

Дмитриченко М.Ф.,\*  
 Довгаль А.Г.,\*\*  
 Білякович О.М.,\*\*  
 Приймак Л.Б.,\*\*  
 Сидоренко О.Ю.,\*\*  
 Туриця Ю.О.\*

\* Національний транспортний університет,  
 м. Київ, Україна,

\*\* Національний авіаційний університет,  
 м. Київ, Україна

E-mail: [dmitrichenko@ntu.edu.ua](mailto:dmitrichenko@ntu.edu.ua)

## МОДЕЛЮВАННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВИХ УСТАНОВОК АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ

УДК 621.891:631.31

На основі аналізу умов роботи сполучення поршнева канавка – компресійне кільце було проведено планування повно факторного експерименту для двох факторів, що найбільше впливають на триботехнічні характеристики сполучення та були випробувані зразки алюмінієвого сплаву, як з захисними покриттями так і без них. На основі експериментальних даних було проведено побудова поліноміальної регресійної моделі другого порядку для триботехнічних характеристик цих покриттів та отримані графічні залежності, що дозволяють передбачити триботехнічну поведінку даних покриттів в будь-яких крапках факторного простору.

**Ключові слова:** авіаційна наземна техніка, силова установка, захисне покриття, триботехнічні характеристики, математична модель, поліном.

### Вступ

Поршні двигунів, працюють в дуже важких умовах. Температура вихлопних газів в бензинових двигунах може досягати 950 - 980 °С. Тиск в циліндрі в момент робочого ходу досягає 100 кг/см<sup>2</sup>. Зокрема канавки компресійних кілець працюють в умовах середніх температур від 300 до 170 °С. Проте для ливарних алюмінієвих сплавів, такі температури вже близькі до поверхневої пластифікації (силумін Al25 плавиться вже при температурі 510 °С), тому проблема першої компресійної канавки особливо актуальна для дизельних двигунів, де компресія визначає умови запалювання суміші.

Проблема зміцнення поршнів двигунів триває вже більше ста років з моменту винайдення та серійного застосування в умовах народного господарства перших двигунів. Невщуає цікавість до цього питання і в наш час. Зокрема в роботі [1] було проведено фундаментальне дослідження застосування для зміцнення алюмінієвих деталей авіаційної техніки електроіскровими покриттями та досліджена можливість застосування дискретних електроіскрових покриттів та їх вплив на зносостійкість. Автори статті [2] досліджували вирішення проблематики першої канавки шляхом застосування електропромислової обробки та було запропоновано цей вид обробки для всього складу деталей двигуна. В результаті було розроблено ряд експериментальних установок, що може бути використаним для серійного виробництва.

Дослідник роботи [3] пропонує використовувати різноманітний розподіл кремнію в заготовці поршню саме під час відливання силуміну, що дозволить створити зони значно міцніші щодо термічних навантажень в ділянці майбутніх компресійних кілець, що працюватимуть в умовах підвищених температур. Це дуже цікавий підхід, але ускладнює процес виготовлення поршнів, та не має відповіді, як діяти, якщо відбудеться дифузійна гомогенізація складу в процесі експлуатації деталі.

Авторський колектив публікації [4] провадив фундаментальне дослідження застосування вставок в проблемні зони стосовно термічної міцності та зносостійкості. Вставки пропонувалося виготовляти з алюмінієвого сплаву зміцненого волокнами з оксидів алюмінію, кремнію та заліза в різній концентрації. Дослідники здобули суттєвих результатів високотемпературної зносостійкості порівняної з чавуном, з якого інколи виготовляються компресійні кільця.

Продовжуються дослідження в царині застосування термостійких вставок в першу канавку компресійного кільця. Зокрема в роботі [5] науковці вирішували відому проблему адгезії вставки до тіла поршня. Зокрема було встановлено, що основною причиною адгезійного відшарування вставки є накопичення на межі пластівчастого графіту. Тому для уникнення відшарування пропонується модифікувати структуру силуміну в зоні вставки.

В роботі [6] визначено, що основною технологією зміцнення та відновлення поршневих канавок є електроіскрове легування, що є дуже ефективним та перспективним для алюмінієвих сплавів, так як не вчиняє суттєвої термічної дії на легкоплавкий метал (а температура плавлення деяких силумінів складає 510 °С, а суттєвої поверхневої пластифікації уже при 300 °С). та не створює суттєвої динамічної дії на підкладку.

В публікації [7], використовуючи аналітичні та емпіричні методи, автор визначив величини максимального зносу сполучення канавка-кільце, коли воно цілком виходить з ладу в 0,4 мм, порівняно з вихідним 0,08 мм та запропонував формули для розрахунку довговічності сполучення від навантаження, температури та швидкості тертя, визначивши їх як основні фактори, що впливають на зносостійкість сполучення.

