

УДК 621.891

О. О. МІКОСЯНЧИК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, М. С. ХІМКО, С. В. ШАКУЛІЄВ

*Національний авіаційний університет, Україна***РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗМАЩУВАЛЬНИХ ШАРІВ ТА ЕНЕРГОНАВАНТАЖЕНІСТЬ В КОНТАКТІ ТЕРТЯ ПРИ ЗМІННИХ КОНТАКТНИХ НАПРУГАХ**

Проведений аналіз триботехнічних характеристик контакту за умов зміни чистого кочення на кочення з проковзуванням при поступовому підвищенні контактної навантаженості. Встановлено зниження енергонавантаженихості контакту за кінетикою зміни приросту питомої роботи тертя за рахунок структурної пристосованості вторинних структур внаслідок підвищення їх міцнісних характеристик при терті.

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

Вступ та постановка задачі досліджень. Проблема підвищення надійності пар тертя являється багатофункціональною. Відносно сумісності матеріалів вона може вирішуватись або за рахунок вибору та створення більш зносостійких антифрикційних матеріалів для заданих конструкцій, режимів навантаження та умов експлуатації, або за рахунок підбору чи створення більш ефективних за змащувальною здатністю оливо та мастил для певних режимів експлуатації, або шляхом оптимізації параметрів тертя та умов експлуатації елементів трибоспряження з наступною їх регламентацією [1]. Тертя – процес перетворення енергії, а закономірності цього перетворення визначаються структурним станом матеріалів пари тертя та його змінами [2]. В ході цих змін утворюються нові вторинні структури, що представляють нову фазу, яка спонтанно утворюється при терті в результаті взаємодії матеріалів пар тертя. Вторинні структури характеризуються екстремальними фрикційними та міцнісними властивостями, нормалізуючи тертя та знос. Тонкі плівки вторинних структур за складом, будовою та властивостями суттєво відрізняються від вихідних матеріалів пар тертя. Формування вторинних структур, як і граничних шарів мастильного матеріалу, – термодинамічно неминучий процес пасивації активованих тертям поверхневих шарів контактних поверхонь. При пасивації вирішальною величиною, від якої залежить діапазон навантажень при нормальному терті, є енергія, необхідна для утворення вторинних структур на поверхнях тертя. Тому важливим питанням сучасних досліджень є розробка кінетичної теорії формування третього тіла (захисного шару на поверхні тертя), існування якого слід розглядати як результат конкуруючих процесів стирання, зміни і відновлення плівки [3].

Мета роботи. Метою проведених досліджень було визначення кореляційного впливу змащувальних, антифрикційних та реологічних характеристик мастильного матеріалу на енергонавантаженихості контакту в умовах динамічних навантажень.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження триботехнічних параметрів пар тертя проводились на пристрої для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів [4]. Даний пристрій складається з двох кінематично незалежних приводів. Нижній ролик обертається від шагового електродвигуна, статор якого нерухомо закріплений на мотор-вагах, які шляхом рухомого підвішування зов-

нішнього вала на двох опорах з конічними підшипниками до внутрішнього вала, з'єднаного з ротором, через втулку зі шпонкою сполучаються по одній геометричній вісі з валом, на якому кріпиться дослідний зразок. До мотор-вагів кріпиться тензодатчик реєстрації моменту тертя. Верхній ролик приводиться в обертальний рух від другого шагового електродвигуна, нерухомо закріпленого до зовнішнього валу, який з'єднаний через обійму з противагами для повороту вала при зміні дослідного зразка. Посадкові місця дослідних роликів ізольовані від маси пристрою, що дозволяє реєструвати зміну падіння напруги в мастильному шарі при визначенні товщини мастильного шару в контакті за методом [5]. Керування шаговими електродвигунами здійснюється програмуванням керуючого блоку, що дозволяє проводити дослідження в умовах ковзання, кочення, кочення з проковзуванням, реверса. Навантажування здійснюється за принципом ричажково-маятникового врівноважування прикладеного до вісі вала навантаження. В нижній частині масляної ванни знаходяться два термотени, температура мастильного матеріалу визначається термопарою; для візуального спостереження за дослідними зразками з торцьової та верхньої сторін вставлені оглядові скельця.

В якості зразків використовувалися ролики із сталі 9XC (HRC = 60), припрацьовані контактні поверхні до $R_a = 0,22$ мкм. Мастильний матеріал – трансмісійна мінеральна всесезонна олива ТЕп-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.

Момент тертя, частота обертання роликів, температура мастильного матеріалу, падіння напруги в мастильному шарі в контакті записуються та обробляються на ПК в реальному часі з графічним зображенням їх змін (рис. 1).

