

**Д. О. САЛТОВСЬКИЙ, Р. М. ДЖУС, О. М. ЛЕОНЕНКО, С. А. ВАХНЮК,
О. Д. КРАВЧУК**

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТРИБОВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ СУМІШІ “КОМБАТ” ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ВУЗЛІВ ТА АГРЕГАТИВ ЗАСОБІВ НАЗЕМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОЛЬОТІВ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Пошук нових ефективних шляхів зміцнення робочих поверхонь деталей пар тертя автомобільних двигунів та агрегатів автомобільних базових шасі при їх виготовленні та технологій відновлення властивостей під час технічного обслуговування і ремонту залишається актуальним для дослідників в галузі машинобудування.

У статті представлені загальний порядок і результати натурних випробувань технології триботехнічного відновлення із застосуванням трибовідновлювальної суміші “Комбат”, використаної для зміцнення високонавантажених пар тертя двигунів внутрішнього згоряння та окремих агрегатів трансмісії засобів наземного забезпечення польотів повітряних суден без їх розбирання в процесі експлуатації, підвищення надійності та подовження ресурсу роботи машин.

Дані контрольних вимірювань швидкості зношування рухомих з’єднань методом акустичної емісії після обробки трибовідновлювальної суміші “Комбат” свідчать про суттєве зниження цього показника для двигунів внутрішнього згоряння та агрегатів трансмісії за рахунок металокерамічного шару, який має високі зносостійкі та задиристійкі характеристики.

Результати використання технології слід вважати позитивними та такими, що надають підстави науково обґрунтувати рекомендації щодо впровадження репараційної технології триботехнічного відновлення для засобів наземного забезпечення польотів повітряних суден як способу відновлення ресурсу машин і механізмів та зниження швидкості їх зношування.

Ключові слова: агрегати трансмісії, двигун внутрішнього згоряння, засоби наземного забезпечення польотів повітряних суден, натурні випробування, пари тертя, подовження ресурсу, технологія триботехнічного відновлення, трибовідновлювальна суміш.

D. SALTOVSKIY, R. DZHUS, O. LEONENKO, S. VAKHNIUK, O. KRAVCHUK

THE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF APPLICATION OF TRIBO- RECOVERY MIXTURE “COMBAT” FOR RESTORATION OF UNITS AND UNITS MEANS OF GROUND SUPPORT OF AIRCRAFT FLIGHTS

The search for new effective ways of strengthening the working surfaces of parts of friction pairs of automobile engines and aggregates of automobile base chassis during their manufacture and technologies for restoring properties during maintenance and repair remains relevant for researchers in the field of mechanical engineering.

The article presents the general procedure and results of full-scale tests of the technology of tribotechnical recovery using the triborecovery mixture “Kombat”, used to strengthen highly loaded friction pairs of internal combustion engines and individual transmission units of ground support for aircraft flights without disassembling them during operation, increasing reliability and lengthening machine resource.

The data of control measurements of the rate of wear of moving joints by the acoustic emission method after processing the tribo-restorative mixture “Kombat” indicate a significant reduction of this indicator for internal combustion engines and transmission units due to the metal-ceramic layer, which has high wear-resistant and scratch-resistant characteristics.

The results of the use of the technology should be considered positive and provide grounds for scientifically justifying recommendations for the introduction of the reparative technology of tribotechnical restoration for the means of ground support for aircraft flights as a way to restore the resource of machines and mechanisms and reduce the rate of their wear and tear.

Key words: transmission units, internal combustion engine, means of ground support for aircraft flights, field tests, friction pairs, life extension, tribotechnical restoration technologies, tribological restoration mixture.

Вступ. На сьогоднішній день за об’єктивних факторів є ситуація, коли чи то в народному господарстві країни, чи то в Збройних Силах України продовжує експлуатуватися автомобільна техніка, випущена за часів СРСР. Однак переважна більшість, а саме понад 75 - 80 %, таких зразків використали свій ресурс, що викликає необхідність у підвищенні

довговічності основних і найбільш коштовних деталей вузлів та агрегатів автомобілів при технічному обслуговуванні (ТО) і ремонті.

В першу чергу це стосується двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) автомобілів, в тому числі засобів наземного забезпечення польотів повітряних суден (ЗНЗП ПС), що експлуатуються в Повітряних Силах Збройних Сил України. Їх спеціальне обладнання монтується на різних автомобільних базових шасі (АБШ) та використовується, насамперед, для забезпечення обслуговування та застосування повітряних суден, а також для утримання аеродромів в експлуатаційній готовності та виконання інших спеціальних заходів.

Пошук нових ефективних технологій відновлення та зміцнення робочих поверхонь деталей для дослідників в галузі машинобудування постійно становить значний інтерес. Це завдання, незважаючи на досить велику кількість способів ремонту та остаточної обробки при виготовленні, залишається актуальним і для пар тертя автомобільних двигунів та АБШ.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. На теперішній час вже не викликає сумнівів щодо ефективності технології триботехнічного відновлення (ТТВ) робочих поверхонь деталей кінематичних вузлів, які дозволяють подовжити ресурсу пар тертя під час їх експлуатації шляхом здійснення обробки вузлів і агрегатів без демонтажу та розбирання за рахунок додавання певних добавок до змащувального матеріалу. Про це переконливо свідчать досягнення відомих корпорацій XADO, Нанопротек (Україна) та багатьох фірм дальнього зарубіжжя. Однією з таких добавок є трибовідновлювальна суміш (ТВС) “Комбат” [1 – 3].

