

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.2(99).17624

Р. М. МАРЧУК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ

*Національний авіаційний університет, Україна***ТРИБОМЕТРИЧНА МАШИНА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛІМЕРІВ**

*Проведено аналіз методів та установок для оцінки зношування та дослідження трибометричних параметрів різних матеріалів. Представлена основна структурна схема установки трибометричної машини, розробленої у Національному авіаційному університеті. Наведено основні характеристики установки, метод тестування зразків та параметри роботи, пов'язані з відповідним дослідженням полімерних матеріалів та композитів на їх основі. При виконанні тестування матеріалів використовується стандартизований метод, наведений в ISO 7148-2:2012.*

**Ключові слова:** трибометрична машина, полімери, зношування, момент тертя, швидкість ковзання.

**Вступ та постановка задачі дослідження.** Одним із головних принципів, які повинен досягнути інженер чи вчений, є збереження енергії. Робочі механізми в машинах, як правило, піддаються впливу тертя та зношування. Приблизно від 1/3 до 1/2 джерел енергії, які використовуються у світі, втрачається через тертя, що призводить до 80% пошкодження машин і обладнання [1], а ремонт або утилізація обладнання призводять до великих економічних збитків [2]. Для зменшення енергії, що витрачається на силу тертя, перспективним напрямком є створення трибологічних пар із нових перспективних композитів. При цьому необхідно велику увагу приділяти дослідженню експлуатаційних характеристик композиційних матеріалів та їх фізико-механічних властивостей. Емпіричний метод дослідження тертя та зношування шляхом експерименту є надзвичайно актуальним для оцінки зносостійкості матеріалу, його структурної пристосованості, кінетики руйнування. На основі результатів експериментальних досліджень композиційних матеріалів триботехнічного призначення можливо більш точно охарактеризувати навантажувально-швидкісний та температурний діапазон їх роботоздатного стану. Дизайн і розробка різних трибометрів завжди були в центрі уваги трибології [3, 4].

Трибометр або трибометрична машина – це загальна назва пристрою, який використовується для моделювання тертя та зношування на межі контакту між поверхнями за умов контрольованого руху. У 1989 році видання Оксфордського словника англійської мови визначило трибометр як прилад для оцінки тертя ковзання. Найперше посилання, наведене в цьому словнику, походить зі статей Голдсмита 1774 року, в яких використовувалось слово "трибометр" для позначення "вимірювача тертя" [5]. Трибометри розробляються та використовуються для дослідження процесів та явищ, що мають місце при контактуванні рухомих елементів. Нові підходи до створення експериментальної бази в триботехніці направлені на:

– симулювання трибоконтактної ситуації в конкретному вузлі тертя та агрегаті;

- оцінку триботехнічних параметрів матеріалів в певному навантажувально-швидкістному діапазоні;
- оцінку якості мастильних матеріалів для конкретного застосування на підставі встановлених критеріїв;
- моніторинг забруднення мастильного матеріалу продуктами зношування контактних поверхонь;
- отримання загальної інформації про тертя, яка не залежить від конкретної системи, та використовується як засіб порівняння та розробки нових матеріалів, покриттів або мастильних матеріалів.
- дослідження фундаментальної природи тертя твердих тіл в різних середовищах та за умов різних режимів мащення.

Мета випробування визначає вибір конкретного трибометра. Проектування схеми випробування повинно включати основні змінні, які впливають на тертя. До основних чинників можна віднести: навантаження, характеристики швидкості та прискорення, шорсткість поверхні, температуру (як зовнішню, так і ту, що виникає внаслідок тертя), відносну вологість, властивості мастильного матеріалу та інші.

В даний час швидко прогресуючі машинобудування, приладобудування, електроніка, медична техніка та інші галузі ставлять перед трибологами ряд нових, специфічних завдань - від тертя в космічному вакуумі до динамічного контакту атомарно гладких поверхонь [6]. Настала нова стадія в розвитку, пов'язана з вивченням тертя і зношування тіл на мікро- і нанорівні, створенням спеціального обладнання та методик для дослідження субшорсткості поверхонь, мономолекулярних граничних шарів, адгезійної взаємодії прецизійних поверхонь, реєстрації надмалих сил тертя.

Незважаючи на широку доступність комерційних трибометрів, дослідники продовжують розробляти специфічні трибометри. Це потрібно для забезпечення певних умов випробування, моделювання конкретних компонентів або розмірів зразків, які не є легкодоступними. Такі дослідні установки є важливим інструментом для вивчення матеріалів у великому спектрі галузей, включаючи машинобудування, автомобільну промисловість, металургію, медицину та інші. Вони дозволяють оцінювати трибологічну продуктивність матеріалів, вдосконалювати їх якість та розробляти нові матеріали з покращеними властивостями зносостійкості.