Авторський колектив вже проводив моделювання зносостійкості алюмінієвих сплавів з електроіскровими покриттями для кількості факторів  $k = 3$ , та в умовах що моделюють роботу спідниці поршня за умов браку мастильної дії [8]. Випробування в такому разі проводилися в умовах лінійного тертя ковзання в діапазоні швидкостей та температур в яких працює спідниця поршня дизельного двигуна на машині лінійного тертя ПВК-3 з підігрівом зони контакту.

Отже з посеред усіх технологічних заходів вирішення проблеми першої канавки поршня ДВЗ важливо визначити такі заходи, що були б дешеві при збереженні ефективності, не вимагали складного та витратного обладнання та були доступні в умовах експлуатаційних підприємств в межах чергових профілактичних робіт по двигуну. А це вимагає всеохоплюючу інформацію про фізичні процеси нанесення та зношування захисних покриттів у всіх крапках факторного простору. Все вище викладене дозволяє сформулювати мету дослідження.

### **Актуальність проблеми**

З метою зменшення витрат на проведення експериментальних робіт та всеохоплюючого дослідження впливу найбільш суттєвих факторів на оптимізаційні функції відгуку застосовується планування експерименту у факторному просторі з подальшою побудовою математичної моделі функції відгуку у факторному просторі. Такі моделі бувають поліноміальні, тригонометричні, показникові, ступеневі та логарифмічні. Найбільш розповсюджені поліноміальні моделі, - виду поліному будь якого порядку, але не вище 3-го, так як підвищення ступеня поліному суттєво на точність моделі не впливає, а лише збільшує обсяг обчислень. Побудова графічних залежностей згідно цих моделей дає змогу спрогнозувати поведінку функції відгуку в будь-якій комбінації факторів у факторному просторі без проведення експериментальних даних, звичайно якщо модель відповідає вимогам відтворюваності та адекватності за статичними критеріями.

Основним агрегатом силової установки сучасної авіаційної наземної техніки є двигун внутрішнього згорання. Найбільш навантаженим вузлом двигунів внутрішнього згорання являється циліндрово-поршнева група. Поршні двигунів виготовляються з високоміцних алюмінієвих ливарних сплавів, що втричі легше сталі, але водночас з цим постає питання локального підвищення зносостійкості цих сплавів, особливо в умовах високих температур. Зносостійкість поршнів прямо впливає не лише на ресурс, а і на компресію циліндра, а отже і паливну ефективність двигуна. Отже підвищення паливної ефективності та продовження ресурсу енергетичних установок авіаційної наземної техніки значно покращує працездатність обладнання та економічну ефективність експлуатації окремих видів авіаційної наземної техніки. Це можливо досягти за допомогою використання захисних покриттів. Важливим аспектом усіх технологічних заходів являється їх низька вартість, можливість застосування в умовах експлуатаційних підприємств та ефективність.

### **Мета і постановка задачі**

Метою роботи є побудова математичних поліноміальних моделей триботехнічних характеристик захисних покриттів для деталей циліндрово-поршневої групи авіаційної наземної техніки, що дозволять спрогнозувати технологічні режими зміцнення, триботехнічну поведінку сполучень, залишковий ресурс та зміну експлуатаційних характеристик двигунів спецмашин.

### **Обґрунтування застосування і опис обраної авторами методики**

Для отримання експериментальних результатів використовували зразки з алюмінієвого сплаву Ал25 (ГОСТ 1583-93) циліндричної форми  $\varnothing 20 \times 20$  мм наносили електроіскрові покриття електродами з міді М1 (ГОСТ 1535-91) у вигляді дротика.

Електроіскрові покриття наносили на установці «Елітрон-22» з вібратором встановленому у пістолеті з вимикачем. Режимі обробки – струм короткого замкнення –  $I_{кз} = 80 \dots 100$  А, робочий струм  $I_p = 10 \dots 30$  А, частота імпульсів 50 Гц. Діаметр легованих ділянок 1 ... 2 мм, глибина - 0,3 ... 0,7 мм, висота над вихідною поверхнею 0,4 ... 0,7 мм.

Дослідження процесу зношування електроіскрових покриттів, в умовах тертя коливання за високих температур в умовах фреттинг процесу проводили на лабораторній торцевій машині тертя МФК-1 з

індукційним підігрівом зони тертя, конструкція якої дозволяє визначати в процесі експерименту коефіцієнт тертя.

Знос зразка  $h_j$  визначали згідно стандарту ГОСТ 2789–73, де зношування зразка визначалось за допомогою профілографування. Оскільки метод контактного профілографування морально та технічно застарів та останнім часом дійсно задовільної точності та вірогідності набули безконтактні методи профілографування, то лінійний знос  $h_j$  канавок тертя визначали інтегральним методом на лазерному скануючому мікроскопі ЛСМ. Далі по лінійному зносу визначали інтенсивність зношування за формулою:

$$I_h = \frac{\sum_j^k h_j}{2ANk} \text{ [мкм/км]}, \quad (1)$$

де  $A$  – амплітуда коливань, мкм;

$N$  – кількість циклів випробувань;

$k$  – кількість випробуваних зразків.

