

УДК 531.43:621.891

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.179900

Дослідження трибологічних властивостей спряжень матеріалів С61900 – А48-25ВС1.25В№.25 в композиційних оливах з геомодифікаторами

В. В. Аулін, А. В. Гриньків, С. В. Лисенко, О. Л. Ляшук, Т. М. Замота,
Д. В. Голуб

З розвитком дисперсних систем в трибології створилась можливість ефективно використовувати функціональні добавки до мастильних матеріалів у вигляді геомодифікаторів. При впровадженні композиційних олив з геомодифікаторами не потрібно виконувати конструктивні зміни спряжень деталей машин, але їх зносостійкість і припрацьовуваність збільшується. Це потребує проведення експериментальних трибологічних досліджень.

Запропоновано використання геомодифікатора KGMF-1+олеїнової кислоти в якості функціональної добавки до моторної оливи, а для порівняння обрано свіжу оливу Monpol TS-5 UHPD 10W40 та композиційну оливу Monpol TS-5 UHPD 10W40+XADO HighWay for Diesel Truck (2,0...2,3 %). Зменшення моменту сили тертя різних спряжень зразків в досліджуваних оливах фіксували на машині тертя моделі 2070 СМТ-1 з додатковим модулем "кільце-кільце". Визначення інтенсивності зношування зразків в досліджуваних оливах проводили методом вимірювання амплітуди акустичного сигналу безпосередньо із зони тертя за допомогою приладу фірми Brüel & Kjaer.

Виявлено, що зростання ефективності мастильних композицій спостерігається у наступному порядку: Monpol TS-5 UHPD 10W4, Monpol TS-5 UHPD 10W40, Monpol TS-5 UHPD 10W40+XADO HighWay for Diesel Truck, Monpol TS-5 UHPD 10W4+KGMF-1+олеїнова кислота. Показник зносу металевих зразків, в середовищі модифікованої оливи Monpol TS-5 UHPD 10W4+KGMF-1+олеїнова кислота, у порівнянні з базовою оливою зменшився на 11,5...14,3 %. Значення критичного навантаження збільшилось на 17,2 %, а навантаження зварювання збільшилось на 19,3 %. відповідно. В свою чергу, зафіксовано, що максимальна інтенсивність зношування зразків при використанні модифікованої оливи Monpol TS-5 UHPD 10W4+KGMF-1+олеїнова кислота зменшилась в 3,4...6,0 рази..

Отримані дані необхідні для формування композиційних олив та обґрунтування умов їх подальшої експлуатації в період форсованого припрацювання трибоспряжень деталей

Ключові слова: трибоспряження зразків, геомодифікатор, композиційна олива, момент тертя, зносостійкість, акустична емісія, зона тертя, присадка, бронза, сірий чавун

1. Вступ

Одним із шляхів підвищення зносостійкості та припрацьовуваності трибоспряжень деталей машин є використання композиційних мастильних матеріалів та геомодифікаторами. Покращення мастильних властивостей олив здійснюють-

ся, в основному, шляхом введення в них промислово розроблених комплексів добавок. На сьогодні активно використовується добавки на основі природних мінералів після попередньої їх обробки. Це так звані геомодифікатори. Вивчення ефекту застосування геомодифікаторів свідчить, що поверхнево-активні речовини металокерамічного відновника, потрапляючи на поверхні тертя разом з оливою, ініціюють процес формування на поверхнях спряжень зразків та деталей металокерамічного покриття з високою зносостійкістю і низьким коефіцієнтом тертя. У присутності в мастильному середовищі добавок відбувається текстурування поверхонь тертя та зміцнення основного матеріалу зразків і деталей на значну глибину. В ході роботи трибоспряжень деталей поступово може формуватись раціональний мікрорельєф на поверхнях тертя, що відповідає тиме реальним умовами експлуатації.

Відмінність геомодифікаторів тертя від інших добавок полягає в тому, що в спряження зразків і деталей вносяться речовини, які ініціюють процеси самоорганізації. В той час, як в основному додаванням добавок і присадок в оливу намагаються розділити спряжені поверхні дрібнодисперсними частинками, довгими вуглеводневими ланцюжками та синтезованою плівкою. Зазначене сприяє утворенню оптимальної структури поверхні, особливо в областях контактів з максимальною кількістю вільних зв'язків, що забезпечує підвищену оливоутримуючу здатність та рівноважну шорсткість. Разом з тим, розроблення питання використання геомодифікаторів для мастильних композицій дає змогу збільшувати зносостійкість та припрацьовуваність трибоспряжень деталей. При подальшій технологічній адаптації в серійному використанні композиційних олив можна отримувати різноманітні позитивні ефекти в експлуатації машин. Актуальність роботи полягає в розробці мастильних композицій з геомодифікаторами, що дають змогу збільшити зносостійкість важконавантажених трибоспряжень деталей машин.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Підвищені вимоги до ефективності машин, з високим рівнем надійності та обмеженими фінансовими витратами на їх експлуатацію, вимагають від трибологічних досліджень пошуку нових більш ефективних способів збільшення зносостійкості різних типів спряжень деталей. Дослідження технічного стану олив, які працюють в силових агрегатах транспортних машин, показали, що має місце не повна відповідність до заявлених виробником норм пробігу [1]. Процеси швидкого старіння робочої оливи ідентифікуються значною контактною температурою, що призводять її окислення [2]. В подальшому потрібно розробляти мастильні середовища для покращення триботехнічних властивостей трибоспряжень деталей. Діагностика мастильного середовища також вкрай необхідна як безперервна, так і періодична [3], особливо це стосується авіаційної техніки. При цьому забезпечується необхідний рівень надійності. Розроблені різні тести дослідження і уточнення характеристик трибоспряжень під час рідинного тертя та в'язкісного опору [4]. Дані тести потрібні для теоретичного опису процесу тертя в зоні контакту в присутності оливного середовища й опису процесів взаємодії оливи з робочою поверхнею деталей. Класифікація при-

садок до оливо та розробка методичного комплексу вибору необхідних добавок до них висвітлені в роботі [5]. Разом з тим, необхідно дослідити окремі комплекси присадок за збільшенням зносостійкості трибоспряжень деталей. Для зменшення внутрішнього тертя і керування закономірностями зовнішнього тертя матеріалів зразків і деталей трибоспряжень можливо використовувати м'які метали [6] та їх похідні покриття [7] з проведеною подальшою високо ефективною термічною обробкою [8]. В той час ці покриття не створюють можливості динамічного регулювання зносостійкості і можуть підтримуватися тільки за певних експлуатаційних умов. Різноманітні добавки та присадки синтетичного і природного походження змінюють фізичну термоокислювальну здатність оливи за рахунок формування поверхневих шарів матеріалів. Зазначене дає змогу зменшити коефіцієнт тертя та забезпечити додаткову дисипацію енергії тертя [9]. Збільшується також мастильна здатність оливи, але зносостійкість при цьому може змінитись не значно, а тому потрібно шукати нові композиції з більшим потенціалом позитивних властивостей для трибоспряжень деталей. Забезпечення необхідного рівня значень трибологічних характеристик та формування відновлювальних добавок до оливо, що містить елементи геологічного походження, відбувається за участі порошку з включеннями серпентину [10]. Разом з тим, отримані результати не відображали порівняльної картини зношування з існуючими синтетичними аналогами добавок. В свою чергу, автори роботи [11] навели певні теоретичні обґрунтування застосування мастильних композицій з деякими геомодифікаторами тертя цього типу. На даний момент не висвітлено питання руйнування цих добавок в робочому середовищі оливи. Це пов'язано з недостатньою кількістю досліджень колоїдних продуктів тертя мастильних середовищ, оскільки процес тертя має значну кількість процесів теплової, електромагнітної та контактної-силової природи, що впливають на руйнування колоїдних частинок присадок. Тому можливо провести паралель з розглянутою моделлю руйнування поверхневих шарів [12]. Потрібно також уточнити в'язкісні та мастильні характеристики оливи. Розробка та дослідження геомодифікаторів потрібні, виходячи з моделі оцінки прилипання поверхневих шарів до робочої поверхні матеріалів [13]. При цьому важливо уточнити природу та вплив трибоелектризації на частинки добавок та мастильне середовище.

