

Писаренко В.Г.,***Диха О.В.***** КНВО "Форт" МВС України,
м. Вінниця, Україна,** Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ МЕТОДУ
ВИПРОБУВАНЬ НА ЗНОС ЗА СХЕМОЮ
КОНУС - ТРИ КУЛЬКИ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ
ТОЧНОЇ МЕХАНІКИ****Вступ**

На КНВО ФОРТ (м. Вінниця) впроваджена високоефективна технологія комбінованої хіміко-термічної обробки (КХТО) з метою підвищення зносостійкості і захисту від корозії деталей точної механіки [1]. Основною особливістю розробленої технології є комплексне забезпечення високих характеристик зносостійкості, корозійної стійкості, теплостійкості за рахунок формування міцних поверхневих шарів в інтервалі підвищених температур. Технологія КХТО є екологічно чистою і може в більшості випадків замінювати гальванічні покриття (оксидування, цинкування, хромування, кадміювання та ін.).

Ефективність розробленої технології може бути досліджена шляхом експлуатаційних або лабораторних випробувань, які є більш економічними. Разом з цим, під час лабораторних випробувань необхідно забезпечити умови, найбільш адекватні до реальних умов експлуатації. Широко використовувані в цей час якісні методи випробувань на знос дають тільки локальні результати стосовно конкретних умов. Метою даної роботи є розвиток теорії методів лабораторних випробувань для встановлення кількісних характеристик зносостійкості, що дозволяють прогнозувати зносостійкість вузлів тертя, підданих різним способам модифікації поверхневого шару.

Теорія визначення параметрів моделей зношування, як правило, розроблюється на основі розв'язку обернених зносоконтактних задач (тобто коли за прийнятою математичною формою закону зношування, геометричними співвідношеннями (умова нерозривності в контакт), умовою рівноваги та результатами випробувань на зношування визначаються залежності для розрахунку параметрів). Чим більше визначальних факторів в моделі, тим складніше розв'язок. Так вже два параметри (наприклад тиск і температура) значно ускладнюють задачу і потребують певних припущень.

Як найбільш доцільну схему випробувань пропонується використати схему, коли в процесі випробувань змінюється контактний тиск внаслідок зміни площадки контакту, що дає можливість за результатами випробувань одного зразка мати результати для діапазону тиску. Для випробувань приймається та схема, яка за геометричними та технологічними ознаками найбільше відповідає реальному трибоспрямленню. В даній роботі розвинені методи теорії випробувань на більшу кількість визначальних факторів для схем випробувань із змінною площадкою контакту. Це дало можливість оцінювати вплив факторів тиску і температури на процес зношування.

Маючи розроблений теоретичний апарат, проводять випробування вузла тертя в умовах близьких до реальних (по матеріалах, мащенні, температурі і т.п.) і кількісно розраховують параметри моделі зношування. На основі отриманої моделі зношування можна:

- розраховувати (прогнозувати) знос вузла при різних умовах по контактному тиску та температурі, наприклад, на стадії проектувального розрахунку вузла тертя;
- оптимізувати конструктивні і технологічні параметри вузла тертя за критерієм зносу.

Звичайно, що такий підхід не дає стовідсоткової відповідності реальному протіканню процесу, але є необхідним шляхом в створенні розрахункових інженерних методів прогнозування зносостійкості вузлів тертя.

Для випробувань в трибології широко застосовується схема чотирикулькової піраміди [2]. За цією схемою три кульки встановлюють жорстко (без обертання) у нижньому корпусі, а четверту розміщують зверху на перші три, навантажують і обертають. При цьому випробовується, як правило, мастильний матеріал. За критерій температурної стійкості випробовуваних при терті масел прийнята критична температура руйнування граничних змащувальних шарів. Ця температура визначається по різкому зростанню коефіцієнта тертя. Вказана схема має обмеження щодо випробувань конструкційних матеріалів, оскільки кульки приймаються стандартними з шарикопідшипникової сталі. Виготовлення кулькових зразків для випробувань матеріалів практично недоцільне і складно реалізуєме. В даній роботі для випробувань різних конструкційних матеріалів пропонується схема випробувань «конус-три кульки», яка дає можливість застосовувати в якості досліджуваних конічні зразки з різних матеріалів.

