

УДК 621.891

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

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 «шийка - 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 зношуваного 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 звисними сплавами БрОЦС4-4-4, БрОЦС4-4-2,5, АЛSi12Cu1(Fe), Л63, АСЧ-2 при роботі сумісно зі сталлю 45ХН2МФ за схемою тертя «прухомий 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 поширової 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 оливи, 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.

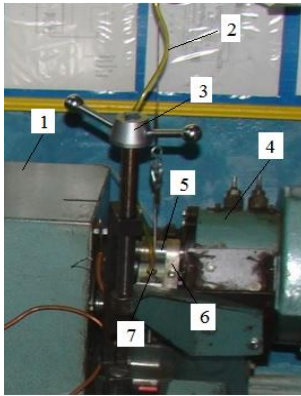
У якості мастильного матеріалу використовувалися чотири товарні моторні оливи, що входили до складу трибологічної системи матеріалів:

- «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 ВА3-21063 - АО20-1»;
- «ВЧ50 - MOTUL 5W20 A1/B1 - АО20-1»;
- «ВЧ50 - YUKO 10W40 SL/SF - АО20-1».

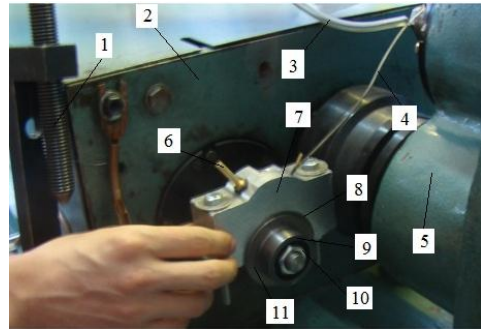
Матеріал зразка-шийки ЗМЗ-402 чавун ВЧ50 [11], зовнішній діаметр 63 мм.

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

Зразки-шийки встановлювалися на перехідний вал, закріплений на нижньому валу машини СМЦ-2 перехідною посадкою, від повороту фіксувалися шпонковим з'єднанням, від осьового 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.



а



б

Рисунок 1 - Експериментальне обладнання: а - 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 термопари; 5 - каретка; 6 - штуцер; 7 - кришка підшипника; 8 - корінний вкладиш підшипника; 9 - стопорне кільце; 10 - гайка; 11 - зразок - шийка

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 утримувач 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: $-18 \sim 712^{\circ}\text{C}$.

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 $\Delta_f^1 = 0,003$.

Триботехнічні випробування проводилися відповідно до розробленого циклу в два етапи при постійній частоті обертань зразка-шийки $n = 300 \text{ хв}^{-1}$.

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 хвилин. У кінці кожної 2-гої хвилини додавання порції свіжої оливи, протягом 10-20 секунд;
- ступінчасте збільшення навантаження до 850 Н, 1275 Н, 1700 Н, утримуючи кожне по 3 хвилини 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 хвилин прописування "нульової" лінії;
- підвищення навантаження на каретку з кроком 170 Н, утримання навантаження протягом 3 хвилин. 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.

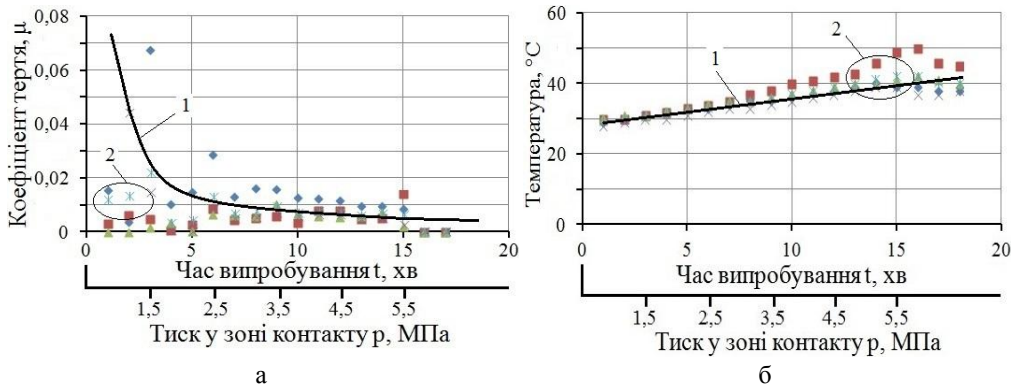
Кількість дослідів для кожної оливи складала не менше трьох. При цьому для кожного послідовного дослідів зразок-шийка шліфувалась, а вкладиші використовувались новими.

