

**Диха О.В.,  
Вельбой В.П.,  
Диха М.О.**

Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна

## ТЕОРІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТ МЕТОДУ ТРИБОЛОГІЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗА СХЕМОЮ «ЦИЛІНДР-КУЛЯ»

### Вступ

Випробування на зношування можуть виконуватися з різними цілями, зокрема: якісне порівняння матеріалів зі зношування; вивчення механізму і виду зношування; визначення параметрів моделей, що описують кількісні закономірності процесу.

На думку багатьох відомих фахівців [1], оцінка властивостей конструкційних і мастильних матеріалів є однією з найбільш складних проблем у сучасній трибології. Експериментальні дослідження проводять на машинах тертя найрізноманітніших типів (понад сотню і навіть до тисячі найменувань). Розв'язанню задачі порівняння та уніфікації використовуваних у світовій практиці випробувань матеріалів на тертя і зношування присвячені спеціальні міжнародні дослідницькі програми [1].

При випробуваннях на износ матеріалів підшипників ковзання виникають складності при виготовленні зразків. При цьому зручним є використання схеми випробувань «сфера-циліндр», коли циліндр виготовлений з матеріалу валу підшипника, а як контрольний зразок використовується підшипникова кулька зі сталі ШХ15 для порівняльних випробувань ефективності технологій зміцнення поверхні валів. В даній роботі для двохфакторної моделі зношування (контактний тиск – швидкість ковзання) розроблена теоретична методика визначення характеристик зношування за результатами експериментальних випробувань по схемі «циліндр-куля» та для реалізації вказаного методу випробувань представлена конструкція випробувальної установки.

### Основний матеріал

#### Геометрія контакту и навантаження

Розглянемо контакт жорсткої кульки та жорсткого циліндру під дією навантаження  $Q$ , при цьому будемо вважати, що зношується тільки циліндр, а сфера (куля) не зношується. Як припущення приймемо, що форма жолоба на циліндрі після зношування циліндрична, а форма площадки контакту сфери та циліндру внаслідок малості зносу приймається коловою (рис. 1).

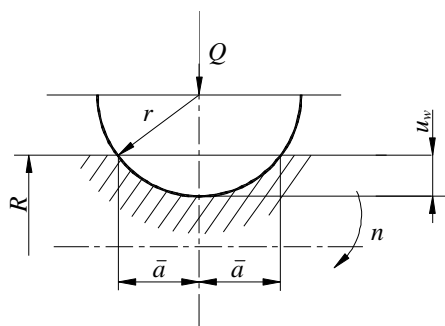


Рис. 1 – Розрахункова схема

В даному випадку жорсткість кулі і циліндру розуміється в тому сенсі, що переміщення від зносу значно більші деформацій від пружних переміщень, тобто пружні деформації не враховуються при аналізі процесу зношування. Разом з цим присутність пружних деформацій така, що геометрично можна вважати площадку контакту коловою [2].

#### Шляхи тертя для площадок контакту

Шляхи тертя для площадок контакту циліндра  $S$  та  $S_1$  кульки різні. Шлях тертя для кульки контакту  $S_1$  дорівнює:

$$S_1 = 2\pi Rnt, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість обертів циліндра за одиницю часу;

$t$  – тривалість випробувань.

Шлях тертя  $S$  для площадки контакту циліндра:

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

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

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

Відношення шляхів тертя верхньої і нижніх площадок є коефіцієнтом перекриття:

$$K_n = \frac{S}{S_1} = \frac{2\bar{a}nt}{2\pi Rnt} = \frac{\bar{a}(S_1)}{\pi R}. \quad (3)$$

Таким чином, маємо взаємозв'язок середніх шляхів тертя:

$$S = S_1 \bar{a}(S_1) \frac{1}{\pi R}. \quad (4)$$

Або позначивши  $C = \frac{1}{\pi R}$ , отримаємо  $S = S_1 \bar{a}(S_1) C$ .

### **Визначення параметрів двохфакторної моделі при випробуваннях за схемою циліндр - кулька**

Для оцінки зношування досліджуваного циліндричного зразка за схемою циліндр-кулька приймемо модель у вигляді залежності інтенсивності зношування від безрозмірних параметрів контактного тиску і швидкості у вигляді:

$$\frac{du_w}{dS} = K_w \left( \frac{\sigma}{HB} \right)^m \left( \frac{V}{V^*} \right)^n, \quad (5)$$

де  $\sigma$  – тиск у контакті, МПа;

$HB$  – твердість за Брінелем, МПа;

$u_w$  – лінійне зношування циліндричної поверхні, м;

$S$  – шлях тертя для циліндра, м;

$K_w, m, n$  – параметри закономірності зношування;

$V, V^*$  – відповідно швидкість випробувань і базова швидкість ковзання, м/с.

