

**Мікосянчик О.О.,
Запорожець О.І.,
Мнацаканов Р.Г.**

Національний авіаційний університет,
м. Київ, Україна
E-mail: oksana.mikos@bk.ru

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ТРИБОТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦІНКИ ЗМАЩУВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В ПАРАХ ТЕРТЯ

УДК 621.891

В роботі представлені результати експериментальних досліджень, проведені на пристрої для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів, в якому момент тертя, частота обертання роликів, температура мастильного матеріалу, падіння напруги в мастильному шарі в контакті записуються та обробляються з застосуванням програмного забезпечення в реальному часі з графічним зображенням їх змін. Аналіз триботехнічних характеристик контакту в пусковий період за умов чистого кочення при поступовому підвищенні контактного навантаження встановив зниження енергонавантажності контакту за кінетикою зміни питомої роботи тертя за рахунок високої несучої здатності граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу, які характеризуються ньютонівськими властивостями та проявляють високу антифрикційну здатність.

Ключові слова: питома робота тертя, граничні адсорбційні шари, реологічні властивості, мастильний матеріал.

Актуальність задачі

При розробці конструкційних і мастильних матеріалів, зносостійких покриттів одним з етапів визначення їх триботехнічних властивостей є проведення прискорених випробувань шляхом моделювання процесу тертя на лабораторних установках. Простота випробувального обладнання, експресність методів, порівняно невелика вартість випробувань роблять їх найбільш раціональними при визначенні якості нових розроблених виробів.

При моделюванні триботехнічних процесів необхідно дотримуватися певного співвідношення між умовами лабораторних випробувань і умовами, в яких протікають реальні процеси тертя і зношування при експлуатації деталей машин і конструкцій.

Огляд публікацій

Значна частина трибологічних методів досліджень стосується впливу зовнішніх факторів на довговічність і ефективність дії змащувального матеріалу [1, 2]. Для одержання достовірних результатів випробувань елементів трибоспряження, відтворення і схожимості результатів при повторних експериментах необхідна чітка структура методики трибологічних досліджень, яка повинна включати: експериментальні засоби для проведення дослідження (схема і конструкція установки); зразки, які досліджуються, або об'єкти дослідження (матеріал, конструкція, точність виготовлення); умови проведення дослідження (характер навантаження, кінематичні і температурні фактори); контрольні - вимірювальні засоби і їх метрологічна перевірка; методи обробки результатів експериментального дослідження.

При цьому розробка раціональних циклів випробувань є однією з необхідних умов оптимізації і підбору пар тертя. Особливу увагу заслуговує вивчення несталих режимів роботи на триботехнічні характеристики вузла тертя [3, 4].

Найбільш інформативним показником ефективності мастильної дії є товщина змащувального шару в контакті. На сучасному етапі розвитку трибології існує багато методів вимірювання товщини змащувальної плівки, класифікація яких засновується на якісній відмінності фізичних процесів при визначенні даного параметру. До найбільш поширених методів можна віднести наступні: рентгенівський, магнітний, інтерференційний, люмінесцентний, тензометричний, електричні (опору, ємності, пробою, падіння напруги) [3, 5, 6, 7, 8].

Головними вимогами, що висувуються до достовірності результатів, отриманих при використанні даних методів, є достатня точність, стабільність і безінерційність, а також забезпечення вимірювання товщини мастильного шару при дотриманні існуючих в контакті умов – кінематичних, силових, температурних. Однак, на результати рентгенівського і магнітного методів впливають продукти зношування [9], інтерференційний метод характеризується підвищеною чутливістю до температури контактних поверхонь і ступеня чистоти їх обробки [7], люмінесцентний метод не забезпечує достовірних даних при структуризації змащувальних шарів [3], тензометричний метод вимагає удосконалення тарировочних залежностей впливу пружних деформацій поверхневих шарів металу у контакті на мікропереміщення тензометричного датчика [6].

В експлуатаційній практиці дослідження мастильної дії при наявності цілого ряду переваг і простоти одержали поширення електричні методи [5].