Випробування проводили за частот коливання 30 Гц, що відповідає середнім частотам обертання колінчастого валу, що вчиняє циклічну дію на спряження «канавка-кільце» для частот обертання колінчастого 1800 об/хв відповідно до номінального режиму роботи двигуна і навантажень у 1000 Н, що відповідає навантаженню на контактну ділянку тертя у 20 МПа, так як саме така максимальна величина тиску на контактну ділянку системи «канавка-кільце» [7], амплітуда складала 10 мкм, такі умови моделюють роботу контактної зони системи «канавка-кільце». В якості контр тіла (рухомого зразка) використовували сталевий зразок 40Х9С2 (HRC 75-80), виходячи з наступних міркувань, компресійні кільця двигуна здебільш виготовляються з сірого чавуну марок СЧ але для підвищення теплостійкості до 350 - 400 °С в нього додавали легуючі присадки Cr, Ni, Mo, Cu, W. До того ж поверхня чавунних компресійних кілець ДВЗ вкривається електролітичним пористим хромовим покриттям товщиною 0,1-0,2 мм. Тож такий склад легованої хромом сталі якнайкраще моделює склад та властивості чавунного вкритого хромом компресійного кільця. Нагрівальний елемент дозволяв підвищувати температуру до 400 °С, а саме використовувалися три режими 50 °С, 150 °С, та 300 °С, для дослідження впливу температури та моделювання окремо роботи першого, другого та третього компресійного кільця. В процесі експерименту на кожне значення випробовувалось 3 - 5 зразків, а остаточні параметри визначались як середні значення з отриманих даних.

### Математичні методи обробки результатів досліджень

Основною складністю при розгляді процесів тертя і руйнування матеріалів являється наявність великої кількості керованих, контрольованих і неконтрольованих факторів, багато із яких мають дуже складні кореляційні залежності. Як ймовірнісний, так і детермінований характер цих факторів обумовлює застосування методів математичної статистики при вивченні трибологічних систем, котрі дозволяють оптимальними засобами вирішувати поставлену задачу і забезпечити задану точність і достовірність обробки результатів.

На думку авторів [9] розподіл зносу покриттів при терті підкоряється нормальному або логарифмічно нормальному закону. Недостатнє знання механізму явищ, що вивчається, і відсутність системи диференціальних рівнянь, що описують складні процеси тертя і зношування, обумовлюють представлення зв'язку між вхідними і вихідними параметрами трибологічної системи у вигляді поліномного рівняння (2) [9]. Поліноміальна модель являється зручною, так як її апроксимація може покращуватись підвищенням порядку полінома [10]. Однак для вирішення практичних задач тертя, зносу і руйнування покриттів достатньо обмежитися поліномом першого або другого порядку. В даній роботі зв'язок між вхідними і вихідними параметрами трибологічної системи представлявся в повному факторному експерименті типу 2<sup>k</sup> математичною моделлю другого порядку виду:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2. \quad (2)$$

де  $\bar{y}$  – оцінка параметра оптимізації – функція відгуку (в даному випадку це інтенсивність зношування  $I$  та коефіцієнт тертя  $\mu$ );

$x_i$  – ранжировані фактори (в нашому випадку – це режими нанесення покриття, що визначаються робочим струмом  $I_p$ , і температура  $T$  зони тертя, так як в основному різницею температур різняться умови роботи першої, другої та третьої компресійних канавок поршнів);

$b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij}$  – коефіцієнти, що характеризують вільний член регресії, лінійні, квадратичні ефекти і ефекти взаємодії [9].

Матриця планування експерименту і вибір рівнів варіювання здійснювалась по рекомендаціям роботи [9]. Кількість повторів дослідів визначалась за формулою:

$$r \geq \left| \frac{t(p)}{\varepsilon} \right|^2 S^2(y), \quad (3)$$

де  $r$  – кількість вимірювань;

$t(p)$  – критерій Стюдента;

$S^2(y)$  – середня квадратична помилка;

$\varepsilon$  – довірна точність. В роботі  $t(p)$  визначався за статистичними таблицям при прийнятій ймовірності 0,95, приймали рівним 2,37. Число дослідів варіювались при цьому від 3 до 5.