Геомодифікатори сприяють механохімічним реакціям, піролізу компонентів оливи та трибокатолицичної карбонізації, графітизації і утворенню твердих вуглеводородних сполук з оливи [14]. Виявлено умови формування покриттів, низькі коефіцієнти тертя і теплопровідності, високу міцність і корозійну стійкість геомодифікаторів. Це впливає з результатів досліджень властивостей геомодифікаторів $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ [15]. Визначено, що в основі фрикційних геомодифікаторів лежить велика група мінералів [16], які мають аналогічний хімічний склад, де магній може бути замінено залізом та нікелем [17]. Серпентинова порода включає в себе декілька видів серпентину, магнетитових та хромових включень і варіацію хімічних елементів, що використано в якості суміші геомодифікаційної композиції [18]. Розробка алгоритмів оцінки мастильного середовища можлива за допомогою-додаткового розрахунку з використанням аналітичних моделей та регресійного аналізу [19]. Зазначене потребує проведення

додаткових трибологічних експериментів формування необхідної бази даних. Вплив температурного поля локальних областей робочих поверхонь трибоспряжень зразків і деталей дає змогу збільшити трибоелектризацію в їх матеріалах [20], що обумовлює збільшення швидкості активації серпентинових добавок в мастильному середовищі. Формування покриттів гальванічними методами підвищує їх трибологічні властивості, але вони є вартісним, екологічно шкідливими і ефективними [21] при однорідних умовах експлуатації. Дані покриття не забезпечують значного економічного ефекту і не мають можливість самоорганізовуватись під час експлуатації. Дослідження різноманітних геомодифікаційних композицій висвітлено в роботі [22], але не описано характер руйнування робочих поверхонь під час критичного навантаження. Зазначено основні рекомендації ефективного використання композиційних олив при розробці триботехнологій відновлення підшипникових вузлів під час експлуатації машин [23]. Бажано було висвітити питання зношування підшипникового вузла в присутності геомодифікатора. Розробка апарату аналізу кожної складової одиниці досліджуваного зразка або деталей можлива з використанням коефіцієнтів оптимальності та круглограм функціональності досліджуваних систем [24]. Разом з тим, при аналізі триботехнічних властивостей потрібно сформувавши базу даних зі зміни інтенсивності зношування та моменту тертя. Якщо розглянути оптимальні технічні системи, то трибоспряження в них відіграють значну роль, забезпечуючи надійність та стійкість до випадкових впливів [25]. Це потрібно додатково розглянути при функціонуванні трибоспряжень деталей з композиційною оливою та виявити відповідні закономірності зміни мастильної здатності.

Важливим місцем використання в машинобудуванні композиційних олив є високошвидкісні ротори [26], а також при розрахунках емпіричних критеріїв виникнення автобалансування, яка показує, що сила тертя відіграє роль дестабілізуючого фактору [27]. В таких типах спряжень деталей важливо впроваджувати високо ефективні добавки та присадки, а також обґрунтувати їх робочі межі та умови експлуатації.

Хімічна складова утворення металокерамічного шару з геомодифікаторів в певній мірі розроблена в роботі [28], але не наведено інформацію про фізико-механічні й реологічні властивості цих шарів. Такі розробки практично відсутні. В опублікованих роботах припускають можливість виникнення еластогідродинамічного ефекту [29], який характеризується високим тиском в оливному клині, викликаючи пружну деформацію матеріалів зразків і деталей, що контактують. Внаслідок цього величина зазору між деталями зростає. Це має місце при роботі шару, що формується при наявності геомодифікаторів в оливі, який додатково захищає робочу поверхню від корозії [30]. Глибоких досліджень поверхневих і приповерхневих шарів, сформованих на зразках і деталях при обробці геомодифікаторами, у відкритій літературі не виявлено. Дотепер відсутні дослідження динаміки процесу збільшення зносостійкості мастильних композицій з геомодифікаторами тертя. Зносостійкі покриття безумовно мають дисипативні та метастабільні структури [31], які постійно потрібно контролювати та виявляти. Але формування мікророзмірних плівок в зоні тертя з допомогою геомодифікаторів не описано з трибологічної точки зору. Безконтактне вияв-

лення процесу тертя в підшипникових вузлах найбільш раціональне за допомогою акустичної емісії [32]. Даний спосіб не розглянуто у випадку присутності мастильного середовища, що має власну розсіювальну здатність [33], та для різних типів трибоспряжень. Опис трибоконтракту розкрив значні можливості формування нових дисипативних структур [34], але створюється можливість розширити дану область з використанням композиційних оливо, модифікованих геомодифікаторами тертя.

Низький рівень досліджень та систематизації геомодифікаторів тертя пов'язаний з технологічними складнощами їх очищення та попередню підготовку, а також наявності складного хімічного складу та його вплив на процес тертя. Мастильні композиції оливо на основі геомодифікаторів не систематизовані й потребують додаткових досліджень їх ефективності використання для трибоспряжень зразків та деталей з точки зору підвищення трибологічних властивостей.

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є дослідження процесу тертя, в присутності мастильних композицій з геомодифікаторами тертя. Це дасть можливість збільшити зносостійкість та припрацьовуваності спряжень зразків в середовищі оливи з додаванням катеринівського геомодифікатора тертя – 1 (KGMF-1). Порівняння триботехнічних характеристик цієї композиції з базовою та композиційною оливою з додаванням промислового зразку присадки XADO HighWay for Diesel Truck дасть можливість більш точно оцінити трибологічну ефективність геомодифікатора тертя.

Для досягнення мети розв'язуються наступні завдання:

- дослідити на чотирикульковій машині тертя FBM показник зносу, критичне навантаження і навантаження зварювання для базової оливи Monnol TS-5 UHPD 10W40 і мастильних композицій Monnol TS-5 UHPD 10W40+XADO HighWay for Diesel Truck та Monnol TS-5 UHPD 10W40+KGMF-1;
- за отриманими результатами провести аналіз мастильної здатності композиційної оливи з додаванням геомодифікатора KGMF-1 в порівнянні з композиційною оливою Monnol TS-5 UHPD 10W40+XADO HighWay for Diesel Truck;
- виявити закономірності зміни моменту тертя та інтенсивності зношування різних типів спряжень зразків з використанням мастильної композиції Monnol TS-5 UHPD 10W40+KGMF-1 з напрацюванням на машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою "кільце-кільце".

4. Матеріали та методи дослідження триботехнічних характеристик різних типів спряжень зразків в середовищі композиційної оливи

В якості матеріалу зразків використовували чавун А48-25ВС1.25В№.25 (HRC 40) та бронзу С61900 (НВ 95). При виборі матеріалів зразків керувалися їх максимальним використанням та спорідненість у спряженнях деталей двигунів внутрішнього згорання та гідроагрегатів вантажних автомобілів сімейства КамАЗ, що широко представлені в центральному регіоні України.

Як мастильне середовище використовували базову моторну оливу Monnol TS-5 UHPD 10W40 – № 1, яку обрано компанією АТП 2004, м. Кропивницький

(Україна), при експлуатації вантажних автомобілів сімейства КамАЗ, Renault та композиційні оливи: Monnol TS-5 UHPD 10W40+KGMF-1 (5,1...5,5 %) + олеїнова кислота (1,4...2,5 %) – № 2, попередні результати вмісту KGMF-1 відображені в роботі [11]. Найбільш відомі присадки на ринку України представлені препаратами торгової марки ХАДО, що непогано себе зарекомендували для силових агрегатів транспортних машин. Для порівняльних досліджень було використано оливу композицію Monnol TS-5 UHPD 10W40+XADO HighWay for Diesel Truck (виробництво Україна) – № 3. Концентрація цієї присадки (2,1...3,2 %) формувалась відповідно до вимог виробника. Зазначимо, що суміш геомодифікатора KGMF-1 (хімічний склад: 11Na – 0.525 ± 0.178 ; 12Mg – 0.950 ± 0.118 ; 13Al – 32.680 ± 0.137 ; 14Si – 55.287 ± 0.168 ; 16S – 0.942 ± 0.035 ; 20Ca – 0.899 ± 0.053 ; 22Ti – 4.842 ± 0.046 ; 23V – 0.042 ± 0.02 ; 24Cr – 0.052 ± 0.006 ; 26Fe – 3.178 ± 0.018 ; 28Ni – 0.117 ± 0.002 ; 29Cu – 0.015 ± 0.001 ; 30Zn – 0.049 ± 0.001 ; 31Ga – 0.042 ± 0.001 ; 37Rb – 0.004 ± 0.001 ; 38Sr – 0.037 ± 0.001 ; 39Y – 0.010 ± 0.001 ; 40Zr – 0.241 ± 0.002 ; 41Nb – 0.026 ± 0.001 ; 49In – 0.018 ± 0.003 ; 82Pb – 0.043 ± 0.002) отримано авторами з природних речовин на основі глини.

