

Диха О.В.,***Вельбой В.П.,*****Марченко Д.Д.*****Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, Україна,** Миколаївський національний
аграрний університет,
м. Миколаїв, Україна

E-mail: tribosenator@gmail.com

**ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРТЯ
ДЛЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ТРИБОСИСТЕМ
КОВЗАННЯ**

УДК 621.891

В даній роботі запропоновані способи визначення статичного і динамічного коефіцієнтів тертя ковзання за результатами розрахунку відповідних кутів тертя циліндричної трибосистеми типу «вал – втулка» та пристрій для реалізації такого способу. Визначення проводили за виміром кута відхилення кільця від врівноваженого стану. Для статичного коефіцієнту тертя під дією сили тертя в зоні нерухомого контакту після припинення руху попередньо зміщеного кільця в напрямі врівноваженого стану. Для динамічного коефіцієнта тертя за виміром кута відхилення кільця від врівноваженого стану, який встановлювався і утримувався під дією сили реакції шорсткої поверхні сили тертя в зоні рухомого контакту.

Ключові слова: трибосистема ковзання, коефіцієнт тертя, кут відхилення, врівноважений стан

Вступ та постановка завдання

Коефіцієнт тертя використовують в практиці інженерних розрахунків енергетичних параметрів руху механізмів машин і приладів різного призначення, зносу спряжених поверхонь і температурного режиму в зоні контакту матеріалів тощо [1, 2]. Числові значення коефіцієнтів тертя для різних пар матеріалів зазвичай визначають за довідниковими таблицями [3, 4] без врахування того, яким чином і за яких обставин вони отримані. Якщо для інженерних розрахунків табличні значення є задовільними, то для дослідницьких випробувань, наприклад, впливу характеру руху і форми контактних поверхонь, способу мащення, ефективності мастильних матеріалів та інших чинників на зносостійкість спряжених поверхонь розробляють відповідну методику і спеціальні пристрої (трибometri) для визначення коефіцієнту тертя, максимально наближені до умов експлуатації даної пари матеріалів в реальних конструкціях вузлів тертя.

Коефіцієнт тертя, визначений за формулою $f = \frac{T}{N}$, де T – сила тертя, а N – сила нормально-го навантаження в зоні контакту спряжених тіл (закон Амонтона – Кулона) є основною експлуатаційною характеристикою конструкційних матеріалів для деталей рухомих трибосистем. Розрізняють статичний коефіцієнт тертя f_c при відносному спокої тіл і динамічний коефіцієнт тертя f_o при ковзанні під час руху одного тіла відносно іншого [1] і встановлено, що $f_c < f_o$.

Визначення коефіцієнтів тертя зазвичай виконують за відомими методиками, які ґрунтуються на безпосередньому вимірюванні сили T або моменту тертя M_m за відомої нормальної сили N , яка діє в зоні контакту спряжених поверхонь. Для цього використовують силовимірювальні пристрої (динамометри) у вигляді плоских, спіральних, гвинтових та інших попередньо тарованих пружних елементів. Слід відзначити, що як при таруванні пружних елементів, так і при вимірюванні силових факторів T або M_m мають місце неминучі похибки і нестабільність результатів, які особливо проявляються при визначенні динамічного коефіцієнту тертя через не враховані коливання пружних елементів, зумовлені шорсткістю контактних поверхонь тертя.

Щоб звести до мінімуму неминучі похибки вимірювання силових факторів і поліпшити достовірність результатів застосовують складні стенди та пристрої без пружних елементів, які оснащені датчиками кутових швидкостей і кутових прискорень маятника, прикріпленого до вільно підвішеного радіального підшипника, і датчиками прискорення вертикальних і горизонтальних переміщень підшипника, а силу динамічного тертя обчислюють з урахуванням цих швидкостей і прискорень [5]. Для дослідження тертя спокою відомий пристрій з мікрометричним переміщенням контрзразка, прикріпленого до траверси, з'єднаної з горизонтальною балкою за допомогою двох гнучких зв'язків, а силу тертя обчислюють за величиною переміщення контрзразка [6].

Відома методика і пристрої визначення статичного коефіцієнту тертя f_c за результатами вимірювання кута γ , утвореного реакцією шорсткої поверхні Q з нормальною до поверхні тертя силою

N і названого куту тертя. Таким чином визначають статичний коефіцієнт тертя при стисканні нормальною силою N округлого тіла двома паралельними плоскими контр зразками, встановленими на сферичні поверхні з можливістю їх повороту [7]. Під час стискання тіла 1 (рис.1, а). силою N під дією реакції шорсткої поверхні Q контрзразки 2 розвертаються на кут γ , що призводить до ковзання тіла 1 у напрямі бісектриси кута 2γ . Коефіцієнт тертя визначають за виміром кута γ в момент початку зміщення тіла 1 в напрямі S .