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

$$\sigma = \frac{Q}{\pi \bar{a}^2}, \quad (6)$$

де  $Q$  – діюче при випробуваннях навантаження;

$\bar{a}$  – радіус колової площадки контакту спряжених циліндра і кульки.

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

$$u_w(S) = \frac{a(S)^2}{2R^*}, \quad (7)$$

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

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

$$\bar{a}(S) = cS^\beta, \quad (8)$$

де  $c, \beta$  – параметри апроксимації, які визначаються за наслідками випробувань.

Інтегруючи вираз (5), отримаємо інтегральну форму моделі зношування циліндра:

$$u_w(S) = K_w \int_0^S \left( \frac{\sigma(S)}{HB} \right)^m \left( \frac{V}{V^*} \right)^n dS. \quad (9)$$

Підставляючи в ліву частину отриманого рівняння вираз (7) для зносу через радіус площадки контакту, а в праву – вираз (6) для контактного тиску, отримаємо:

$$\frac{\bar{a}^2(S)}{2R^*} = K_w \int_0^S \left[ \left( \frac{Q_1}{\pi \bar{a}^2(S)} \right) \frac{1}{HB} \right]^m \left( \frac{V}{V^*} \right)^p dS, \quad (10)$$

або, з урахуванням виразу (8), після інтегрування по шляху тертя маємо:

$$\frac{c^2 S^{2\beta}}{2R^*} = K_w \left( \frac{Q_1}{c^2 \pi HB} \right)^m \left( \frac{V}{V^*} \right)^n \frac{S^{1-2\beta m}}{1-2\beta m}. \quad (11)$$

З умови виконуваності рівняння (11) при будь-яких  $S$  слідує:

$$m = \frac{1-2\beta}{2\beta}. \quad (12)$$

Для знаходження параметра  $n$  проводимо випробування при двох значеннях швидкості ковзання  $V_1$  і  $V_2$ , звідки отримаємо дві групи даних з параметрами:

$$\begin{aligned} \bar{a}_1 &= c_1 S^\beta; \\ \bar{a}_2 &= c_2 S^\beta. \end{aligned} \quad (13)$$

Підставляючи вирази (13) в (11), отримаємо два рівняння:

$$\left. \begin{aligned} \frac{c_1^2 S^{2\beta}}{2R^*} &= K_w \left( \frac{Q_1}{c_1^2 \pi HB} \right)^m \left( \frac{V_1}{V^*} \right)^n \frac{S^{2\beta}}{2\beta}; \\ \frac{c_2^2 S^{2\beta}}{2R^*} &= K_w \left( \frac{Q_1}{c_2^2 \pi HB} \right)^m \left( \frac{V_2}{V^*} \right)^n \frac{S^{2\beta}}{2\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Розділивши перше рівняння на друге, після перетворень знайдемо:

$$n = (2m + 2) \frac{\lg(c_1/c_2)}{\lg(V_1/V_2)}. \quad (15)$$

Для знаходження коефіцієнта  $K_w$  скористаємось одним з рівнянь (14):

$$K_w = \frac{\beta c_1^{2m+2}}{R^*} \left( \frac{HB}{Q} \right)^m \left( \frac{V^*}{V} \right)^n. \quad (16)$$

Тобто вирази (12), (15), (16) дозволяють за результатами випробувань за схемою «циліндр-куля» побудувати розрахункову модель закономірності зношування від двох визначальних факторів: контактного тиску і швидкості.

#### **Експериментальна установка**

Для випробування зміцнених електромеханічною обробкою зразків доопрацьована багатофункціональна лабораторна установка, структурно-функціональна схема і технічна характеристика якої приведені в роботі [3]. Нові конструктивні рішення (рис.2) дозволяють випробування трибологічних властивостей зміцненої циліндричної поверхні за схемою пари тертя «циліндр – куля» при змащуванні контактної поверхні рідко текучими мастильними оливами.

Випробувальний зразок 11 у вигляді втулки зі зміцненою поверхнею вільно посаджений на оправку 4 і закріплений гайкою 10. Оправка 4 вгвинчена в хвостовик 3, спарений з конусною поверхнею шпинделя 1 і закріплений в ньому накидною гайкою 2. Сталева кулька 12 (контртіло) нерухомо закріплена в наконечнику 13 упорним стрижнем 14, вставленим в отвір повзуна 15 механізму навантаження установки важелем 17. Корпус 16 механізму навантаження встановлений і прикріплений до каретки поздовжньої подачі  $S$  установки (не показано). Притискання кульки 12 до зміцненої поверхні випробувального зразка 11 здійснюється заданою силою  $P$ , прикладеною до важеля 17.

