УДК 621.891 **DOI 10.20535/1813-5420.4.2025.341343**

С.В. Бойченко[1], д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980
І.О. Шкільнюк[1], канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8808-3570
Р.Є. Костюник[2], канд. техн.наук, ORCID 0000-0003-0232-9208
В.О. Коровушкін[1], аспірант, ORCID 0000-0002-7571-7124
К.М. Лутченко[3], ORCID 0009-0001-0480-2591
[1]Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
[2]Державний університет «Київський авіаційний інститут»
[3]10 хіммотологічний Центр МО України

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТИЗНОСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВІАЦІЙНОГО КЕРОСИНУ F-35 В УМОВАХ ТЕРТЯ КОВЗАННЯ

Метою роботи є дослідження процесу зношування модельного вузла тертя ковзання в середовищі традиційного авіаційного палива для порівняльного аналізу зразків палива з дослідними біодобавками та оцінки їх здатності формувати захисні плівки, що знижують силу тертя та інтенсивність зношування. Дослідження проводилося на випробувально-вимірювальному комплексі «НАУ-01», що включає машину тертя АСК-01, яка підтримує постійну геометрію лінійного контакту між зразками зі сталі ШХ15. Як еталонну рідину було використано авіаційний гас F-35 (Jet A-1, NATO F-35). В ході дослідження виконувалось п'ять повторних чотирьохетапних випробувань на комплексі НАУ-01 (АСК-01) при 100 Н і 0,3 м/с; фінішне доведення зразка до Ra ≈ 0,02 μм. В результаті середнє сумарне лінійне зношування = 24,89 μм; середній макс. об'єм ≈ 0,053 мм³; масові втрати контрзразків 0,0001–0,0002 г, плоских 0,0003–0,0012 г; температура контакту до 36,8 °С; виявлено комбінований адгезійно-абразивний характер зносу і вторинні трибофільми. Порівняльний аналіз методів метрології зносу виявив, що профілометричні (лінійні та об'ємні) вимірювання забезпечили надійні дані з відносною похибкою нижче 7%, тоді як гравіметричний метод виявився непридатним через високу межу похибки (≥50%). Статтю підготовлено в рамках грантового проєкту Національного фонду досліджень України «Експериментально-аналітичні засади надійності авіаційної техніки подвійного призначення удосконаленням технології використання авіаційних палив згідно вимог стандартів ASTM і NATO» (проєкт № 0124U004599).

Ключові слова: *авіаційний керосин F-35, трибологія, тертя ковзання, протизносні властивості, профілометрія, об'ємний знос, вторинні структури.*

Вступ. Авіаційне паливо в газотурбінних двигунах виконує подвійну функцію: воно є не лише джерелом енергії, але й основним мастильним матеріалом для високоточних компонентів паливної апаратури, таких як плунжерні насоси, форсунки та регулятори [1]. Недостатня змащувальна здатність палива є однією з головних причин підвищеного зносу та передчасного виходу з ладу прецизійних пар тертя, де паливо є єдиним мастилом [2]. З огляду на постійне зростання вимог до паливної ефективності та надійності авіаційних двигунів, розробка передових методів для точної характеристики протизносних властивостей палива набуває критичного значення, особливо в контексті впровадження нових рецептур палива, включаючи екологічно сталі альтернативи (Sustainable Aviation Fuels – SAFs) [3].

Стандартні методи трибологічної оцінки включають [4,5]:

1. Чотирикульковий тест (ASTM D4172, D2266, D2783), що є одним з основних для оцінки протизносних властивостей та характеристик за умов екстремального тиску (ЕР). Його принцип полягає в обертанні однієї сталевої кульки по трьох нерухомих, що створює висококонцентровані точкові контакти. Основними вимірюваними параметрами є діаметр плями зносу, індекс задиру (LWI) та навантаження зварювання (weld point). Хоча цей тест є ефективним для скринінгу, його геометрія точкового контакту не завжди репрезентативна для всіх вузлів тертя в паливних системах.

2. Тест «Штифт-на-диску» (Pin-on-Disc, ASTM G99) – універсальний метод, де штифт ковзає по обертовому диску при заданому навантаженні, швидкості й шляху. Вимірюють коефіцієнт тертя, ширину/глибину сліду, лінійний та об'ємний знос і масові втрати; простий для скринінгу, але геометрія контакту може не відтворювати складні інженерні вузли.

3. Коливне/рециркувальне ковзання (Reciprocating sliding, ASTM G133), що використовується для моделювання циклічних режимів тертя. Його принцип полягає у зворотно-поступальному русі контактуючих поверхонь по визначеному ходу під дією навантаження. Основними вимірюваними параметрами є коефіцієнт тертя в динаміці циклів, глибина та форма зносної доріжки, а також накопичувальний об'ємний знос. Тест дозволяє достовірно оцінити поведінку матеріалів та мастильних середовищ у поршневих, клапанних і ущільнювальних вузлах, але потребує більш тривалих випробувань.