Особливе місце серед передових ресурсозберігаючих технологій займає так звана репараційна технологія (способи відновлення ресурсу машин і механізмів без їх розбирання та припинення експлуатації), заснована на застосуванні добавок мінерального походження до змащувальних матеріалів. Ця технологія дозволяє відновлювати геометрію зношених поверхонь деталей трибоспрямижень, забезпечуючи суттєве збільшення ресурсу цих деталей (до 3 – 8 і більше разів залежно від кінематики та умов роботи рухомих спряжень) [4 – 7].

Суть її полягає в тому, що при внесенні в змащувальний матеріал ТВС, основу якого складає багатокомпонентна суміш мінералів з додаванням каталізаторів, на робочих поверхнях в процесі тертя формується захисний шар металокераміки. Це покриття частково відновлює геометрію і збільшує ресурс деталей [8, 9].

В роботах [10, 11] авторами була доведена доцільність застосування технології ТТВ для застосування у відповідних агрегатах ЗНЗП ПС для подовження їх ресурсу, а також визначені найбільш відповідальні трибосистеми (ТС) в ЗНЗП ПС – чисельні пари тертя ДВЗ та агрегатів трансмісії АБШ [10 – 14].

Аналіз різноманітних складів ревіталізаторів, геоактиваторів, кондиціонерів металу тощо в роботах [1, 15, 16] дозволив обґрунтовано обрати основу ТВС для відновлення ТС із забезпеченням високих протизносних і протизадирних властивостей та підібрати легуючі добавки для цієї суміші. Слід також відмітити, що дослідження різних ТВС та пошук їх складу, оптимального до відповідних умов роботи, тривають і надалі [5, 11, 17, 18].

Проведені лабораторні дослідження застосування обраної ТВС на парах тертя, які моделювали ТС ДВЗ та трансмісії ЗНЗП ПС показали його високу ефективність, зокрема швидкість зношування оброблених ТС знизилася до 2...3 разів [10, 11]. Ці результати було визначено достатніми для планування і проведення подальших натурних випробувань зразків техніки з використанням запропонованої технології ТТВ [19].

Мета та постановка задачі дослідження. Метою даної роботи є аналіз результатів розробки методики репараційного ТТВ з використанням ТВС “Комбат” для вузлів і агрегатів ЗНЗП ПС та ефективності її застосування при проведенні натурних випробувань.

Завданнями дослідження визначалися: узагальнення наявних навантажувальних і розрахункових обмежень, теоретичний аналіз репараційних методів відновлення вузлів та агрегатів ЗНЗП ПС без виводу їх з експлуатації; проведення натурних випробувань з метою оцінки ефективності репараційної технології відновлення ДВЗ та агрегатів трансмісії ЗНЗП ПС.

Основний матеріал та результати дослідження. Метою проведення натурних випробувань

була перевірка ефективності технології ТТВ, що застосовувалася, за результатами зміни таких експлуатаційних характеристик об'єктів дослідження як:

- підвищення компресії та її вирівнювання по циліндрах ДВЗ;
- відновлення потужності ДВЗ;
- підвищення тиску моторної оливи у системі змащення ДВЗ;
- зменшення витрати пально-мастильних матеріалів (ПММ) ДВЗ;
- зменшення коефіцієнту тертя навантажених трибоспряджень ДВЗ та агрегатів трансмісії.

Натурні випробування за часом охоплювали період експлуатації зразків ЗНЗП ПС (машин), що досліджувалися, між сезонними обслуговуваннями при переведенні на весняно-літній режим експлуатації до переведення на осінньо-зимовий режим.

При обробці ДВЗ та агрегатів трансмісії безпосередньо на машинах повинні виконуватись вимоги безпеки та виробничої санітарії, передбачені стандартами, технічними умовами та технічною документацією підприємства-виробника на машину (двигун), прилади, паливо, ТВС, охолоджувальні та робочі рідини, агрегати трансмісії. За своїм складом ТВС “Комбат” не вміщує інгредієнтів, які є небезпечними для здоров'я людини, на відміну від тих, що використовуються в інших технологіях, наприклад, РВС-технологіях.

Для приробки усіх пар тертя визначені зразки ЗНЗП ПС протягом 7 – 10 днів експлуатувалися у штатному режимі відповідно до розробленої методики та порядку проведення контрольних вимірів експлуатаційних характеристик об'єктів досліджень після заміни в них мастильних матеріалів при переведенні машин на весняно-літній режим експлуатації. Контрольні вимірювання, які були виконані за цей період в процесі експлуатації до обробки ДВЗ та агрегатів трансмісії машин ТВС, занотовувалися у протоколи випробувань.

На початку наступної декади експлуатації після заміни моторної оливи в ДВЗ були виконані контрольні вимірювання компресії за програмою випробувань, а також рівня швидкості зношування по усім об'єктам контролю. Останні вимірювання виконувалися при русі автомобіля за швидкості 30 – 40 км/год по рівному майданчику протягом 10 хв. Результати вимірювань також занотовувалися у протоколи випробувань.

Після закінчення цих контрольних вимірювань була виконана обробка ДВЗ та агрегатів трансмісії АБШ ЗНЗП ПС за допомогою ТВС “Комбат” складом № 1. Далі машини експлуатувалися в штатному режимі протягом декади.