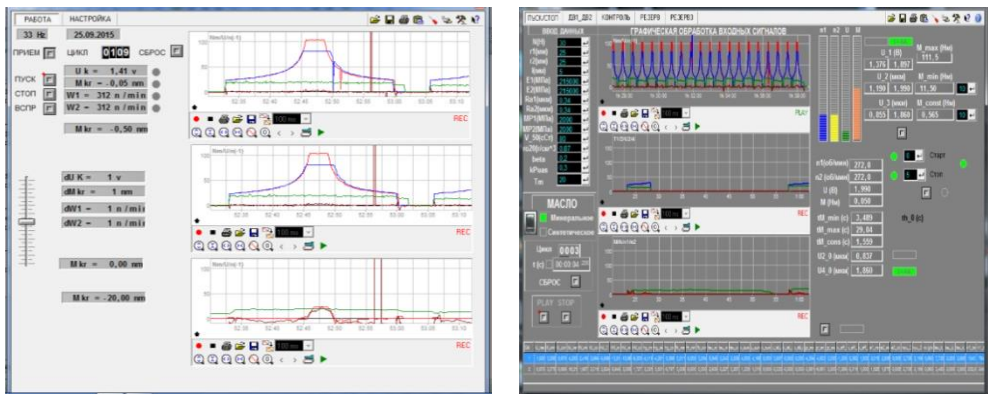


Рис.1. Фрагменти програм прийому та обробки триботехнічних параметрів в зоні контакту в реальному часі проведення експериментальних досліджень.

Результати досліджень та їх обговорення. В даних умовах експерименту відтворювався реальний режим роботи зубчастих прямозубих передач, де чисте кочення реалізується лише в полюсі зачеплення, а в перехідних зонах (входу та виходу зуба в зачеплення) відбувається проковзування, ступінь якого зростає із збільшенням передаточного числа.

За умов зміни чистого кочення на кочення з проковзуванням, максимальні значення якого досягають 20 %, змащувальні властивості мінеральної трансмісійної оливи ТЕп-15, незважаючи на зниження товщини мастильного шару, в середньому, на 10%, залишаються на високому рівні в усьому діапазоні заданих контактних навантажень – в контакті реалізується гідродинамічний режим мащення, при якому параметр мащення λ [6] досягає 10 – 12. Однак, проковзування призводить до появи високих градієнтів швидкості зсуву (γ) масляних шарів порядку $0,5 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$, що проявляється в зниженні антифрикційних властивостей оливи – момент тертя при σ_{\max} 100, 140 та 170 МПа зростає в 1,2 : 1,3 : 1,9 разів відповідно (рис. 2).

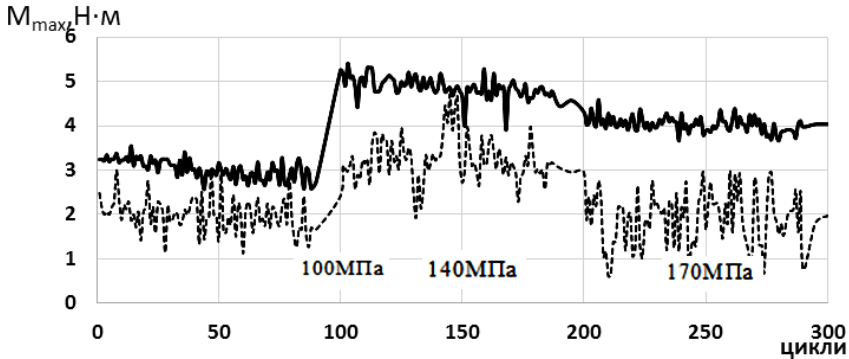


Рис. 2. Кінетика зміни моменту тертя при чистому коченні (1) та коченні з проковзуванням (2) в умовах збільшення контактного навантаження: 1 – -----; 2 – ———

За Біргером [7], сили тертя, які виникають між зуб'ями в зубчастих передачах, переводять максимальні дотичні напруги на поверхню площини контакту. Так як в умовах експерименту між контактними поверхнями формується товщина мастильного шару, яка значно перевищує максимальні нерівності профілю елементів трибоспряження, то дотичні напруги локалізуються в мастильному матеріалі. За умов проковзування напруга зсуву мастильного матеріалу (τ) зростає аналогічно підвищенню моменту тертя – в 1,25 : 1,4 : 2,0 рази при σ_{\max} 100, 140 та 170 МПа відповідно (рис. 3).