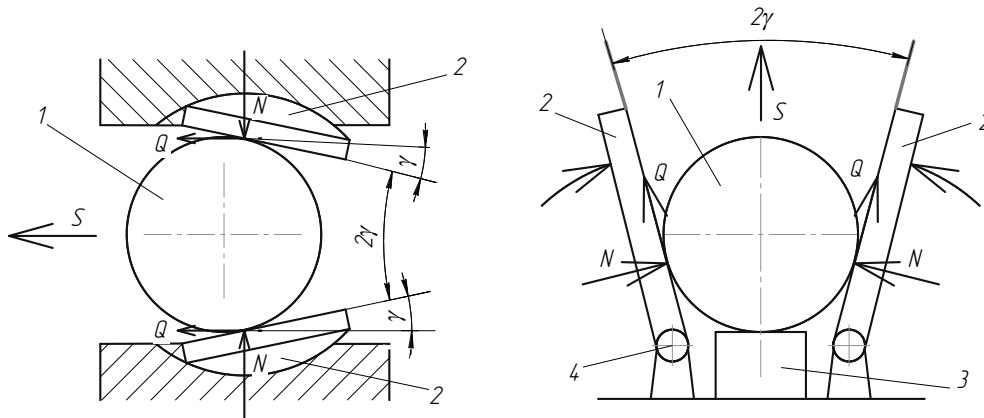


Рис. 1 — Відомі схеми вимірювання кута тертя спокою:

- 1 – округле тіло;
- 2 – контрзразок;
- 3 – опора;
- 4 – вісь повороту контр зразка

За іншим способом [8, 9, 10] округле тіло 1 (рис. 1, б) вставляють вільно або на опору 3 між двома нахиленими під кутом плоскими контрзразками 3, встановленими з можливістю їх повороту на осях 4 корпусу спеціального пристрою. Величину нормальних сил N , діючих в точках контакту тіла 1 з контрзразками 3, збільшують до моменту порушення контакту тіла 1 з опорою 3 і фіксують значення кута 2γ , при якому під дією реакцією шорсткої поверхні Q починається ковзання тіла 1 в напрямі S бісектриси кута між контрзразками. Наведені схеми показують, що визначення коефіцієнту тертя за вимірюванням кута тертя значно простіше за безпосереднє вимірювання сили або моменту тертя з використанням пружних динамометрів.

Основний матеріал

В даній роботі пропонується спосіб визначення статичного і динамічного коефіцієнтів тертя ковзання за результатами розрахунку відповідних кутів тертя трибосистеми типу «вал – втулка» та пристрій для реалізації такого способу.

Сутність способу полягає в тому, що на вал 1 (рис. 2, а), концентрично посаджене з можливістю вільного повороту відносно вала жорстке кільце 2, до якого рівномірно по колу прикріплені контрзразок 3 та центруючі елементи 4 і 5, які дотикаються до циліндричної поверхні вала.

Контрзразок 3 в зоні контакту (точка A) притискається до поверхні вала 1 нормальною силою N_A рівною за величиною і напрямом силі G , прикладеної в шарнірі 6 жорсткого кільця 2 (точка B) так, що при повороті кільця вектор сили G не змінюється.

Визначення статичного кута тертя γ_c здійснюють за умови нерухомого вала. Для цього кільце 2 (рис. 2, а) разом з контрзразком 3 і центруючими γ_c елементами 4 і 5 та шарніром 6 вручну повертають відносно вала 1 в напрямі годинникової стрілки на кут $\varphi \approx 30^\circ$ і повільно відпускають. Під дією сили G кільце 2 повертається в протилежному напрямі на кут β і шарнір 6 утримується в точці C силою тертя спокою T , яка діє в зоні контакту контрзразка 3 з валом 1 (точка K). За виміром кута $\alpha_c = \varphi - \beta$, що показує відхилення точки C від точки B під дією сили тертя в точці K , визначають

кут тертя γ_c виходячи з того, що обертові моменти відносно центру вала (точка O) від дії сили тертя T_K в точці K і зміщеної в точку C сили G врівноважені.