На початку третьої декади об'єкти досліджень на ЗНЗП ПС були оброблені складом № 2. Подальша експлуатація протягом 7 – 10 днів також здійснювалася в режимі штатних навантажень.

Після зазначених 25 – 30 днів усі контрольні вимірювання (компресія у циліндрах ДВЗ, швидкість зношування деталей досліджуваних систем та агрегатів, витрати ПММ) були виконані повторно. У подальшому досліджувані ЗНЗП ПС експлуатувалися у штатному режимі протягом трьох місяців та усі зазначені контрольні вимірювання з періодичністю 30 днів здійснювалися до кінця програми випробувань.

Під час контрольних вимірювань компресія в циліндрах ДВЗ машин визначалась за допомогою компресометра зі шкалою до 1 МПа (10 кгс/см²). Двигун попередньо прогрівався до температури 70 - 80 °С. При замірі компресії дотримувалася стандартна методика [20]. Різниця показань між циліндрами не мала перевищувати 0,1 МПа (1 кгс/см²).

Вимірювання витрат ПММ здійснювалося шляхом визначення питомої витрати палива після прогрівання води в системі охолодження двигуна ЗІЛ-131 до 90 °С по відпрацюванню палива об'ємом по 0,5 л шляхом вимірювання часу до повної зупинці двигуна на малих обертах.

Оцінка витрати оливи на угар проводилася відповідно до вимог ГОСТ 14846-81 в процесі штатної експлуатації відносно до витрати 100 л палива. Оцінка визначалася як середнє за результатами чотирьох вимірювань до обробки та після обробки ТВС “Комбат”.

За допомогою методу акустичної емісії (АЕ) [7, 8] в найбільш відповідальних ТС об'єктів досліджень контролювалися зміни значення швидкості їх зношування (у відносних одиницях) до обробки ТВС та після обробки через 2000 км пробігу машин. У процесі вимірювань система

контролю параметрів АЕ розміщувалася у кабіні водія. Елементи кріплення датчиків попередньо були закріплені на блоку циліндрів ДВЗ та картерах агрегатів трансмісії.

За результатами натурних випробувань була розроблена типова репараційна технологія ТТВ з використанням ТВС “Комбат” для продовження ресурсу ДВЗ та агрегатів трансмісії ЗНЗП ПС [10, 11].

Для обробки даних експериментів були застосовані відомі статистичні підходи. Аналізувалися залежності, що характеризували зміну названої величини у часі (кількість вимірювань за проміжок часу $\Delta t = 5$ хв), для випадків запуску ДВЗ, початку руху та руху зразка ЗНЗП ПС на визначеному для натурних випробувань проміжку ділянки дороги. Результати вимірювань представлені на рис. 1 [11].