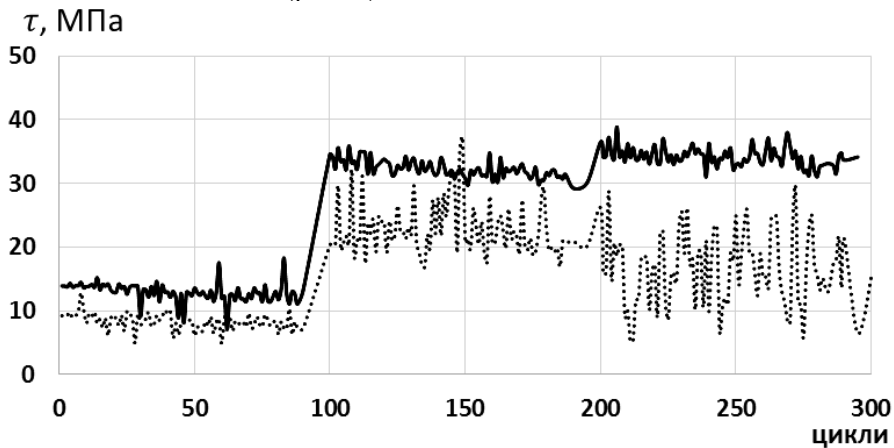


Рис. 3. Зміна напруг зсуву масляного шару при чистому коченні (1) та коченні з проковзуванням (2) в умовах збільшення контактного навантаження: 1 – -----; 2 – ———

Розглянемо коефіцієнт пропорційності (k) між дотичною напругою зсуву (τ) та нормальним навантаженням (σ_{\max}) (табл. 1), запропонований в роботах [8; 9]:

$$k = \frac{\tau}{\sigma_{\max}}.$$

Діапазон встановлених нами значень коефіцієнта опору деформуванню масляної плівки співпадає з одержаними даними в роботі [8] щодо коефіцієнту опору пластичному деформуванню для різних конструкційних матеріалів, який лежить в межах 0,15 – 0,25 (табл.1). Це свідчить про високі демпфуючі властивості граничних змащувальних шарів, які формуються на контактних поверхнях, зміну реологічних властивостей оливи при структуризації в контакті, надбання мастильним матеріалом пружних властивостей з високим модулем зсуву, що також встановлено в роботі [10].

Таблиця 1

Вплив навантаження та умов кочення на коефіцієнт опору деформуванню масляної плівки

k	σ_{\max} , МПа		
	100	140	170
За умов чистого кочення $V_{\Sigma\text{коч}} = 1,3$ м/с	0,105	0,17	0,104
За умов кочення з проковзуванням $V_{\Sigma\text{коч}} = 4,8$ м/с; $V_{\Sigma\text{ковз}} = 0,6$ м/с	0,13	0,23	0,20

За обраною нами схемою проведення досліджень в умовах пуск – зупинка, внаслідок реалізації граничного режиму мащення в контакті в моменти страгування та гальмування елементів трибоспряження, відбувається інтенсивна активація поверхневих шарів металу. На активованих тертях контактних поверхнях формуються граничні адсорбційні шари різної природи товщиною 2 – 4 мкм, які характеризуються неньютонівськими властивостями та різким зростанням їх ефективної в'язкості. Отже, сформована товщина мастильного шару в період проковзування (при $V_{\Sigma\text{коч}} = 4,8$ м/с; $V_{\Sigma\text{ковз}} = 0,6$ м/с) складається з товщини граничних плівок та приросту гідродинамічної товщини мастильного шару. Стрімке зростання градієнту швидкості зсуву за наявності проковзування в контакті призводить до часткової дезорієнтації граничних адсорбованих шарів мастильного матеріалу, що проявляється в зниженні ефективної в'язкості (η_{ef}) в 25 : 16 : 12 разів при σ_{\max} 100, 140 та 170 МПа відповідно. При цьому проявляється чітка залежність ефективної в'язкості від градієнта швидкості зсуву, що підтверджує твердження про надбання мастильним матеріалом неньютонівських властивостей (рис.4).

Найсуттєвіше зменшення η_{ef} в період проковзування при 100 МПа свідчить про слабкі когезійні зв'язки між структурованими компонентами мастильного матеріалу на активованих тертях контактних поверхнях, що проявляється в несуттєвому зростанні напруг зсуву масляного шару, в порівнянні з чистим коченням. Однак вже при 140 і 170 МПа τ збільшується майже втричі, що опосередковано підтверджує зростання опору деформування мастильного шару внаслідок утворення стійких когезійних зв'язків між структурними компонентами мастильного матеріалу. При цьому слід зазначити, що енергонавантаженість контакту підтверджує залежність цього параметру від адаптації граничних шарів до динамічних навантажень.