Хоча стандартні методи є незамінними, існує потреба в методиках, що забезпечують Вибір даного способу випробувань обумовлений тим, що він має ряд переваг для дослідження ВС, таких як:

– Контрольована геометрія контакту;

– Можливість вимірювання параметрів (навантаження, швидкість ковзання, температура випробувального та навколишнього середовища), що дозволяє досліджувати їх вплив на формування ВС;

– Зручність проведення аналізу складу та будову утворених ВС.

Для розроблення методики трибологічних випробувань та порівняльної оцінки ефективності дослідних зразків авіаційного палива з біодобавками в якості «еталонного» зразка палива вибрано авіаційний керосин (F-35). Забезпечення можливості проведення коректних повторних випробувань в однакових зовнішніх умовах, на першому етапі виконувалось шляхом проведення підготовчих робіт щодо виготовлення стальних випробувальних зразків модельного вузла тертя АСК-01 та фінішного доведення їх робочих поверхонь на спеціальному обладнанні за відповідним алгоритмом

Мета та завдання: дослідження процесу зношування модельного вузла тертя ковзання в середовищі дослідного традиційного авіаційного палива для порівняльного аналізу результатів випробувань з результатами протизносних властивостей суміші палива з дослідними зразками біодобавок та оцінки їх здатності утворювати на робочих поверхнях ефективні захисні плівки, що сприяють зниженню сили тертя й інтенсивності зношування.

Матеріал і результати досліджень

Для розроблення методики трибологічних випробувань та порівняльної оцінки ефективності дослідних зразків авіаційного палива з біодобавками в якості «еталонного» зразка палива вибрано авіаційний керосин (F-35). Забезпечення можливості проведення коректних повторних випробувань в однакових зовнішніх умовах, на першому етапі виконувалось шляхом проведення підготовчих робіт щодо виготовлення стальних випробувальних зразків модельного вузла тертя АСК-01 та фінішного доведення їх робочих поверхонь на спеціальному обладнанні за відповідним алгоритмом (рис.1).

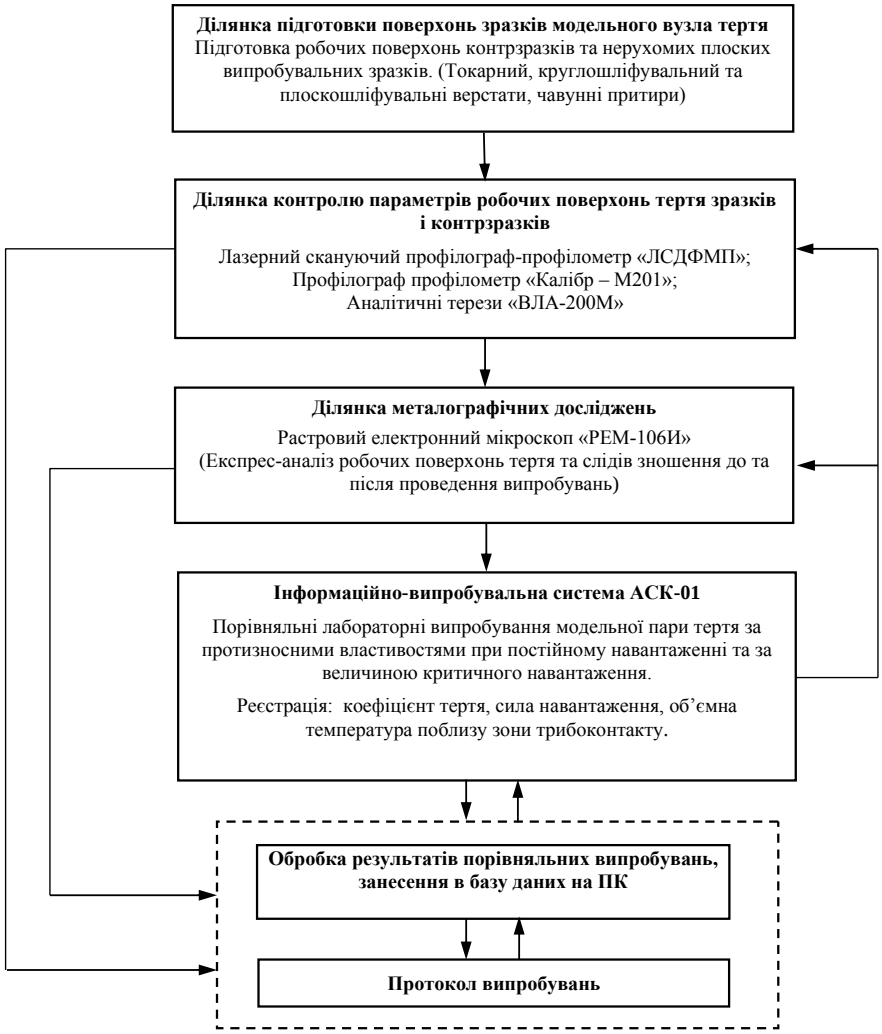


Рисунок 1 – *Алгоритм проведення порівняльних випробувань дослідних палив*

Початкова підготовка робочих поверхонь модельних нерухомих плоских зразків проводилась на плоскошліфувальному верстаті. Подальше фінішне доведення кожного з цих зразків виконувалось в ручному режимі із використанням спеціальної оправки на чавунних притирах та алмазних паст, починаючи від 40/28 і поступово переходячи до 1/0, до отримання відповідної робочої шорсткості поверхонь Ra 0,02.