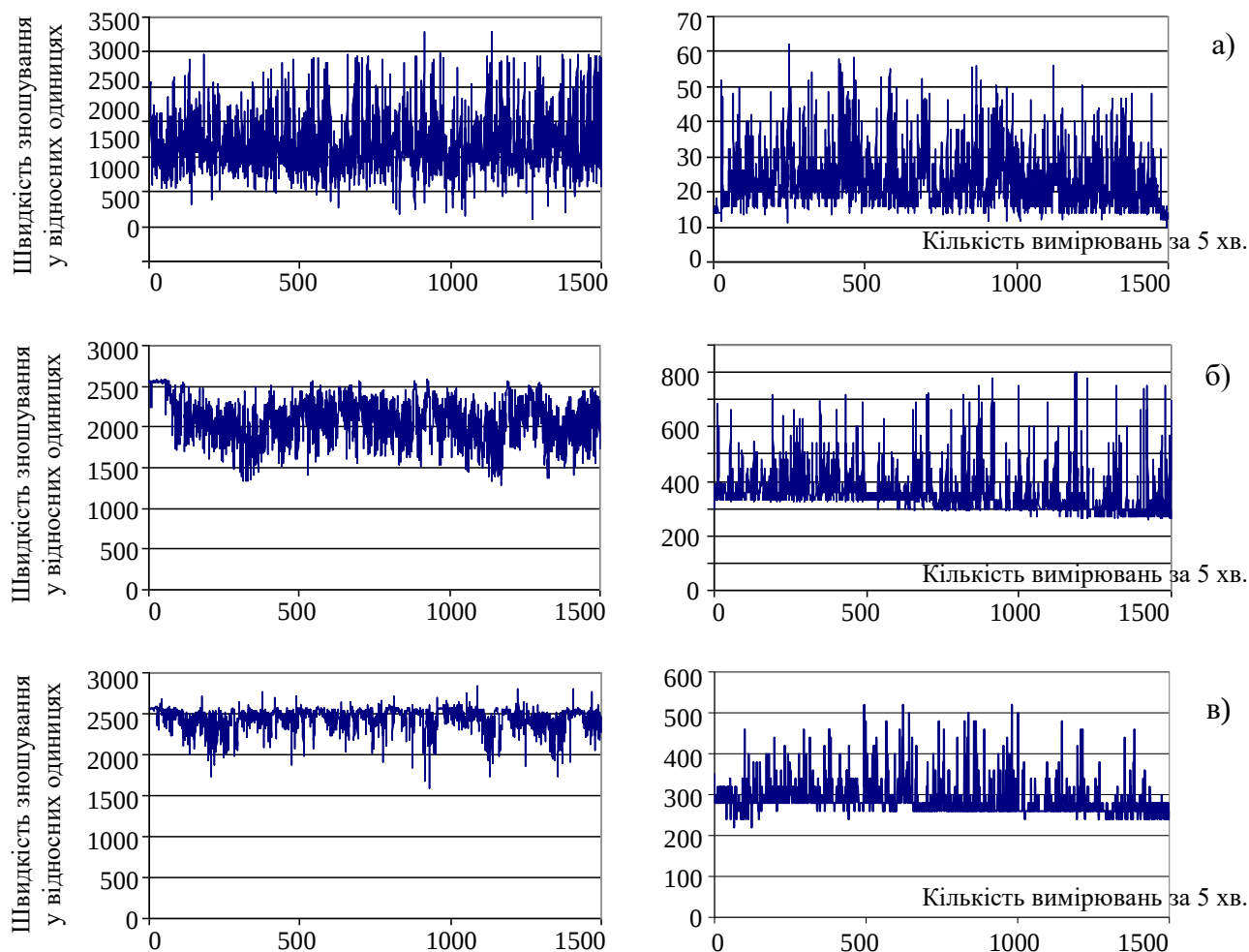


Рис. 1 – Зміна значень швидкості зношування у відносних одиницях за час реєстрації (кількість вимірювань за 5 хв) до обробки ТВС та через 2000 км пробігу після обробки: а) ДВЗ; б) коробка передач; в) задній міст.

В процесі обробки результатів дослідження ставилися і вирішувалися наступні задачі:

- ідентифікація ділянки стабілізації параметрів зносу (пошук перманентності);
- визначення найкращої оцінки величини, що обчислюється;
- визначення максимальних похибок визначення величини, що обчислюється.

Для вирішення цих задач було використано поняття емпіричного середнього [21], яке отримується, використовуючи вихідну числову послідовність:

$$\{MP(i)\}^N = \{MP(1), MP(2), ..., MP(m), ..., MP(N)\} \quad (1)$$

де m – номер вимірювання; i ; N – відповідно поточне вимірювання (яке розглядається в даний момент) і загальна кількість проведених вимірювань.

Обґрунтованість такого рішення може полягати у тому, що емпіричне середнє вихідної величини в більшості практичних випадків виявляє належну стійкість в тому сенсі, що розкид значень $M_m[MП]$ в кінцевому підсумку відчутно зменшується по мірі зростання m .

Таким чином, використовуючи вираз

$$M_m[MП] = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^m MП_i, \dots m = 1, N, \quad (2)$$

за схемою серії, що подовжується, можна виявити ділянку перехідного та квазістаціонарного режиму роботи агрегату (в сенсі зміни зношування). Останнє можна формалізувати наступним чином:

$$M_m[MП] \in [MП] \text{ при } N \geq m \geq m_\epsilon, N \gg m_\epsilon \quad (3)$$

де m_ϵ – та найменша кількість значень вимірювальної величини, починаючи з якого, на думку дослідника, вже постійно виконується рівність, тобто залежність приймає стаціонарний характер; $M[MП]$ – деяка константа, яка в статистиці має назву “математичне очікування”.

Якщо наближена рівність виконувалася у вже проведених випробуваннях, то можливо припустити, що при подальшому подовженні серії (1) значення $M_m[MП]$ будуть близькими до вже згаданої вище константи $M[MП]$, тобто:

$$M_m[MП] \in M[MП] \forall m \gg N \quad (4)$$

Саме це дає змогу стверджувати, що найкраще значення для величини $MП$, яке визначається, знаходиться на ділянці, де аналізується функція, є стаціонарним або квазістаціонарним [21].

Для випробувань ДВЗ машин до обробки ТВС “Комбат” і після закінчення обробки величина $M_m[MП]$ суттєвим чином відрізняється за величиною, але вона квазістаціонарна на ділянці контролю. Відносно проміжних вимірів після 1000 км пробігу після обробки, то тут очевидне різке зменшення міри пошкоджуваності для досліджуваних пар тертя ДВЗ параметрів $M_m[MП]$, що показано на рис. 2 [11]. Це пояснюється утворенням на поверхнях тертя металокерамічного шару, який знаходиться ще в нестабільному стані, як по товщині, так і за фізико-хімічними властивостями.

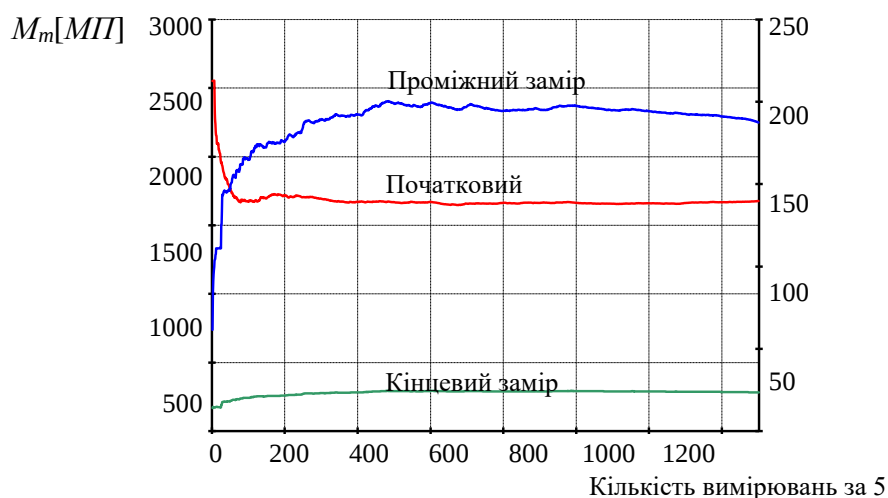


Рис. 2 – Математичне очікування швидкості зношування рухомих вузлів ДВЗ за час вимірювань

Узагальнені результати контрольних вимірювань експлуатаційних показників ДВЗ та агрегатів трансмісії (коробки переключення передач (КП) та задні мости) і питомих витрат ПММ ЗНЗП ПС, проведених до їх обробки ТВС “Комбат”, а також після 1000 км та 2000 км пробігу машин в процесі натурних випробувань представлені в табл. 1 та 2 [11].