Існує кілька стандартів, які прийняті для забезпечення максимальної продуктивності та ефективності у вивченні трибологічних систем. Такі організації, як Міжнародна організація стандартизації (ISO), Американське товариство інженерів-механіків (ASME), Американське товариство випробувань і матеріалів (ASTM), Німецький інститут норм (DIN), Японські промислові стандарти (JIS), Товариство автомобільних інженерів (SAE), Міжнародна електротехнічна комісія (IEC), Американське ливарне товариство (AFS), Китайський національний стандарт (GB), розробляють установки тертя або створюють процедури тестування матеріалів для відтворення реальних умов роботи машин та механізмів. Ці стандарти включають параметри випробування, такі як навантаження, температуру навколишнього середовища, швидкість ковзання, контактні поверхні, контактну температуру, умови ковзання, повторювані цикли (відстань), вологість/сухість середовища, електризацію, а також розміри та форми зразків. Трибоелементи для дослідження, які використовуються у трибометричних машинах, значно відрізняються один від одного механізмом контакту, площею/площиною, лінійним і точковим контактом

між тестованим матеріалом. У даній роботі буде розглянуто лише один метод тестування, оскільки дана машина працює тільки за цим методом. Перш ніж проводити будь-які трибологічні експерименти, вчені спочатку повинні переконатися, що випробування проводяться у правильних умовах. Метрологічне забезпечення датчиків, які сприймають і перетворюють сигнали, забезпечують передачу інформації та представляють дані, що допоможуть вченим спостерігати та розуміти поведінку кожного матеріалу під час певного випробування на зношування, є важливим етапом в трибологічних дослідженнях.

Робота може допомогти вивченню впливу різних параметрів на зношування, встановленню зв'язку між структурою та властивостями матеріалу, та забезпечити підґрунтя для розробки нових матеріалів, що мають покращені властивості зносостійкості.

**Метою роботи** є створення трибометричної машини та методу тестування антифрикційних та протизношувальних властивостей полімерів та композиційних матеріалів на їх основі з реєстрацією температури в фрикційному контакті та в приповерхневих шарах трибоелементів.

**Технічні характеристики трибометричної машини.** У частині другій ISO 7148-2:2012 «Plain bearings — Testing of the tribological behaviour of bearing materials» описані методи трибологічних випробувань, що дозволяють оцінити трибологічну поведінку матеріалів підшипників з полімерних композитів або композиційних матеріалів з металевою матрицею. Випробування проводяться за визначеними умовами, такими як навантаження, швидкість ковзання та температура в зоні фрикційного контакту за наявності мастильного матеріалу або без нього. Отримані результати про антифрикційні, змащувальні та протизношувальні властивості вказують на відносну трибологічну поведінку металополімерних і полімер-полімерних деталей, що досліджуються в експерименті. Метою ISO 7148-2:2012 є вибір оптимальних комбінацій полімерних та композиційних матеріалів для виробництва підшипників, які відповідають експлуатаційним умовам без змащення (сухі поверхні) і за наявності мастильного матеріалу (при домінуванні як гідродинамічного, так і граничного режимів мащення). Серед перелічених методів діагностики та оцінки триботехнічних параметрів та схеми контактування трибоелементів з вищенаведеного стандарту для розробки власної трибометричної машини взяли за основу метод В «блок на кільці» (рис. 1) [7]. Даний метод дозволяє оцінити триботехнічні властивості матеріалів під час ковзання, моделювати процеси зношування в широкому навантажувально-швидкістному діапазоні. Зазначена схема досліджень надійно сприяє упорядкуванню експлуатаційних характеристик матеріалів трибоелементів, які є основою для подальшої розробки рекомендацій щодо використання досліджуваних матеріалів для різноманітних трибологічних потреб.

До переваг обраної схеми досліджень можна віднести: експрес-тестування простих зразків; відсутність збільшення площі контакту трибоелементів при зношуванні в процесі ковзання; можливість випробування трибоелементів з мастильним матеріалом або без нього.

До недоліків запропонованої схеми досліджень можна віднести високу імовірність обмеження потрапляння мастильного матеріалу в зону фрикційного контакту та нерівномірність його розподілу по площині контактування елементів трибоспряження внаслідок накопичення мастильного матеріалу на краю блоку (об'єкту дослідження) в вхідній зоні контакту.