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

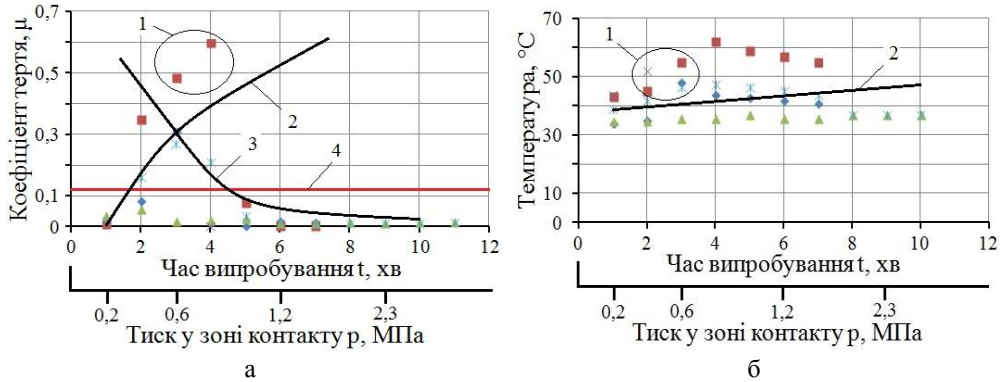
Випробування трибоз'єднання з моторною оливою LUKOIL 15W40 SF/CC показали наступне, рис. 2, 3

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 складало 3 хвилини. Тривалість роботи оливи під навантаженням складало 12 хвилин. Найбільше значення швидкості зміни коефіцієнта тертя сягнуло до $7 \cdot 10^{-2}$ од/хв⁻¹, при цьому температура знаходилась у межах 30-32°С. 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.



1 - крива зміни коефіцієнта тертя (а), температури (б); 2 - поле розсіювання даних
Рисунок 2 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) під час припрацювання моторної оливи LUKOIL 15W 40 SF/CC відносно часу і тиску

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.



1 - поле розсіювання даних; 2 - зміна коефіцієнта тертя (а), температури (б) при роботі на сформованих мастильних утвореннях; 3 - зміна коефіцієнта тертя після подачі оливи; 4 - граничне значення коефіцієнта тертя

Рисунок 3 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) без подачі та з подачею оливи LUKOIL 15W40 SF/CC

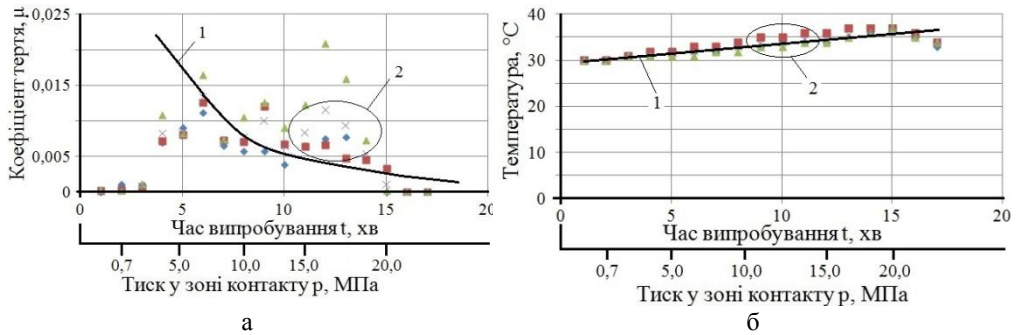
На етапі тертя без подачі оливи, рис. 2, спостерігався характерний зрив масляних шарів і різке збільшення значення коефіцієнта тертя при мінімальних навантаженнях вже на 1 хвилині випробування. Швидкість зростання коефіцієнта тертя складала від 0,14 до 0,16 од/хв⁻¹, при допустимому значенні 0,1-0,12. Температурний стан змінювався від 39 до 54°C. 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 складала 0,47 од/хв⁻¹. Загальна тривалість роботи моторної оливи без підведення додаткової порції у діапазоні навантажень від 0,6 до 2,3 МПа знаходилась у межах від 2 до 3 хвилин.