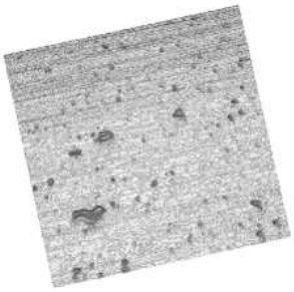
В якості випробувальних контрзразків спеціально виготовлені зі сталі ШХ15 ролики зовнішнім діаметром 33 мм і товщиною 3 мм, ідентичні за структурою та твердістю (HRC 58-63) матеріалу. Контрзразки виготовлювались шляхом шліфування робочої поверхні зразків, зібраних в касету (рис. 2), на круглошліфувальному верстаті з наступним доведенням по утворюючої циліндр з використанням вищенаведених алмазних паст у тій же послідовності та зміною спеціальних притирів до шорсткості Ra 0,02. Контроль шорсткості робочих поверхонь контрзразків та нерухомих зразків проводиться на лазерному скануючому мікроскопі профілометрі ЛСДФМП. Така висока ступень доведення робочих поверхонь дозволяє мінімізувати можливість мікрорізання з однієї сторони, а з другої сторони багаторазово підвищує ймовірність адгезійного зношування шляхом мікросхоплювання утворених ВС в граничних шарах змазки, що неминуче виникає при граничному терті [6].

а) б)

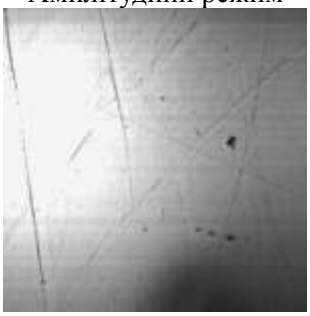
Рисунок 2 – *а) пара тертя; б) 25 контрзразків зібрані в касету;*
1 – контрзразок; 2 - плоский нерухомий зразок.

На (рис.3) наведено результати досліджень робочих поверхонь плоских нерухомих зразків, що проведені на лазерному мікроскопі «ЛСДФМП» після їх фінішного доведення алмазними пастами на чавунних притирах перед виконанням серії досліджень.

3D вигляд



Амплітудний режим



Параметри шорсткості

Parameters	Number of measurements	Average value	Standard deviation	Confidence limits of the parameter value
Ra (μ)	512	4.776 10^{-3}	2.934 10^{-3} (61.22%)	5.744 10^{-3} (120.27%
Rz (μ)	512	0.021	0.015 (71.94%)	0.030 (141.33%)
Rmax (μ)	512	0.033	0.025 (75.39%)	0.048 (148.10%)
Rvk (μ)	512	0.011	0.015 (134.96%)	0.030 (265.19%)
Rk (μ)	512	8.787 10^{-3}	4.781 10^{-3} (53.60%)	9.236 10^{-3} (105.10%
Rpk (μ)	512	7.795 10^{-3}	6.416 10^{-3} (82.30%)	0.013 (161.69%)
Sm (μ)	512	38.670	25.272 (65.34%)	49.649 (128.39%)

Опорна крива профілю шорсткої поверхні

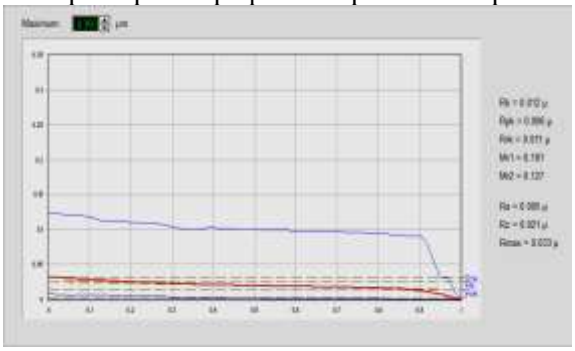


Рисунок 3 – *Результати вимірювання шорсткості робочих поверхонь зразків (ШХ 15)*

На відміну від контактного профілометру прилад дозволяє отримати 512 профілограм, за якими автоматично будується крива та невизначеність за профілем (від мінімумів до максимумів). В процесі виконання модернізації ЛСДФМП в програму був вшитий модуль вимірювань параметрів шорсткості за ISO на основі кривої Аббота-Файерстоуна. Опорна крива профілю (ОКП) шорсткої поверхні запропонована як узагальнена характеристика якості поверхонь деталей після механічної обробки, досить проста та зручна для практичного застосування.