Основний матеріал**Загальний опис схеми**

Три кульки 1,2,3 однакового радіусу (рис. 1) R розташовані на площині так, щоб вони контактували за схемою рис. 1, при цьому їх центри утворюють рівносторонній трикутник $O_1O_2O_3$. Конус 4 с кутом при вершині γ розташовується на трьох нижніх кульках так, що контактує з кожною в точках

A_1, A_2, A_3 . До верхнього конусу прикладена сила Q , яка передається до кожної з трьох нижніх кульок по перпендикулярам від твірної конуса в точках дотику з кульками, створюючи рівні сили $Q_1 = Q_2 = Q_3$.

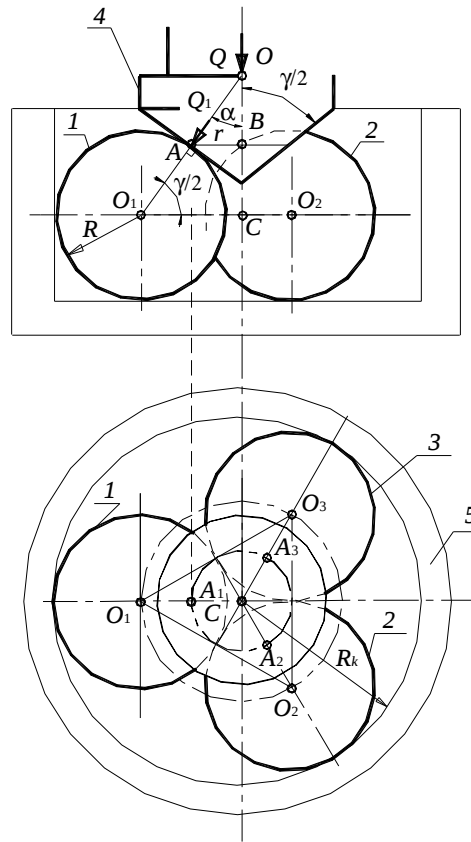


Рис. 1 – Розрахункова схема

Наявність обойми 5 забезпечує стійке нерухоме положення нижніх кульок при вертикальному навантаженні силою Q і обертанні конуса моментом навколо вертикальної осі.

Геометрія контакту і навантаження

Для визначення сил, що діють між конусом та кульками, необхідно визначити їх напрямки і кут α (рис. 1):

$$\alpha = 90^\circ - \gamma / 2, \quad (1)$$

де γ – кут при вершині конуса.

Сили, що діють вздовж по нормалі до кожної кульки, виражаються через загальну силу співвідношенням:

$$Q_1 = \frac{Q}{3 \cos \alpha}, \quad (2)$$

або

$$Q_1 = \frac{Q}{3 \cos(\gamma / 2)}. \quad (3)$$

Величину r , що визначає відстань від осі обертання конуса до точки контакту з кульками, визначаємо з подібності трикутників OO_1C і OAB :

$$r = O_1C \frac{OA}{OO_1} = O_1C \left(1 - \frac{R}{OO_1} \right), \quad (4)$$

Величина O_1C знаходиться як радіус кола, описаного навколо правильного трикутника $O_1O_2O_3$ (рис. 1):

$$O_1C = \frac{2\sqrt{3}}{3}R. \quad (5)$$

З прямокутного трикутника OO_1C :

$$OO_1 = \frac{O_1C}{\cos \gamma/2} = \frac{2\sqrt{3}R}{3\cos \gamma/2}. \quad (6)$$

Отже після проміжних підстановок отримаємо:

$$r = R \left(\frac{2\sqrt{3}}{3} - \cos(\gamma/2) \right). \quad (7)$$

Шляхи тертя для площадок контакту

Шляхи тертя для площадок контакту конуса S і нижніх S_1 кульок різні. Нехай при визначенні шляхів тертя розміри площадки контакту на нижніх площадках кульок малі порівняно з розміром r площадки контакту верхнього конуса ($\bar{a} \ll r$). Розрахунок шляху тертя будемо здійснювати за середнім радіусом.

Шлях тертя для кожної точки нижньої площадки контакту S_1 дорівнює:

$$S_1 = 2\pi r n t, \quad (8)$$

де n – кількість обертів конуса за одиницю часу;

t – тривалість випробувань.