Через точковий контакт кульок чотирикулькова машина тертя (FBM) слугує надійним інструментом для визначення мастильної здатності оливок та їх композицій, ефективності присадок та добавок в них. Дослідження ефективності використання в базовій оливі № 1 відновлювальної суміші KGMF-1 здійснювали на кулькових зразках точковими або лінійними контактами. В якості порівняльних досліджень проведені випробування на базовій оливі № 1 і оливній композиції № 3. FBM, в якій випробовували оливне середовище трибоспряження з кульок зібране в піраміду з чотирьох кульок, із яких три нижніх кульки закріплені нерухомо в чашці, в яку заливається випробувальна олива, а верхня кулька обертається у вертикальному шпинделі. В процесі дослідження визначали усередненні значення критичного навантаження, навантаження зварювання, показника зносу, що характеризується діаметром плями зносу від прикладеного критичного навантаження для відповідних мастильних середовищ. Випробування та визначення характеристик мастильних середовищ на FBM проводили відповідно до однотипних стандартів ГОСТ 9490-75, в Німеччині – DIN 51350, в США - ASTM D2783.

Для дослідження закономірностей зміни моменту тертя та інтенсивності зношування спряжень зразків при мащенні композиційною оливою, за якими можливо виявити підвищення їх припрацьовуваності та зносостійкості. Для підтвердження ефективності використання композиційних оливок з додаванням геомодифікатора, наприкладі, KGMF-1+олеїнова кислота, було використано машину тертя 2070 СМТ-1 з модулем випробування зразків за схемою "кільце-кільце" рис. 1, б. Базову і композиційні оливи в зону тертя подавали шестереним насосом через форсунку. Для виключення впливу частинок зносу на параметри тертя і зношування в систему мащення встановлено фільтр з тонкою очисткою до частинок розміру 100 мкм.



Рис. 1. Загальний вид машин тертя: *a* – чотирикулькової машини тертя ; *б* – машини тертя 2070 СМТ-1 з додатковим модулем "кільце-кільце"

Реалізацію цієї схеми здійснювали на додатковому модулі випробовування зразків. Загальний вигляд зразків представлено на рис. 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд експериментальних зразків для випробувань за схемою "кільце-кільце" на машині тертя 2070 СМТ-1: *a* – С61900 (НВ95); *б* – А48-25ВС1.25В№.25 (HRC40)

Перед дослідженням зразки притирали один до одного до повного дотикування площ контакту. При цьому забезпечували шорсткість поверхні $Ra = 0,2$ мкм, що відповідає припрацьованим ресурсовизначальним спряженням силових агрегатів транспортних та гідравлічних машин. Вимірювання шорсткості виконували за ГОСТ 27964-88, з використанням профілометра модель 283. Дослідження зразків проводили з коефіцієнтом взаємного перекриття $K_{mo}=0,5$, що обумовлене охопленням більшої кількості типів спряжень зразків. Розміри зразків та методика випробувань відповідали ГОСТ 23.210.

Дослідження триботехнічних характеристик спряжень різних типів в масильному середовищі виконували при навантаженні 200 Н і швидкості ковзання 0,7 м/с., що практично відповідає площі контакту зразків за ГОСТ Р 51860-2002 машини тертя 2070 СМТ-1. Зразки за схемою "кільце-кільце" мали зовнішній діаметр 12 мм, а внутрішній 6 мм.

Для більш точного відображення процесу зміни зносостійкості спряжень зразків, що функціонують в базовій та модифікованій оливі, запропоновано їх поділ за ознаками зразків. Для машини тертя 2070 СМТ-1 спряження зразків

розділено на чотири типи за характерними ознаками: рухомість, твердість матеріалу і площа зони тертя табл. 1.

Таблиця 1

Типи трибоспряжень зразків та характерні ознаки їх властивостей

Характерні ознаки властивостей трибоспряжень зразків				
Тип спряжен-ня	Рухомий зразок		Нерухомий зразок	
	Твердість ма-теріалу, H_m	Площа зони тертя, S_m	Твердість ма-теріалу, H_f	Площа зони тертя, S_f
I	$H_m > H_f$	$S_m > S_f$	$H_f < H_m$	$S_f < S_m$
II	$H_m < H_f$	$S_m > S_f$	$H_f > H_m$	$S_f < S_m$
III	$H_m > H_f$	$S_m < S_f$	$H_f < H_m$	$S_f > S_m$
IV	$H_m < H_f$	$S_m < S_f$	$H_f > H_m$	$S_f > S_m$

Широко розповсюдженою конструкцією є перший тип трибоспряження зразків, у яких матеріал рухомого зразка (деталі) має більшу твердість (H_m) і більшу площу зони тертя (S_m), а нерухомого – відповідно меншу твердість (H_f) і меншу площу зони тертя (S_f). Для трибоспряжень другого типу характерним є $H_m < H_f$, $S_m > S_f$, третього типу – $H_m > H_f$, $S_m < S_f$ та четвертого типу – $H_m < H_f$, $S_m < S_f$.

Першим типом спряження є спряження з твердого валу і м'якого вкладишу, що широко використовується в системах і агрегатах мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки і добре себе зарекомендувала в експлуатації. Трибоспряження твердих циліндричних зразків і м'якого рухомого диску належать до другого типу трибоспряжень. Гідроциліндр і спряжений з ним поршень з твердого матеріалу, причому циліндр виготовлено з більш м'якого матеріалу – утворюють третій тип трибоспряжень. Трибоспряження "гільза циліндра-поршень" являє собою четвертий тип.

В процесі досліджень визначали зміну моменту тертя за силою тертя і розмірами зразка, а інтенсивність зношування – за амплітудою акустичного сигналу з зони тертя.

Процеси зношування трибоспряжень зразків досліджували методом акустичної емісії. В роботі використано акустико-емісійний комплекс (рис. 3), що складався із серійного приладу фірми Brüel & Kjaer (type 2511) (Німеччина).



Рис. 3. Комплекс для дослідження інтенсивності зношування за вимірюванням амплітуди акустичного сигналу

В якості датчика використовували п'єзоелемент цієї фірми. Датчик закріплювали на нерухомому зразку. Даний комплекс дозволяє знімати зміну акустичного сигналу від трибоспряжень зразків при випробуваннях. Важливим при проведенні трибологічних досліджень є вибір параметрів акустичної емісії, що адекватно відображає процеси зношування у зонах тертя з урахуванням специфіки формування сигналу. В якості інформаційної характеристики акустичної емісії дослідження динаміки утворення й руйнування поверхневого зносостійкого шару було обрано амплітуду сигналу з області зони тертя, яка корелює з величиною інтенсивності зношування. Для визначення значення інтенсивності зношування спряжених зразків використовували амплітуду акустичної емісії сигналу, відповідний розрахунок проводили за формулою:

$$I_u = k \cdot A \cdot 10^{-9}, \quad (1)$$

де $k=0,4 \text{ мВ}^{-1}$ – перехідний коефіцієнт, що визначається за тарувальним графіком для приладу фірми Brüel & Kjær (type 2511); A – амплітуда акустичного сигналу, мВ.