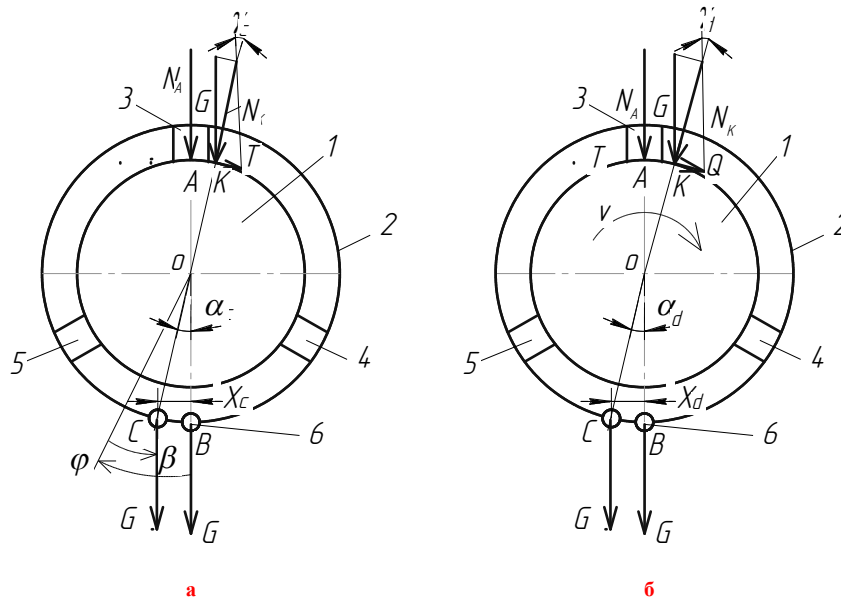


Рис. 2 – Схеми вимірювання статичного γ_c (а) і динамічного γ_d (б) кутів тертя;

- 1 – вал;
2 – жорстке кільце;
3 – контрзразок;
4, 5 – центруючі елементи;
6 – шарнір

З умови рівності обертових моментів отримаємо рівняння:

$$T_R \cdot OK = G \cdot X_c \rightarrow X_c = \frac{T_K \cdot OK}{G}.$$

З прямокутного трикутника COB визначаємо:

$$X_c = OC \cdot \sin \alpha_c.$$

Таким чином показано, що:

$$\frac{T_K \cdot OK}{G} = OC \cdot \sin \alpha_c.$$

Оскільки в точці K сила тертя $T_K = N_A \cdot \cos \alpha_c \cdot \operatorname{tg} \gamma_c$; $N_A = G$, $OK = r$ – радіус вала; $OC = R$ – радіальна відстань точки підвішування сили G , то отримаємо:

$$\frac{G \cdot \cos \alpha_c \cdot \operatorname{tg} \gamma_c \cdot r}{G} = R \cdot \sin \alpha_c \rightarrow \operatorname{tg} \gamma_c = \frac{R}{r} \cdot \operatorname{tg} \alpha_c \quad (1)$$

Визначення динамічного кута тертя γ_d здійснюють за умови рухомого вала. При обертанні вала 1 (рис. 2, б) під дією реакції шорсткої поверхні $Q = T$ жорстке кільце 2 разом з контрзразком 3, центруючими елементами 4 і 5 та шарніром 6 повертається в напрямі v обертання вала на кут α_d . Шарнір 6 зміщується від положення B до положення C і утримується в цьому положенні під час обертання вала. Кут тертя γ_d визначаємо так само, але з урахуванням того, що інші обертові моменти відносно цен-

тру вала (точка O) від дії сили реакції шорсткої поверхні Q і зміщеної в точку C сили G врівноважені, то аналогічно знаходимо:

$$\operatorname{tg} \gamma_o = \frac{R}{r} \cdot \operatorname{tg} \alpha_o \quad (2)$$

Таким чином показано, що згідно за формулами (1) і (2) кути тертя γ_c і γ_o можна визначити за вимірами відповідного кута α , який дорівнює повороту жорсткого кільця при відомому радіусі вала r і даній радіальній відстані підвищування сили G .