Таблиця 1 – Узагальнені результати контрольних вимірювань експлуатаційних показників об’єктів досліджень (контролю)

Період проведення вимірювань	Об’єкти досліджень (контролю)				
	Двигуни внутрішнього згорання			Агрегати трансмісії	
				КП	задній міст
	компресія в циліндрах ДВЗ, МПа	тиск оливи, МПа	усереднена швидкість зношування, відносні одиниці		
Після заміни мастильних матеріалів до обробки двигуна ТВС	0,60 – 0,76	3,8	167,79	208,29	243,64
Через 1000 км пробігу машини після обробки двигуна ТВС	0,78 – 0,80	4,2	18,76	48,88	45,43
Через 2000 км пробігу машини після обробки двигуна ТВС	0,78 – 0,80	4,2	2,34	36,09	28,92

Таблиця 2 – Питома витрата ПММ у процесі експлуатації

Період проведення вимірювань	Параметри, що контролюються	
	питомі витрати палива, л/с	витрати масла на угар (за ГОСТ 14846-81), л/100л палива
До обробки двигуна ТВС	0,00102	1,9
Через 2000 км пробігу машини після обробки двигуна ТВС	0,0009	1,6

Результати контрольних вимірювань (табл. 1) свідчать:

– до обробки двигуна ТВС після заміни мастильних матеріалів за період експлуатації зразків ЗНЗП ПС деталі циліндро-поршневої групи ДВЗ мали усереднене нерівномірне зношування по циліндрах з різницею компресії від 0,07 МПа до 0,16 МПа;

– у результаті внесення в ДВЗ ТВС “Комбат” відбулося суттєве підвищення компресії у циліндрах, які на початку випробувань мали найбільш зношені деталі (найменшу компресію), і деяке зниження в решті циліндрів. Це пов’язано з динамікою виникнення металокерамічного шару, яка була вивчена при проведенні лабораторних випробувань;

– в результаті обробки ДВЗ досліджуваних ЗНЗП ПС за допомогою ТВС “Комбат” компресія у всіх циліндрах підвищилася до параметрів, які досягаються при проведенні капітального ремонту ДВЗ ЗІЛ-131 (0,78 – 0,80 МПа). Різниця компресії в циліндрах не перевищувала при остаточних вимірюваннях 0,02 МПа. Даний ефект досягається за рахунок утворення металокерамічного шару. Це призвело до підвищення тиску оливи у системі змащення на 0,4 МПа;

– вимірювання швидкості зношування рухомих спряжень ДВЗ та агрегатів трансмісії

методом акустичної емісії показує суттєве зменшення показників по усім досліджуваним вузлам: для ДВЗ – у 70 разів, для КП – майже у 6 разів, для заднього мосту – у 8 разів;

– підвищення компресії за рахунок використання технології репараційного ТТВ призвело до зменшення питомої витрати палива на 12 %, та оливи на угар на 16 % (табл. 2).

Таким чином, результати досліджень слід вважати позитивними та такими, що надають підстави науково обґрунтувати наступні рекомендації щодо впровадження репараційної ТТВ для ЗНЗП ПС як способу відновлення ресурсу машин і механізмів та зниження швидкості їх зношування. А саме:

– перед використанням ТВС “Комбат” необхідно проаналізувати ТС, які будуть підлягати відновленню. Згідно досліджень даної роботи, використання ТВС дасть позитивний ефект лише на прямих трибосистемах та зворотних трибосистемах за геометрією. В іншому випадку використання ТВС “Комбат” не дасть позитивних результатів;

– обробку ТС слід проводити під час проведення технічного обслуговування ДВЗ та агрегатів трансмісії із заміною оливи. Причому, перед додаванням ТВС у мастильні матеріали, слід використовувати промивальну рідину. В іншому випадку тверді частинки ТВС, які є фундаментом для утворення захисного зносостійкого покриття, будуть шаржуватись (втілюватись) не в поверхні тертя, а в окисли, нагар і бруд, що утворились у результаті роботи пар тертя ДВЗ та агрегатів машини. На них буде формуватись захисна плівка, але через слабе закріплення або його відсутність, абразивні частинки будуть відриватись від поверхні тертя, та замість захисту і відновлення поверхні тертя почнеться посилений абразивний знос;

– слід чітко дотримуватись дозування ТВС – пропорційно до об’єму оливи. Зміна пропорцій ТВС в більшу чи меншу сторону не дасть позитивного ефекту;

– найбільш оптимальним терміном експлуатації, як демонструють дослідження, буде такий, коли поверхневий шар і більшість об’єму утвореного зносостійкого захисного покриття буде в твердому, окисненому стані, з незначним вмістом в’язкої фази. В результаті утворених окисів такий варіант дасть високу твердість поверхні тертя, низький коефіцієнт тертя та низьку інтенсивність зношування, що в свою чергу є максимальним наближенням до беззносного механізму тертя;

– технологія ТТВ повинна використовуватись після напрацювання не менш 70 – 80 % ресурсу ДВЗ чи агрегату трансмісії.