Нормування приладу Brüel & Kjær (type 2511) здійснювали шляхом вибору частоти акустичного сигналу, що найбільше адекватно відображає процеси зношування досліджуваних трибоспряжень зразків. Дане нормування полягало в акустичній оцінці рухомих трибоспряжень та елементів гідросистеми машини тертя 2070 СМТ-1 без встановлених зразків в контакт, а отримані результати амплітуди акустичних сигналів відкидалися як шуми. Значення їх амплітуд встановлювали як порогову величину, а тому при оцінці інтенсивності зношування за допомогою комплексу Brüel & Kjær (type 2511) вони не враховувались. Раціональна частота оцінки інтенсивності зношування зразків, за рахунок утворення і руйнування поверхневих шарів в середовищі базової та модифікованої оливи при встановлених в контакт досліджуваних зразків, становила 4 кГц. Таке значення частоти відповідає максимальній амплітуді акустичного сигналу в діапазоні частот 3...6 кГц акустичного спектру без врахування шумів. На даній частоті акустичних сигналів отримували найбільш точні і адекватні результати визначення інтенсивності зношування досліджуваних зразків за акустичною емісією у порівнянні з ваговим методом.

Експериментальні дослідження різних типів спряжень зразків проводили з отримання значень інтенсивності зношування I_u і моменту тертя M_{fr} в оливах: базовій Monnol TS-5 UHPD 10W40 та композиційній Monnol TS-5 UHPD 10W40+KGMF-1+олеїнова кислота. Загальна тривалість експерименту при кожному повторенні складала 100...110 хв. У кожному випадку записували діаграму зміни амплітуди акустичної емісії та моменту тертя на самописці.

Достовірність показань приладів і експериментальних даних по визначенню показника зносу, критичного навантаження, навантаження зварювання, моменту тертя та інтенсивності зношування проводили за трьома відповідними дослідями. При цьому визначали абсолютну і відносну похибки. Для обробки

результатів дослідження використовували програму «Excel 2007», в якій проводили обчислення середнього квадратичного відхилення, коефіцієнта кореляції, коефіцієнта регресії та середньої похибки апроксимації.

Дослідження базової і композиційних олив за наведеними методиками має важливе значення для технічного сервісу підприємств, що експлуатують транспортну техніку. Тому їх підбір та формування виконували таким чином, щоб забезпечити мінімальну тривалість часу та максимальну ефективність реалізації дослідів.

5. Результати досліджень триботехнічних характеристик та зміни зносостійкості спряжень зразків різних типів в базовій та композиційних оливах

Вплив композиційної оливи № 2 порівнювали з базовою оливою № 1 та з мастильною композицією № 3. В процесі випробувань визначали мастильну здатність досліджуваних проб олив на FBM за показниками: знос, критичне навантаження і навантаження зварювання. Результати відповідних експериментальних досліджень наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Усереднені результати випробувань на чотирикульковій машині тертя FBM в різних мастильних середовищах

Усереднені показники	Мастильні композиції		
	№ 1	№ 2	№ 3
Показник зносу, мм	0,53±0,05	0,47±0,05	0,49±0,02
Критичне навантаження, Н	1348±0,6	1626±2,5	1548±1,7
Навантаження зварювання, Н	1874±12,4	2327±19,5	2232±8,5

За результатами досліджень на чотирикульковій машині тертя FBM побудовані гістограми зміни середнього діаметру плям зносу нижніх шариків від прикладеного навантаження (рис. 4). Час одиничного дослідження, згідно ГОСТ 9490-75, дорівнював 10 с.

Регресійний аналіз виконано за допомогою засобів "Аналіз даних" та інструменту "Регресія" в прикладній програмі Excel 2010. Результати експерименту наведені усередненні за трьома повтореннями. Використання сформованої бази даних дає можливість отримати рівняння зміни середнього діаметру плям зносу на FBM (табл. 3).

Оскільки відповідні коефіцієнти детермінації регресійних рівнянь табл. 3–5 не менше значення 0,95. Відповідні розрахункові значення критерію Фішера більше за табличні значення критерію Фішера, то можна стверджувати про адекватність отриманих рівнянь.

Результати дослідження закономірностей зміни моменту тертя на машині тертя 2070СМТ-1 (табл. 3) та інтенсивності зношування (табл. 4) представлені для різних типів трибоспрямижень зразків на базовій оливі № 1 і оливних композиціях № 2 та № 3. В якості матеріалу спряження зразків використовували С61900 (НВ95) та А48-25ВС1.25В№.25 (HRC40).

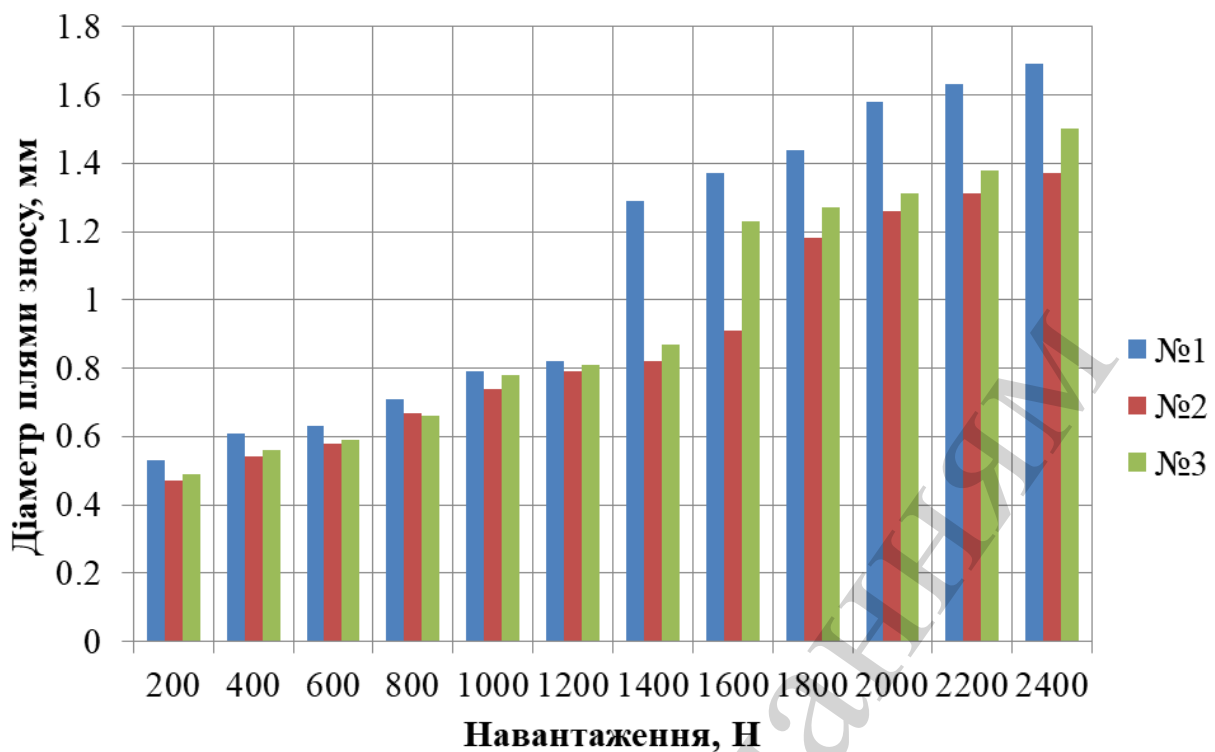


Рис. 4. Гістограми зміни середнього діаметру плям зносу нижніх кульок від прикладеного навантаження для різних випробуваних мастильних середовищ

Таблиця 3

Регресійний аналіз залежності діаметру зносу кульки підчас тертя від навантаження на машині тертя FBM в присутності мастильної композиції № 1

Вихідні змінні функції експерименту, мм											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.51	0.60	0.62	0.71	0.78	0.81	1.29	1.36	1.42	1.57	1.62	1.68
$\frac{+0.0}{17}$	± 0.01	$\frac{+0.0}{17}$	$\frac{+0.0}{13}$	$\frac{+0.0}{07}$	± 0.01	$\frac{+0.0}{03}$	± 0.01	$\frac{+0.0}{07}$	$\frac{+0.0}{13}$	$\frac{+0.0}{13}$	$\frac{+0.0}{03}$
0.013		0.013	0.017	0.003		0.007		0.013	0.007	0.017	0.007
Вхідні змінні фактору експерименту, Н											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
Рівняння регресії зміни функції від фактору експерименту, мм				Коефіцієнт детермінації		Дисперсії залишків		Розрахункове значення критерію Фішера		Табличне значення критерію Фішера	
$Y=0.3+6.0 \cdot 10^{-4} \cdot X$				0,95		0.012		173.6		2.2	