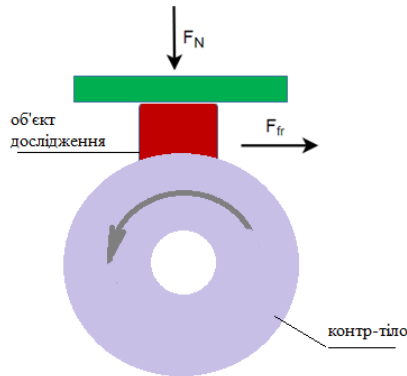


Рис. 1. Тест-метод «В» за ISO 7148-2:2012 – блок або штифт (об'єкт дослідження) на кільці (контр-тіло)

Прийmemo, що площею контакту трибоелементів є еліпс з напіввісьми  $a_e$  та  $b_e$ , відповідно радіусами  $r_1$  та  $r_2$  (рис. 2).

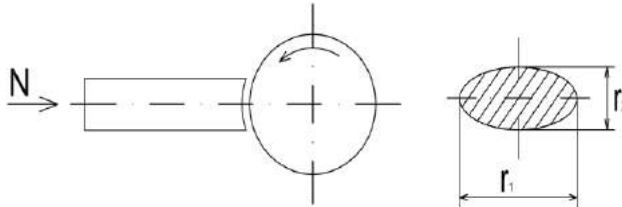


Рис. 2. Схема площі контакту об'єкту дослідження та контр-тіла

Максимальний тиск  $p_{max}$  у зоні контакту становить:

$$p_{max} = \frac{1.5N}{A}, \quad (1)$$

де  $A$  – площа контакту

$$A = \pi a_e b_e, \quad (2)$$

$N$  – погонне навантаження.

Структурна схема розробленої трибометричної машини представлена на рис. 3.

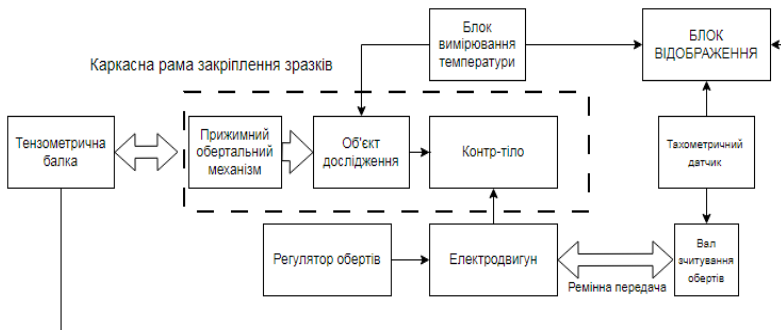


Рис. 3. Структурна схема дослідної установки

Контр-тіло приводиться у рух завдяки електродвигуну, швидкість обертання може встановлюватись від 20 до 800 обертів за хвилину. Налаштування сили притискування досліджуваного об'єкта до контр-тіла відбувається завдяки спеціальному пружному обертальному механізму, який закріплений у каркасній рамі установки (рис. 4).



Рис. 4. Каркасний механізм кріплення зразків для досліджень.

У каркасній рамі машини можна закріплювати зразки дослідження розмірами від  $8 \times 100$  мм. Одночасно встановлюється два зразки одного матеріалу. Контр-тіло може бути виготовлено із різних матеріалів, у залежності до вимог поточного дослідження, та легко замінено на установці.

Установка оснащена системою датчиків, яка дозволяє відслідковувати температуру об'єктів дослідження та навколишнього середовища, рівень вологості навколишнього середовища, швидкість обертання та момент тертя. Швидкість обертання вимірюється за допомогою датчика Холла, який реєструє параметри на валу, що приводиться у рух, за допомогою ремінної передачі, з'єднаної з основним обертовим валом машини. Блок управління (відображення) дозволяє керувати установкою та в процесі випробувань відображати поточну швидкість обертання рухомого зразка (контр-тіла) та крутний момент (рис. 5).



Рис. 5. Зовнішній вигляд випробувальної установки.

Шкала відображення моменту тертя має два режими вимірювання ( $\times 10$ ,  $\times 20$ ). При градуюванні встановлено, що у положенні №1 перемикача шкали максимальне відхилення стрілки при навантаженні на тензобалку складає 100 г. Відповідно у положенні №2 – 200 г.

Трибометричну машину також обладнано таймером відліку часу випробування, який вмикається автоматично при пуску установки. Інтервал відліку від 0.1 с до 999 хв.