Середнє значення параметру і дисперсії паралельних дослідів визначались за формулами:

$$y_u = \frac{1}{r} \sum_{v=1}^r y_{uv}, \quad (4)$$

$$S_u^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{v=1}^r (y_{uv} - y_u)^2. \quad (5)$$

Далі розраховували однорідність дисперсій паралельних дослідів для визначення можливості регресійного аналізу за критерієм Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}. \quad (6)$$

Порівнюючи розрахункове значення з табличним для ступенів свободи: чисельника  $f_1 = r - 1$ , знаменника  $f_2 = N$  при вибраному рівні значності  $\alpha = 0,05$  [9]. Якщо  $G_{\text{табл}} > G_p$ , то визначалась дисперсія відтворюваності і помилка експерименту відповідно за формулами:

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N S_u^2, \quad (7)$$

$$S(y) = +\sqrt{S^2(y)}. \quad (8)$$

Далі розраховували коефіцієнти рівняння регресії:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{y}_u \quad (9)$$

і взаємодії:

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u. \quad (10)$$

Перевірку статистичної значності коефіцієнту проводили за  $t$ -критерієм. Для цього визначались середня квадратична помилка коефіцієнту регресії [9]:

$$S(b_i) = S(b_{ij}) = \frac{S(y)}{\sqrt{Nr}} \quad (11)$$

і далі визначали довірчий інтервал  $2\Delta b_i$ :

$$\Delta b_i = t_{kp} S(b_i). \quad (12)$$

Після виключення статистично незначних коефіцієнтів рівняння регресії перевірялось на адекватність за  $F$ -критерієм [9]:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S^2(y)} \quad (13)$$

і якщо  $F_p \leq F_{\text{табл}}$  отримане рівняння піддавалось аналізу, в протилежному випадку функція відгуку відкидалась.

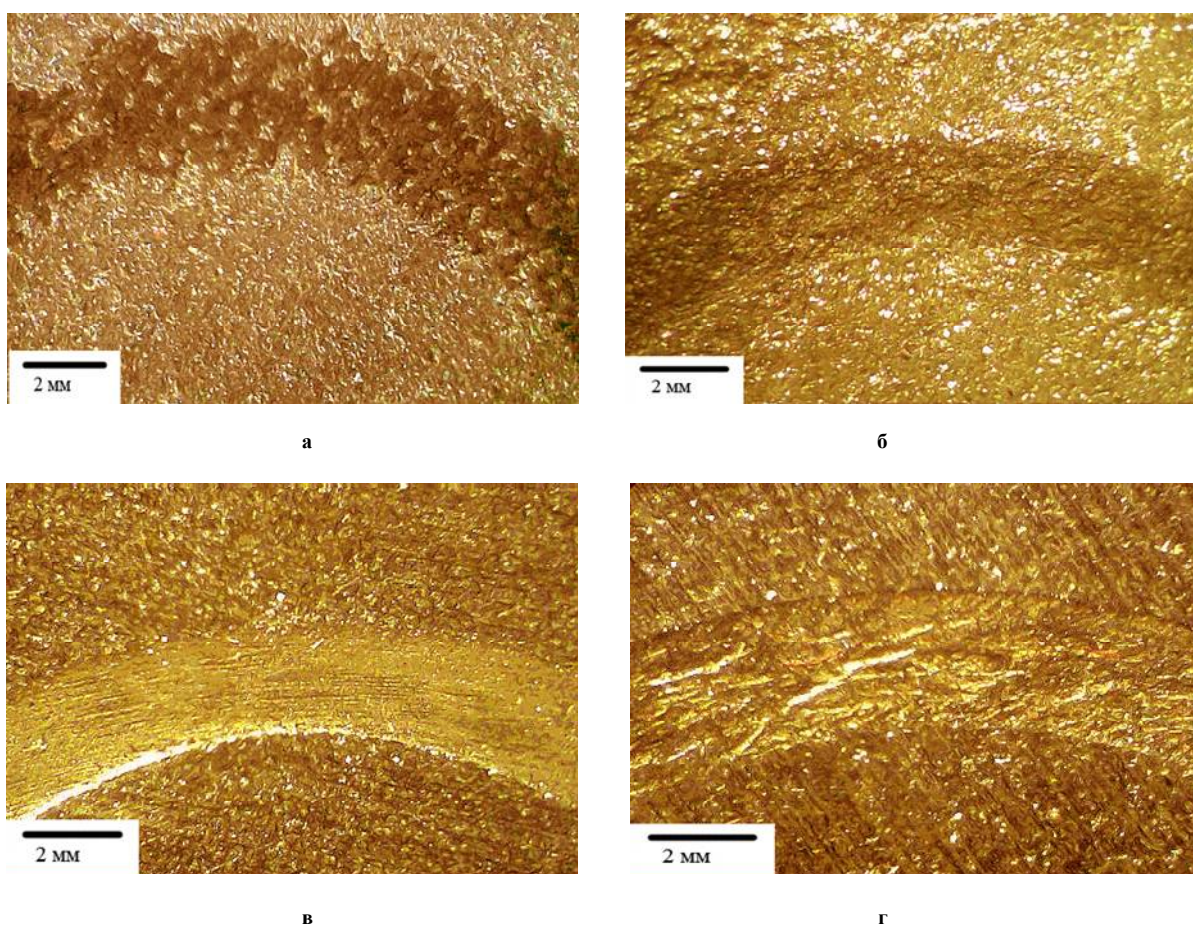
За викладеною методикою обробці піддавались результати всіх експериментів, що виконуються при вирішенні задач даного дослідження.