Таблиця 4

Регресійний аналіз залежності діаметру зносу кульки підчас тертя від навантаження на машині тертя FBM в присутності мастильної композиції № 2

Вихідні змінні функції експерименту, мм											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.46	0.54	0.58	0.67	0.72	0.78	0.81	0.92	1.17	1.25	1.32	1.36
± 0.0 1	± 0.0 1	$\frac{+0.0}{03}$ - 0.007	$\frac{+0.0}{13}$ - 0.017	$\frac{+0.0}{17}$ - 0.013	± 0.0 1	± 0.01	± 0.0 1	$\frac{+0.0}{07}$ - 0.003	$\frac{+0.0}{07}$ - 0.003	± 0.0 1	± 0.0 1
Вхідні змінні фактору експерименту, Н											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
Рівняння регресії зміни функції від фактору експерименту, мм				Коефіцієнт детермінації		Дисперсії залишків		Розрахункове значення критерію Фішера		Табличне значення критерію Фішера	
$Y=0.319+4.33 \cdot 10^{-4} \cdot X$				0,96		0.004		244.5		2.2	

Таблиця 5

Регресійний аналіз залежності діаметру зносу кульки підчас тертя від навантаження на машині тертя FBM в присутності мастильної композиції № 3

Вихідні змінні функції експерименту, мм											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.48	0.5 5	0.6	0.66	0.77	0.82	0.87	1.23	1.26	1.31	1.37	1.51
± 0.0 1	$\frac{+0.0}{007}$ - 0.003	$\frac{+0.0}{03}$ - 0.007	$\frac{+0.0}{13}$ - 0.007	± 0.01	± 0.0 1	± 0.0 1	$\frac{+0.0}{07}$ - 0.013	$\frac{+0.0}{07}$ - 0.013	± 0.01	$\frac{+0.0}{13}$ - 0.017	± 0.0 1
Вхідні змінні фактору експерименту, Н											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
Рівняння регресії зміни функції від фактору експерименту, мм				Коефіцієнт детермінації		Дисперсії залишків		Розрахункове значення критерію Фішера		Табличне значення критерію Фішера	
$Y=0.312+4.93 \cdot 10^{-4} \cdot X$				0,96		0.006		242.1		2.2	

Таблиця 6

Момент тертя M_{fr} ($10^{-3}\text{Н}\cdot\text{м}$) різних типів спряжень зразків на базовій оливі № 1 та оливних композиціях № 2, № 3

Тип спряження	Олива	Тривалість випробування, хв.									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I	№ 1	3.1± ±0.09	3.7± ±0.10	4.5± ±0.12	4.6± ±0.08	4.7± ±0.11	4.2± ±0.08	3.6± ±0.09	3.3± ±0.14	3.2± ±0.10	3.2± ±0.13
	№ 2	2.4± ±0.12	3.4± ±0.10	3.6± ±0.08	3.3± ±0.11	3.1± ±0.12	2.9± ±0.09	2.5± ±0.14	2.4± ±0.09	2.4± ±0.12	2.3± ±0.11
	№ 3	2.7± ±0.10	2.8± ±0.09	3.2± ±0.12	3.6± ±0.09	3.4± ±0.13	2.6± ±0.07	2.3± ±0.08	2.1± ±0.11	2.1± ±0.13	2.0± ±0.12
II	№ 1	3.5± ±0.09	3.7± ±0.12	3.8± ±0.09	4.0± ±0.12	4.3± ±0.08	4.1± ±0.11	3.8± ±0.12	3.5± ±0.10	3.3± ±0.12	2.9± ±0.14
	№ 2	2.4± ±0.11	3.1± ±0.10	3.3± ±0.12	3.6± ±0.09	3.7± ±0.11	3.4± ±0.12	3.1± ±0.10	3.0± ±0.14	2.9± ±0.08	2.9± ±0.12
	№ 3	2.5± ±0.09	3.3± ±0.12	3.5± ±0.08	3.7± ±0.11	3.8± ±0.12	3.7± ±0.09	3.5± ±0.10	3.3± ±0.08	3.2± ±0.11	3.2± ±0.08
III	№ 1	1.8± ±0.13	2.5± ±0.11	2.8± ±0.09	3.3± ±0.12	3.6± ±0.08	3.2± ±0.12	3.1± ±0.11	2.9± ±0.14	2.5± ±0.07	2.5± ±0.12
	№ 2	1.7± ±0.10	2.3± ±0.11	2.4± ±0.09	2.5± ±0.10	2.3± ±0.08	2.2± ±0.12	2.2± ±0.11	2.2± ±0.08	2.2± ±0.12	2.2± ±0.11
	№ 3	1.9± ±0.12	2.5± ±0.09	2.6± ±0.11	2.7± ±0.12	2.9± ±0.11	2.5± ±0.13	2.4± ±0.09	2.3± ±0.10	2.3± ±0.09	2.2± ±0.02
IV	№ 1	3.6± ±0.14	4.8± ±0.12	4.9± ±0.09	4.9± ±0.11	4.7± ±0.08	4.5± ±0.14	4.2± ±0.10	3.6± ±0.13	3.2± ±0.11	3.2± ±0.11
	№ 2	2.4± ±0.10	2.6± ±0.15	2.7± ±0.11	3.2± ±0.09	3.8± ±0.12	3.9± ±0.11	3.4± ±0.13	3.1± ±0.09	2.8± ±0.08	2.8± ±0.08
	№ 3	2.8± ±0.09	2.9± ±0.12	3.1± ±0.07	3.5± ±0.12	4.1± ±0.07	4.2± ±0.10	4.3± ±0.08	4.0± ±0.12	3.2± ±0.12	3.0± ±0.09

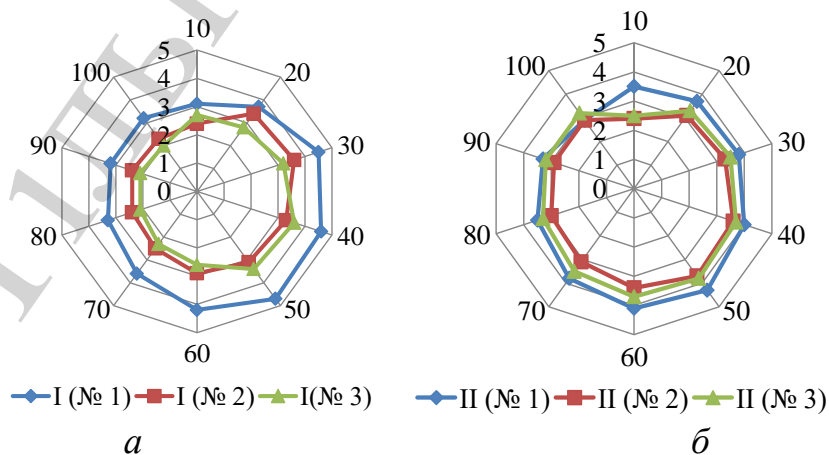
Для більш детального відображення загальної картини та наочного уявлення енергетичної (рис. 5) та матеріалоємної (рис. 6) складових процесу тертя в трибоспряженнях. Дані складові можливо аналізувати за площею відповідних круглограм. Подання в такій формі результатів розширює можливості їх системного аналізу, а саме виявлення характеру припрацювання різних типів спряження зразків, що працюють в досліджуваному середовищі.

Закономірності зміни інтенсивності зношування та моменту тертя в спряженнях деталей різних типів дають можливість виявити основні переваги і недоліки використання геомодифікаторів в порівнянні з виробничим аналогом.

