

УДК 621.891

В. І. КУБІЧ, Д. А. КУРЛИКОВ, М. М. МАРУЩАК

*Запорізький національний технічний університет***СТАН ТРИБОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ «ВЧ50 - МОТОРНА ОЛИВА - АО20-1»
В УМОВАХ НЕДОСТАТНЬОГО МАЩЕННЯ**

Наведено результати триботехнічних випробувань трибологічної системи матеріалів «ВЧ50 - моторна олива - АО20-1», яка досліджувалась у трибоз'єднанні «шиїка - вкладиш» з використанням натурних зразків деталей кривошипно-шатунного механізму двигуна ЗМЗ-402 за циклом: припрацювання оливи; тертя без подачі оливи; тертя з подачею оливи при ступеневому навантаженні та одношвидкісному режимі тертя ковзання. Встановлено неоднозначний вплив складу оливи на швидкість зміни коефіцієнта тертя при взаємодії матеріалів в умовах втрати спроможності мастильних утворень, сформованих при припрацюванні, здійснювати мащення.

Ключові слова: трибоз'єднання, навантаження, натурний зразок, коефіцієнт тертя, температура

Вступ. На сьогоднішній день актуальним є питанням стосовно вивчення робочих процесів, що відбуваються під час швидкоплинних режимів роботи трибоз'єднань двигунів внутрішнього згорання. Одним з таких режимів є режим пуску. Основна його складність полягає в тому, що режим роботи досить швидкоплинний, тому моделювання умов роботи і вивчення закономірностей зміни параметрів стану трибологічної системи матеріалів у експлуатаційному трибоз'єднанні, наприклад, підшипники ковзання колінчастого валу двигуна, досить складний. Окрім режиму роботи на переході до граничного тертя мають вплив і гідравлічні властивості потоку моторної оливи, перехід із ламінарного до турбулентного стану. Відмічається, що явище турбулізації досить негативно впливає на процес утворення масляних шарів і провокує зрив вже сформованих масляних утворень, за рахунок хаотичного руху молекул, поверхнево-активних речовин у потоку відносно один одного [1; 2]. Для усунення цих проблем пропонується введення у конструкцію системи змащування мехатронного модуля, який би усував подібні переходи завдяки своєчасному впливу на параметри робочих процесів відносно зон тертя. Проте, для того щоб скласти алгоритм керування, необхідно знати закономірності зміни параметрів, які будуть покладені в основу роботи мехатронного модуля.

Аналіз публікацій та постановка мети досліджень. Значимість вивчення процесів в зонах контактної взаємодії не втрачає своєї актуальності, про що свідчать ряд наукових робіт, присвячених трибологічним аспектам в машинобудуванні [3; 4 та ін.]. Так у роботі [3] обґрунтовано трибофізичні основи забезпечення максимальної мастильної здатності рідкокристалевих присадок в оливах енергетичних машин за рахунок встановлення закономірностей впливу фазового стану присадок на трибологічні властивості граничної плівки, тертя та зношування в трибосистемах при граничному мащенні. У роботі [4] наведено методологія підвищення зносостійкості вузлів тертя машин і механізмів на етапах їх проектування, експлуатації та ремонту шляхом підбору сумісності трибоелементів на основі науково-обґрунтованого вибору застосування методик оцінки триботехнічних характеристик контактних поверхонь, мастильного матеріалу та

довговічності зношеного шару при самоорганізації дисипативних структур в несталих умовах тертя. Об'єднувальним цих робіт є визначення закономірностей зміни параметрів стану трибологічних систем матеріалів, але фізичні процеси контактної взаємодії як при терті ковзання, так і при терті кочення з проковзуванням моделюються на малогабаритних зразках, що не в повній мірі відтворює особливості роботи експлуатаційних пар тертя. Більш того висвітлюються питання значимості різного роду присадочних композицій, які вносять суттєві зміни у трибологічний стан поверхонь тертя.

У роботі [5] наведено результати триботехнічних випробувань експериментальних графітізованих сталей та вторинного алюмінієвого сплаву АЛ25 у порівнянні зі звичайними сплавами БрОЦС4-4-4, БрОЦС4-4-2,5, AlSi12Cu1(Fe), Л63, АСЧ-2 при роботі сумісно зі сталлю 45ХН2МФ за схемою тертя «рухомий диск - нерухома колодка». При цьому за зміною коефіцієнта тертя визначався час спроможності граничних мастильних шарів забезпечувати нормальне тертя без подачі мастильного матеріалу при ступінчастому навантаженні. Випробування проводили на малогабаритних зразках з метою моделювання тертя у підшипниках ковзання турбокомпресорів двигунів. При цьому умови взаємодії яких не в повній мірі відповідають експлуатаційним.

В роботі [6] експериментально визначено поверхневий натяг деяких мастильних матеріалів і його температурна залежність. Показано, що зменшення товщини плівки мастильного матеріалу нижче критичної величини призводить до того, що мастильний ефект починає зникати і відбувається перехід до режиму сухого тертя або плівкового голодування. При цьому констатується, що одним з керуючих параметрів трибологічних систем при їх самоорганізації слід враховувати поверхневу енергію (поверхневий натяг) фазових розділів матеріалів елементів трибоз'єднань [6; 7].

В роботі [8] представлені результати моделювання зміни питомого часу сталості коефіцієнта тертя у вигляді поверхонь відгуку складної форми в залежності від навантаження, геометрії контакту, в'язкостних параметрів моторної оливи. При цьому уточнені величини комплексного параметра оцінки пошарової податливості упорядкованих структур мастильних утворень, визначено значення коефіцієнтів рівняння регресії, яке отримано раніше. Слабо виражений вплив комплексного параметра міри жорсткості взаємодії мастильних шарів між собою оцінено окремо відповідно до отриманого рівняння регресії, в якому розглядаються співвідношення твердостей, модулів пружності матеріалів модельних трибологічних систем. Отримані поверхні відгуку запропонованого критерію оцінки дають можливість прогнозувати можливий стан трибологічної системи матеріалів.

Отже, виникає необхідність продовження проведення пошукових досліджень трибологічних станів трибоз'єднань з окрема в парах ковзання об'єктів машинобудування в залежності від хімічного складу та механічних властивостей матеріалів, що контактують при порушенні параметрів умов мащення - градієнти швидкості руху молекул моторних олів, наявність та кількість її компонентів, що визначається ефективністю змащування зон взаємодії. При цьому більш значущими будуть результати, які відтворюють стани трибологічних систем матеріалів при моделюванні процесів з використанням натурних зразків трибоз'єднань. На цей час питання розробки рекомендацій щодо забезпечення управління процесами мащення у підшипниках ковзання двигунів за допомогою мехатронних модулів керування при позначених умовах взаємодії поверхонь тертя є відкритими. Безперечно, отримання експериментальних даних у вигляді графічних залежностей, що визначають загальний

характер зміни коефіцієнта тертя у трибоз'єднаннях колінчастого валу двигуна при моделюванні умов критичного навантаження на граничні мастильні утворення, обумовлять визначення часового показника їх дії.