### Результати випробування та моделювання зносостійкості покриттів

База випробувань складає  $5 \times 10^5$  циклів коливань, – ці показники залишалися постійними та незмінними при всій серії випробувань мідних електроіскрових покриттів різного режиму нанесення, а решта факторів варіювалася для оптимізаційних цілей технологічних рішень.

Для дослідження впливу режиму нанесення, а мідь є дуже чутливою до режиму нанесення, використовувалися три режими та визначалися технологічні особливості утворення захисних покриттів. А саме робочий струм складав 10, 20 та 30 А. І випробування покриттів виконувалось за температур 70 °С, 150 °С та 300 °С.

Загальний вигляд поверхонь тертя при збільшенні 50 отриманий на лазерному скануючому мікроскопі ЛСМ. Він також дозволяє отримати якісні знімки для візуального аналізу поверхонь тертя (рис. 1).



**Рис. 1 – Фотографії поверхонь тертя зразків з Al-25 з мідним ЕІЛ покриттям отримані за допомогою лазерного скануючого мікроскопа ЛСМ:**  
 а – 300 °С, 20 А; б – 150 °С, 20 А;  
 в – 300 °С, 30 А; г – 300 °С, 10 А, зб. 50., N=5\*10<sup>5</sup> ц

Так за режиму сили струму 20 А та температурі випробувань 300 °С величина зносу складала 33,3 (рис. 1, а). при зменшенні температури випробування до 150 °С покриття отримане на другому режимі при робочому струмі 20 А, величина зносу зменшується 13,47 мкм. На третьому режимі нанесення при 30 А, за температури випробувань 300 °С, знос покриття склав 28,1 мкм. При першому режимі нанесення при робочому струмі 10 А за температури 300 °С величина зносу складає 19,5 мкм. Ці вихідні дані можливо використати для побудови моделі триботехнічних характеристик в повно факторному просторі.

Математичну обробку результатів випробувань проводили з використанням методики математичної теорії планування експерименту [9, 10], котрий дозволив використовувати математичний апарат не тільки при обробці результатів дослідження, але і при підготовці і проведенні дослідів, а також суттєво скоротив час при виконанні дослідницької роботи. Для цього виконуємо обчислення коефіцієнтів регресії для некомпозиційного ротатбельного плану другого порядку для кількості факторів  $K = 2$ . Для виконання умови ортогональності базисних функцій, за допомогою яких визначалися коефіцієнти регресії і для зручності розрахунку переходим від істинних значень параметрів до кодівих (табл. 1), таким чином була складена матриця планування (табл. 2) для центрального некомпозиційного ротатбельного плану 2-го порядку для кількості факторів  $K = 2$ .

Параметрами оптимізації даного експерименту служили:  $Y_1$  – ваговий знос ( $\text{мг/см}^2 \times \text{км}$ ),  $Y_2$  – коефіцієнт тертя,  $\mu$ . Моделювання зводиться до пошуку поліноміальної функції відгуку другого порядку, що має вигляд:

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_{12} X_1 X_2 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2$$

визначення оцінок коефіцієнтів регресії за формулами [10]:

$$B_0 = Y_0, \quad (14)$$

$$B_i = A \sum_{U=1}^N X_{iU} Y_U. \quad (15)$$

Таблиця 1

**Умови дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів  
в умовах високотемпературного фреттинг - зношування**

Фактори	Температура $X_1$ , T [°C]	Режим нанесення покриття $X_2$ , $I_p$ [A]
Верхній рівень (+1)	300	30
Нижній рівень (-1)	70	10
Основний рівень (0)	150	20
Інтервал варіювання (J)	150	10

Таблиця 2

**Центральний некомпозиційний ротатбельний план 2-го порядку  
для кількості факторів  $K = 2$**

№ досліджу	Фактори						Дослідні параметри оптимізації		Розрахункові параметри оптимізації	
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1 X_2$	$X_1^2$	$X_2^2$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_2$
1	1	1	1	1	1	1	28,1	0,23	53,11	0,293
2	1	1	-1	-1	1	1	16,2	0,15	39,60	0,198
3	1	-1	1	-1	1	1	19,5	0,24	24,20	0,408
4	1	-1	-1	1	1	1	16,3	0,21	15,91	0,343
5	1	1	0	0	1	0	33,3	0,12	36,88	0,141
6	1	0	1	0	0	1	21,1	0,2	28,39	0,288
7	1	-1	0	0	1	0	15,5	0,18	10,58	0,271
8	1	0	-1	0	0	1	25,3	0,23	17,49	0,208
9	1	0	0	0	0	0	13,47	0,14	13,47	0,143