Таблиця 7

Інтенсивності зношування I_u (10^{-9}) різних типів спряжень зразків на базовій оливі № 1 та оливних композиціях № 2, № 3

Тип спряження	Олива	Тривалість випробування, хв.									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
I	№ 1	0.12± ±0.01	0.36± ±0.02	0.48± ±0.04	0.49± ±0.03	0.51± ±0.01	0.47± ±0.02	0.45± ±0.03	0.43± ±0.02	0.42± ±0.03	0.42± ±0.01
	№ 2	0.15± ±0.01	0.18± ±0.02	0.24± ±0.04	0.19± ±0.03	0.17± ±0.01	0.14± ±0.02	0.13± ±0.03	0.12± ±0.02	0.11± ±0.01	0.11± ±0.02
	№ 3	0.13± ±0.02	0.24± ±0.01	0.25± ±0.03	0.26± ±0.02	0.23± ±0.04	0.21± ±0.01	0.15± ±0.02	0.14± ±0.03	0.14± ±0.03	0.14± ±0.01
II	№ 1	0.24± ±0.02	0.36± ±0.01	0.48± ±0.03	0.60± ±0.03	0.68± ±0.04	0.7± ±0.05	0.73± ±0.04	0.69± ±0.06	0.68± ±0.04	0.68± ±0.03
	№ 2	0.13± ±0.01	0.24± ±0.03	0.27± ±0.02	0.36± ±0.04	0.39± ±0.03	0.48± ±0.01	0.49± ±0.02	0.51± ±0.02	0.51± ±0.03	0.51± ±0.02
	№ 3	0.15± ±0.02	0.27± ±0.01	0.28± ±0.03	0.34± ±0.05	0.42± ±0.02	0.53± ±0.01	0.56± ±0.02	0.55± ±0.01	0.54± ±0.03	0.53± ±0.02
III	№ 1	0.36± ±0.01	0.49± ±0.02	0.72± ±0.03	0.68± ±0.04	0.65± ±0.01	0.64± ±0.03	0.63± ±0.05	0.62± ±0.02	0.62± ±0.03	0.62± ±0.04
	№ 2	0.21± ±0.01	0.25± ±0.02	0.36± ±0.03	0.14± ±0.02	0.12± ±0.04	0.11± ±0.05	0.11± ±0.03	0.11± ±0.02	0.11± ±0.03	0.11± ±0.04
	№ 3	0.25± ±0.04	0.27± ±0.03	0.38± ±0.02	0.28± ±0.01	0.26± ±0.02	0.24± ±0.01	0.22± ±0.04	0.21± ±0.01	0.18± ±0.03	0.16± ±0.02
IV	№ 1	0.18± ±0.02	0.45± ±0.03	0.61± ±0.05	0.72± ±0.02	0.76± ±0.03	0.84± ±0.04	0.83± ±0.03	0.81± ±0.04	0.78± ±0.01	0.75± ±0.03
	№ 2	0.20± ±0.03	0.48± ±0.04	0.60± ±0.01	0.64± ±0.03	0.72± ±0.02	0.64± ±0.04	0.62± ±0.03	0.60± ±0.01	0.58± ±0.03	0.51± ±0.04
	№ 3	0.27± ±0.05	0.44± ±0.03	0.51± ±0.02	0.62± ±0.04	0.73± ±0.05	0.74± ±0.06	0.73± ±0.04	0.71± ±0.02	0.62± ±0.04	0.61± ±0.03



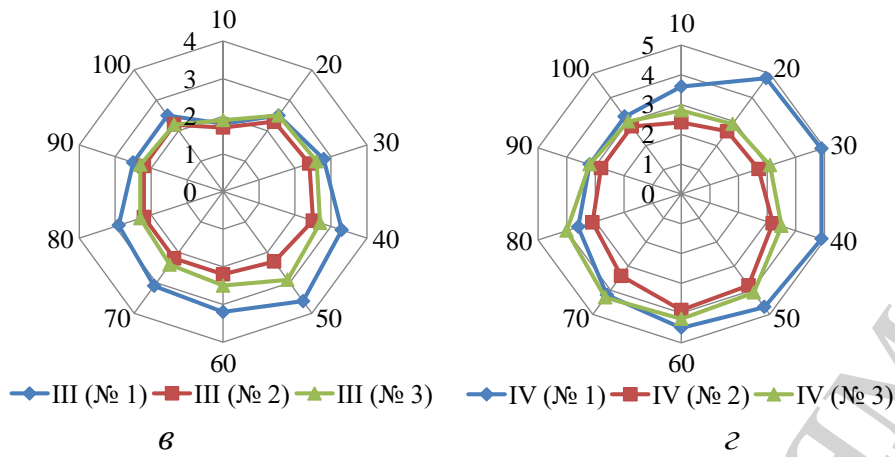


Рис. 5. Закономірності зміни енергетичної складової процесу тертя в трибоспряженні за моментом тертя M_{fr} (10^{-3} Н·м) в різних типах спряжень досліджуваних зразків (матеріали зразків С61900 (НВ95) та А48-25ВС1.25В№.25 (HRC40)) в часі: *a* – I тип; *б* – II тип; *в* – III тип; *г* – IV тип.

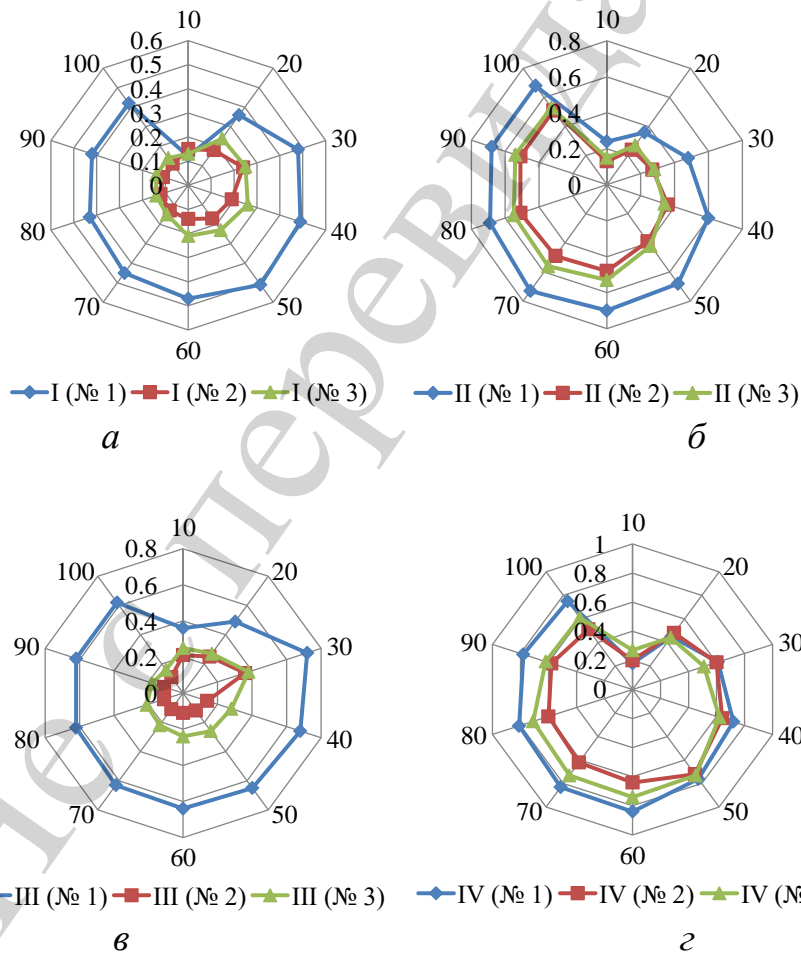


Рис. 6. Закономірності зміни матеріалоемної складової процесу тертя в трибоспряженні за інтенсивністю зношування I_u (10^{-9}) в різних типах спряжень досліджуваних зразків (матеріали зразків С61900 (НВ95) та А48-25ВС1.25В№.25 (HRC40)): *a* – I тип; *б* – II тип; *в* – III тип; *г* – IV тип.