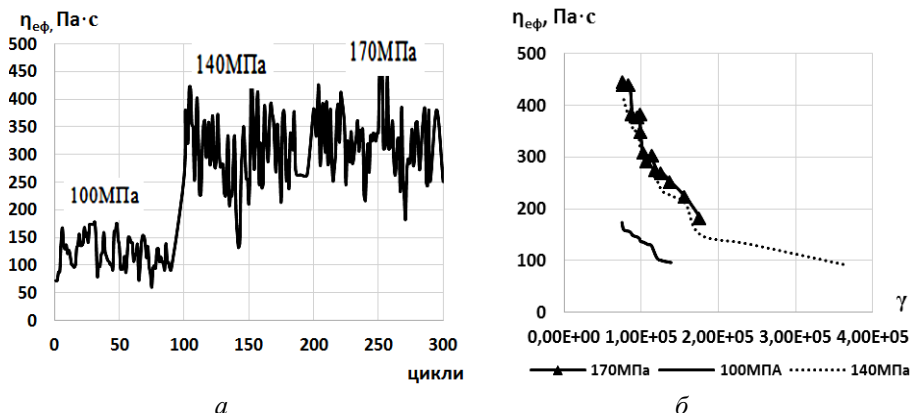


Рис. 4. Залежність ефективної в'язкості оливи від навантаження (а) та градієнту швидкості зсуву (б)

Зокрема, кінетика зміни питомої роботи тертя ($A_{\text{тр}}$) в період наробітки контактних поверхонь за наявності проковзування, представлена на рис. 4, свідчить про зростання даного параметру, в порівнянні з умовами чистого кочення, в 160 разів при 100 та 140 МПа та в 100 разів при подальшому зростанні контактної напруги до 170 МПа (рис. 5).

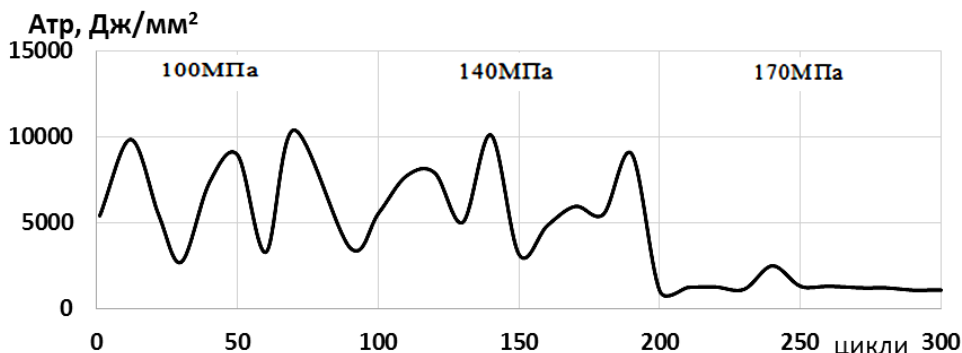


Рис. 5. Зміна питомої роботи тертя при напрацюванні контактних поверхонь в умовах поступового зростання навантаження

Коливальний процес зміни питомої роботи тертя з великим амплітудним діапазоном (3000 – 10000 Дж/мм²) при 100 та 140 МПа свідчить про періодичний характер процесу утворення та руйнування вторинних структур. Внаслідок дискретності контакту в режимі пуск – зупинка, неоднорідності епюри навантаження в часі та в просторових координатах, періодичній зміні умов чистого кочення на кочення з проковзуванням, на різних ділянках поверхні тертя одночасно протікають різні фази локально – періодичних процесів. При цьому мікротвердість контактних поверхонь (H_{100}) знижується, в середньому, на 700 МПа, в порівнянні з мікротвердістю вихідної поверхні сталі 9ХС, відбувається розміщення поверхневих шарів металу, а інтенсивність зношування становить $I = 10^{-8}$. Однак, наявність активної хімічної протизношувальної присадки в досліджуваній трансмісійній оливі забезпечує формування захисних екрануючих граничних шарів на активованих тертях контактних поверхнях, що призводять до формування вторинних структур з високою міцністю – відбувається зміцнення поверхневих

шарів металу, H_{100} зростає, в середньому, на 550 МПа, в порівнянні з вихідною мікротвердістю сталі, а інтенсивність зношування зменшується до $I = 10^{-9}$.