Для контролю впливу та моніторингу розподілу температури по поверхні та глибині об'єкту дослідження використовується система терморезистивних датчиків типу Pt100, які мають лінійну функцію перетворення [8].

**Висновки.**

1. Розроблена трибометрична установка на основі стандартизованого метод тестування ISO 7148-2:2012 дозволяє досліджувати триботехнічні характеристики полімерних матеріалів та композиційних матеріалів на основі полімерної або металевої матриці.

2. Запропонована еліптична форма контакту трибоелементів забезпечує постійність контактного навантаження під час експерименту.

3. Система терморезистивних датчиків забезпечує моніторинг умов навколишнього середовища та температури об'єктів тестування.

4. Розроблену установку можна використовувати для експрес-тестування матеріалів триботехнічного призначення, що надасть можливість розробляти більш ефективні трибологічні рішення стосовно структурного пристосування елементів трибоспряження.

**Список літератури**

1. Experimental investigation on tribological behavior of several polymer materials under reciprocating sliding and fretting wear conditions. / Wang, Q. et. al, 2016. 82с.

2. Xue, Q. J. Progress in chinese tribology research and application. Science & Technology Review / 2008. 5 с.

3. Ultra-high frequency tribometer for reciprocating sliding motion / Splatman, D. et al, 2007. С. 153-165.

4. A new tribometer formeasuring friction data at high temperature in a continuousoperation / Dalverny, O. et. al, 1998. С. 1-14.

5. Friction science and technology / Blau, P. et. al, 2009. 17с.

6. Myshkin, N.K., Goryacheva, I.G. Tribology: Trends in the half-century development. J. Frict. Wear. 2016. 37. P. 513-516.

7. ISO 7148-2: 2012. Plain bearings – Testing of the tribological behaviour of bearing materisals. 2012. 4с.

8. ДСТУ ІЕС 60751: 2012. Термоперетворювачі опору та чутливі елементи промислові платинові. Київ, 2013. 2с.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2023.

**Марчук Роман Миколайович** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 068 832 39 56 E-mail: 4629663@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>.

**Мнацаканов Рудольф Георгійович** – д. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, Email: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>.

R. M. MARCHUK, R. G. MNATSAKANOV

### TRIBOMETRIC TESTING MACHINE FOR INVESTIGATING TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF POLYMERS

Analysis of methods and installations for assessment of wear and research of tribometric parameters of various materials was carried out. The purpose of the work is to create a tribometric machine and a method of testing the anti-friction and anti-wear properties of polymers and composite materials. That include temperature registration in frictional contact and in the near-surface layers of triboelements. The main structural diagram of the installation of the tribometric machine, developed at the National Aviation University, is presented. The main characteristics of the installation, the method of testing samples and the parameters of work related to the relevant research of polymer materials and composites based on them are provided. The standardized method specified in ISO 7148-2:2012 is used when testing materials. The proposed elliptical contact form of the triboelements ensures the constancy of the contact load during the experiment. The installation is equipped with a sensor system that allows you to control the speed of rotation and the moment of friction. The rotation speed is measured using a Hall sensor. The system of thermoresistive sensors provides monitoring of environmental conditions and temperature of testing objects. The developed installation can be used for express testing of materials for tribotechnical purposes, which provides an opportunity to develop more effective tribological solutions regarding the structural adjustment of tribo-coupling elements.

**Key words:** tribometric machine, polymers, wear, frictional torque, sliding velocity.

#### Referenses

1. Experimental investigation on tribological behavior of several polymer materials under reciprocating sliding and fretting wear conditions. / Wang, Q. et. al, 2016. 82p.
2. Xue, Q. J. Progress in chinese tribology research and application. Science & Technology Review / 2008. p c.
3. Ultra-high frequency tribometer for reciprocating sliding motion / Splatman, D. et al, 2007. P. 153-165.
4. A new tribometer for measuring friction data at high temperature in a continuous operation / Dalverny, O. et. al, 1998. P. 1-14.
5. Friction science and technology / Blau, P. et. al, 2009. 17c.
6. Myshkin, N.K., Goryacheva, I.G. Tribology: Trends in the half-century development. J. Frict. Wear. 2016. 37. P. 513-516.
7. ISO 7148-2: 2012. Plain bearings – Testing of the tribological behaviour of bearing materials. 2012. 4p.
8. ДСТУ IEC 60751: 2012. Platinum resistance thermometer sensors. Kyiv, 2013. 2p.

**Marchuk Roman Mykolayovych** – graduate student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 4629663@stud.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>.

**Mnatsakanov Rudolf Georgievich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: mnatsakanov@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>.