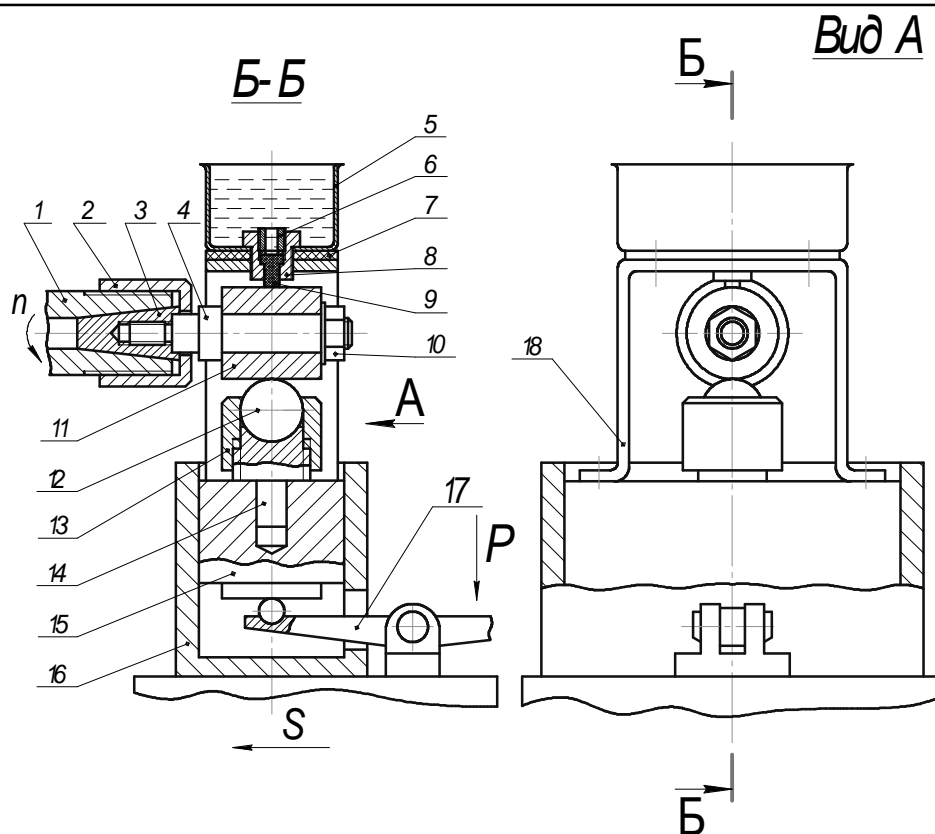


Рис. 2 – Експериментальна установка

Для змащування зони тертя рідко текучими оливами до повзуна 15 прикріплений П-подібний кронштейн 18, на якому встановлена ванна 5, наповнена оливою. В отвір дна ванни 5 вставлена ливникова втулка 8 з фетровим осердям 9, затиснутим різьбовою з отвором пробкою 6. Корпус ванни 5 кріпиться до горизонтальної полки кронштейна 18 втулкою 8. Ущільнення з'єднання корпусу ванни з полкою кронштейна забезпечується гумовою прокладкою 7.

Змащування зони тертя відбувається за рахунок ковзання змоченого мастильною оливою фетрового осердя по сліду рухомого контакту кульки 12 з випробувальною поверхнею зразка 11.

### Висновок

Для двохфакторної моделі зношування (контактний тиск – швидкість ковзання) представлена теоретична методика визначення характеристик зношування за результатами експериментальних випробувань по схемі «циліндр-куля». Для реалізації методу випробувань розроблена конструкція випробувальної установки. Метод випробувань рекомендований для оцінки технологій зміцнення поверхневого шару зовнішніх циліндричних поверхонь деталей машин.

### Література

1. Системный анализ методологии трибологических испытаний конструкционных материалов / В. Пекошевски, В. Потеха, М. Щерк [та ін.] // Трение и износ. – 1996. – Т. 17, № 2. – С. 178-186.
2. Кузьменко А.Г. Методы испытаний на износ / А.Г. Кузьменко., С.В. Сытник // Проблемы трибологии. – 1999. – № 2(12). – С. 38-109.
3. Вельбой В.П. Багатофункціональна лабораторна установка для дослідження трибологічних властивостей конструкційних і мастильних матеріалів / В.П. Вельбой, А.Г. Кузьменко, О.В. Диха, М.О. Диха // Проблеми трибології (Problems of Tribology). – 2008. – № 1. – С. 94-98.

Надійшла 25.04.2012