$$B_{ii} = B \cdot \sum_{U=1}^N X_{iU}^2 Y_U + C \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{U=1}^N X_{iU}^2 Y_U - \frac{B_0}{p} \quad (16)$$

$$B_{ij} = D \cdot \sum_{U=1}^N X_{iU} X_{jU} Y_U \quad (17)$$

де  $A, B, C, D$  – константи, що залежать від кількості факторів  $K$ , в нашому випадку:  $K = 2$ ;  $A = 0,5$ ;  $B = 0,33$ ;  $C = -0,1$ ;  $D = 0,15$ ;  $p = 2$ , та замість факторів використовуються їх кодові значення з матриці планування.

Перевірка їх статистичної значимості шляхом визначення їх довірчих інтервалів. Аналіз даних, отриманих в результаті проведених експериментів багатофакторного планування, проводився по відомим методикам та формулам математичної статистики [9]. Виходячи з розрахункових параметрів, рівняння регресії будуть мати вигляд:

$$Y_1 = 13,5 + 13,1X_1 + 5,45X_2 + 10,264X_1^2 + 9,472X_2^2 + 1,305X_1X_2;$$

$$Y_2 = 0,14 - 0,065X_1 + 0,04X_2 + 0,0075X_1X_2 + 0,0622X_1^2 + 0,105X_2^2.$$

Отримані моделі найбільш вірогідно відбивають залежності величин зносу і коефіцієнту тертя в даній області факторного простору. Перевірка адекватності моделі проводилась за допомогою критерію Фішера [9]. Результати розрахунку приведені в табл. 3.

Таблиця 3

**Розрахункові значення коефіцієнтів регресії,  
дисперсії, довірчих інтервалів**

Параметри	Розрахункові значення для величини зносу	Розрахункові значення для коефіцієнту тертя
$B_0$	13,5	0,14
$B_1$	13,150	-0,0650
$B_2$	5,450	0,0400
$B_{12}$	1,305	0,0075
$B_{11}$	10,264	0,0622
$B_{22}$	9,472	0,1051
$S_y^2$	1,043333	0,000233
$\Delta B_0$	$\pm 1,2561$	$\pm 0,0188$
$\Delta B_i$	$\pm 1,5384$	$\pm 0,0230$
$\Delta B_{ij}$	$\pm 1,3988$	$\pm 0,0209$
$\Delta B_{ii}$	$\pm 0,8426$	$\pm 0,0126$
$S_{ad}^2$	672,0315476	0,034399819
$F_{f_2f_1}^T$	224,6	8,84
$F_{f_2f_1}^P$	64,411969	1,474
$f_1$	2	2
$f_2$	2	2

За результатами розрахунків всі шість коефіцієнтів регресії виявилися статистично значимими так, як потрапляють або перевищують довірчі інтервали  $\Delta B$ . На цій підставі були розраховані ступені свободи  $f_1$  та  $f_2$  та дисперсії адекватності  $S_{ad}^2$  та визначені розрахункові значення критеріїв Фішера  $F_{f_2f_1}^P$  для обох функцій відгуку. І так як вони не перевищували табличні значення  $F_{f_2f_1}^T$  то математичні моделі триботехнічних характеристик електроіскрових покриттів можна визнати адекватними в околицях значень факторного простору.

Перехід від кодованих значень до натуральних значень факторів здійснюється за формулами:

$$T = 150X_1 + 150, \quad I_p = 10X_2 + 20. \quad (18)$$

За отриманими даними побудовані двовимірні графічні залежності одночасного впливу факторів на значення функції відгуку (рис. 2 - 3).

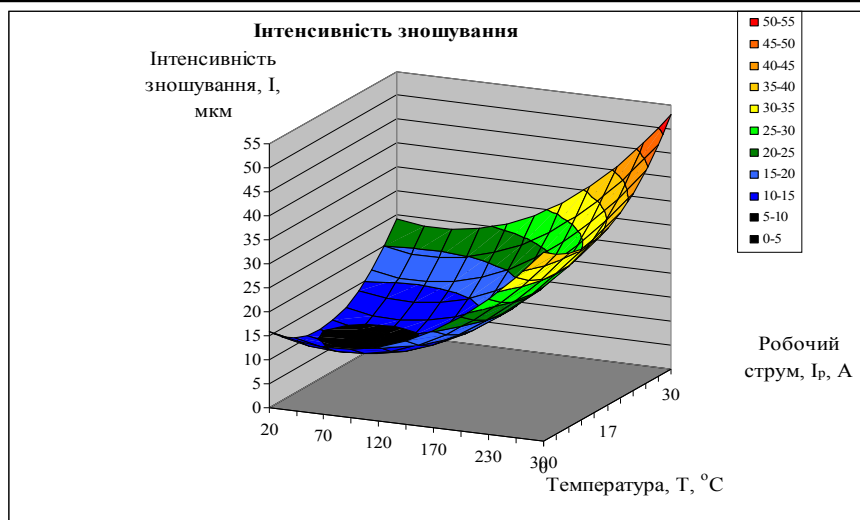


Рис. 2 – Результат моделювання залежності інтенсивності зношування від температури і режиму нанесення покриття