Метою роботи є загальна оцінка впливу мастильних утворень, які формуються з компонентів товарних моторних олиव з різними основами базового середовища на молекулярно-механічний і тепловий стани трибо з'єднання «шийка - вкладиш». При цьому критеріями стану, які описуються, приймаються закономірності зміни коефіцієнта тертя і температури на етапах припрацювання, тертя з мастильним матеріалом і без нього в умовах імітації недостатнього змащування при одношвидкісному ступінчастому навантаженні. Основним завданням даного дослідження ставиться оцінка поведінки мастильних утворень в трибологічній системі матеріалів «ВЧ50-«моторна олива»-АО20-1», що властиво експлуатаційній взаємодії елементів підшипників ковзання колінчастого валу двигунів сімейства ЗМЗ.

Методика досліджень. Для проведення триботехнічних випробувань використовувалася методика, запропонована в роботі [9]. Методика заснована на можливості установки на вал машини тертя СМЦ-2 додаткового оснащення, яке дозволяє закріплювати натурні зразки спряжених деталей групи колінчастого валу двигуна.

Для проведення випробувань використовувалися один зразок-шийка колінчастого валу двигуна ЗМЗ-402 і цільні вкладиші його корінних підшипників відповідного ремонтного розміру.

У якості мастильного матеріалу використовувалися чотири товарні моторні оливи, що входили до складу трибологічної системи матеріалів:

- «ВЧ50 - LUKOL-STANDARD SAE 15W/40 SF/CC - АО20-1»;
- «ВЧ50 - WOLF 10W40SL/CF з суспензією РЕМОЛ-2 - АО20-1» [10];
- «ВЧ50 - WOLF 10W40SL/CF з суспензією РЕМОЛ-2 після 500 км пробігу автомобіля ВАЗ-21063 - АО20-1»;
- «ВЧ50 - MOTUL 5W20 A1/B1 - АО20-1»;
- «ВЧ50 - YUKO 10W40 SL/SF - АО20-1».

Матеріал зразка-шийки ЗМЗ-402 чавун ВЧ50 [11], зовнішній діаметр 63 мм.

Як зразки-вкладиші використовувалися цільні сталелеюмінієві вкладиші з антифрикційним сплавом АО20-1 [12], матеріал основи сталь 0,8 кп.

Зразки-шийки встановлювалися на перехідній вал, закріплений на нижньому валу машини СМЦ-2 перехідною посадкою, від повороту фіксувалися шпонковим з'єднанням, від осевого зсуву гайкою. Попередньо в кожній шийці виконувалися отвори відповідного розміру. Вкладиші встановлювалися в тримачі, який був виконаний з нижньої кришки корінного підшипника двигуна ЗМЗ-402, рис. 1.

У кришці висвердлювався отвір для подачі оливи під робочу поверхню вкладиша через його технологічний отвір, а також отвір для установки термопари в тілі вкладиша. На тильній частині кришки виконувався циліндричний паз під ролик, яким утримував вкладиша притискався до зразка-шийці при дії навантажувального пристрою. У кожному вкладиші також з тильного боку висвердлювався глухий отвір для введення спайки термопари. Вкладиш встановлювався в утримувачі з технологічним натягом.

Для вимірювання температури в зоні тертя використовувався мультиметр DT-835 з термопарою TP-01A з діапазоном вимірюваних температур: $-18\sim 712^{\circ}\text{C}$.

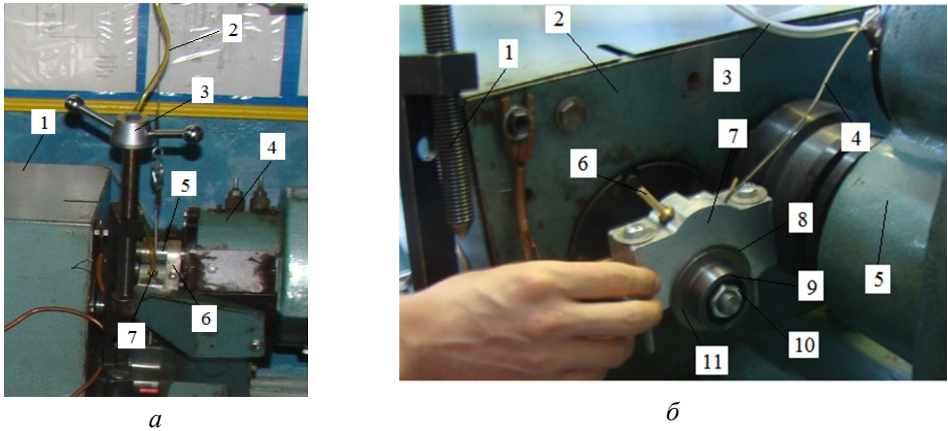


Рис. 1. Експериментальне обладнання: *a* – загальний вид: 1 – корпус машини тертя; 2 – трубка підводу оливи до зони тертя; 3 – силовий гвинт; 4 – каретка; 5 – кришка корінного підшипника; 6 – фіксатор скоби; 7 – штуцер; *б* – натурні зразки: 1 – силовий гвинт; 2 – корпус машини тертя; 3 – трубка підводу оливи до зони тертя; 4 – дріт термомопари; 5 – каретка; 6 – штуцер; 7 – кришка підшипника; 8 – корінний вкладиш підшипника; 9 – стопорне кільце; 10 – гайка; 11 – зразок – шийка

Момент тертя вимірювався і записувався у вигляді трибограм у mV за допомогою потенціометра КСП2-005. За записаними трибограмами з урахуванням масштабу довжина клітини поля сітки 1,2 мм - 0,18 Н·м, навантаження зразків, їх геометричних розмірів сигнал перераховувався в коефіцієнт тертя μ . Точність вимірювання становила $\Delta_M = 0,1$ мм, що в перерахунку на значення коефіцієнта тертя становило $\Delta_f^I = 0,003$.

Триботехнічні випробування проводилися відповідно до розробленого цикла в два етапи при постійній частоті обертань зразка-шийки $n = 300$ хв⁻¹.

Етап 1: «з подачею моторної оливи у зону тертя»:

- встановлення зразків, подача оливи, пуск, прописування «нульової» лінії моменту опору руху протягом 2-3 хвилин з мінімальним навантаженням;
- підвищення навантаження з кроком 425 Н з утриманням взаємодії протягом 3 хв. У кінці кожної 2-гої хв. додавання порції свіжої оливи, протягом 10-20 с;
- ступінчасте збільшення навантаження до 850 Н, 1275 Н, 1700 Н, утримуючи кожне по 3 хв. з додаванням оливи;
- зменшення навантаження до мінімального значення та прописування «нульової» лінії;
- зупинка машини, розкриття контакту, огляд стану поверхонь, витирання на сухою поверхонь шийка та вкладиша, вимірювання площі контакту.