Підвищення продуктивності машин, розширення діапазону навантажувально - швидкісних параметрів і експлуатаційних середовищ вимагають створення комплексних методів оцінювання працездатності вузла тертя при різноманітних режимах експлуатації.

Методика та результати досліджень

Нами створений пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів який дозволяє одержати більш достовірні результати досліджень, забезпечує проведення випробувань в умовах кочення, ковзання, реверсу без переобладнання пристрою, характеризується розширенням діапазону коефіцієнта проковзування між контактуючими тілами кочення [10].

Як показано на рис. 1, пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів містить два привода 5, 6, на вихідних валах яких кріпляться дослідні ролики 7, 8; обертання приводів здійснюється шляхом програмування керуючим блоком 2 крокових електродвигунів 3, 4, що з'єднані з джерелом живлення 1. Кроковий електродвигун 3 закріплений на мотор-вагах, до яких кріпиться тензодатчик реєстрації моменту тертя 9. Нижній дослідний зразок 7 занурений в мастильний матеріал 10, що знаходиться в ванні 11, до нижнього корпусу якої входять два термотени 12, термopара 13 прикріплена до стрижня 14. Навантажувальний засіб складається з системи ричагів з навантаженням 15 та противагами 16.

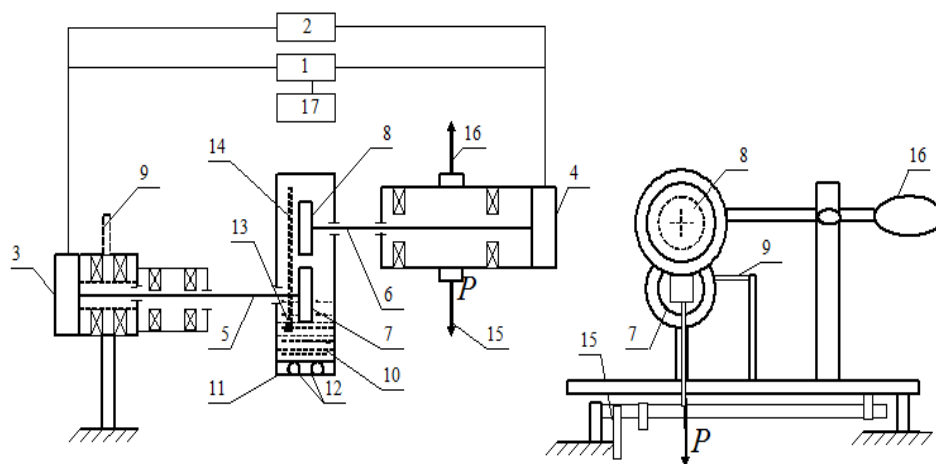


Рис. 1 – Схема триботехнічного комплексу для оцінки змащувальних, антифрикційних та реологічних характеристик мастильних матеріалів

Пристрій працює наступним чином. Трибосистема, яка складається з двох рухомих роликів 7, 8, що контактують в процесі тертя, та мастильного матеріалу 10, розміщена в ванні 11. Трибосистема з допомогою навантажувального засобу 15 навантажується зазделегідь визначеним зусиллям P і обертальними приводами 5, 6 приводяться в рух ролики. Режими обертання (ковзання, кочення, кочення з проковзуванням, реверс) програмуються керуючим блоком 2. Момент тертя, частота обертання роликів, температура мастильного матеріалу, падіння напруги в мастильному шарі в контакті записуються та обробляються на ПК 17 в реальному часі з графічним зображенням їх змін (рис. 2).

