

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНТИФРИКЦІЙНИХ СИСТЕМ

Розглянуто метод 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.

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.

Стан проблеми

Антифрикційні системи в значній мірі забезпечують ресурс, надійність і безпеку усіх видів техніки, вони відносяться до основних об'єктів досліджуваних трибологією. Під час їхнього дослідження виникають проблеми, які пов'язані з незрівноваженістю та динамікою станів у трибологічному контакті, а також складністю вимірів, котра визначається не тільки дозволяючою здатністю інструмента, але і внутрішнім механізмом трибологічних процесів. Головним методом дослідження в трибології, як усієї традиційної науки, є аналіз — реальний або уявний поділ єдиного цілого на частини, при цьому передбачається, що тільки вивчивши елементи, можна пізнати явище в цілому. Тертя і зношування розглядаються як різновиди руйнування, тертя — це подолання опору руйнуванню містків холодного зварювання і деформації поверхні виступаючими нерівностями контртіла, а знос — результат мікрорізання, когезійного, втомлювального відділення часток від поверхні твердого тіла або крихкого руйнування хімічних плівок. Такі механістичні уявлення не відповідають реальним процесам в антифрикційних системах. Навіть у найбільш навантажених, внаслідок економії розмірів і маси, авіаційних трибосистемах реалізуються тонкі фізико-хімічні механізми, відбувається синтез нових речовин і структур, а будь-які форми руйнування, деформації поверхні тертя розглядаються як ознаки майбутньої відмови. У праці [1] показано, що в процесі зношування в трибологічному контакті мимовільно утворюються трибологічні структури, що флюктуують біля середнього значення в стаціонарному режимі. При цьому на окремих часових інтервалах розміри деталей можуть навіть збільшуватися, за рахунок тимчасового зростання трибоструктур, тому обмежений час іспитів може дати неадекватні оцінки.

Постановка завдання

Мета цієї роботи полягає в розробці методу визначення параметрів зношування, що ґрунтується на знанні механізму процесів у трибологічному контакті та побудова математичної моделі процесу.

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 постійними середнім значенням і дисперсією. Надмірний ріст 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 (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 подати 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 (3) і (4) дисперсія зношування зростає в часі пропорційно t/τ , а дисперсія оцінки середнього $\langle i \rangle$ зменшується як $(t/\tau)^{-1}$. Оцінка $\langle i \rangle$ стає точніше 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 кількох 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 .

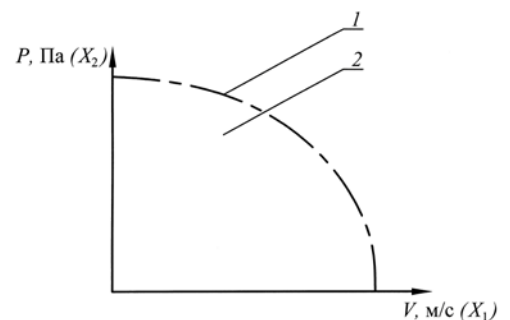
Для кожної антифрикційної системи, на просторі швидкостей і навантажень \bar{X} , існує область \bar{C} (див. рисунок), у кожній точці якої визначено стійкий стаціонарний стан. Ця область обмежена аномальними станами, у яких значимою стає імовірність відмови.

В області стаціонарних станів швидкість зношування має властивість однорідності, розподілена за нормальним законом і не залежить від часу. Тому цей процес можна подати статистичними моделями регресійного аналізу [2] у вигляді полінома другого ступеня.

В області стаціонарних станів процес зношування завжди можна адекватно описати аналітичним виразом виду

$$E[i(\bar{X})] = \eta(\beta, X), \quad (5)$$

де $E[i(\bar{X})]$ — усереднені результати вимірювань у точках факторного простору X , ці результати незалежні і розподілені за нормальним законом із середнім $\eta_{\text{ср}}(\beta, X)$ та дисперсією σ_i^2 ; β — вектор коефіцієнтів регресії, визначення яких є метою експерименту.



Область стаціонарних станів \bar{C} на просторі швидкостей і навантажень \bar{X} :
1 — межа області стаціонарних станів;
2 — область стаціонарних станів

Як оцінку β приймають оцінку b , методу найменших квадратів.

Вибір плану експерименту, тобто оптимального розташування експериментальних точок на просторі швидкостей та навантажень дає змогу багаторазово підвищити його ефективність. Як критерії оптимальності використання факторного простору можуть бути використані: ортогональність матриці планування, коефіцієнти регресійного рівняння при цьому визначаються незалежно; під час ротатбельного планування дисперсія результату оцінки визначається тільки відстанню від центра експерименту.