Після проведення лабораторних триботехнічних випробувань «еталонного» палива на протизносні властивості отримані результати шляхом вимірювання кожного сліду зносу на робочій поверхні нерухомого зразка стандартними методами профілографії, мікроскопії та математичних розрахунків заносились в таблиці (1-4) у вигляді середнього значення лінійного зношення, втрати маси та об'єму зношеного матеріалу.

Динаміка зношування пари тертя визначалась побудовою графіків для всієї серії випробувань дослідного «еталонного» зразка палива (№1, №2, №3, №4 та №5), на осі абсцис якого відкладався шлях тертя, а на осі ординат – глибина чи об'єм зношеного матеріалу (рис. 4 - 6).

Оцінку зносу робочих поверхонь плоских зразків робили за втратою маси випробувальних зразків для кожного дослідного зразка палив (масовий знос).

Таблиця 1 - Результати вимірювання лінійного зносу (I, мкм) нерухомого зразка

№ з/п	Етапи тертя у відповідності методики випробувань			
	1 етап тертя – 270 м	2 етап тертя –270 м	3 етап тертя – 270 м	4 етап тертя – 2430 м
1	$\frac{3,5+3,5+4,0}{3} = 3,67$	$\frac{4,0+3,0+3,75}{3} = 3,58$	$\frac{4,0+3,75+3,25}{3} = 3,67$	$\frac{9,0+13,0+17,0}{3} = 13,0$
2	$\frac{3,5+6,75+7,5}{3} = 5,92$	$\frac{2,5+3,0+3,75}{3} = 3,08$	$\frac{2,25+3,5+3,5}{3} = 3,08$	$\frac{15,0+13,0+12,0}{3} = 13,3$
3	$\frac{3,2+4,2+3,8}{3} = 3,73$	$\frac{4,0+5,2+3,2}{3} = 4,13$	$\frac{3,25+4,2+4,75}{3} = 4,06$	$\frac{13,0+16,2+12,0}{3} = 13,73$
4	$(4,75+2,45+3,0)/3 = 3,4$	$(3,5+3,75+2,75)/3 = 3,33$	$(3,75+4,5+4,0)/3 = 4,08$	$\frac{12,75+13,0+12,0}{3} = 13,58$
5	$\frac{4,25+4,75+3,25}{3} = 4,08$	$\frac{3,75+4,75+4,0}{3} = 4,16$	$\frac{4,08+3,25+4,25}{3} = 3,86$	$\frac{11,25+14,5+13,25}{3} = 13,0$
$I_{сер}$	**4,16**	**3,66**	**3,75**	**13,32**

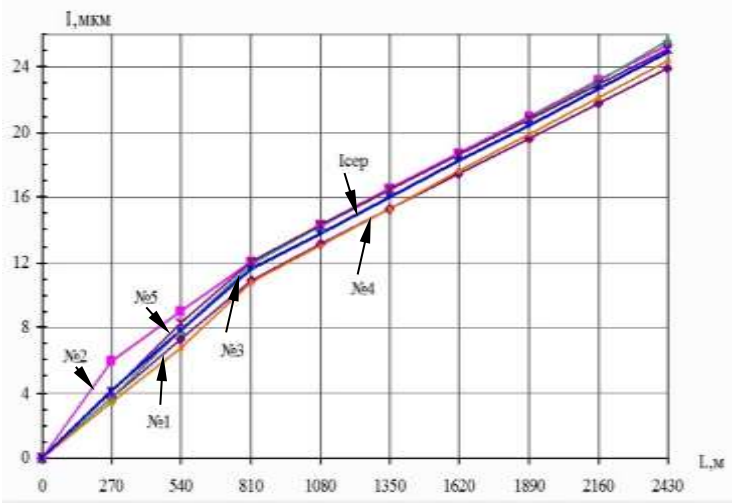


Рисунок 4 – *Серія (п'ять) повторних експериментальних випробувань дослідного авіаційного палива F-35*

Вимірювання маси штатних попередньо підготовлених контрзразків і плоских нерухомих зразків, до та після проведення випробувань, проводилось на аналітичних терезах моделі ВЛА-200г-М з точністю 0,0001 г. Результати зважування наведено у (табл. 2 - 3) та рисунках 5, 6.