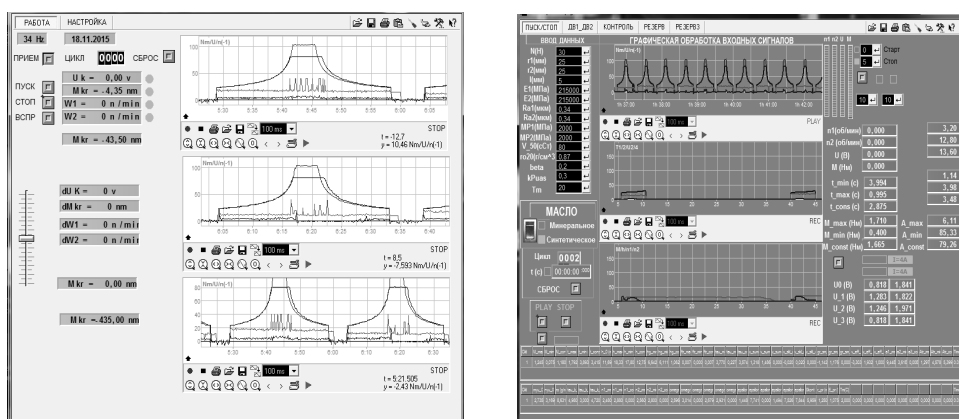


Рис. 2 – Фрагменти програм прийому та обробки триботехнічних параметрів в зоні контакту в реальному часі проведення експериментальних досліджень

В якості зразків використовувалися ролики із сталі 9XC (HRC = 60), припрацьовані контактні поверхні до $Ra = 0,22$ мкм. Мастильний матеріал – трансмісійна мінеральна всесезонна олива ТEP-15 (за міжнародною класифікацією API – GL-2).

Дослідження змащувальних властивостей оливи проходило в режимі пуск – зупинка за наступною схемою: розгін за умов чистого кочення контактних поверхонь (12,5 с) – робота в умовах 20 % проковзування (4 с) – гальмування за умов чистого кочення контактних поверхонь (12,5 с).

Контактне навантаження (σ_{\max}) на 100, 200 та 300 циклах наробітки становило відповідно 100, 140 та 170 МПа.

При дослідженні максимального моменту тертя при зрушенні контактних поверхонь в період пуску в умовах чистого кочення при сумарній швидкості кочення 1,3 м/с встановлено, що підвищення контактних напружень з 100 до 140 МПа призводить до зростання даного параметру, в середньому в 1,46 разів, а при подальшому збільшенні контактних напружень до 170 МПа максимальний момент тертя зменшується в 1,72 рази. Кінетика зміни цього параметру при напрацюванні протягом 100 та 200 циклів наробітки в нестационарному режимі мащення свідчить про його зменшення, в середньому, на 3 - 5% при 100 та 140 МПа, а при 170 МПа простежується протилежна закономірність – момент тертя зростає на 2 - 3% (рис. 3).

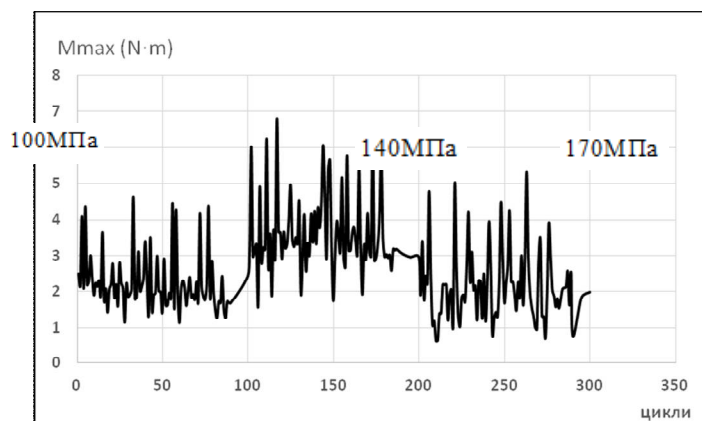


Рис. 3 – Кінетика зміни моменту тертя при чистому коченні за умов поступового збільшення контактного навантаження

Лінійне рівняння апроксимації кінетики зміни моменту тертя при зрушенні в умовах чистого кочення при досліджуваних контактних напруженнях становить:

$$M_{100} = -0,0033x + 2,4672 \text{ (достовірність апроксимації – } R^2 = 0,84\text{);}$$

$$M_{140} = -0,0014x + 3,6853 \text{ (достовірність апроксимації – } R^2 = 0,91\text{);}$$

$$M_{170} = 0,0014x + 2,0902 \text{ (достовірність апроксимації – } R^2 = 0,912\text{).}$$

Найкращі антифрикційні властивості оливи при 170 МПа обумовлені її здатністю формувати найбільшу товщину мастильного шару ($h_{\text{заг}}$) в контакті, яка становить, в середньому, 6,15 мкм, що на 11 % перевищує аналогічні значення даного параметру при менших контактних навантаженнях (рис. 4).