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 складала $2 \cdot 10^{-3}$ од/хв⁻¹.

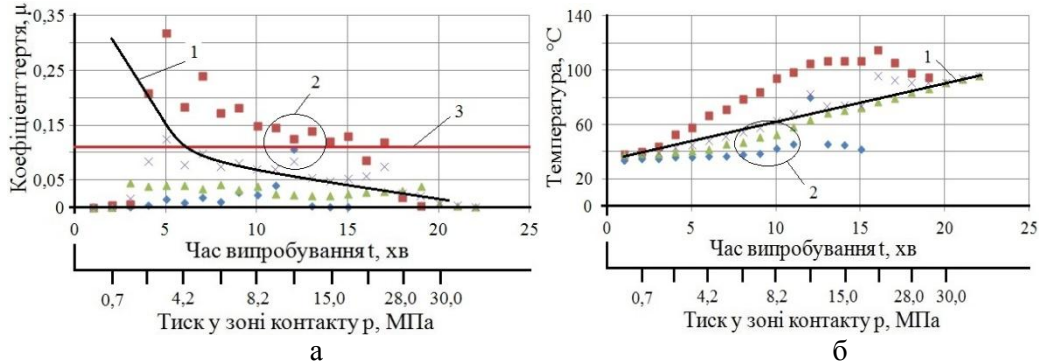
Температура при цьому змінювалась від 30 до 33°C. Подібне явище відбувалося на протязі 3 хвилин. Далі під час ступінчатого навантаження у діапазоні від 0,7 до 20 МПа спостерігалось зменшення коефіцієнта тертя до діапазону від $3 \cdot 10^{-3}$ до $9 \cdot 10^{-3}$, швидкість його зміни складала $5 \cdot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

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



1 - крива зміни коефіцієнта тертя (а), температури (б); 2 - поле розсіювання даних
Рисунок 4 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) під час припрацювання моторної оливи WOLF 10W40SL/CF + PEMOL-2 відносно часу і тиску

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.



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

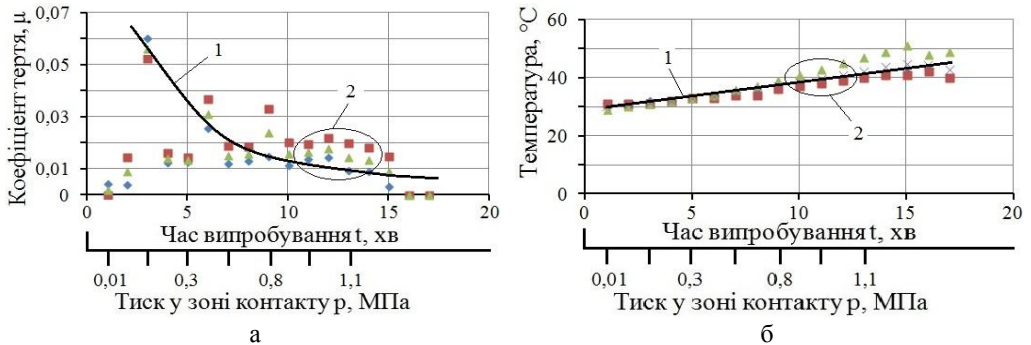
На етапі тертя без подачі оливи (рис. 5) спостерігалось характерне підвищення коефіцієнта тертя, деякі значення навіть перевищили допустиме значення 0,1-0,12 од. Діапазон зміни коефіцієнта тертя склав від 0,31 до 0,01. Швидкість зміни коефіцієнта тертя змінювалась від 0,08 до 0,1 од/хв⁻¹. Час виходу на сталий режим склав 2-2,5 хвилини. 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 $4,3 \cdot 10^{-3}$ од/хв⁻¹. Зміна температури спостерігалась від 48 до 96°C на протязі 16 хвилин. Загальний час проведення дослідження становив 16 хвилин. Однак при цьому в одному з дослідів мала місце тривалість часу випробувань до 23 хвилин. Важливим є те, що під час навантажень не відбувався характерний зрив шарів мастильних утворень, що не обумовлювалось 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 0,5-1секунди. Це було зроблено з метою визначення характеру поведінки температура при додатковому потрапінні 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