Найбільш зручною і достатньою формою функції (5) для опису стаціонарної області процесу зношування є поліном другого ступеня у вигляді

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

Для того, щоб оцінити всі коефіцієнти квадратичної моделі треба мати плани, в яких кожен фактор варіюється не менш чим на трьох рівнях. У таблиці наведено матрицю центрального ротатбельного плану другого порядку для двох факторів, у якій X_1 варіюється на п'ятьох рівнях, а фактор X_2 — на трьох.

У лабораторних умовах визначали характеристику зношування $i(\bar{X})$ трибосистеми: плазменне покриття на титановому сплаві VT-22 TiC-Ni під час тертя по сталі 45 зі змащенням ЦИАТИМ-201.

Експериментальну частину дослідження здійснювали в лабораторних умовах. Сталеві зразки у формі кільця $\varnothing 30 \times \varnothing 40 \times 10$ мм термооброблювали до твердості HRC = 45 ± 2 , торцьові поверхні тертя шліфували до шорсткості Ra $\leq 0,32$ мкм. Плазменне покриття наносили на аналогічне кільце зі сплаву VT-22 і оброблювали до шорсткості Ra $\leq 0,32$ мкм. Площа контакту не змінюється зі зносом, що є однією з умов стаціонарності процесу.

МАТРИЦЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО РОТАТАБЕЛЬНОГО ПЛАНУ ДРУГОГО ПОРЯДКУ ДЛЯ ДВОХ ФАКТОРІВ

№ досліду	X_1	X_2	X_{12}	X_{22}	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	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0

Розглянемо приклад визначення характеристики зношування $i(\bar{X})$.

Експериментально встановлено межі області стаціонарних процесів, вони визначаються термостабільними властивостями змащення і відповідають швидкості 0,3 м/с при навантаженні 12 МПа.

Аналіз стану поверхні і поведінки сили тертя дозволив обмежити процес припрацювання до 500 м. Після припрацювання проводили контрольне обмірювання зразків та випробовували при швидкостях і навантаженнях, що відповідають експериментальним точкам плану експерименту.

Час поновлення трибологічної структури визначали металознавчими методами та вимірами розмірів зразків мікрометром з точністю 0,1 мм. В області експерименту тривалість інтервалу не перевищувала 600 м. Виходячи з цього був обраний шлях тертя при оцінці параметрів стаціонарного процесу, котрий був рівний 4000 м. Змащення відновлювалося через кожні 200 м шляху тертя.

Було реалізовано ротатабельний план другого порядку для двох факторів, що містить в собі сім експериментальних точок і десять дослідів. Чотири дослідів в центральній точці плану використовували для визначення дисперсії.

У результаті експерименту отримано характеристику трибосистеми у вигляді:

$$i(\bar{X}) = 5,75 + 1,25X_1 + 1,65X_2 - 0,4X_1X_2 + 0,43X_1^2 + 1,2X_2^2,$$

де X_1 – нормоване значення швидкості від -1 (0,05 м/с) до +1 (0,25 м/с); X_2 — нормоване значення навантаження від -1 (1 МПа) до +1,25 (10 МПа).

Інтенсивність зношування виражена в $i \times 10^{-9}$, що відповідає 1 мкм зносу на 1 км шляху тертя.

Дисперсія визначена за результатами чотирьох досліджень у центрі експерименту. Середньоквадратичне відхилення i в області експерименту дорівнює $\sigma_i = 0,29 \times 10^{-9}$. Перевірка за критерієм Кохрена показала адекватність характеристики $i(\bar{X})$ експериментальним даним.

Висновки

Тривалість дослідження під час оцінки характеристик зношування, визначається дозволяючою здатністю, застосовуваного інструменту, а також внутрішньою структурою процесу. Вона має бути в діапазоні від трьох до шести часових інтервалів поновлення трибоструктур, або значення

зносу — не менше ніж трьох мінімальних поділок застосовуваного інструменту, котрі визначаються безпосередньо в процесі експерименту.

Ефективним шляхом зменшення часових витрат на експеримент, є застосування методів математичної статистики і планування експерименту.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Кульгавый Э. А.* Триботехнические характеристики и их применение. Проблемы трибологии. — 2003. — № 3. — С. 51—61.
2. *Налимов В. В.* Теория эксперимента. — М. : Наука, 1971. — 436 с.