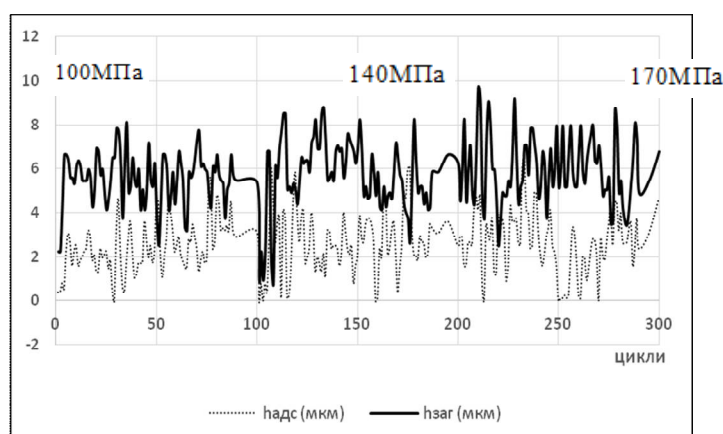


Рис. 4 – Динаміка формування загальної товщини мастильного шару ($h_{\text{заг}}$) та товщини граничних адсорбційних шарів ($h_{\text{адс}}$) в нестационарних умовах

Слід зазначити, що змащувальна здатність оливи ТЕп-15 характеризується високою ефективністю в усьому діапазоні досліджуваних навантажень – контактні поверхні при максимальному моменті тертя в початковий пусковий період повністю розділені шаром мастильного матеріалу, реалізується гідродинамічний режим мащення, а розрахунковий критерій λ [3] становить, в середньому 10 - 16.

Так як дослідження проводились в режимі пуск – зупинка, розглянемо кінетику формування граничних адсорбційних шарів на активованих тертях контактних поверхнях. При $\sigma_{\max} = 100$ МПа простежується утворення стійких граничних шарів, товщина яких при напрацюванні зростає на 47 % (рис. 4). Підвищення контактних напружень до 140 МПа призводить до часткового стирання сформованих граничних шарів, в 5 % циклів спостерігається зрив мастильного шару на зупинці, що обумовлює металевий контакт поверхонь та підвищення моменту тертя при пуску, в середньому, в 1,7 разів. Однак, граничні плівки характеризуються високою адаптаційною здатністю - при напрацюванні їх товщина зростає, в середньому, на 20 %, а з підвищенням σ_{\max} до 170 МПа не встановлено суттєвої зміни товщини граничних шарів при напрацюванні. Лише в діапазоні наробітки 250 - 270 циклів зафіксовано часткове руйнування граничних шарів та короточасне зниження антифрикційних властивостей контакту. Аналіз кінетики зміни граничних адсорбційних шарів при динамічному навантаженні дозволяє стверджувати про високу несучу здатність ароматичних залишкових компонентів та дистилатної оливи, що входять до складу трансмісійної оливи ТЕп-15, а протизношувальна присадка з активними елементами фосфору ($\geq 0,06$ %) та сірки ($\approx 2,5$ %), яка міститься в досліджуваній оливі, ефективно протидіє схоплюванню контактних поверхонь в періоди часткового стирання граничних шарів при зростанні навантаження.