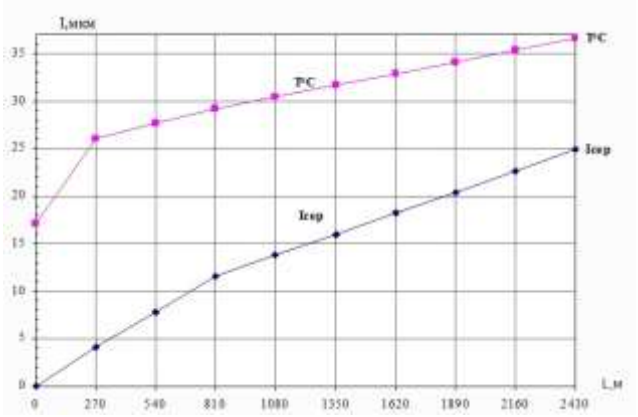


Рисунок 5 – *Залежність зношення плоского нерухомого зразка від шляху тертя*

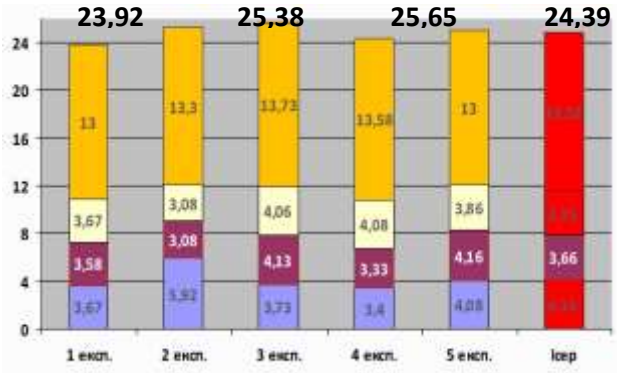


Рисунок 6 – *Сумарне значення лінійного зношення нерухомого зразка для кожного з п'яти повторних порівняльних випробувань палива при рівних зовнішніх умовах*

Таблиця 2 - Результати зважування маси контрзразків

Контрзразки	Номер контрзразка (ШХ15) у відповідності до типу палива				
	№1	№2	№3	№4	№5
	Маса, г.				
До випробувань	10,6867	10,6858	10,6864	10,6862	10,6869
Після випробувань	10,6866	10,6857	10,6862	10,6861	10,6868
Маса зношеного Матеріалу	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001

Таблиця 3 - Результати зважування маси плоских нерухомих зразків

Плоскі зразки	Номер плоского зразка у відповідності до типу палива				
	№1	№2	№3	№4	№5
	Маса, г.				
До випробувань	25,1683	25,1693	25,1700	25,1683	25,1696
Після випробувань	25,1680	25,1684	25,1688	25,1677	25,1692
Маса зношеного Матеріалу	0,0003	0,0009	0,0012	0,0006	0,0004

В процесі роботи будь-яка реальна трибосистема проходить через такі стадії роботи, як припрацювання, знос що стабілізується у часі та катастрофічне зношування деталей [7]. Так і в даному випадку, із графіків (Рис. 4, 5 та 6), видно, що на перших етапах роботи при терті в умовах змащення (від 0 до 810 м пройденого шляху), при нестаціонарному режиму роботи, відбувалось формування робочих поверхонь, котрі взаємодіяли з різною швидкістю зношування. Стабілізація поточних параметрів (постійна швидкість зношування) на наступних етапах свідчила про початок виходу дослідної пари тертя на стаціонарний режим роботи. Поступове підвищення швидкості зношування зразків у часі вказує на

експлуатаційні властивості відповідного дослідного змащувального середовища. Подальша тривала робота зразка дослідного палива з більш низькими трибологічними властивостями наймовірніше спричинить швидше схоплення та руйнування поверхонь тертя, ніж у середовищі «еталонного» авіаційного палива F-35, що неминуче призведе до катастрофічнішого зношування робочих деталей модельного вузла тертя [8].

Фрактографічний експрес-аналіз руйнування робочої поверхні нерухомого зразка від тертя ковзання контрзразком (ШХ15) в умовах змащення середовищем авіаційного керосину проводився на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И. Штатне програмне забезпечення котрого дозволило визначити межі слідів зношення та шляхом маркування їх габаритних розмірів заміряти реальну довжину і ширину. Для прикладу, на рис. 6 наведено вимірювання слідів зношення робочої поверхні зразка після проведення повторного порівняльного експерименту №1, трибологічних лабораторних випробувань дослідного авіаційного палива F-35. За результатами експериментальних визначень та вимірювань реального радіусу контрзразків (R=16,5мм) було розраховано параметри сегмента та його площу (переріз або профіль сліду зносу) прийнявши бічну сторону визначеного прямокутника за довжину хорди кола (контрзразка).

Підставивши розрахункове значення площі сегмента $S_{n.n}$ слідів зношення матеріалу та виміряної ширини доріжок тертя $L_{n.n}$ в формулу (1) отримано об'єм зношеного матеріалу нерухомих плоских зразків кожного випробування, після чого результати заносились у таблицю 4 з урахуванням чотирьох-етапної методики випробувань.

$$V_{n.n} = S_{n.n} \times L_{n.n} \quad (1)$$

За результатами експериментальних вимірювань та математичних розрахунків визначали динаміку зношування пари тертя побудовою графіка, де на осі абсцис відкладався шлях тертя, а на осі ординат – розрахункові масу (рис. 7) та об'єм зношеного матеріалу (рис.8).