Етап 2: «без подачі моторної оливи у зону тертя»:

- зібрання трибоз'єднання, встановлюємо і запускаємо машину тертя;
- протягом 2 - 3 хв. прописування «нульової» лінії;
- підвищення навантаження на каретку з кроком 170 Н, утримання навантаження протягом 3 хв. Якщо зриву не відбувається продовження навантаження трибоз'єднання до позначки 1700 одиниць з кроком 170 одиниць утримуючи по 3 хвилини. Під час дослідів необхідно слідкувати за моментом тертя і температурою. Якщо рівень температури різко підніметься до позначки 130-135 °С, або момент тертя різко збільшиться до позначки 4-5 одиниць (0,72-0,9 Н·м) швидко подача оливи і фіксування зміни температури;

– зменшення навантаження до мінімального значення та прописування «нульової» лінії;

– зупинка машини, закінчення проведення експерименту.

Кількість дослідів для кожної оливи складала не менше трьох. При цьому для кожного послідовного дослідів зразок-шийка шліфувалась, а вкладиші використовувались новими.

Всі отримані дані для розрахункових коефіцієнтів тертя, фіксованих температур в залежності від поточних розрахункових тисків та часу випробувань графічно відображались на полі координат та за середніми значеннями будувались графіки. Результати наведено на рис. 2-11.

Результати досліджень та їх обговорення. Випробування трибоз'єднання з моторною оливою LUKOIL 15W40 SF/CC показали наступне, рис. 2, 3.

На етапі припрацювання, рис. 2, спостерігалось стрімке збільшення коефіцієнта тертя. Це пов'язано з виходом моторної оливи на робочий режим роботи. При цьому швидкість виходу зміни коефіцієнта тертя складала $8,7 \cdot 10^{-3}$ од/хв⁻¹, а тривалість виходу на сталий режим складала 3 хв. Тривалість роботи оливи під навантаженням складало 12 хв. Найбільше значення швидкості зміни коефіцієнта тертя сягнуло до $7 \cdot 10^{-2}$ од/хв⁻¹, при цьому температура знаходилась у межах 30-32°C. Після регулярної подачі моторної оливи і ступінчатого навантаження від 1,5 до 5,5 МПа, спостерігалось плавне зниження швидкості зміни коефіцієнта тертя від $3 \cdot 10^{-2}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ од/хв⁻¹, що характеризує роботу вузла під час гідродинамічного тертя. Зрив чи різке збільшення коефіцієнта тертя до граничного значення під час проведення дослідів не відбувалося.

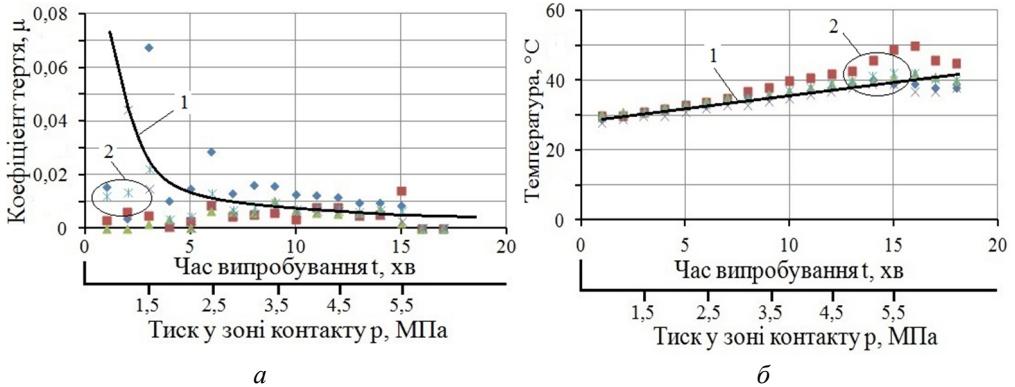


Рис. 2. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) під час припрацювання моторної оливи LUKOIL 15W40 SF/CC відносно часу і тиску: 1 – крива зміни коефіцієнта тертя (а), температури (б); 2 – поле розсіювання даних

Температура в свою чергу під час всього дослідження зі збільшенням навантаження лінійно зростала без спалахів та різких зривів. Діапазон зміни температури склав від 29 до 46°C під час усіх дослідів. Характер зміни коефіцієнта тертя нагадує експоненціальний закон розподілення, температура змінюється за лінійною залежністю.

На етапі тертя без подачі оливи, рис. 2, спостерігався характерний зрив масляних шарів і різке збільшення значення коефіцієнта тертя при мінімальних навантаженнях вже на 1 хвилині випробування. Швидкість зростання коефіцієнта тертя складала від 0,14 до 0,16 од/хв⁻¹, при допустимому значенні 0,1-0,12. Температурний стан змінювався від 39 до 54°C.

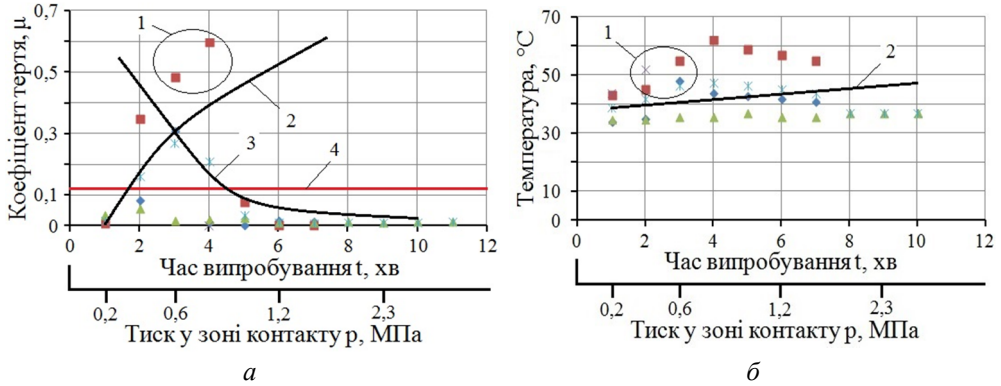


Рис. 3. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (*a*) і температури (*б*) без подачі та з подачею оливи LUKOIL 15W40 SF/CC: 1 – поле розсіювання даних; 2 – зміна коефіцієнта тертя (*a*), температури (*б*) при роботі на сформованих мастильних утвореннях; 3 – зміна коефіцієнта тертя після подачі оливи; 4 – граничне значення коефіцієнта тертя

Подальше проведення дослідження при такому різкому збільшенні коефіцієнта тертя унеможливило проведення дослідження. Тому для зменшення значення коефіцієнта тертя подавалась порція моторної оливи. Завдяки цьому спостерігалось різке зменшення коефіцієнта тертя від 0,55 до 0,08. Швидкість зміни коефіцієнта тертя склала $0,47 \text{ од/хв}^{-1}$. Загальна тривалість роботи моторної оливи без підведення додаткової порції у діапазоні навантажень від 0,6 до 2,3 МПа знаходилась у межі від 2 до 3 хв.

Випробування трибоз'єднання з моторною оливою WOLF 10W40SL/CF + РЕМОЛ-2 показали наступне, рис. 4, 5.