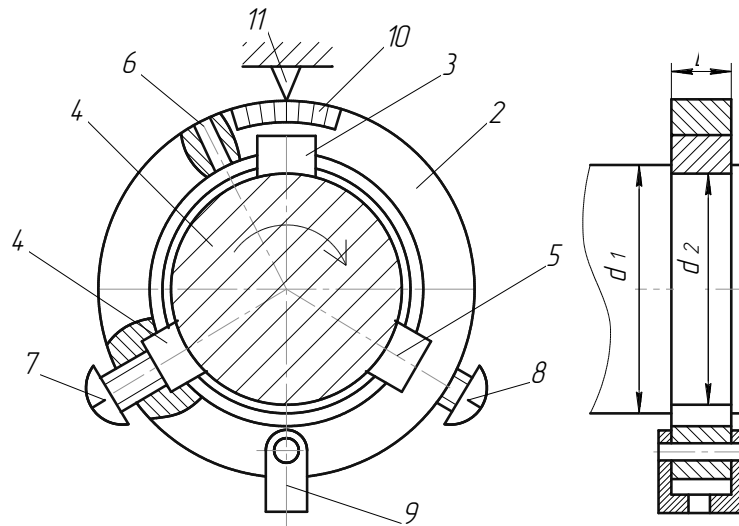


Рис. 3 – Пристрій для вимірювання кута відхилення кільця

Для вимірювання кута α розроблений пристрій (рис.3), що складається з вала 1 діаметром d_1 і жорсткого кільця 2. На внутрішній поверхні кільця є рівномірно розміщені по колу пази для кріплення контрзразка 3 і центруючих елементів 4 і 5, а також передбачений отвір 6 для введення мастила в зону тертя. Контрзразок і центруючі елементи виконані у вигляді тіла призматичної форми з ввігнутою округлою контактною поверхнею радіусом, рівним радіусу контактної поверхні виконаної на валу виточки діаметром d_2 . Контрзразок нерухомо запресований в паз з виступом контактної поверхні за межі отвору в кільці на 1 ... 2 мм. Центруючі елементи 4 і 5 вставлені у відповідні пази з можливістю радіально переміщення за допомогою гвинтів 7 і 8. Довжина L контрзразка і центруючих елементів на 0,2 ... 0,5 мм менша довжини виточки на валу, що забезпечує фіксацію кільця і запобігає зміщенню його вздовж осі вала. Діаметрально протилежно пазу контрзразка в кільці міститься шарнір 9 підвищування наванжки (не показано) для притискання контрзразка до контактної поверхні виточки вала. Для вимірювання кута утримання кільця під дією сили тертя в контакті при нерухомому валу α_c і кута повороту кільця під дією реакції шорсткої поверхні контакту при обертанні вала α_o до кільця прикріплена градуйована шкала 10. Кути α_c і α_o вимірюють в градусах за відхиленням шкали 10 відносно нерухомого візира 11.

Кільце 2 вільно одівають на вал 1 так, щоб контрзразок 3 ввійшов у виточку вала, а потім гвинтами 7 і 8 зміщують в радіальному напрямі центруючі елементи 4 і 5 так, щоб кільце вільно оберталось навколо вала. Кільце повертають так, щоб «нуль» шкали 10 став проти візира 11. Вимірювання кутів α_c і α_o виконують за наведеними схемами (рис. 2).

Можливість вимірювання кутів тертя за допомогою даного пристрою покажемо на прикладі тертя сталевго вала і вкладиша з бабіту Б83, якщо коефіцієнт тертя без змащування складає 0,28, а при змащуванні – 0,05 [4]. Якщо відомі геометричні параметри пристрою, наприклад, $d_1 = 25$ мм; $d_2 = 24$ мм; $D = 30$ мм; $R = 20$ мм, за формулою (1) знаходимо:

$$\operatorname{tg} \alpha_c = \frac{r \cdot \operatorname{tg} \gamma_c}{R} = \frac{12}{20} \cdot 0,28 = 0,168 \quad \rightarrow \quad \alpha_c = 9^\circ 32';$$

$$\operatorname{tg} \alpha_\delta = \frac{r \cdot \operatorname{tg} \gamma_\delta}{R} = \frac{12}{20} \cdot 0,05 = 0,03 \quad \rightarrow \quad \alpha_\delta = 1^\circ 44'.$$

Цілочисельне градування шкали вимірювання кута α через 1° з достатньою точністю дозволяє визначити кути α_c і α_δ , оскільки за тих же розмірів d_2 і R при $\alpha = 1^\circ$ відхилення кільця від врівноваженого початкового стану відповідає:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{R}{r} \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{20}{12} \cdot 0,017 = 0,028.$$

Висновки

1. Запропонований спосіб визначення статичного коефіцієнту тертя в контакті циліндричного зразка і контрзразка, прикріпленого до вільно посадженого на зразок жорсткого кільця. Визначення проводили за виміром кута відхилення кільця від врівноваженого стану, який встановлюється і утримується під дією сили тертя в зоні нерухомого контакту після припинення руху попередньо зміщеного кільця в напрямі врівноваженого стану.

2. Запропонований спосіб визначення динамічного коефіцієнту тертя за вимірюванням відповідного кута тертя рухомих циліндричних спряжень. Динамічний кут тертя γ_δ в контакті циліндричної поверхні зразка, який обертається, і контрзразка, прикріпленого до вільно посадженого на зразок жорсткого кільця розраховували за виміром кута відхилення кільця від врівноваженого стану, який встановлювався і утримувався під дією сили реакції шорсткої поверхні сили тертя в зоні рухомого контакту.