Шлях тертя S для площадки контакту конусу:

$$S = 3(2\bar{a})nt, \quad (9)$$

де $2\bar{a}$ – середній шлях тертя за один прохід контактних точок верхнього конуса через площадку контакту нижньої кульки;

$\bar{a}$ – середній радіус площадки контакту конуса і кульки.

Відношення шляхів тертя верхньої і нижніх площадок є коефіцієнтом перекриття:

$$K_n = \frac{S}{S_1} = \frac{3(2\bar{a})nt}{2\pi r n t} = \frac{3\bar{a}(S_1)}{\pi r}. \quad (10)$$

Таким чином, маємо взаємозв'язок середніх шляхів тертя:

$$S = S_1 \bar{a} (S_1) \frac{3}{\pi r}. \quad (11)$$

Або позначивши $C = \frac{3}{\pi r}$, отримаємо $S = S_1 \bar{a} (S_1) C$.

Визначення параметрів двохфакторної моделі при випробуваннях за схемою конус - три кульки

Для оцінки зношування досліджуваного конічного зразка за схемою конус-три кульки прийемо модель у вигляді залежності інтенсивності зношування від безрозмірних параметрів контактної тиску і температури у вигляді:

$$\frac{du_w}{dS} = K_w \left(\frac{\sigma}{HB} \right)^m \left(\frac{T}{T^*} \right)^p, \quad (12)$$

де σ – тиск у контакті, МПа;

HB – твердість за Брінелем, МПа;

u_w – лінійне зношування конусної поверхні, м;

S – шлях тертя для конуса, м;

K_w, m, p – параметри закономірності зношування;

T, T^* – відповідно температура випробувань і базова температура, К.

Прийемо форму зношеної поверхні у вигляді колового жолоба з радіусом профілю $\bar{a}$. Припустимо що контактний тиск під жорсткою кулькою по зношеній поверхні жолоба конуса розподілений рівномірно. Тоді справедливо співвідношення:

$$\sigma = \frac{Q_1}{\pi \bar{a}^2}, \quad (13)$$

де Q_1 – сила, що діє по нормалі до кожної нижньої кульки;

$\bar{a}$ – радіус колової площадки контакту спряжених кульок і конуса.

Сила Q_1 у відповідності до (2) виражається через загальну силу Q , що діє на верхню конус:

$$Q_1 = \frac{Q}{3 \cos \alpha}.$$

Зв'язок максимального зносу u_w і розміру площадки контакту $\bar{a}$ центрі площадки визначається з геометрії перетину спряженого конуса і кульки. При цьому будемо розглядати контакт сфери радіусом R з циліндром радіусом r . З достатньою точністю шукану залежність можна подати у вигляді [3]:

$$u_w(S) = \frac{a(S)^2}{2R^*}, \quad (14)$$

де $R^* = \frac{Rr}{R+r}$ – приведений радіус в контакті конуса і кульки.

Нехай експериментальна залежність радіусу колового жолобу зносу конуса від шляху тертя представляється у вигляді степеневі апроксимації:

$$\bar{a}(S) = cS^\beta, \quad (15)$$

де c, β – параметри апроксимації, які визначаються за наслідками випробувань.

Інтегруючи вираз (12), отримаємо інтегральну форму моделі зношування конуса:

$$u_w(S) = K_w \int_0^S \left(\frac{\sigma(S)}{HB} \right)^m \left(\frac{T}{T^*} \right)^p dS. \quad (16)$$

Підставляючи в ліву частину отриманого рівняння вираз (14) для зносу через радіус площадки контакту, а в праву – вираз (13) для контактного тиску, отримаємо:

$$\frac{\bar{a}^2(S)}{2R^*} = K_w \int_0^S \left[\left(\frac{Q_1}{\pi \bar{a}^2(S)} \right) \frac{1}{HB} \right]^m \left(\frac{T}{T^*} \right)^p dS, \quad (17)$$

або, з урахуванням виразу (15), після інтегрування по шляху тертя маємо:

$$\frac{c^2 S^{2\beta}}{2R^*} = K_w \left(\frac{Q_1}{c^2 \pi HB} \right)^m \left(\frac{T}{T^*} \right)^p \frac{S^{1-2\beta m}}{1-2\beta m}. \quad (18)$$