На етапі припрацювання спостерігалось наступне. На початку дослідження мало місце характерне збільшене значення коефіцієнта тертя, його діапазон склав $9 \cdot 10^{-3} - 0,015$, в подальшому спостерігалось його плавне зменшення. Швидкість зміни коефіцієнта тертя склала $2 \cdot 10^{-3} \text{ од/хв}^{-1}$.

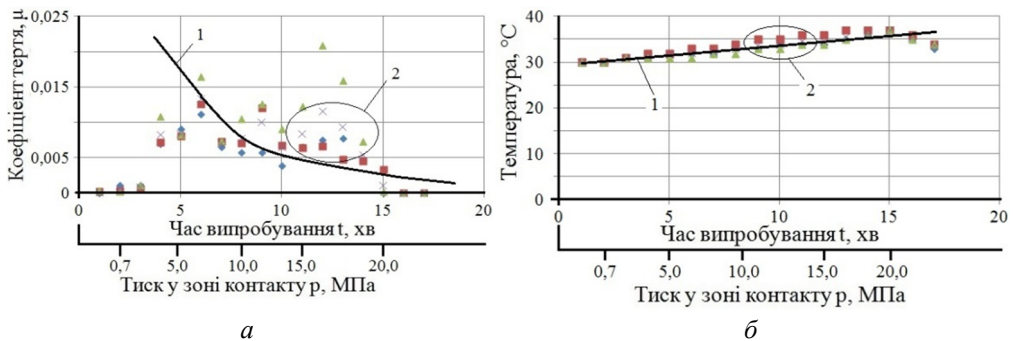


Рис. 4. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (*a*) і температури (*б*) під час припрацювання моторної оливи WOLF 10W40SL/CF + РЕМОЛ-2 відносно часу і тиску: 1 - крива зміни коефіцієнта тертя (*a*), температури (*б*); 2 - поле розсіювання даних

Температура при цьому змінювалась від 30 до 33°C . Подібне явище відбувалося на протязі 3 хв. Далі під час ступінчатого навантаження у діапазоні від $0,7$ до 20 МПа спостерігалось зменшення коефіцієнта тертя до діапазону від $3 \cdot 10^{-3}$ до $9 \cdot 10^{-3}$, швидкість його зміни склала $5 \cdot 10^{-4} \text{ од/хв}^{-1}$. Температура змінювалась в діапазоні від 33 до 36°C на протязі 12 хв. Загальний час проведення досліджень на даному етапі становив 17 хв.

Підвищення коефіцієнта тертя до граничного його значення і різкого збільшення температури не відбувалося.

Діапазон зміни коефіцієнта тертя характеризував роботу трибоз'єднання в умовах гідродинамічного тертя. Характер зміни коефіцієнта тертя нагадує експоненціальний закон розподілення, температура змінюється за лінійною залежністю.

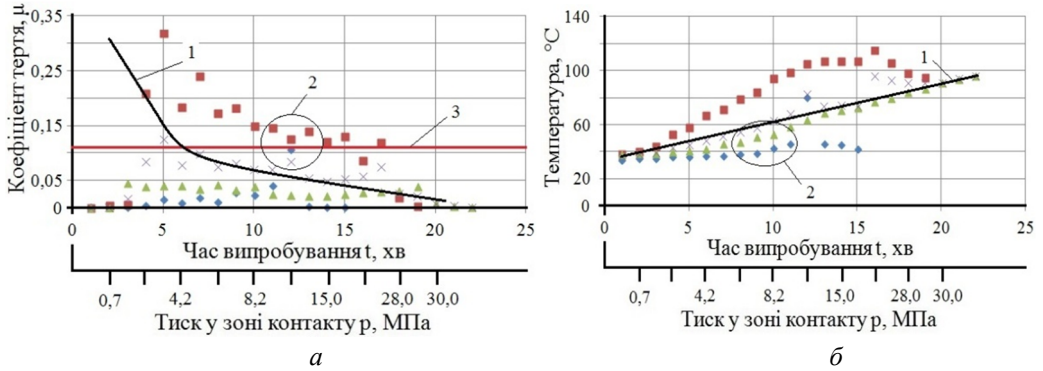


Рис. 5. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) без подачі та з подачею оливи WOLF 10W40SL/CF + РЕМОЛ-2: 1 – зміна коефіцієнта тертя (а), температури (б) при роботі на сформованих мастильних утвореннях; 2 – поле розсіювання даних; 3 – граничне значення коефіцієнта тертя

На етапі тертя без подачі оливи (рис. 5) спостерігалось характерне підвищення коефіцієнта тертя, деякі значення навіть перевищили допустиме значення 0,1-0,12 од. Діапазон зміни коефіцієнта тертя склав від 0,31 до 0,01. Швидкість зміни коефіцієнта тертя змінювалась від 0,08 до 0,1 од/хв⁻¹. Час виходу на сталий режим склав 2-2,5 хв. Температура на даному проміжку знаходилась у межах від 38 до 48°C. Діапазон ступінчастого навантаження зон взаємодії склав від 0,7 до 30 МПа. При цьому коефіцієнт тертя змінювався від 0,08 до 0,02, а швидкість зміни його значення становила 4,3 · 10⁻³ од/хв⁻¹. Зміна температури спостерігалась від 48 до 96°C на протязі 16 хв. Загальний час проведення дослідження становив 16 хв. Однак при цьому в одному з дослідів мала місце тривалість часу випробувань до 23 хв. Важливим є те, що під час навантажень не відбувався характерний зрив шарів мастильних утворень, що не обумовлювалося різким підвищенням значення коефіцієнта тертя до його критичного значення.

Спостерігання за температурним показником, значення якого знаходилось у діапазоні 80-115°C, примусило до подачі у зону тертя незначної порція оливи протягом 0,5-1 секунди. Це було зроблено з метою визначення характеру поведінки температура при додатковому потраплянні оливи у зону тертя. Подача порції оливи обумовила різке падіння температури з позначки 80 до 40°C за рахунок того, що температура масла на вході у зону тертя становила менше ніж у контакті. Слід зазначити те, що один із дослідів було припинено завдяки підвищенню температури до критичного значення, яке сягнуло 115°C.

Характер зміни коефіцієнта тертя нагадує експоненціальний закон розподілення, температура змінюється за лінійною залежністю.

Випробування трибоз'єднання з моторною оливою WOLF 10W40SL/CF + РЕМОЛ-2 (500 км пробігу автомобіля) показали наступне, рис 6, 7.

На початку дослідження мало місце підвищене значення коефіцієнта тертя, діапазон склав 0,06-0,052. Швидкість зміни величини коефіцієнта тертя становила 0,0027 од/хв⁻¹.