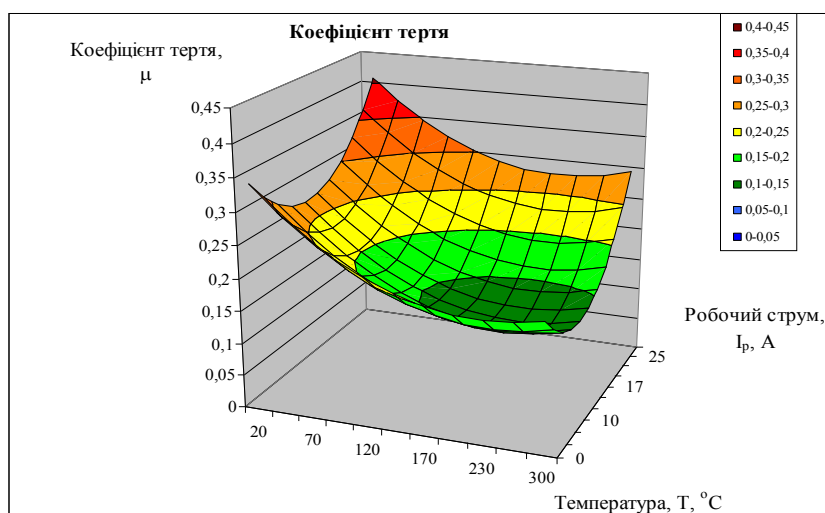


Рис. 3 – Результат моделювання залежності коефіцієнту тертя від температури і режиму нанесення покриття

Таким чином можна провести аналіз впливу всіх факторів на зносостійкість покриттів та фрикційні характеристики трибоконтакту. Розроблена модель дозволяє комплексно та наглядно оцінити вплив факторів на шукану функцію відгуку, провести оптимізаційні заходи та математичну обробку регресійної залежності.

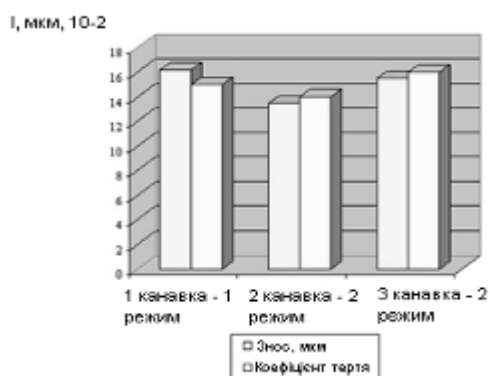


Рис. 4 – Інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя остаточно рекомендованих режимів зміцнення канавок поршнів ДВЗ АНТ, що обрані за найменшими значеннями величини зношування, та задовільними значеннями коефіцієнтів тертя



Зокрема для остаточного вирішення оптимізаційної задачі можна обрати найкращі результати (рис. 4.) для індивідуального зміщення кожної канавки поршнів. Обрані покриття мають близьке значення інтенсивності зношування для відповідних умов роботи, тому і припущений вихід з ладу всього поршня за компресійним пакетом відбудеться в один і той час.

А отримані значення коефіцієнтів тертя електричних покриттів також мають близькі між собою, та не перебувають в антифрикційному діапазоні, а це свідчить про те, що схоплення не відбудеться та залягання компресійних кілець в канавках не відбудеться.

### Висновок

На підставі відомих методик планування експерименту та моделювання його результатів було побудовано поліноміальну регресію модель другого порядку для кількості факторів  $K = 2$  триботехнічних характеристик захисних покриттів для канавок поршнів двигунів внутрішнього згоряння. За допомогою мінімальної кількості дослідів  $n = 9$ , було побудовано триботехнічну поведінку досліджуваних покриттів в усіх крапках факторного простору.