Висновки.

В ході виконання теоретичних досліджень та натурних випробувань було проведено оцінку ефективності застосування технології ТТВ за допомогою ТВС “Комбат” при обробці ДВЗ та агрегатів трансмісії ЗНЗП ПС. Отримані дані свідчать про ефективність даної технології для подовження ресурсу обраних об’єктів досліджень. Ця ефективність підтверджена наступними результатами проведених натурних випробувань:

1) використання технології ТТВ, розробленої в роботі, приводить до відновлення компресії по всім циліндро-поршневим групам до рівня 0,78 – 0,80 МПа, при чому різниця між ними не перевищує значень, які досягаються при проведенні капітального ремонту ДВЗ;

2) дані контрольних вимірювань усередненої швидкості зношування рухомих з’єднань ДВЗ та агрегатів трансмісії методом акустичної емісії після обробки ТВС “Комбат” свідчать про суттєве зниження цього показника, що досягається за рахунок металокерамічного шару, який має високі зносостійкі та задиростійкі характеристики.

Список літератури:

1. Запорожець В.В., Стадніченко В.М., Трошін О.М. Механізм дисипації енергії при терті металокерамічного шару в технологіях триботехнічного відновлення деталей машин і механізмів. Системи озброєння і військова техніка. 2010. № 2. С. 113-118. http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2010_2_29.
2. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення : монографія / за ред. В.В. Ауліна. – Кіровоград : вид. Лисенко В.Ф., 2016. 303 с. ISBN 978-617-7197-54-5.

3. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Лівіцький О.М. Підвищення надійності спряжень деталей силового агрегату транспортних машин їх припрацюванням в мастильному середовищі з добавками модифікаторів тертя. Крамаровські читання : зб. тез доп. X Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : вид. центр НУБіП України, 2023. С. 107-109. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik_tez_kch2023.pdf.
4. Лисенко С.В., Аулін В.В. Підвищення ресурсу силових агрегатів та термінів використання моторної і трансмісійної оливи мобільних машин геомодифікаторами. Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва : проблеми теорії та практики : зб. тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 90-річчю від дня народження професора Т.І. Рибак та 60-річчю кафедри технічної механіки та сільськогосподарських машин. 2022. С. 143-144. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/39028/2/MNPK_2022_Lysenko_S_V-Increasing_the_resource_143-144.pdf.
5. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Чернай А.Е., Лукашук А.П. Системно-спрямований підхід до розробки технологій безрозбірного відновлення спряжень деталей. Крамаровські читання : зб. тез доп. VI Міжнар. наук.-техн. конф. Київ : вид. центр НУБіП України, 2019. С. 94-96. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/zbirnik_tez2019v2.pdf.
6. Levanov I., Zadorozhnaya E., Kandeva M., Kalitchin Z., Dolgushina N., Polyacko E. Influence of friction geo-modifier on antiwear properties of plastic lubricants. Journal of Environmental Protection and Ecology. 2019. № 20(3). P. 1303-1309. https://www.academia.edu/88008959/Influence_of_the_Friction_Geo_Modifier_on_the_Anti_Wear_Properties_of_Plastic_Lubricants.
7. Aulin V., Lysenko S., Hryniv A., Velykodnyi D., Chernai A., Lukashuk A. Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by tribotechnologies of restoration. Problems of tribology. 2019. № 24(1/91). P. 73-80. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-91-1-73-80>.
8. Aulin V., Hryniv A., Lysenko S., Dykha A., Zamota T., Dzyura V. 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. 2019. Vol. 3, No 12(99). P. 6-16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171619>.
9. Al-Quraan T.M.A. Influence evaluation of the RVS friction geomodifier on tribotechnical parameters of the contact in non-stationary working conditions / T.M.A. Al-Quraan // Tribology in Industry. 2020. № 42(1). P. 121-130. DOI:10.24874/ti.2020.42.01.12.
10. Леоненко О.М., Джус Р.М., Салтовський Д.О., Кравчук О.Д., Стояновський Д.А. Застосування технологій триботехнічного відновлення для подовження ресурсу засобів наземного забезпечення польотів повітряних суден. Системи озброєння і військова техніка. 2023. № 4 (78). С. 42-48. <https://doi.org/10.30748/zhups.2023.78.06>.
11. Тема спеціальна : звіт про НДР (проміжний). №ДР 0101U001193; інв. № 2906/2. Харків : ХУПС, 2011. 106 с.
12. Лисенко С.В., Аулін В.В., Чернай А.Е., Голуб Д.В., Лукашук І.П. Вплив модифікування моторної та трансмісійної оливи композиційними добавками на підвищення ресурсу транспортних машин. Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем. 2022. С. 170-172. <http://erm.kntu.kr.ua/files/Materialy-2022.pdf>.
13. Aulin V., Lysenko S., Lyashuk O., Hryniv A., Velykodnyi D., Vovk Y., Holub D., Chernai A. Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KGMF-1. Tribology in Industry. 2019. Vol. 41, No 2. P. 156-165. DOI: 10.24874/ti.2019.41.02.02.
14. Кравченко С.О. Забезпечення ресурсу ДВЗ шляхом застосування дискретно-континуального зміцнення робочих поверхонь : дис. ... докт. тех. наук. НТУ «ХПІ». Харків, 2018. 315 с.
15. Білик А.П. Відновлення поверхонь тертя за допомогою триботехнічних регенеруючих сумішей : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.04. Хмельницький національний університет. Хмельницький, 2009. 262 с.
16. Войтов В.А., Білик А.П., Сторожук В.В., Мазепа В.О. Дослідження ефективності застосування триботехнічних відновлювальних сумішей на різних конструкціях трибосистем. Проблеми трибології. 2007. № 1. С. 99-103.
17. Aulin V., Lysenko S., Hryniv A., Chernai A., Zhylova I., Lukashuk A. Wear resistance increase of samples tribomating "Steel 45-cast iron SCH20" with geo modifier KGMF-1. Проблеми трибології. 2019. № 2. С. 55-60. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-92-2-55-60>.
18. Aulin V., Lyashuk O., Hryniv A., Lysenko S., ... & Horkunenko A. Determination of the Rational Composition of the Additive to Oil with the Use of the Katerynivka Friction Geo Modifier. Tribology in Industry. 2019. № 41(4). С. 548-562. <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.04.08>.
19. Тема спеціальна : звіт про НДР (заклучний). №ДР 0101U001193; інв. № 2927/2. Харків : ХУПС, 2011. 128 с.
20. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Технологія: Підручник. – К.: Вища шк., 2007. – 527 с. ISBN 978-966-642-351-4.
21. Теорія ймовірностей та математична статистика: навч. посіб. / Х. Т. Дрогомирецька [та ін.]; НУ «Львівська Політехніка». – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 396 с.. – ISBN 978-617-607-260-7.