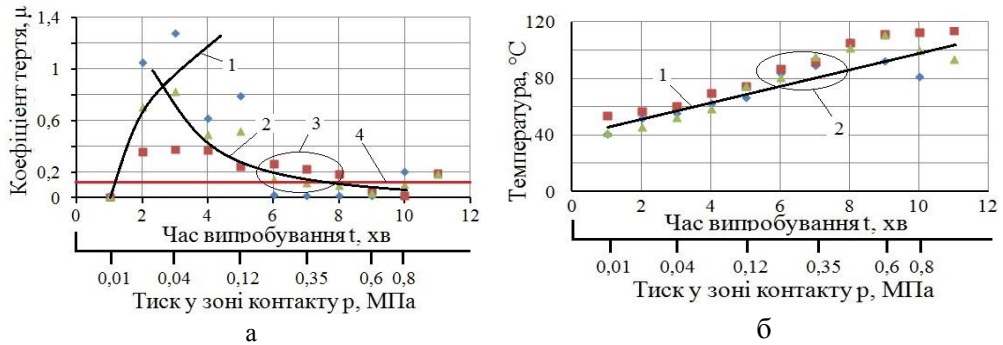


1 - крива зміни коефіцієнта тертя (а), температури (б); 2 - поле розсіювання даних
Рисунок 6 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) під час припрацювання моторної оливи WOLF 10W40SL/CF з додаванням РЕМОЛ-2 і пробігом автомобіля 500 км відносно часу і тиску

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. Температура знаходилась в діапазоні від 31 до 34°C. Далі при збільшенні навантаження від 0,01 до 1,1 МПа на протязі 12 хвилин 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 хвилині дослідження. Загальна величина часу проведених досліджень становила 17 хвилин. 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.

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 значеннях 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 од/хв⁻¹.



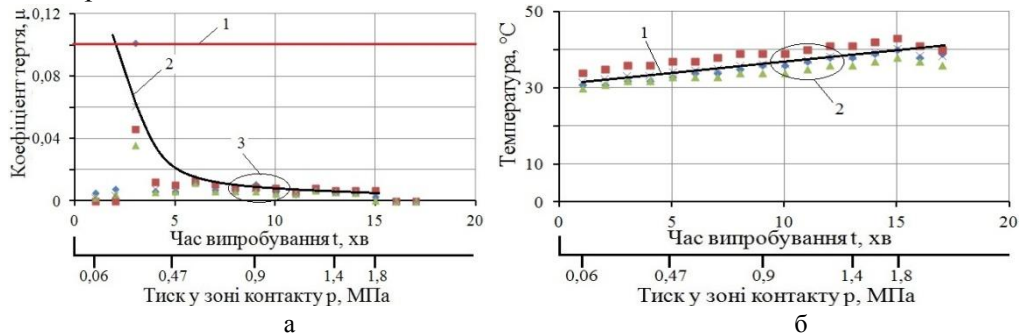
1 - зміна коефіцієнта тертя (а), температури (б) при роботі на сформованих мастильних утвореннях; 2 (а) - зміна коефіцієнта тертя після подачі оливи; 2 (б), 3 (а) - поле розсіювання даних; 4- граничне значення коефіцієнта тертя