### Література

1. Зносостійкі електроіскрові покриття для підвищення довговічності кінематичних сполучень авіаційної техніки / А.Г. Довгаль, Л.В. Бурдюженко, І.В. Ткаченко // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин. Серія Г. Збірка наукових праць. – К.: 2003. – С. 313-320.
2. Проблемы и перспектив использования электроннолучевых технологий в дизелестроении / М.В. Радченко, В.Г. Радченко, Ю.О. Шевцов, К.С. Кровяков // Ползуновский вестник. – № 4, – 2006. – С. 325-329.
3. Cast Aluminium Alloy for High Temperature Application / Jonathan A. Lee // The Minerals, Metals & Materials Society, – 2003, – 245-247.
4. Wu Shenqing, Li Jun Application of ceramic short fiber reinforced Al alloy matrix composite on piston for internal combustion engines. – China foundry. – 2010. – Vol. 7. – No. 4. P. 408-411.
5. Ahu Fahriye Acar, Fahrettin Ozturk, Mustafa Bayrak Effects of variations in alloy content and machining parameters on the strength of the intermetallic bonding between diesel piston and ring carrier. – Materials and technology. – No. 44. – 2010. – P. 391-395.
6. Упрочнение верхних поршневых канавок двигателей внутреннего сгорания методом искрового упрочнения / Н.Ю. Дударева // Вестник УГАТУ, 2010. – Т. 14, № 3 (38). – С. 111-115.
7. Расчетно-экспериментальное исследование влияния температуры, нагрузки и скорости скольжения на долговечность сопряжения канавка-поршневое кольцо малоразмерного дизеля / О.Г. Гасангушенов // Вестник АГТУ. – Сер.: Морская техника и технология. – 2013. – № 1. – С. 111-116.
8. Моделювання зносостійкості електроіскрових покриттів при відсутності мащення / В.В. Варюхно, А.Г. Довгаль, Л.В. Бурдюженко, Є.М. Лісовий // Вісник НАУ. – № 1, – 2004. – С. 63-66.
9. Евдокимов Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин // М.: Наука, – 1980. – 228 с.
10. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металловедении. В 2-х ч. – М.: МИС. – I ч. – 1970. – 110 с. – II ч. – 1972. – 118 с.

Поступила в редакцію 10.02.2017

Dmitrichenko N.F., Dovgal A.G., Bilyakovych O.N., Pruymak L.B., Sudorenko O.Y., Turitsa Y.A. **Modelling of tribological characteristics of protective coating for power plants aviation ground equipment parts.**

On the basis of analysis of the compound conditions groove piston - piston ring was conducted planning for full factorial experiment two factors most affect the tribological characteristics of the message and the aluminum alloy specimens were tested as protective coatings with and without them. On the basis of the experimental data was carried out construction of the second order polinomialnoi regression model for the friction characteristics of the coating, and the resulting image depending allow to predict the behavior of tribological coatings data at any point of the factor space.

**Key words:** aircraft ground support equipment, power plant, protective coating, tribological characteristics, mathematical model, polynomial model.

### References

1. Wear-resistant electrical discharge coating for durability kinematic joints aviation equipment. A.G. Dougal, L.V. Burdyuzhenko, I.V. Tkachenko. Modern processes of machining tools from the STM and the surface quality of machine parts. Series G. The collection of scientific works. M.:, 2003. P. 313– 320.
2. Problems and prospects of using electron-beam technologies in diesel building. M.V. Radchenko, V.G. Radchenko, J.O. Shevtsov, K.S. Krovyakov. Polzunovsky Gazette. № 4. 2006. P. 325– 329.
3. Cast Aluminium Alloy for High Temperature Application. Jonathan A. Lee. The Minerals, Metals & Materials Society, 2003, 245–247.
4. Wu Shenqing, Li Jun Application of ceramic short fiber reinforced Al alloy matrix composite on piston for internal combustion engines. China foundry. 2010. Vol. 7. No. 4. P. 408–411.
5. Ahu Fahriye Acar, Fahrettin Ozturk, Mustafa Bayrak Effects of variations in alloy content and machining parameters on the strength of the intermetallic bonding between diesel piston and ring carrier. Materials and technology. No. 44. 2010. P. 391–395.
6. Strengthening the upper groove of the piston internal combustion engine by the spark hardening. N.Y. Dudarev. Herald USATU, 2010. T. 14, № 3 (38). P. 111–115.
7. Design and experimental study of the effect of temperature, load and sliding speed on the durability of coupling groove-small-sized diesel engine piston ring / O.G. Gasangusenov. Herald ASTU. Ser. : Marine engineering and technology. 2013. № 1. P. 111–116.
8. Simulation of electric-spark coatings wear resistance without lubrication. V.V. Varyuhno, A.G. Dougal, L.V. Burdyuzhenko, E.M. Lisovuy. Bulletin of NAU, No. 1, 2004. S. 63–66.
9. Evdokimov Y.A. Planning and analysis of experiments in dealing with problems of friction and wear. Y.A. Evdokimov, V.I. Kolesnikov, A.I. Teterin. M. : Science. 1980. 228 p.
10. Novick F.S. Mathematical methods for design of experiments in metallurgy. At 2 h. M. : MIS – I of h, 1970, 110p. II p. 1972. 118 p.