References (transliterated):

1. Zaporozhets V.V., Stadnichenko V.M., Troshin O.M. Mekhanizm dysypatsii enerhii pry terti metalokeramichnoho sharu v tekhnolohiiakh trybotekhnichnoho vidnovlennia detalei mashyn i mekhanizmiv. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2010. № 2. S. 113-118. http://nbuv.gov.ua/UJRN/soivt_2010_2_29.
2. Aulin V.V., Lysenko S.V., Kuzyk O.V. Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki tekhnolohiiamy trybotekhnichnoho vidnovlennia : monohrafiia / za red. V.V. Aulina. – Kirovohrad : vyd. Lysenko V.F., 2016. 303 s. ISBN 978-617-7197-54-5.
3. Aulin V.V., Lysenko S.V., Hrynkiv A.V., Livitskyi O.M. Pidvyshchennia nadiinosti spriazhen detalei sylovoho ahrehatu transportnykh mashyn yikh prypratsiuvanniam v mastynomu seredovyshchi z dobavkamy modifikatoriv tertia. Kramarovski chytannia : zb. tez dop. Kh Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Kyiv : vyd. tsentr NUBiP Ukrainy, 2023. S. 107-109. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u349/zbirnik_tez_kch2023.pdf.
4. Lysenko S.V., Aulin V.V. Pidvyshchennia resursu sylovykh ahrehativ ta terminiv vykorystannia motornoj i transmissiinoj olyv mobilnykh mashyn heomodyfikatory. Protsepy, mashyny ta obladdannia ahropromyslovoho vyrobnytstva : problemy teorii ta praktyky : zb. tez dop. Mizhnar. nauk.-prakt. konf., prysviachenoi 90-richchiu vid dnia narodzhennia profesora T.I. Rybaka ta 60-richchiu kafedry tekhnichnoi mekhaniky ta silskohospodarskykh mashyn. 2022. S. 143-144. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/39028/2/MNPK_2022_Lysenko_S_V-Increasing_the_resource_143-144.pdf.
5. Aulin V.V., Lysenko S.V., Hrynkiv A.V., Chernai A.E., Lukashuk A.P. Systemno-spriamovanyi pidkhyd do rozrobky tekhnolohii bezrozbirnoho vidnovlennia spriazhen detalei. Kramarovski chytannia : zb. tez dop. VI Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Kyiv : vyd. tsentr NUBiP Ukrainy, 2019. S. 94-96. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/zbirnik_tez2019v2.pdf.
6. Levantov I., Zadorozhnaya E., Kandeve M., Kalitchin Z., Dolgushina N., Polyacko E. Influence of friction geo-modifier on antiwear properties of plastic lubricants. Journal of Environmental Protection and Ecology. 2019. № 20(3).P.1303-1309. https://www.academia.edu/88008959/Influence_of_the_Friction_Geo_Modifier_on_the_Anti_Wear_Properties_of_Plastic_Lubricants.
7. Aulin V., Lysenko S., Hrynkiv A., Velykodnyi D., Chernai A., Lukashuk A. Regularities of dynamics of change in tribotechnical characteristics of coatings formed by tribotechnologies of restoration. Problems of tribology. 2019. № 24(1/91). P. 73-80. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-91-1-73-80>.
8. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Dykha A., Zamota T., Dzyura V. 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. 2019. Vol. 3, No 12(99). P. 6-16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.171619>.
9. Al-Quraan T.M.A. Influence evaluation of the RVS friction geomodifier on tribotechnical parameters of the contact in non-stationary working conditions / T.M.A. Al-Quraan // Tribology in Industry. 2020. № 42(1). P. 121-130. DOI:10.24874/ti.2020.42.01.12.
10. Leonenko O.M., Dzhus R.M., Saltovskiy D.O., Kravchuk O.D., Stoianovskiy D.A. Zastosuvannia tekhnolohii trybotekhnichnoho vidnovlennia dlia podovzhennia resursu zasobiv nazemnoho zabezpechennia polotiv povitrianykh suden. Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika. 2023. № 4 (78). S. 42-48. <https://doi.org/10.30748/zhups.2023.78.06>.
11. Tema spetsialna : zvit pro NDR (promizhnyi). №DR 0101U001193; inv. № 2906/2. Kharkiv : KhUPS, 2011. 106 s.
12. Lysenko S.V., Aulin V.V., Chernai A.Ie., Holub D.V., Lukashuk I.P. Vplyv modifikuvannia motornoj ta transmissiinoj olyv kompozytsiinykh dobavkamy na pidvyshchennia resursu transportnykh mashyn. Pidvyshchennia nadiinosti i efektyvnosti mashyn, protsesiv i system. 2022. S. 170-172. <http://erm.kntu.kr.ua/files/Materialy-2022.pdf>.
13. Aulin V., Lysenko S., Lyashuk O., Hrynkiv A., Velykodnyi D., Vovk Y., Holub D., Chernai A. Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KGMF-1. Tribology in Industry. 2019. Vol. 41, No 2. P. 156-165. DOI: 10.24874/ti.2019.41.02.02.
14. Kravchenko S.O. Zabezpechennia resursu DVZ shliakhom zastosuvannia dyskretno-kontynualnoho zmitsnennia robochykh poverkhon : dys. ... dokt. tekhn. nauk. NTU "KhPI". Kharkiv, 2018. 315 s.
15. Bilyk A.P. Vidnovlennia poverkhon tertia za dopomohoiu trybotekhnichnykh reheneruiuchykh sumishei : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.02.04. Khmelnytskyi natsionalnyi universytet. Khmelnytskyi, 2009. 262 s.
16. Voitov V.A., Bilyk A.P., Storozhuk V.V., Mazepa V.O. Doslidzhennia efektyvnosti zastosuvannia trybotekhnichnykh vidnovliuvalnykh sumishei na riznykh konstruktsiiaakh trybosystem. Problemy trybolohii. 2007. № 1. S. 99-103.
17. Aulin V., Lysenko S., Hrynkiv A., Chernai A., Zhylova I., Lukashuk A. Wear resistance increase of samples tribomating "Steel 45-cast iron SCH20" with geo modifier KGMF-1. Problemy trybolohii. 2019. № 2. S. 55-60. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-92-2-55-60>.
18. Aulin V., Lyashuk O., Hrynkiv A., Lysenko S., ... & Horkunenko A. Determination of the Rational Composition of the Additive to Oil with the Use of the Katerynivka Friction Geo Modifier. Tribology in Industry. 2019. № 41(4). S. 548-562. <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.04.08>.
19. Tema spetsialna : zvit pro NDR (zakliuchnyi). №DR 0101U001193; inv. № 2927/2. Kharkiv : KhUPS, 2011. 128 s.