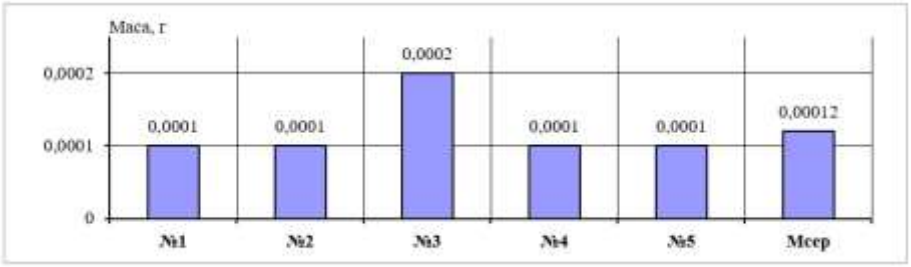


Рисунок 7 – *Втрата маси контрзразка при терті ковзання по плоскому нерухомому зразку для кожного з п'яти повторних порівняльних випробувань*

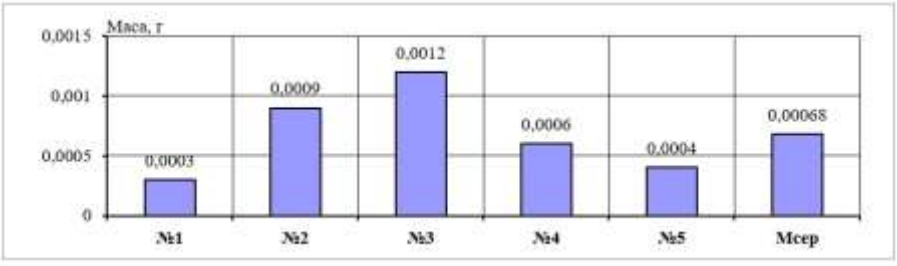


Рисунок 8 - *Втрата маси плоского нерухомого зразка при терті ковзання кожного з п'яти повторних порівняльних випробувань*

Визначено достовірність проведених випробувань за результатами вимірювань середнього значення максимального об'єму зношеного матеріалу модельної пари тертя п'яти повторних експериментів шляхом розрахунку відносної та абсолютної похибки.

Жовто-коричневий колір продуктів зношування зразків пари тертя при дослідженні середовища палива свідчить про помірний рівень нагріву в зоні їх контактування [9]. Для більш точно визначення причини та складу продуктів зношування, необхідно провести додаткові дослідження, такі як: спектральний і рентгено-фазовий аналіз та мікроскопічні дослідження [10]. Це допоможе визначити елементний склад, ідентифікувати кристалічні фази продуктів зношування та дозволить оцінити морфологію мікрочастинок і характер зносу поверхонь тертя.

Таблиця 4 - Результати розрахунку об’єму зношеного матеріалу доріжок тертя

№ сліду / Назва зразка	1 слід	2 слід	3 слід	4 слід
№1	$V_{1.1}$=0,00501147мм^3	$V_{1.2}$=0,004489158мм^3	$V_{1.3}$=0,004511272мм^3	$V_{1.4}$=0,034712922мм^3
№2	$V_{2.1}$=0,00474949мм^3	$V_{2.2}$=0,005131263мм^3	$V_{2.3}$=0,004496655мм^3	$V_{2.4}$=0,042535833мм^3
№3	$V_{3.1}$=0,00426512мм^3	$V_{3.2}$=0,0053112316мм^3	$V_{3.3}$=0,0052335577мм^3	$V_{3.4}$=0,045690122мм^3
№4	$V_{4.1}$=0,00421234мм^3	$V_{4.2}$=0,004456789мм^3	$V_{4.3}$=0,0045001122мм^3	$V_{4.4}$=0,036789221мм^3
№5	$V_{5.1}$=0,00500112мм^3	$V_{5.2}$=0,0045443278мм^3	$V_{5.3}$=0,0046001265мм^3	$V_{5.4}$=0,035679988мм^3