6. Обговорення результатів дослідження зміни трибологічних властивостей спряжень різних типів з геомодифікатором KGMF-1

З проведених випробувань мастильної здатності досліджуваних олив на чотирикульковій машині тертя FBM (табл. 1) визначено, що композиційні оливи № 2 та № 3 показують кращі трибологічні результати у порівнянні з базовою оливою № 1. У випадку використання композиційних олив зменшився показник зносу, збільшилось значення критичного навантаження та навантаження зварювання. Виявлено, що композиційна олива № 2 показала найкращий результат у порівнянні з базовою оливою: показник зносу зменшився на 11,5...14,3 %, а критичне навантаження зросло на 17,2 %. Протизадирні властивості, які визначаються навантаженням зварювання, збільшились на 19,3 %. Це пояснюється тим, що геомодифікатор KGMF-1 сприяє підвищенню мастильної здатності композиційної оливи. Це можливо за рахунок того, що його частинки в оливі на поверхнях кулькових зразків, виконують додатково функцію твердого мащення. Олеїнова кислота в трибологічному контакті реагує на контактну взаємодію матеріалів за рахунок збільшення трибоелектризації локальних областей контакту.

Покращені трибологічні властивості композиційних олив № 2, № 3 у порівнянні з базовою оливою № 1, можливо спостерігати на рис. 4. Про це свідчать криві зміни діаметру плями зносу нижніх кульок зі збільшенням прикладеного навантаження на FBM. Виявлено, що більшість добавок, таких як XADO HighWay for Diesel Truck; KGMF-1 та олеїнова кислота (рис. 4) підвищують навантаження зварювання. Отже при додаванні в базову оливу таких добавок буде спостерігатись підвищення протизадирних властивостей оливного середовища у порівнянні з базовою оливою. Крім цього усі вище перераховані добавки збільшують значення критичного навантаження, яке характеризує діапазон роботи протизносних присадок. В цілому запропонована добавка KGMF-1+олеїнова кислота подібна до присадки XADO HighWay for Diesel Truck за протизадирними властивостями, але забезпечує більшу ефективність роботи композиційної оливи на 4.7...5.8 % за критичним навантаженням (табл. 2).

Дослідження показали, що зростання ефективності мастильної здатності базової та композиційних олив можна навести у наступному ранжованому ряді: Monnol TS-5 UHPD 10W40, Monnol TS-5 UHPD 10W40+XADO HighWay for Diesel Truck, Monnol TS-5 UHPD 10W40+KGMF-1+олеїнова кислота. Разом з тим, отримані результати потребують подальшого визначення триботехнічних характеристик спряжень зразків в середовищі базової № 1 та композиційних № 2 та № 3 оливах.

Виявлено, що на композиційній оливі в середовищі № 1 з добавкою геомодифікатора KGMF-1+олеїнова кислота процес зношування змінюється. Момент тертя в різних типах спряжень зразків з матеріалів С61900 – А48-25ВС1.25В№.25 мають менші значення в порівнянні з базовою оливою (рис. 5, б) на 5...57% для різних типів спряжень, що може свідчити про кращі енергетичні показники трибоспряжень деталей підчас експлуатації. Визначено, що використання композиційної оливи № 2 зменшує інтенсивність зношування в 3,4...4,1 рази для спряжень зразків І типу (рис. 6); в 1,3...1,8 рази для спряжень

зразків II (рис. 6) та IV типів (рис. 6) відповідно; в 5,0...6,0 разів – для спряжень зразків III типу (рис. 6).

Даний характер зміни процесу зношування пояснюється тим, що мікрочастинки геомодифікатору KGMF-1 шаржуються в м'яку поверхню зразків рис. 7.



Рис. 7. Включення мікрочастинок в поверхню зразка матеріалу A48-25BC1.25BNo.25 (HRC40)

Відповідні результати можливо спостерігати при визначенні впливу геомодифікатора на фізико-хімічні параметри оливи та зразків під час випробувань [9]. Оскільки мікрочастинки геомодифікатору KGMF-1 мають значний вміст серпентеніту, то олеїнова кислота формує можливість утримувати і доставляти ці частинки до поверхні тертя під дією трибоелектризації. Після завершення процесу шаржування величина моменту тертя зменшується. Подальший характер розвитку цього процесу відповідає зміні моменту тертя відносно базової оливи, але з меншою величиною. Інтенсивність зношування спряжень зразків при роботі на базовій оливі та композиційній оливі з KGMF-1 різко відрізняється. Це потребує додаткового вивчення закономірностей формування захисних покриттів на робочих поверхнях матеріалів рухомих спряжень зразків та деталей.

Виходячи з результатів триботехнічних характеристик, при використанні геомодифікатора KGMF-1+олеїнової кислоти в оливі можливо в подальшому розробляти технологію формування функціональних добавок та особливу увагу потрібно звернути на процес подрібнення їх фракцій, щоб запобігти проходження процесу седиментації. Використання геомодифікаторів є перспективним напрямком для експлуатації важконавантажених спряжень деталей машин.

7. Висновки

1. Під час проведення досліджень мастильної здатності базової та композиційних оливи Monnol TS-5 UHPD 10W40+KGMF-1+олеїнова кислота, Monnol TS-5 UHPD 10W40+XADO HighWay for Diesel Truck на матеріалах С61900 – А48-25BC1.25BNo.25 виявлено їх позитивний ефект у порівнянні з базовою оливою Monnol TS-5 UHPD 10W40. Про це свідчить підвищення таких характеристик, як навантажування зварювання та критичного навантажування, а також характер залежності діаметра плям зносу нижніх кульок FBM від прикладеного

до них навантаження. Дані композиційні оливи можливо використовувати для підвищення зносостійкості трибоспряджень деталей машин.

2. Виявлено, що серед досліджуваних композиційних олив Monnol TS-5 UHPD 10W40+KGMF-1+олеїнова кислота, Monnol TS-5 UHPD 10W40+XADO Highway for Diesel Truck композиційна олива з геомодифікатором KGMF-1+олеїнова кислота показала найкращий результат у порівнянні з базовою оливою: показник зносу зменшився на 11,5...14,3 %, а критичне навантаження зросло на 17,2 %. Протизадирні властивості, які визначаються навантаженням зварювання, покращилися на 19,3 %.

3. Визначено, що закономірності зміни моменту тертя та інтенсивності зношування зразків з часом випробування на машині тертя 2070 СМТ-1 залежать як від їх матеріалу, типу спряджень та мастильного середовища. При застосуванні геомодифікатора KGMF-1+олеїнової кислоти в базовій оливі Monnol TS-5 UHPD 10W40 на спрядженнях зразків з матеріалів С61900 – А48-25BC1.25B№.25 на 5...57 % знижується момент тертя, в порівнянні з базовою оливою. При цьому визначено, що інтенсивність зношування зменшується в 3,4...6,0 рази для I і III типу спрядження зразків, а для II і IV типу спрядження зразків - в 1,3...1,8 рази.

Література

1. Aulin, V., Hrinkiv, A., Dykha, A., Chernovol, M., Lyashuk, O., Lysenko, S. (2018). Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (92)), 4–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125349>
2. Aulin, V., Hryniv, A., Lysenko, S., Rohovskii, I., Chernovol, M., Lyashuk, O., Zamota, T. (2019). Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (6 (97)), 6–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156150>
3. Osadchiy, S. I., Kalich, V. M., Didyk, O. K. (2013). Structural identification of unmanned supercavitation vehicle based on incomplete experimental data. 2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD). doi: <https://doi.org/10.1109/apuavd.2013.6705294>
4. Aulin, V., Hryniv, A., Lysenko, S., Dykha, A., Zamota, T., Dzyura, V. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (12 (99)), 6–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171619>
5. Buketov, A. V., Sapronov, O. O., Brailo, M. V., Maruschak, P. O., Yakushchenko, S. V., Panin, S. V., Nigalatiy, V. D. (2018). Dynamics of destruction of epoxy composites filled with ultra-dispersed diamond under impact conditions. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–9. doi: <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1495788>