20. Ludchenko O.A. Tekhnichne obsluhovuvannya i remont avtomobiliv: Tekhnolohiia: Pidruchnyk. – K.: Vyshcha shk., 2007. – 527 s. ISBN 978-966-642-351-4.
21. Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka: navch. posib. / Kh. T. Drohomiretska [ta in.]; NU "Lvivska Politehnika". – Lviv: Vyd-vo Lvivskoi politehniki, 2012. – 396 s.. – ISBN 978-617-607-260-7.

Надійшла (received): 28.04.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Салтовський Денис Олександрович (Denis Saltovskiy) – Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, молодший науковий співробітник науково-дослідного відділу (аеродромно-технічного забезпечення авіації Повітряних Сил) науково-дослідного управління (розвитку, застосування та забезпечення авіації Повітряних Сил) наукового центру Повітряних Сил, м. Харків, Україна; ORCID: [https:// orcid.org/0000-0003-0248-7804](https://orcid.org/0000-0003-0248-7804); e-mail: saltovskiy17@gmail.com.

Джус Роман Миколайович (Roman Dzhus) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, старший викладач кафедри конструкції та міцності літальних апаратів та двигунів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7079-0912>; e-mail: dromnik1@gmail.com.

Леоненко Олександр Миколайович (Olexander Leonenko) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу (аеродромно-технічного забезпечення авіації Повітряних Сил) науково-дослідного управління (розвитку, застосування та забезпечення авіації Повітряних Сил) наукового центру Повітряних Сил, м. Харків, Україна; ORCID: [https:// orcid.org/0000-0003-1208-796X](https://orcid.org/0000-0003-1208-796X); e-mail: alexander.leonenko73@gmail.com.

Вахнюк Сергій Анатолійович (Sergey Vakhniuk) – Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, старший викладач кафедри аеродромно-технічного забезпечення авіації, м. Харків, Україна; ORCID: [https:// orcid.org/0000-0003-3584-7730](https://orcid.org/0000-0003-3584-7730); e-mail: Vakhniuk.ser@gmail.com.

Кравчук Олександр Дмитрович (Olexander Kravchuk) – начальник науково-дослідного відділу (аеродромно-технічного забезпечення авіації Повітряних Сил) науково-дослідного управління (розвитку, застосування та забезпечення авіації Повітряних Сил) наукового центру Повітряних Сил, м. Харків, Україна; ORCID: [https:// orcid.org/0000-0002-1032-117X](https://orcid.org/0000-0002-1032-117X); e-mail: kravcukoleksandr504@gmail.com.