Саме найменший приріст питомої роботи тертя при 170 МПа підтверджує зниження енергонавантаженості контакту за рахунок структурної пристосованості вторинних структур внаслідок підвищення їх міцнісних характеристик при терті. В роботі [11] також одержані дані щодо стабілізації значень електродного потенціалу, питомої роботи тертя та метастабільного значення площі вторинних структур при збільшенні питомого навантаження до деякого критичного значення. Адже метастабільний стан, за Костецьким Б.І., – це результат рівноваги процесів руйнування та відновлення вторинних структур, а також локалізації руйнування в цих структурах.

Висновки. В роботі встановлені закономірності формування трансмісійною мінеральною оливою ТЕп-15 захисних екрануючих граничних шарів на активованих тертям контактних поверхнях за умов зміни чистого кочення на кочення з проковзуванням: відбувається зростання напруг зсуву масляного шару при поступовому збільшенні контактного навантаження внаслідок утворення стійких когезійних зв'язків між структурними компонентами мастильного матеріалу, підвищуються протизношувальні властивості контакту за рахунок зміни процесу розміцнення поверхневих шарів металу на початковій стадії формування вторинних структур на зміцнення поверхневих шарів трибоелементів при напрацюванні.

Встановлено зменшення приросту та періодичності коливання питомої роботи тертя за умов проковзування при σ_{\max} 170 МПа, в порівнянні з аналогічним параметром при 100 та 140 МПа, що свідчить про динамічну рівновагу та структурну пристосованість елементів трибоспряження і компонентів мастильного матеріалу до динамічних умов навантаження при роботі контактних поверхонь в режимі пуск – зупинка.

Список літератури

1. Барышев В.И. Температурно–силовая совместимость материалов подшипников скольжения шестеренных насосов типа НШ / В.И. Барышев // Серия «Машиностроение», Вестник ЮУрГУ. – 2005, № 1(6). – С.105–113.
2. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Костецкий Б.И. // Трение и износ. – 1980. – Т. I, № 4 – С.57–68.
3. [Електронний ресурс] // Научная библиотека диссертаций и авторефератов. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.dissercat.com/content/deformatsionno-spektralnyi-analiz-vtorichnykh-struktur-poverkhnostei-treniya-detalei-aviatsi>
4. Патент на корисну модель №88748, МПК G 01 N 3/56 Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О.О. – у 2013 13450, заявл. 19.11.13; опубл. 25.03.14, Бюл. №6 – 4с.
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. Дмитриченко Н.Ф. Смазочные процессы в условиях нестационарного трения / Дмитриченко Н.Ф., Мнацаканов Р.Г. – Житомир: ЖИТИ, 2002. – 308 с.
7. Биргер И.А. Расчет на прочность деталей машин / Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Шнейдерович Р.М. – М.:ГНТИМЛ, 1959. – 459с.
8. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун–т, 2008. – 507с.

9. Александров А.В. Сопrotивление материалов: учебник для вузов / Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. – М.:Высш. школа, 1995. – 560с.
10. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / Ахматов А.С. – М.,Физматгиз. – 1967. – 472 с.
11. Поверхностная прочность материалов при трении / [Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов та ін.]. – Київ: Техніка, 1976. – 296 с.

Стаття надійшла до редакції 18.11.2015

O. O. MIKOSIANCHYK, R. G. MNATSAKANOV, M. S. HIMKO, S. V. SHAKULIEV

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF LUBRICANT LAYERS AND ENERGOLOADINGS IN THE CONTACT OF FRICTION PAIR AT ALTERNATING CONTACT PRESSURE

There are presented results of researches of transmission lubricant on the devices for estimation tribotechnical characteristics of triboelements, which contains software for registration and processing in the real time the graphical illustration of friction moment changes, frequency rotation of rollers, temperature of lubricant material, pressure drops in the lubricant layer in the contact. It was determined the decreasing of contact energoloading at gradual increase of contact loading due to the structural fitness of secondary structures as the result of increasing their strength characteristics at friction.

Key words: specific work of friction, boundary absorption layers, rheological properties, lubricant materials.

Мікосянчик Оксана Олександрівна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри безпеки життєдіяльності Національного авіаційного університету, пр. Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 91, E-mail: oksana.mikos@bk.ru.

Мнацаканов Рудоль Георгійович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри організації авіаційних робіт та послуг Національного авіаційного університету, пр. Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 68 75, E-mail: mnatsakanov@bk.ru.

Хімко Маргарита Сергіївна – аспірант Національного авіаційного університету, пр. Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 72 58.

Шакулєв Сердар Вельсахатович – аспірант Національного авіаційного університету, пр. Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 68 75.