В роботі [11] зазначається, що здатність металів незворотно поглинати енергію деформації, яка оцінюється показником інтегральної роботи, може бути використана в якості чутливого критерію при дослідженні металів в умовах циклічного пружно-пластичного деформування. Так як при динамічній деформації частка прихованої енергії, що запасється в металі, може становити до 20 - 25 % від всієї розсіяної енергії [12], то чим більшою здатністю буде характеризуватися мастильний матеріал щодо зменшення питомої роботи тертя, тим нижче стане й енергонапруженість контакту, відповідно, тим вищим має бути опір руйнуванню елементів трибоспряжень.

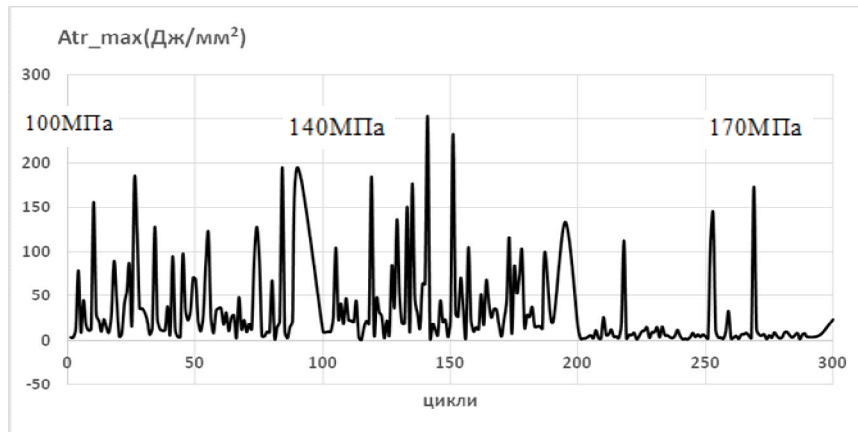


Рис. 5 – Кінетика зміни питомої роботи тертя в пусковий період в умовах поступового зростання навантаження

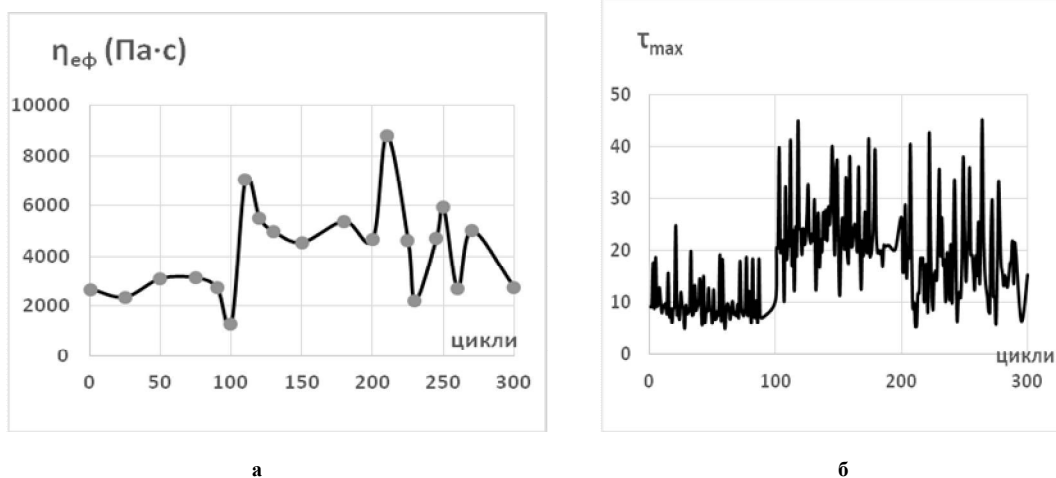


Рис. 6 – Зміна ефективної в'язкості в контакті (а) та напружень зсуву масляного шару (б) при поступовому зростанні навантаження

За методикою [3] проаналізована кінетика зміни питомої роботи тертя в контактi. Встановлено, що при 100 та 140 МПа енергонапруженість контакту характеризується високими показниками – питома робота тертя, в середньому, становить 37 Дж/мм², а в 30 % циклів даний параметр перевищує середні значення в 3 - 4 рази (рис. 5). Однак, при зростанні контактних напружень до 170 МПа спостерігається стрімкоподібне зниження питомої роботи тертя в 4 рази.