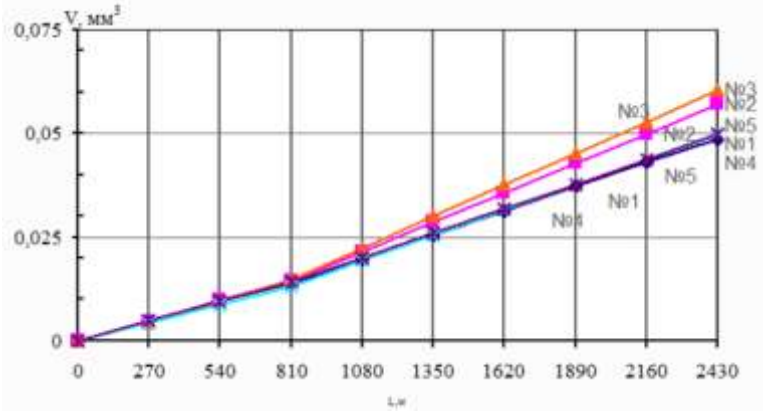


Рисунок 9 – *Залежність зношення плоского нерухомого зразка від шляху тертя*

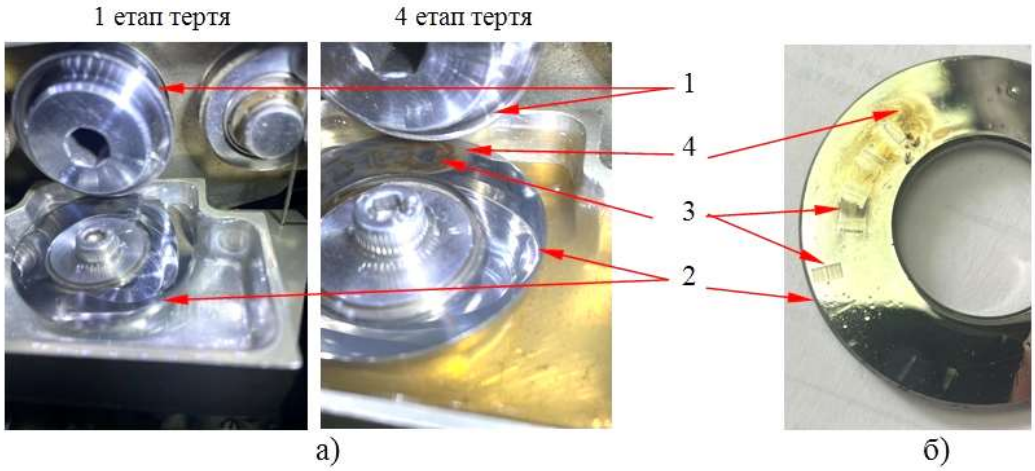


Рисунок 10 – *Зображення випробувального вузла тертя ковзання: а) модельний вузол тертя ковзання АСК - 01; б) робоча поверхня плоского нерухомого зразка з продуктами зношення; 1 – контрзразок; 2 – плоский зразок ; 3 – сліди зносу; 4 – продукти зношування*

Висновок

1. Результати дослідження свідчать про те, що трибологічний випробувально-вимірювальний комплекс «НАУ-01» та розроблена експрес методика випробувань дозволяє забезпечити якісну та коректну оцінку протизносних і антифрикційних характеристик паливо-мастильних матеріалів (авіаційний керосин F-35) та присадок до них в умовах лабораторного експерименту з урахуванням властивостей ВС.

Завдяки серії повторних випробувань дослідного зразка палива F-35 та експериментальній оцінці його впливу на трибологічну поведінку робочих поверхонь модельного вузла тертя АСК-01 було охарактеризовано його трибологічні властивості, що в подальшому можуть слугувати «еталоном» для визначення ефективності експериментальних протизносних присадок та розроблюваних біодобавок.

2. За результатами порівняльних випробувань було визначено, що середнє значення загального лінійного зносу робочої поверхні нерухомого зразка в умовах тертя ковзання (сталь ШХ15 по ШХ15) у середовищі дослідного зразка «еталонного» авіагасу досягло 24,89 мкм, при цьому його середня

температура за весь період випробувань підвищилась до максимального значення 36,8оС, при рівних зовнішніх умовах випробувань.

3. Відносна похибка виконання досліджень за результатами вимірювання лінійного зношування не перевищувала 5% (розрахункове значення X = 3,574 % ± 0,89).

4. Оцінка зношування робочих поверхонь плоских зразків за втратою маси (масовий знос) для кожного повторного експерименту, що проводилась до та після випробувань на аналітичних терезах (табл. 2-3, рис. 6-7), незважаючи на достатньо велику точність (0,0001 г.) та відтворюваність, може виявитись недостатньо інформативною для порівняння більш ефективних рідин у подальших дослідженнях. Це зумовлено тим, що вага контрзразка становить 10,0 – 15,0 г., а дослідного нерухомого зразка - 30,0 – 35,0 г. за таких мас похибка вимірювання втрати маси внаслідок зношування сягає ≥ 50%.

5. Виконано повторні вимірювання ряду результатів п’яти повторних випробувань за об’ємом зношеного матеріалу стальних зразків пари тертя, де максимальне середнє значення складало Vсер = 0,053184424 мм3. Відносна похибка експерименту складає ≤ 7%, що є сумарною похибок засобів вимірювань і похибок методів та прийомів їх використання.

S.V. Boichenko[1], DSc (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980
I.O. Shkilnyuk[1], Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8808-3570
R.E. Kostyunik[2], Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-0232-9208
V.O. Korovushkin[1], PhD student, ORCID 0000-0002-7571-7124
K.M. Lutchenko[3], ORCID 0009-0001-0480-2591
[1]National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
[2]State University “Kyiv Aviation Institute”
[3]10 chemmotological center of the Ministry of defense of Ukraine