Література

1. Теорія механізмів і машин / А. С. Кореняко; Під ред. М. К. Афанасьєва. – К. : Вища школа. Головне вид-во, 1987. – 206 с.
2. Кіндрачук М. В., Лабунець В. Ф., Пашечко М. І., Корбут Є. В. Трибологія: підручник / МОН. – К. : НАУ-друк, 2009. – 392 с.
3. Решетов Д.Н. (ред.) Детали и механизмы металлорежущих станков. Том 1 М.: Машиностроение, 1972. – 664с.
4. Машиностроительные материалы: Краткий справочник / В. М. Раскатов, В. С. Чуенков и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.
5. А. С. № 775670. Способ определения силы трения / К. К. Глухарев, И. О. Гончаревич и др. // Б.И. – 1980. – № 40.
6. Патент UA № 106912. Пристрій для визначення коефіцієнта тертя спокою / М. Й. Бурда, А. О. Криль та ін. // Бюл. – 2014. – № 20.
7. А.с. № 145379. Устройство для определения коэффициента трения скольжения шаровидных и цилиндрических тел / К. В. Семенов // Бюл. – 1962. – № 5.
8. Патент UA № 48263. Спосіб вимірювання коефіцієнта тертя округлих тіл /Л. О. Губачева, В. В. Гладушин та ін. // Бюл. – 2010. – № 5.
9. Патент UA № 4591. Пристрій для визначення коефіцієнту тертя ковзання / Г. І. Нечаєв, Л. О. Губачева та ін. // Бюл. – 2005. – № 1.
10. А. с. SU № 1326956. Способ определения коэффициента трения скольжения шаровидных и цилиндрических тел / Н. Е. Усольцев // Бюл. – 1987. – № 28.

Надійшла в редакцію 14.03.2018

Dykha O.V., Velboi V.P., Marchenko D.D. **Determination of friction parameters for the cylindrical sliding tribosystems.**

In this paper, we propose ways to determine the static and dynamic coefficients of slip friction based on the results of calculating the corresponding friction angles of a cylindrical tribosystem of the type "shaft - sleeve" and a device for implementing such a method. The determination was carried out by measuring the angle of deviation of the ring from the balanced state. For static coefficient of friction under the influence of friction in the area of real contact after stopping the movement pre-biased ring toward a balanced state. For a dynamic friction coefficient for measuring the angle of deviation of a ring from a balanced state, which was installed and maintained under the action of the force of the reaction of the rough surface of the frictional force in the zone of the moving contact.

Key words: tribosystem of sliding, coefficient of friction, angle of deviation, balanced state.

References

1. Teoriya mekhanizmov i mashin. A. P. Korenyako; Pid red. M. K. Afanas'eva. K. Vishcha shkola. Golovne vid-vo, 1987. 206 p.
2. Kindrachuk M. V., Labunec' V. F., Pashechko M. I., Korbut C. V. Tribologiya: pidruchnik. MON. Kiiv: NAU-druk, 2009. 392 p.
3. Reshetov D.N. (red.) Detali i mekhanizmy metallorazhushchih stankov. Tom 1 M. Mashinostroe-nie, 1972. 664p.
4. Mashinostroitel'nye materialy: Kratkij spravochnik . V. M. Raskatov, V. P. CHuenkov i dr. M. Mashinostroenie, 1980. 511 p.
5. A. P. No 775670. Sposob opredeleniya sily treniya . K. K. Gluharev, I. O. Goncharevich i dr. B.I. 1980. No 40.
6. Patent UA No 106912. Pristrij dlya viznachennya koeficienta tertya spokoyu. M. J. Burda, A. O. Kril' ta in. Byul.2014. No 20.
7. A.p. No 145379. Ustrojstvo dlya opredeleniya koehfficienta treniya skol'zheniya sharovidnyh i cilindrisheskih tel . K. V. Semenov Byul. 1962. No 5.
8. Patent UA No 48263. Sposib vimiryuvannya koeficienta tertya okruglih til .L. O. Gubacheva, V. V Gladushin ta in. Byul.-2010. No 5.
9. Patent UA No 4591. Pristrij dlya viznachennya koeficientu tertya kovzannya. G. I. Nechaev, L. O. Gubacheva ta in. Byul. 2005. No 1.
10. A. p. SU No 1326956. Sposob opredeleniya koehfficienta treniya skol'zheniya sharovidnyh i cilindrisheskih tel . N. E. Usol'cev. Byul. 1987. No 28.