Ми вважаємо, що поступове зменшення даного параметру при напрацюванні обумовлено здатністю мастильного матеріалу формувати на контактних поверхнях стійкі граничні шари, які характеризуються високою адаптаційною здатністю до динамічного навантаження. Перш за все, зростання контактного навантаження призводить до стрімкого підвищення ефективної в'язкості в контактi, в порівнянні з динамічною в'язкістю оливи за атмосферних умов, мастильний матеріал набуває ньютонівських властивостей (рис. 6).

При $\sigma_{\max} = 100$ МПа робота тертя витрачається на структурування граничних адсорбційних шарів на активованих тертям контактних поверхнях, адже, як зазначалось вище, товщина граничних шарів при напрацюванні 100 циклів зростає на 47 %. При $\sigma_{\max} = 140$ МПа в 2,5 рази зростає ефективна в'язкість в контактi, відбувається зміна природи граничних адсорбційних плівок – напруження зсуву масляного шару зростає втричі, отже і питома робота тертя залишається на високому рівні.

Однак, при подальшому підвищенні σ_{\max} до 170 МПа напруження зсуву масляного шару адаптованих граничних плівок зменшується, в середньому, в 1,5 рази, проявляються ефективні демпфуючі властивості граничних плівок щодо впливу динамічного навантаження, що обумовлює значне зниження енергонапруженості контакту. З рис. 3 видно стрімке зростання питомої роботи тертя при 250 - 270 циклах наробітки, що відповідає частковому стиранню сформованих граничних шарів на контактних поверхнях, однак їх швидке оновлення на активованій тертям поверхні призводить до стабілізації енергетичного показника контакту.

Висновки

1. Створений пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів в умовах ковзання, кочення, кочення з проковзуванням, реверса, до складу якого входять два контактуючих в процесі тертя рухомих ролика з ізольованими від маси пристрою посадковими місцями, мастильний матеріал, розміщений в ванні, ричажково-маятниковий навантажувальний засіб та програмне забезпечення запису та обробки результатів випробувань.

2. Максимальний момент тертя в пусковий період в умовах чистого кочення при підвищенні контактних напружень з 100 до 140 МПа зростає в 1,46 разів, при подальшому збільшенні контактних напружень до 170 МПа даний параметр зменшується в 1,72 рази, що обумовлено високою адаптаційною здатністю граничних адсорбційних шарів до динамічних умов навантаження.

3. Встановлено зниження енергонапруженості контакту при 170 МПа за рахунок ефективних демпфуючих властивостей граничних шарів мастильного матеріалу, який набуває в триботехнічному контактi властивостей ньютонівських рідин.

Література

1. Зозуля В.Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / Зозуля В.Д., Шведков Е.Л., Ровинский Д.Я., Браун Э.Д. – К.: Наук.думка, 1990. – 264с.
2. Порохов В.С. Трибологические методы испытания масел и присадок/ Порохов В.С. – М.: Машиностроение, 1983. – 183с.
3. Дмитриченко Н.Ф. Смазочные процессы в условиях нестационарного трения / Дмитриченко Н.Ф., Мнацаканов Р.Г. – Житомир:ЖИТИ, 2002.- 308 с.
4. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. – М.: Наука, 1971. – 98 с.
5. Райко М.В. Исследование смазочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.02.04 / М.В. Райко – К.: КИИГА, 1974. – 369с.
6. Павлов В.Н. Исследование смазочного действия масел в зубчатых передачах: дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук: 05.02.04 / Павлов В.Н. – К.: КИИГА, 1974 – 273с.
7. Гоэр Р. Толщина пленки и сопротивление качению в упругодинамическом точечном контакте / Гоэр Р. // Проблемы трения и смазки. – 1971. – № 3. – С. 22 – 26.
8. Kannel G.W. Methods for Determining Pressure Distributions in Lubricated Rolling Contact / Kannel G.W., Bell I.C., Allen C.M. // ASLE Trans. – 1965. – № 8. – P. 250 – 263.
9. Земскова И.И. Измерение величины износа с помощью сцинтилляции / Земскова И.И., Матвеевский Р.М. // Вестник машиностроения. – 1969. – № 11. – С. 29–32.
10. Патент на корисну модель №88748, МПК G 01 N 3/56 Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О.О. – u 2013 13450, заявл. 19.11.13; опубл. 25.03.14, Бюл. №6 – 4с.
11. Лин Т.Х. Скрытая энергия упругой деформации, обусловленная остаточными напряжениями в пластически деформированном поликристалле / Лин Т.Х., Ито М.// Труды Американского общества инженеров-механиков. – 1967. – С.158 – 169.
12. Фридель Ж. Дислокации // Фридель Ж. – М.:Мир. – 1967. – 643с.