З умови виконуваності рівняння (18) при будь-яких S слідує:

$$2\beta = 1 - 2\beta m, \quad (19)$$

звідки:

$$\boxed{m = \frac{1-2\beta}{2\beta}}. \quad (20)$$

Для знаходження параметра p проводимо випробування при двох значеннях температури T_1 і T_2 , звідки отримаємо дві групи даних з параметрами:

$$\begin{aligned} \bar{a}_1 &= c_1 S^\beta; \\ \bar{a}_2 &= c_2 S^\beta. \end{aligned} \quad (21)$$

В даній роботі розглядається задача визначення параметрів зношування за наслідками випробувань зразків з площадкою контакту $\bar{a}(S)$, що змінюється в процесі зношування.

Зміна площадки зношування викликає зміну значень контактного тиску $\sigma(\bar{a})$. Показник степеня m у виразах типу (17) характеризує швидкість зміни контактних тисків і безпосередньо пов'язаний з параметром β експериментальної залежності (15), який характеризує відповідно швидкість зміни площадки контакту при зношуванні. Зв'язок між m і β в прийнятій закономірності зношування (17) однозначно описується співвідношенням (20). Оскільки в даних виразах в другому комплексі температура випробувань T не залежить від шляху тертя S , то вона не впливає на параметри m і β в процесі проведення випробувань. В даному випадку зміна температури T лінійно впливає тільки на масштабний коефіцієнт c у виразах (15), (21). Викладені міркування підтверджуються результатами випробувань.

Підставляючи вирази (21) в (18), отримаємо два рівняння:

$$\left. \begin{aligned} \frac{c_1^2 S^{2\beta}}{2R^*} &= K_w \left(\frac{Q_1}{c_1^2 \pi H B} \right)^m \left(\frac{T_1}{T^*} \right)^p \frac{S^{2\beta}}{2\beta}; \\ \frac{c_2^2 S^{2\beta}}{2R^*} &= K_w \left(\frac{Q_1}{c_2^2 \pi H B} \right)^m \left(\frac{T_2}{T^*} \right)^p \frac{S^{2\beta}}{2\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Розділивши перше рівняння на друге, після перетворень отримаємо:

$$\left(\frac{c_1}{c_2} \right)^{2m+2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^p. \quad (23)$$

Звідки:

$$p = (2m + 2) \frac{\lg(c_1 / c_2)}{\lg(T_1 / T_2)}. \quad (24)$$

Для знаходження коефіцієнта K_w скористаємось одним з рівнянь (22):

$$K_w = \frac{\beta c_1^{2m+2}}{R^*} \left(\frac{3\pi H B \cos \alpha}{Q} \right)^m \left(\frac{T^*}{T} \right)^p. \quad (25)$$

Геометричні розміри зразків для випробувань можуть бути прийняті за матеріалами ГОСТ 23.221-84 [4]. Вказаний стандарт встановлює метод експериментального визначення температурної стійкості рідких і пластичних мастильних матеріалів при терті на основі вимірювання моменту тертя і об'ємної температури.

Висновок

Розроблена теорія методу випробувань на знос за схемою конус-три кульки для двохфакторної моделі зношування (контактний тиск, температура) з визначенням характеристик закономірності зношування. Метод випробувань рекомендований для лабораторних випробувань ефективності технологій підвищення зносостійкості деталей точної механіки.

Література

1. Писаренко В.Г. Комбінована хіміко-термічна обробка як ефективний спосіб підвищення довговічності деталей точної механіки / В.Г. Писаренко // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2011. – № 2. – С. 75-78.
2. Кузьменко А.Г. Метод испытаний на износ со смазкой по четырехшариковой схеме (теория износа шаров в ЧШМ) / А.Г. Кузьменко, А.В. Дыха // Проблеми трибології. – 2000. – № 3. – С. 30-40.
3. Кузьменко А.Г. Методы испытаний на износ / А.Г. Кузьменко, С.В. Сытник // Проблеми трибології. – 1999. – № 2(12). – С. 38-109.
4. ГОСТ 23.218-84. ОИИ. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении. Взамен ГОСТ 17604-72.

Надійшла 06.02.2012