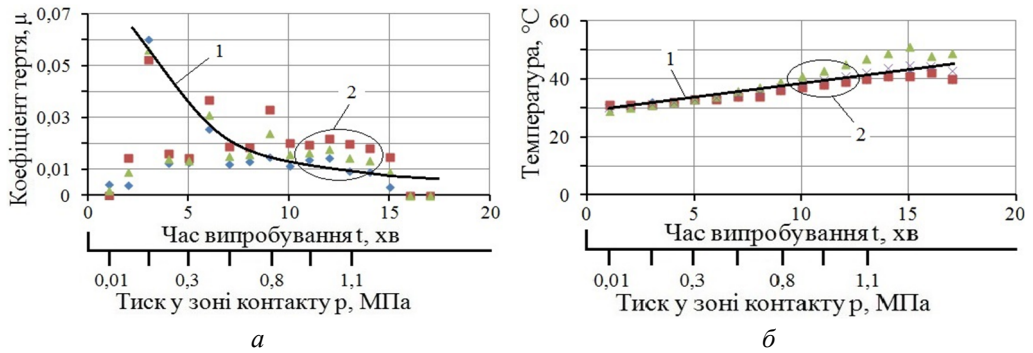


Рис. 6. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (*a*) і температури (*б*) під час припрацювання моторної оливи WOLF 10W40SL/CF з додаванням РЕМОЛ-2 і пробігом автомобіля 500 км відносно часу і тиску: 1 – крива зміни коефіцієнта тертя (*a*), температури (*б*); 2 – поле розсіювання даних

Температура знаходилась в діапазоні від 31 до 34°C. Далі при збільшенні навантаження від 0,01 до 1,1 МПа на протязі 12 хв. діапазон зміни величини коефіцієнта тертя становив від 0,002 до 0,036, а швидкість його зміни складала 0,0028 од/хв⁻¹. Температура під час досліджень за середніми значеннями змінювалась від 32 до 44°C. Вихід на сталий режим тертя визначився на 7 хв. дослідження. Загальна величина часу проведених досліджень становила 17 хв. Підвищення коефіцієнта тертя до граничного значення і різкого збільшення температури не відбувалося. Загальний діапазон зміни коефіцієнта тертя визначав те, що мав місце граничний режим взаємодії поверхонь тертя. Графічний вигляд закономірності зміни коефіцієнта тертя нагадує експоненціальний закон розподілення, а температура змінюється за лінійною залежністю.

На другому етапі спостерігалось наступне, рис. 7. На початку мав місце стрімкий ріст коефіцієнта тертя, значення якого перевищувало допустимі значення 0,1-0,12.

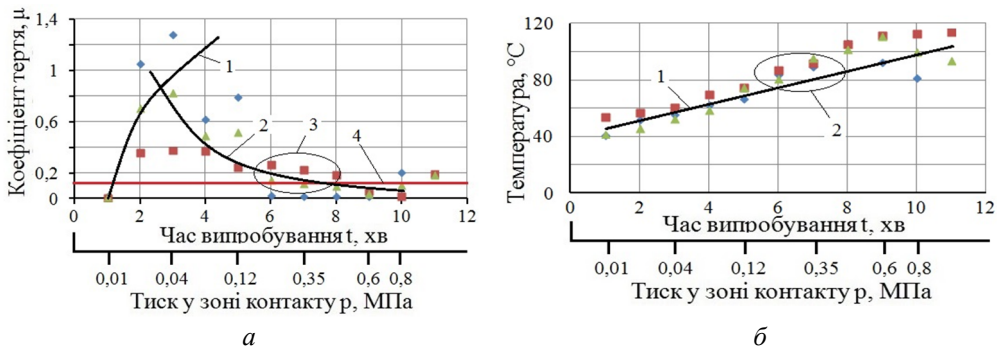


Рис. 7. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (*a*) і температури (*б*) без подачі та з подачею оливи WOLF 10W40SL/CF + РЕМОЛ-2 і пробігом автомобіля 500 км: 1 – зміна коефіцієнта тертя (*a*), температури (*б*) при роботі на сформованих мастильних утвореннях; 2 (*a*) – зміна коефіцієнта тертя після подачі оливи; 2 (*б*), 3 (*a*) – поле розсіювання даних; 4 – граничне значення коефіцієнта тертя

Величина значення коефіцієнта тертя становила 0,6-1,3 од, швидкість його зміни складала 0,35 од/хв⁻¹, а температура змінювалась від 50 до 55°C. За таких значень коефіцієнта тертя подальше продовження дослідження неможливе, тому у зону тертя була подана олива. У наступному спостерігалась різке зниження величини коефіцієнта тертя, але олива за таких умов взаємодії пошкоджених поверхонь не

може утворити масляні шари, про що вказувало значення коефіцієнта тертя, яке знаходилось у межах від 0,4 до 0,6, хоча і частково була знижена швидкість його зменшення, до $0,2 \text{ од/хв}^{-1}$.

Далі, тільки на протязі 3 хв. роботи, за рахунок постійної подачі оливи у зону тертя фіксувалось плавне зниження коефіцієнта тертя до допустимої межі. Проте, показник температури неухильно зростав на протязі всього досліджу, незважаючи на подачу оливи у зону тертя. Температурні спалахи сягали $106-114^\circ\text{C}$ на протязі 3 хвилин роботи. Отже, швидкість зростання температури становить $2,6^\circ\text{C}\cdot\text{хв}^{-1}$. Дане дослідження було досить швидкоплинним за рахунок різкого підвищення фіксованих параметрів. Загальна величина часу проведених досліджень становила 10-11 хв. Важливим є те, що сталий режим роботи настав лише за умов подачі оливи у зону тертя і на 6-7 хв. роботи, хоча тиск у контакті знаходився у діапазоні від 0,01 до 0,8 МПа. Характер зміни коефіцієнта тертя до подачі оливи у зону тертя нагадує степеневий закон розподілення, характер зміни коефіцієнта тертя після подачі оливи у зону тертя нагадує експоненціальний закон розподілення, температура змінювалась за лінійною залежністю.

Випробування трибоз'єднання з моторною оливою MOTUL 5W20 A1/B1 показали наступне, рис. 8, 9.

На етапі припрацювання спостерігалось наступне. На початку дослідження мало місце збільшене значення коефіцієнта тертя, діапазон склав 0,03-0,1. Проте, далі спостерігалось різке зниження коефіцієнта тертя до позначки 0,0045-0,008, швидкість його зниження становило $0,0255-0,092 \text{ од/хв}^{-1}$. Сталий режим роботи даного зразка оливи настав на 4 хв. дослідження.