Mikosyanchyk O.O., Zaporozhets O.I., Mnatsakanov R.G. **Tribotechnical automated evaluation system for lubricating processes in friction fume.**

The paper presents the results of the research conducted on a device for evaluation of tribotechnical characteristics of the tribocomponents. The software of the device registers and processes in real-time and with graphical presentation of changes - the moment of friction, turnover speed, lubricant temperature, voltage drop in contact lubricant layer. The analysis of the tribotechnical characteristics in contact at the startup moment under conditions of straight rolling and under the gradual increase of contact load has defined the decrease in contact energy load in the kinetics of friction changes due to high carrying capacity of the lubricant boundary adsorption layers, which characterized by non-Newtonian properties and demonstrate high anti-friction ability.

Keywords: specific work of friction, boundary adsorption layers, rheological properties, lubricants.

References

1. Zozulja V.D., Shvedkov E.L., Rovinskij D.Ja., Braun Je D. Slovar'-spravochnik po treniju, iznosu i smazke detalej mashin, Kiev: Nauk.dumka, 1990, 264p.
2. Porohov V.S. Tribologicheskie metody ispytaniya masel i prisadok, M.: Mashinostroenie, 1983, 183p.
3. Dmitrichenko N.F., Mnacakanov R.G. Smazochnye processy v uslovijah nestacionarnogo trenija, Zhitomir:ZhITI, 2002, 308 p.
4. Adler Ju.P., Markova E.V., Granovskij Ju.V. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij, M.: Nauka, 1971, 98 p.
5. Rajko M.V. Issledovanie smazochnogo dejstvija nefjtjanyh masel v uslovijah raboty zubchatyh peredach: dis. na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehn. nauk: 05.02.04, K.: KIIGA, 1974, 369p.
6. Pavlov V.N. Issledovanie smazochnogo dejstvija masel v zubchatyh peredachah: dis. na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehn. nauk: 05.02.04, K.: KIIGA, 1974, 273p.
7. Gojer R. Tolshhina plenki i soprotivlenie kacheniju v uprugodinamicheskom tochechnom kontakte, Problemy trenija i smazki, 1971, № 3, pp. 22 – 26.
8. Kannel G.W., Bell I.C., Allen C.M. Methods for Determining Pressure Distributions in Lubricated Rolling Contact, ASLE Trans, 1965, № 8, pp. 250 – 263.
9. Zemskova I.I., Matveevskij R.M. Izmerenie velichiny iznosa s pomoshh'ju scincilljicii, Vestnik mashinostroenija, 1969, № 11, pp. 29–32.
10. Patent na korisnu model' №88748, MPK G 01 N 3/56 Pristrij dlja ocinki tribotehnicnih harakteristik triboelementiv, Mikosjanchik O.O., u 2013 13450, zajavl. 19.11.13; opubl. 25.03.14, Bjul. №6, 4p.
11. Lin T.H., Ito M Skrytaja jenergija uprugoj deformacii, obuslovlennaja ostatochnymi naprjazhenijami v plasticheski deformirovannom polikristalle, Trudy Amerikanskogo obshhestva inzhenerov-mehaničkov, 1967, pp.158 – 169.
12. Fridel' Zh. Dislokacii, M.:Mir, 1967, 643p.