RESEARCH ON THE ANTI-WEAR PROPERTIES OF F-35 AVIATION KEROSENE UNDER SLIDING FRICTION CONDITIONS

The aim is to investigate the wear process of a model sliding contact assembly in the environment of a conventional aviation fuel for comparative analysis with fuel mixtures containing experimental bio-additives and to assess their ability to form protective films that reduce friction force and wear intensity. Methodology: Five repeated four-stage sliding tests were conducted on the NAU-01 complex using the ACK-01 tribometer at axial load 100 N and sliding speed 0.3 m/s. Specimens were ShKh15 steel (HRC 58–63) finished to Ra ≈ 0.02 μm. Measured parameters included profilometric linear wear, gravimetric mass loss (analytical balance resolution 0.0001 g), worn volume computed from segment geometry, and wear-track morphology by SEM. Results: Mean total linear wear was 24.89 μm; maximum mean worn volume ≈ 0.053 mm³. Gravimetric losses were 0.0001–0.0002 g for counter-samples and 0.0003–0.0012 g for flat specimens, indicating limited sensitivity of mass measurements. Bulk contact temperature rose to 36.8 °C. SEM showed mixed adhesive–abrasive mechanisms, micro-adhesion, plastic deformation and secondary tribofilm formation. Measurement uncertainties: linear ≤5%; volumetric ≤7%; gravimetric relative errors may exceed 50% at low wear. Conclusions: The four-stage protocol on NAU-01 yields reproducible, sensitive tribological indicators suitable as a reference baseline for evaluating bio-additives. Profilometry and volumetric assessments are recommended as primary metrics for fine differentiation; gravimetric data should be interpreted cautiously. Complementary EDS and XRD analyses are recommended to identify chemical and phase composition of wear products and tribofilms. The obtained reference data may be used to compare effects of experimental bio-additives under identical conditions and to guide selection of promising formulations for engine-scale testing. This article was prepared as part of a grant project of the National Research Fund of Ukraine, “Experimental and analytical foundations of the reliability of dual-use aviation equipment through the improvement of aviation fuel technology in accordance with ASTM and NATO standards” (project No. 0124U004599).

Keywords: *F-35 aviation kerosene, tribology, sliding friction, anti-wear properties, profilometry, volumetric wear, secondary structures.*

References

1. I. P. Kondor, “Sustainable fuels for gas turbines—a review”, *Sustainability*, т. 17, № 13, с. 6166, jul. 2025. Дата звернення: 18 серп. 2025. https://doi.org/10.3390/su17136166.

2. “Alternative fuels data center: Sustainable aviation fuel”. Alternative Fuels Data Center: The go-to resource for advanced transportation fuels and technologies. Date of access: 18 aug. 2025. [Online]. Available at: https://afdc.energy.gov/fuels/sustainable-aviation-fuel#:~:text=Sustainable%20aviation%20fuel%20(SAF)%20is,in%20lifecycle%20greenhouse%20gas%20emissions.

3. Boichenko, S., Shkilniuk, I., Iakovlieva, A. (2024). Evolution of the Quality of Jet Fuels: Ukrainian Comparative Review from Traditional to Sustainable Aviation Fuels. In: Boichenko, S., Zaporozhets, A., Shkilniuk, I., Yakovlieva, A. (eds) Modern Technologies in Energy and Transport II. Studies in Systems, Decision and Control, vol 574. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76650-3_13.

4. M. Polajnar, L. Čoga, S. K. Sharma та M. Kalin, “Laboratory tribological screening test methodologies to evaluate the performance of metalworking lubricants for punching stamping”, *Tribol. Int.*, т. 211, с. 110815, nov. 2025. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110815.

5. Iakovlieva, A., Boichenko, S., Vovk, O., Kazimierz, L., Kuszewski, H., & Jakubowski, M. (2015). Experimental study on antiwear properties for blends of jet fuel with bio-components derived from rapeseed oil. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(8(77), 20–28. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.51682.

6. D. P. Markov, “Adhesion at friction and wear”, *Friction*, april. 2022. https://doi.org/10.1007/s40544-021-0564-7.

7. V. A. Vojtov and A. V. Voitov, “Substantiation of a rational program for the running-in of tribosystems”, Problems Tribol., т. 28, № 3/109, с. 6–17, sept. 2023. https://doi.org/10.31891/2079-1372-2023-109-3-6-17.

8. Yakovlieva, A., Trofimov, I., Boichenko, S., Kuszewski, H., Lejda, K. (2020). Anti-wear Properties of Jet Fuel with Camelina Oils Bio-Additives. In: Gopalakrishnan, K., Prentkovskis, O., Jackiva, I., Junevičius, R. (eds) TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA 2019. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38666-5_63.

9. S. Domínguez García, M. A. Espinosa-Medina, J. A. Flores Tapia, R. Maya-Yescas, M. A. Pérez-Méndez та B. Castro-Cedeño, “Study of tribological behavior from friction fluctuations in pin-on-disk tests”, *J. Tribol.*, с. 1–14, march. 2025. https://doi.org/10.1115/1.4068221.

10. M. Basak, M. L. Rahman, M. F. Ahmed, B. Biswas та N. Sharmin, “The use of X-ray diffraction peak profile analysis to determine the structural parameters of cobalt ferrite nanoparticles using Debye-Scherrer, Williamson-Hall, Halder-Wagner and Size-strain plot: Different precipitating agent approach”, *J. Alloys Compounds*, т. 895, с. 162694, feb. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162694.

Надійшла: 15.09.2025
Received: 15.09.2025