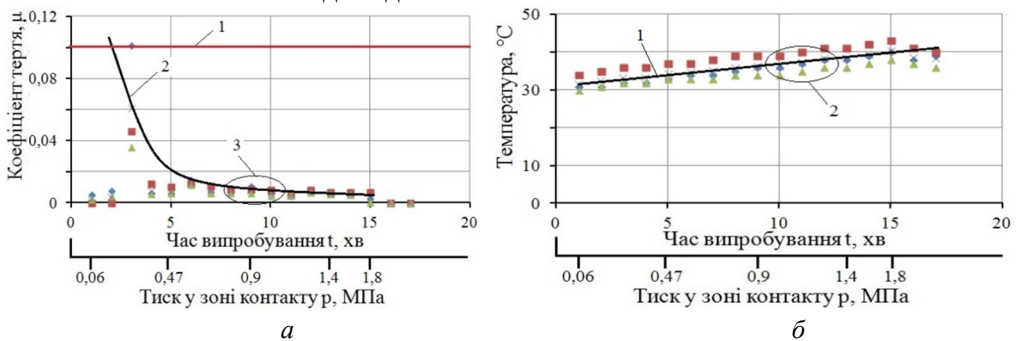


Рис. 8. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) під час припрацювання моторної оливи MOTUL 5W20 A1/B1 відносно часу і тиску: 1 (а) – граничне значення коефіцієнта тертя; 1 (б) – зміна температури; 2 (а) – зміна коефіцієнта тертя; 2 (б), 3 (а) – поле розсіювання даних

Слід зазначити, що даний зразок чутливий до подачі свіжого заряду до зони тертя. Це обумовлювалось невеликими підвищенням значення коефіцієнта тертя і нагадувало пульсацію на характерних ділянках часу де відбувалося підведення. Наведене відображалось на трибограмах на рис. 8 не показано. Температура на протязі всього дослідження зростала від 30 до 40°C . Діапазон ступінчастого навантаження становив від 0,06 до 1,8 МПа. Загальний час досліджу становив 17 хв. Підвищення коефіцієнта тертя до граничного значення і різкого збільшення температури не відбувалось. Загальний діапазон зміни коефіцієнта тертя визначав те, що мав місце граничний режим взаємодії поверхонь тертя. Характер зміни коефіцієнта тертя нагадує експоненціальний закон розподілення, температура змінювалась за лінійною залежністю.

На другому етапі, де була виключена подача оливи у зону тертя, спостерігалось наступне, рис. 9.

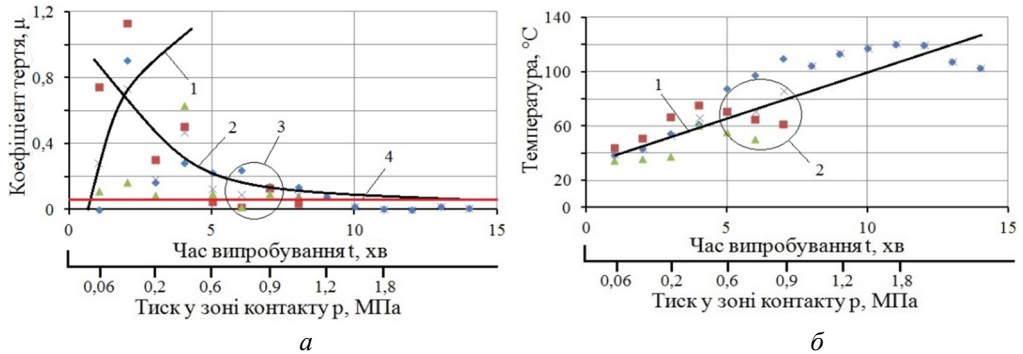


Рис. 9. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) без подачі та з подачею оливи MOTUL 5W20 A1/B1: 1 – зміна коефіцієнта тертя (а) при роботі на сформованих мастильних утвореннях, температури (б); 2 (а) – зміна коефіцієнта тертя після подачі оливи; 1 (б), 3 (а) – поле розсіювання даних; 4 – граничне значення коефіцієнта тертя

Зрив масляного шару відбувався практично миттєво. Мав місце ріст коефіцієнта тертя до позначки 0,3-0,7 с наступним збільшенням до позначки 0,75-1,1. Швидкість зростання становила $0,225-0,2$ од/хв $^{-1}$. Критичного значення коефіцієнта тертя досяг наприкінці другої хвилини випробувань, що обумовило включення подачі оливи. Температура змінювалась від 39 до 50°C . Слід відзначити те, що досліди мали різне значення за часом. Після подачі оливи спостерігалось зменшення коефіцієнта тертя. Сталий режим роботи настав за рахунок безперервної подачі оливи на 4 хв. Загальний час проведення дослідження склав 8-14 хвилин. Температура з урахуванням подачі оливи у зону тертя становила $40-120^{\circ}\text{C}$ на протязі всього випробування. Діапазон ступінчастого навантаження становив від 0,06 до 1,8 МПа. Характер зміни коефіцієнта тертя до подачі оливи та після її подачі у зону тертя нагадує степеневий закон розподілення, температура змінювалась за лінійною залежністю.

Випробування трибоз'єднання з моторною оливою YUKO 10W40 SL/SF показали наступне, рис. 10, 11.

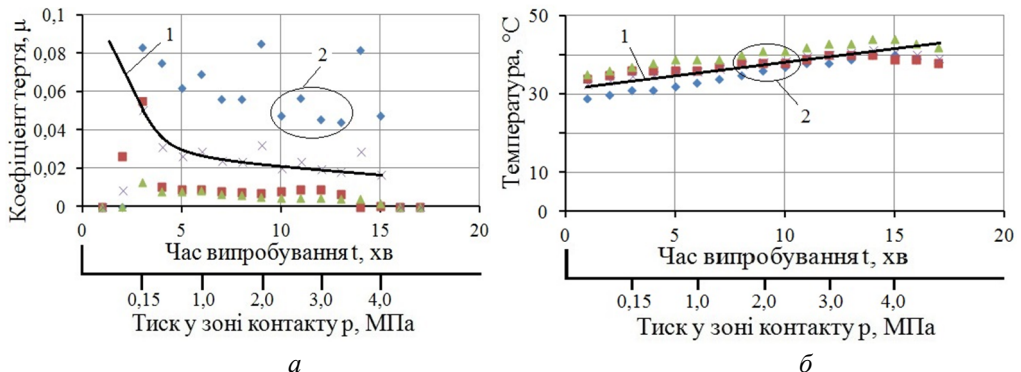


Рис. 10. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) під час припрацювання моторної оливи YUKO 10W40 SL/SF відносно часу і тиску: 1 – крива зміни коефіцієнта тертя (а), температури (б); 2 – поле розсіювання даних

На етапі припрацювання спостерігалось наступне. Найбільше значення коефіцієнта тертя знаходилось у діапазоні 0,01-0,08. Діапазон температур складав від 28

до 35°C. Надалі мало місце зниження коефіцієнта тертя до 0,018 та виходу на стабільний режим роботи, який настав на 4 хвилині. Швидкість зміни коефіцієнта тертя становила 0,035 од/хв⁻¹. Температури при цьому на протязі всього дослідження плавно зростала від 33 до 40°C. Діапазон зміни ступінчастого навантаження становить 0,15-4 МПа. Підвищення коефіцієнта тертя до граничного значення і різкого збільшення температури не відбувалося. Загальний діапазон зміни коефіцієнта тертя вивчав те, що мав місце граничний режим взаємодії поверхонь тертя.