Рисунок 7 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) без подачі та з подачею оливи WOLF 10W40SL/CF + РЕМОЛІ-2 і пробігом автомобіля 500 км

Далі, тільки на протязі 3 хвилин 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°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 хвилин. Важливим є те, що сталий режим роботи настав лише за умов подачі оливи у зону тертя і на 6-7 хвилині 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 $0,0255\text{-}0,092\text{ од/хв}^{-1}$. Сталий режим роботи даного зразка оливи настав на 4 хвилині дослідження.

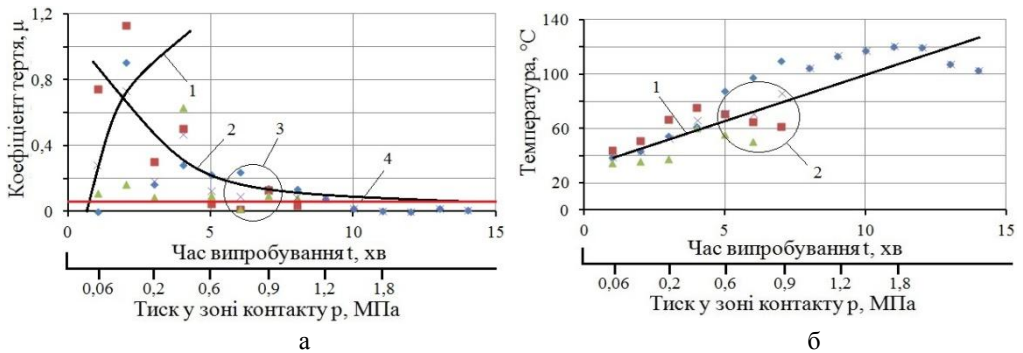


1 (а) - граничне значення коефіцієнта тертя; 1 (б) - зміна температури; 2 (а) - зміна коефіцієнта тертя; 2 (б), 3 (а) - поле розсіювання даних

Рисунок 8 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) під час припрацювання моторної оливи MOTUL 5W20 A1/B1 відносно часу і тиску

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 досліду становив 17 хвилин. 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. 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.

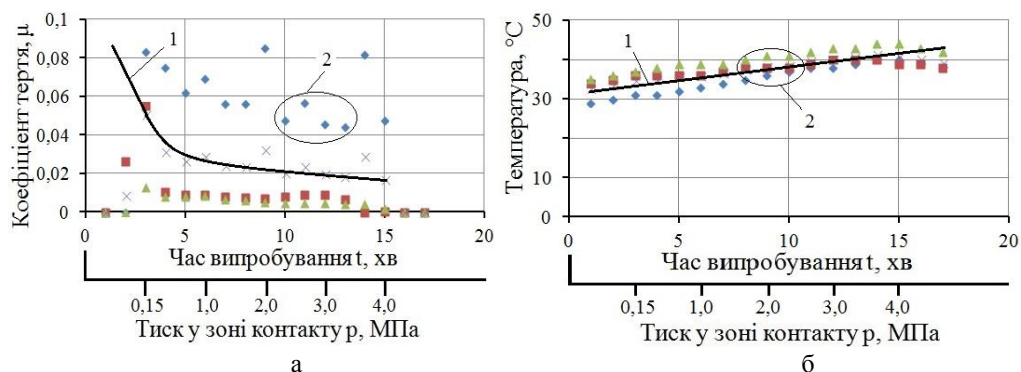


1 - зміна коефіцієнта тертя (а) при роботі на сформованих мастильних утвореннях, температури (б); 2 (а) - зміна коефіцієнта тертя після подачі оливи; 1 (б), 3 (а) - поле розсіювання даних; 4 - граничне значення коефіцієнта тертя

Рисунок 9 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) без подачі та з подачею оливи MOTUL 5W20 A1/B1

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 коефіцієнт 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 хвилині. Загальний час проведення дослідження склав 8-14 хвилин. Температура з урахуванням подачі оливи у зону тертя становила 40-120°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.