6. Ashmarin, G. M., Aulin, V. V., Golobev, M. Yu., Zvonkov, S. D., Mal-yuchkov, O. T. (1986). Electrical conductivity of copper after laser treatment. *Russian metallurgy. Metally*, 5, 185–189. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0022959597&partnerID=40&md5=a27075bbaeb23b2bea5c5f9b2cc75f68>
7. Ashmarin, G. M., Aulin, V. V., Golubev, M. Yu., Zvonkov, S. D. (1986). Grain boundary internal friction of unalloyed copper subjected to continuous laser radiation. *Physics and chemistry of materials treatment*, 20 (5), 476–478. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0022781198&partnerID=40&md5=12a45ba637bf291f2ffb4fe3a9da90e0>
8. Sokolovskii, M. F., Chernovol, M. I., Chabannyi, V. Y., Nalivaiko, V. N., Pavlyuk-Moroz, V. A. (1992). Increasing the life of chemical apparatus parts by contact surfacing. *Chemical and Petroleum Engineering*, 28 (11), 695–697. doi: <https://doi.org/10.1007/bf01150933>
9. Levanov, I., Zadorozhnaya, E., Vichnyakov, D. (2018). Influence of Friction Geo-modifiers on HTHS Viscosity of Motor Oils. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 967–972. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_101
10. Sokolovskij, M. F., Chernovol, M. I., Chabannyj, V. Ya., Nalivajko, V. N., Pavlyuk-Moroz, V. A. (1992). Increasing the chemical apparatus component service life using contact welding-on. *Khimicheskoe I Neftegazovoe Mashinostroenie*, 11, 35–36. Available at: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0026946301&origin=inward&txGid=56508e338f454db3b1dcd97501109e70>
11. Levanov, I., Doykin, A., Zadorozhnaya, E., Novikov, R. (2017). Investigation Antiwear Properties of Lubricants with the Geo-Modifiers of Friction. *Tribology in Industry*, 39 (3), 302–306. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.03.04>
12. Aulin, V., Lyashuk, O., Tykhyi, A., Karpushyn, S., Denysiuk, N. (2018). Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation. *Acta Technologica Agriculturae*, 21 (4), 153–159. doi: <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0028>
13. Aulin, V. V., Chernovol, M. I., Pankov, A. O., Zamota, T. M., Panayotov, K. K. (2017). Sowing machines and systems based on the elements of fluidics. *INMATEH - Agricultural Engineering*, 53 (3), 21–28. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85039172369&partnerID=40&md5=2468069fc8914b34091c229527a0cc3e>
14. Michalec, M., Svoboda, P., Krupka, I., Hartl, M. (2018). Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review. *Tribology in Industry*, 40 (4), 515–528. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.01>
15. Sapronov, O. O., Buketov, A. V., Maruschak, P. O., Panin, S. V., Brailo, M. V., Yakushchenko, S. V. et. al. (2019). Research of crack initiation and propagation under loading for providing impact resilience of protective coating. *Functional Materials*, 26 (1), 114–120. doi: <https://doi.org/10.15407/fm26.01.114>
16. Aulin, V., Warouma, A., Lysenko, S., Kuzyk, A. (2016). Improving of the wear resistance of working parts agricultural machinery by the implementation of

the effect of self-sharpening. *International Journal of Engineering & Technology*, 5 (4), 126. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v5i4.6386>

17. Aulin, V., Lysenko, S., Lyashuk, O., Hrinkiv, A., Velykodnyi, D., Vovk, Y. et. al. (2019). Wear Resistance Increase of Samples Tribomating in Oil Composite with Geo Modifier KGMF-1. *Tribology in Industry*, 41 (2), 156–165. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.02.02>

18. Chernovol, M. I. (1991). Electrolytic polymer-metal coatings. *Protection of Metals (English translation of Zashchita Metallov)*, 26 (5), 667–668. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0026155660&partnerID=40&md5=97f201c28b017f21537cbe76fb1788dc>

19. Melnichenko, M. M., Osadchy, S. I. (2015). Trends of MEMS technology in UAV development. 2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). doi: <https://doi.org/10.1109/apuavd.2015.7346561>

20. Schott, M., Schlarb, A. K. (2018). Simulation of the thermal budget of plastic/metal tribological pairings by means of FEM [Simulation des thermischen haushalts von kunststoff/metall-gleitpaarungen mittels FEM]. *Tribologie und Schmierungstechnik*, 65 (1), 20–26. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85042685942&partnerID=40&md5=008b4ade337d0ce12db22e990e00965d>

21. Hiilser, P. (2018). Electroplating meets lamella - Successful combination of two coating technologies (Part 1) [Galvanik trifft lamelle - erfolgreiche verbindung zweier beschichtungstechnologien (teil 1)]. *Galvanotechnik*, 109 (10), 1964–1972. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85056282820&partnerID=40&md5=91385b4069b25bce2cace692519430d2>

22. Riva, G., Perricone, G., Wahlström, J. (2019). Simulation of Contact Area and Pressure Dependence of Initial Surface Roughness for Cermet-Coated Discs Used in Disc Brakes. *Tribology in Industry*, 41 (1), 1–13. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.01>

23. Gritsenko, A. V., Zadorozhnaya, E. A., Shepelev, V. D. (2018). Diagnostics of Friction Bearings by Oil Pressure Parameters During Cycle-By-Cycle Loading. *Tribology in Industry*, 40 (2), 300–310. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.02.13>

24. Aulin, V., Lyashuk, O., Pavlenko, O., Velykodnyi, D., Hrynkiv, A., Lysenko, S. et. al. (2019). Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 21 (2), 3–12. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85066994460&partnerID=40&md5=105d35bd46f8ab7b6de0b6688948d0e3>

25. Osadchiy, S. I., Zozulya, V. A. (2013). Combined Method for the Synthesis of Optimal Stabilization Systems of Multidimensional Moving Objects under Stationary Random Impacts. *Journal of Automation and Information Sciences*, 45 (6), 25–35. doi: <https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v45.i6.30>

26. Filimonikhin, G. B., Pirogov, V. V., Filimonikhina, I. I. (2007). Attitude stabilization of the rotational axis of a carrying body by pendulum dampers. *Interna-*

tional Applied Mechanics, 43 (10), 1167–1173. doi: <https://doi.org/10.1007/s10778-007-0117-4>

27. Filimonikhin, G., Filimonikhina, I., Yakymenko, M., Yakimenko, S. (2017). Application of the empirical criterion for the occurrence of auto-balancing for axisymmetric rotor on two isotropic elastic supports. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (86)), 51–58. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96622>

28. Chernets, M. (2019). A Method for Predicting Contact Strength and Life of Archimedes and Involute Worm Gears, Considering the Effect of Wear and Teeth Correction. *Tribology in Industry*, 41 (1), 134–141. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.15>

29. Abd Al-Samieh, M. F. (2019). Surface Roughness Effects for Newtonian and Non-Newtonian Lubricants. *Tribology in Industry*, 41 (1), 56–63. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.07>

30. Bautista-Ruiz, J., Caicedo, J. C., Aperador, W. (2019). Evaluation of the Wear-Corrosion Process in Beta-Tricalcium(β -TCP) Films Obtained by Physical Vapor Deposition (PVD). *Tribology in Industry*, 41 (1), 126–133. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.14>

31. Kopčanová, S., Kučera, M., Kučera, M., Kučera, M., Kučerová, V. (2018). The Effect of Friction Behaviour and Wear Protection Ability of Selected Base Lubricants on Tribo-pairs Parameters of Machine Components. *Tribology in Industry*, 40 (4), 681–691. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.14>

32. Ratnam, C., Jasmin, N. M., Rao, V. V., Rao, K. V. (2018). A Comparative Experimental Study on Fault Diagnosis of Rolling Element Bearing Using Acoustic Emission and Soft Computing Techniques. *Tribology in Industry*, 40 (3), 501–513. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.03.15>

33. Fedorov, S. V. (2018). Nano-Structural Standard of Friction and Wear. *Tribology in Industry*, 40 (2), 225–238. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.02.06>

34. Guzanová, A., Brezinová, J., Draganovská, D., Maruschak, P. O. (2019). Properties of coatings created by HVOF technology using micro- and nano-sized powder. *Koroze a Ochrana Materialu*, 63 (2), 86–93. doi: <https://doi.org/10.2478/kom-2019-0011>