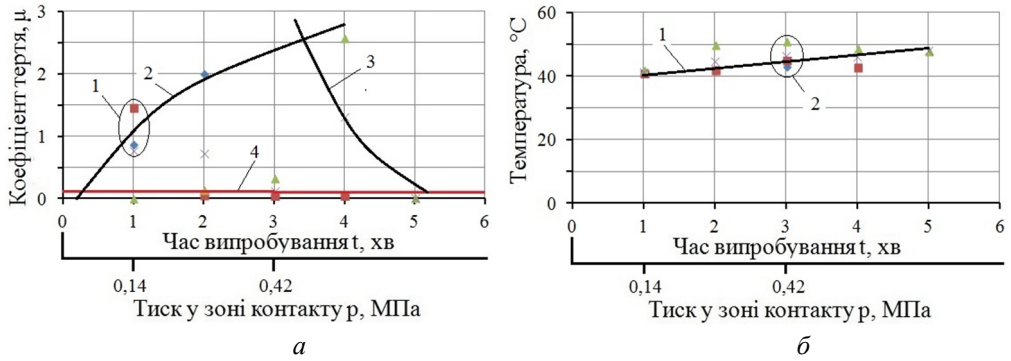


Рис. 11. Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) без подачі та з подачею оливи YUKO 10W40 SL/SF: 1 (б), 2 (а) – поле розсіювання даних; 2 – зміна коефіцієнта тертя (а) при роботі на сформованих мастильних утвореннях, температури 1 (б); 3 (а) – зміна коефіцієнта тертя після подачі оливи; 4 – граничне значення коефіцієнта тертя

Характер зміни коефіцієнта тертя нагадує експоненціальний закон розподілення, температура змінювалась за лінійною залежністю.

На другому етапі спостерігалось наступне, рис. 11. За умови відсутності подачі оливи фіксувалось різке збільшення величини коефіцієнта тертя до позначки 1,1-1,8 на протязі 2 хв., швидкість його зміни становила 0,35 од/хв⁻¹.

Температура знаходилась в межах 40-42°C. Для зменшення ступеня механічної напруженості контакту подавалась олива. Загальний час проведення дослідів становить 5 хв. Температура змінювалась від 40-50°C. Діапазон ступінчастого навантаження становив від 0,14 до 0,42 МПа. Характер зміни коефіцієнта тертя до подачі оливи у зону тертя нагадує статичну залежність, після її подачі – експоненціальний закон розподілення. Температура змінювалась за лінійною залежністю.

В цілому отримана картина зміни стану трибологічної системи матеріалів, що підлягала триботехнічним випробуванням, свідче про таке.

На етапі припрацювання, на початку випробувань всі оливи показали досить стабільне і характерне збільшене значення коефіцієнта тертя і плавне його зменшення враховуючи те, що навантаження ступінчасте збільшувалося. Проте, з усіх зразків під час етапу припрацювання найменше значення коефіцієнта тертя мало трибоз'єднання, яке випробувалося с оливою MOTUL 5W20 A1/B1. Коефіцієнта тертя мав значення від 0,002 до 0,008 при зміні тиску від 0,06 до 1,8 МПа у всіх дослідях, що відзначало роботу трибоз'єднання в режимі гідродинамічного мащення.

На етапі роботи без подачі оливок, чотири зразки: Лукойл 15W40 SF/CC, WOLF 10W40SL/CF з додаванням PEMOJI-2 і пробігом автомобіля у 500 км, MOTUL 5W20 A1/B1 і YUKO 10W40 SL/SF показали характерний зрив масляних шарів лише за зміною часу від 10 до 50 секунд у діапазоні навантажень від 0,04 до 0,2

МПа. Проте, слід відзначити, що моторна олива WOLF 10W40SL/CF з додаванням реміталізантау РЕМОЛ-2, показало досить цікаві результати. Цей зразок один з усіх, на якому не відбулося зриву масляного шару. Під час дослідів спостерігалось підвищене значення коефіцієнта тертя 0,25-0,3, а далі відбулося плавне поступове його за умови ступінчастого навантаження в діапазоні від 0,7 до 28 МПа. На перший погляд може здатися, що у зону тертя могла потрапляти незначна кількість моторної оливи, яка б підтримувала стабільність роботи. Але цього не відбувалось, бо для неможливості несанкціонованої подачі оливи трубка її підводу під час усіх дослідів від'єдналась від штуцера.

Висновки

В результаті проведених триботехнічних випробувань отримані закономірності зміни коефіцієнта тертя і температури в експлуатаційному трибоз'єднанні «шийка вкладиш» при одношвидкісному ступінчастому навантаженні в умовах імітації недостатнього змащування. При цьому основний акцент зроблений на визначенні і порівнянні швидкості зміни коефіцієнта тертя в трибологічних системах матеріалів, які працюють на остаточно сформованих при припрацюванні мастильних утвореннях.

Отримані результати з одного боку представляються порівняно узагальненими і вказують на неоднозначний характер поведінки досліджуваних тріад, і з іншого боку є вихідними даними для визначення часу опору зриву масляних шарів при змащувальному голодуванні.

Встановлено, що найбільший опір зриву в розглянутих умовах взаємодії з дослідженого асортименту моторних масел надають мастильні утворення, що формуються з компонентів напівсинтетичної оливи WOLF 10W40SL/CF з додаванням суспензії РЕМОЛ-2.

Список літератури

1. Курликов Д. Н., Кубич В. И. Влияние явища турбулізації моторного масла на ресурс роботи ДВЗ / Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика» - щоріч. наук.-практ. конф., 11-12 травня 2017 р.: зб. тез допов., Маріуполь. ДВНЗ «ПДТУ», 2017. - С. 37-38.
2. Курликов Д. А., Кубич В. И. Уравнение регрессии критерия Рейнольдса для сопряжений скольжения ДВС //Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. 8-а міжн. наук.-практ. конференція, 28-29 вересня 2017 р.: матеріали, Херсон: ХДМА. - С. 236 - 240.
3. Воронін С. В. Трибофізичні основи забезпечення мастильної здатності рідкокристалічних присадок до базових олив: дис. докора тех. наук: 05.02.04 [Електронний ресурс] / Воронін Сергій Володимирович. - Х.: 2016. - 366 с. Режим доступу: <http://www.khnu.km.ua/root/res/2-22-6-10>.
4. Мікосянчик О. О. Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи: дис. докора тех. наук: 05.02.04 [Електронний ресурс] / Мікосянчик Оксана Олександрівна. - К.: -2017. - 416 с. Режим доступу: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/27289>.
5. Кубич В. И. Довготривалість граничного мащення в модельних трибологічних системах з експериментальними антифрикційними матеріалами / В. И. Кубич, В. В. Клімін // Проблеми тертя та зношування № 66. - 2015. - С. 54-63.
6. Кубич В. И. Термодинамический аспект пленочного голодания в трибосопряжениях / В. И. Кубич, В. М. Юров // Проблеми тертя та зношування № 70. - 2016. - С. 58-66.
7. Юров В. М. Некоторые вопросы самоорганизации трибологических систем, содержащих тонкие слои смазочного материала / В. М. Юров, В. И. Кубич // Хаос и структу-

ры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Материалы 9-ой Междунар. науч. конф., 90-летию академика Е. А. Букетова. - Караганда: Изд-во КарГУ, 2015. - С. 185-188.