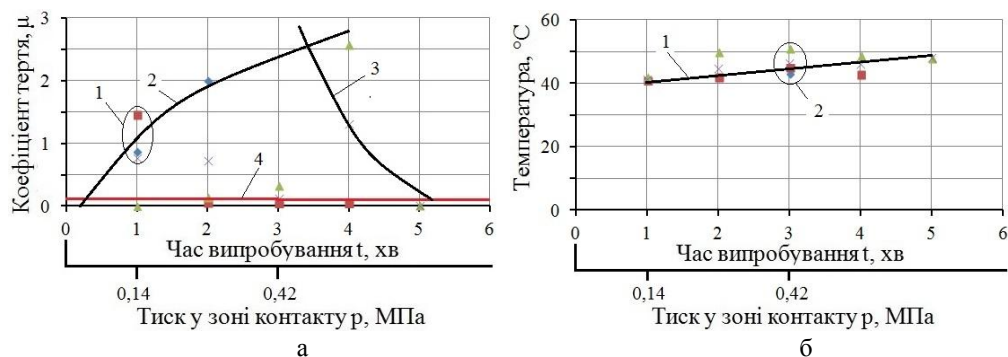
Випробування трибоз'єднання з моторною оливою YUKO 10W40 SL/SF показали наступне, рис. 10, 11



1 - крива зміни коефіцієнта тертя (а), температури (б); 2 - поле розсіювання даних

Рисунок 10 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) під час припрацювання моторної оливи YUKO 10W40 SL/SF відносно часу і тиску

На етапі припрацювання спостерігалось наступне. Найбільше значення коефіцієнта тертя знаходилось у діапазоні 0,01-0,08. Діапазон температур складав від 28 до 35 $^{\circ}\text{C}$. Надалі мало місце зниження коефіцієнта тертя до 0,018 та виходу на сталий 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 $^{\circ}\text{C}$. Діапазон зміни ступінчастого навантаження становить 0,15-4 МПа. 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.



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

Рисунок 11 - Графічні залежності зміни коефіцієнта тертя (а) і температури (б) без подачі та з подачею оливи YUKO 10W40 SL/SF

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 хвилин, швидкість його зміни становила 0,35 од/хв $^{-1}$.

Температура знаходилась в межах 40-42 $^{\circ}\text{C}$. Для зменшення ступеня механічної напруженості контакту подавалась олива. Загальний час проведення

дослідів становить 5 хвилин. 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 дослідах, що відзначало роботу трибоз'єднання в режимі гідродинамічного мащення.

На етапі роботи без подачі олив, чотири зразки: Лукойл 15W40 SF/CC, WOLF 10W40SL/CF з додаванням РЕМОЛ-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 реміталізанту РЕМОЛ-2, показало досить цікаві результати. Цей зразок один з усіх, на якому не відбулося зриву масляного шару. Під час досліду 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. Вплив 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. Кубіч В. І. Довготривалість граничного мащення в модельних трибологічних системах з експериментальними антифрикційними матеріалами / В. І. Кубіч, 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 структуры 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. Ищенко // Проблемы трибологии. - 2011. - № 2 (60). - С. 103-110.
10. Присадка Ремол-2 [Електронний ресурс] - Режим доступа: <http://www.remol.ua/>.
11. ГОСТ 7293-85. Чугун с шаровидным графитом для отливок [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://vseghost.com/Catalog/20/20267.shtml>.
12. ГОСТ 14113-78. Сплавы алюминиевые антифрикционные. Марки [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://vseghost.com/Catalog/>.

Стаття надійшла до редакції 10.11.2017

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