема тертя

При випробуванні зразків «кільце—кільце» коефіцієнт перекриття якого становить ($\rho = 1$), за рахунок чого складаються умови, коли зовнішнє середовище не потрапляє в область фактичного контакту. Тобто доступ змащувального матеріалу в цьому випадку буде мінімальним. При такому виді працездатність пари тертя визначається триботехнічними властивостями матеріалів.

Пари тертя «кільце—сектор» та «кільце—сфера» мають коефіцієнт перекриття менший

одиниці ($\rho < 1$), що збільшує підведення мастильного матеріалу. Активізована поверхня тертям більше часу взаємодіє з середовищем мастила. За рахунок оптимальнодостатнього підведення мастила створюються умови для формування трибологічних структур, які впливають на процеси зношування.

Пара тертя «кільце—сектор» та «кільце—кільце» забезпечує однорідність умов по площі контакту та постійність номінального навантаження в процесі експерименту.

При випробуванні пари тертя «кільце—сфера» коефіцієнт перекриття значно менший одиниці ($\rho \ll 1$). Це забезпечує найкраще змащування поверхонь тертя, та як наслідок створює оптимальні умови для утворення трибоструктур на поверхнях контакту. Така схема випробування не дає змоги встановити нормоване питоме навантаження, оскільки при збільшенні зносу, зростає коефіцієнт перекриття, тому питоме навантаження усереднене.

Однак збільшення площі контакту дає змогу здійснювати вимірювання лінійного зносу з дуже високою точністю, за допомогою геометричного розрахунку (рис. 6).

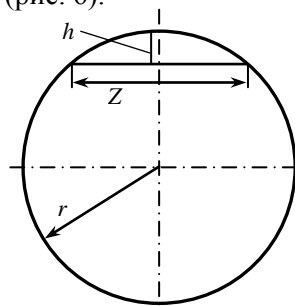


Рис. 6. Схематичне зображення контртіла «сфери»

Лінійний знос розраховується за формулою

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{Z^2}{4}}$$

де h — висота дуги (лінійний знос); r — радіус сфери; Z — хорда (діаметр плями зносу).

Отже, для визначення лінійного зносу необхідно за допомогою оптичного мікроскопа проводити замірювання діаметра плями. Це дає можливість значною мірою зменшити час проведення експерименту та збільшити точність вимірювання.

Висновки

Проведення досліджень новітніх матеріалів трибологічного призначення обумовлене: необхідністю чутливого обладнання; наявністю установок, які дають можливість проводити випробування за необхідних умов та параметрів швидкості та навантаження, а також мінімізувати три-

валість досліджу та фінансові затрати на його проведення.

Тривалість дослідження під час оцінки характеристик зношування визначається дозволяючою здатністю інструменту, а також внутрішньою структурою процесу.

Дослідження повинно бути в діапазоні від трьох до шести часових інтервалів відновлення трибоструктур, або значення зносу — не менше трьох мінімальних поділок інструменту, які визначаються безпосередньо в процесі експерименту. Ефективним шляхом зменшення часових витрат на експеримент є застосування методів математичної статистики і планування експерименту.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Прусаков Б. А.* Проблемы материалов в XXI веке (обзор) / Б. А. Прусаков // *Металловедение и термическая обработка металлов.* — 2001. — № 1. — С. 3—5.
2. *Сулов А. Г.* Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Сулов, А. М. Дальский. — М. : Машиностроение, 2002. — 684 с.
3. *Нахимов В. В.* Теория эксперимента / В. В. Нахимов. — М. : Наука, 1971. — 436 с.
4. *Кульгавый Э.А.* Триботехнические характеристики и их применение. Проблемы трибологии / Э. А. Кульгавый. — 2003. — № 3. — С. 51—61.

Стаття надійшла до редакції 17.12.2010.