8. Кубич В. И. Моделирование удельного времени постоянства коэффициента трения в трибологических системах / В. И. Кубич // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Материалы 10-ой Междунар. науч. конф., 75-летию юбилею профессора З. Ж. Жанабаева., 16-18 июня 2017. - Алматы: Изд-во Ках.НУ, 2017. - С. 287-292.

9. Кубич В. И. Износостойкость деталей трибосопряжения «шейка-вкладыш» с медьсодержащими покрытиями / В. И. Кубич, Л. И. Ивченко // Проблемы трибологии. - 2011. - № 2 (60). - С. 103-110.

10. Присадка Ремол-2 [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.remol.ua/>.

11. ГОСТ 7293-85. Чугун с шаровидным графитом для отливок [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/20/20267.shtml>.

12. ГОСТ 14113-78. Сплавы алюминиевые антифрикционные. Марки [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/>.

Стаття надійшла до редакції 03.11.2017

Кубіч Вадим Іванович – к.т.н., доцент кафедри автомобілів Запорізького національного технічного університету, schmirung@gmail.com, 066-5868697.

Курликов Дмитро Андрійович – магістрант кафедри автомобілів Запорізького національного технічного університету, duma_tmm@autorambler.ru, 099-4099863.

Марущак Михайло Михайлович - магістрант кафедри автомобілів . Запорізького національного технічного університету, mishkamihail1123@gmail.com, 095-7242044

V. I. KUBICH, D. A. KURLIKOV, M. M. MARUSHCHAK

STATUS OF TRIBOLOGICAL SYSTEM «VCH50 - MOTOR OIL - AO20-1» IN THE CONDITIONS OF INSUFFICIENT LUBRICATION

The results of tribotechnical tests of the tribological system of materials "VCH50 - motor oil - AO20-1", which was investigated in tribo-conjugation "neck-insert" using full-scale specimens of the details of the crank-and-rod mechanism of the engine ZMZ-402, are given. The tests were carried out in accordance with the cycle: oil ingot, friction without oil supply, friction with oil supply, with step loading and single-speed sliding friction mode. The main emphasis is made on the determination and comparison of the rate of change in the friction coefficient in tribological materials systems. An ambiguous influence of the composition of oils on the rate of change in the coefficient of friction in the interaction of materials in the conditions of loss of the possibility of oil formations formed during running-in has been shown to have a lubricating effect. The results obtained on the one hand seem to be comparatively generalized and indicate an ambiguous character of the behavior of the triads under study, and on the other hand they are the initial data for determining the time of resistance to oil layer collapse during lubricating starvation. It was found that the greatest resistance to failure in the conditions of interaction under consideration from the assortment of motor oils studied: LUKOL-STANDARD SAE 15W / 40 SF / CC; WOLF 10W40SL / CF with a suspension of REMOL-2; MOTUL 5W20 A1 / B1; YUKO 10W40 SL / SF, provide lubricant formations formed from components of semi-synthetic oil WOLF 10W40SL / CF with the addition of a suspension of REMOL-2.

Key words: tribocoupling, loading, natural sample, coefficient of friction, temperature

References

1. Kurlykov D.N., Kubysh V.Y. Vplyv yavlyshcha turbulizatsii motornoho masla na resurs roboty DVZ //Problemy enerhoresursozberezhennia v promyslovomu rehioni. Nauka i praktyka» - shchorich. nauk.-prakt. konf., 11-12 travnia 2017 r.: zb. tez dopov., Mariupol. DVNZ «PDTU», 2017. - S.37-38
2. Kurlykov D.A., Kubysh V.Y. Uravnenye rehressyy kryteryia Reinoldsa dlia sopriazheniy skolzheniya DVS //Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia. 8-a mizhn. nauk.-prakt. konferentsiia, 28-29 veresnia 2017 r.: materialy, Kherson: KhDMA. - S.236 - 240
3. Voronin S.V. Trybofizichni osnovy zabezpechennia mastylnoi zdatnosti ridkokrystalichnykh prysadok do bazovykh olyv: dys.. dokora tekhn. nauk: 05.02.04/ Voronin Serhii Volodymyrovych. - Kh. -2016. – 366 s. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <http://www.khnu.km.ua/root/res/2-22-6-10>
4. Mikosianchyk O.O. Strukturno-enerhetychni ta reolohichni pokaznyky mastylnoho sharu v kontakti tertia v umovakh nestalykh rezhymiv roboty: dys.. dokora tekhn. nauk: 05.02.04/ Mikosianchyk Oksana Oleksandrivna. - K. -2017. - 416 s. [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/27289>.
5. Kubich V.I. Dovhotryvalist hranychnoho mashchennia v modelnykh trybolohichnykh systemakh z eksperymentalnyimi antyfyktsiynymi materialamy / V.I. Kubich V.I., V.V. Klimin // Problemy tertia ta znoshuvannia №66. - 2015.- S.54-63
6. Kubysh V.Y. Termodynamicheskyi aspekt plenochnoho holodanyia v trybosopriazheniyakh / V.Y. Kubysh, V.M. Yurov // Problemy tertia ta znoshuvannia №70. - 2016.- S.58-66.
7. Yurov V.M. Nekotorye voprosy samoorhanyzatsyy trybolohicheskyykh system, sodержashchykh tonkye sloj smazochnoho materyala/ V.M. Yurov, V.Y. Kubysh//Khaos y struktury v nelyneinykh systemakh. Teoriya y eksperyment: Materyaly 9-oi Mezhdunar. nauch. konf., 90-letyiu akademyka E.A. Buketova. - Karahanda: Yzd-vo KarHU, 2015. - S.185-188.
8. Kubysh V.Y. Modelyrovanye udelnoho vremeny postoianstva koeffitsyenta trenyia v trybolohicheskyykh systemakh /V.Y. Kubysh//Khaos y struktury v nelyneinykh systemakh.

Teoriya y eksperyment: Materialy 10-oi Mezhdunar. nauch. konf., 75-letyiu yubyleiu professora Z.Zh. Zhanabaeva., 16-18 yunia 2017. - Almaty: Yzd-vo Kakh.NU, 2017. - S.287-292

9. Kubych V.Y. Yznosostoikost detalei trybosopriazheniya «sheika-vkladыsh» s medsoderzhashchymu pokrytiyamu/ V.Y. Kubych, L.Y. Yvshchenko // Problemy trybolohyy. - 2011. - №2 (60). - S.103-110

10. Prysadka Remol-2 [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupa: <http://www.remol.ua/>.

11. HOST 7293-85. Chuhun s sharovudnym hrafytom dlia otlvok [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <http://vsegost.com/Catalog/20/20267.shtml>.

12. HOST 14113-78. Splavy aliumynuevyye antyfyryktsyonnyye. Marky [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <http://vsegost.com/Catalog/>.