

О. А. Тамаргазін, А. Г. Довгаль, Л. Б. Приймак

МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПОВЕРХОНЬ ПОРШНІВ ДВЗ АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ

Проведено математичне моделювання окремих триботехнічних характеристик інтрузійних покриттів, призначених для поверхонь поршнів двигунів внутрішнього згоряння, виготовлених з ливарних алюмінієвих сплавів. Проблема зносостійкості поршнів є однією з найбільших наукових проблем застосування двигунів та у двигунобудівній галузі. Наукове дослідження зносостійкості алюмінієвих сплавів поршнів є важливою для розробки технології поверхневого зміцнення. В якості компонентів для композиційних покриттів використовувалися карбід кремнію та оксид алюмінію різного гранулометричного складу. Було обрано основні фактори нанесення покриттів для визначення критичних для зносостійкості та якості покриття. Покриття наносили методом інтрузій в струмені піску піскострумінної машини та фіксували остаточною термічною обробкою. Середовище покриття змішували зі струменем піску в процесі нанесення покриття. Таким чином найменші частинки наносились на підкладку в потоці струменю піску, а основне середовище – пісок - відторгалося з поверхні. Результати отриманих триботехнічних характеристик використовували для побудови регресійних поліноміальних залежностей та визначення їх коефіцієнтів. Порядок полінома було обрано рівним двом відповідно до кількості факторів. Вищий ступінь поліному не має користі, оскільки не впливає на точність розрахункових даних. Для визначення точності розрахунків було оцінено адекватність моделі. Так, було розраховано критерій Фішера для розробленої поліноміальної моделі та порівняно з табличним для визначення адекватності моделі, а також для визначення статистичної значущості коефіцієнтів поліноміальної моделі. У якості факторів оптимізації було обрано розмір частинки покриття та температуру остаточної термічної обробки. У якості функції відгуку було обрано зносостійкість покриття, що характеризує ресурс та коефіцієнт тертя, що вказує на можливе схоплювання в робочих умовах. Були визначені коефіцієнти поліноміальних моделей, визначена їх статистична значущість та побудовані двовимірні графічні залежності. Отримані моделі було перевірено на адекватність за допомогою статистичних критеріїв Ст'юдента та Фішера в кожній точці моделі. На основі візуальної оптимізації отриманих моделей було сформовано рекомендації щодо технологічних режимів нанесення покриттів на поверхні поршнів ДВЗ АНТ.

Вступ. Для захисту поверхонь деталей двигунів внутрішнього згоряння широко застосовується технологія захисних покриттів. Для вивчення взаємозв'язків між властивостями покриттів та їх фазовим складом і структурою, а також впливом зовнішніх факторів велике значення має вибір методів дослідження. Важливою складовою наукового дослідження є вибір математичного апарату для обробки первинних експериментальних результатів та побудови математичних моделей оптимізаційного характеру [1].

Аналіз попередніх досліджень. Поршні двигунів внутрішнього згоряння зазвичай виготовляються із алюмінієвих ливарних сплавів, що значно легші за сталеві, проте мають відомі проблеми високотемпературної зносостійкості в критичних зонах. Так, було проведено дослідження оптимізаційного характеру отримання монометалічного електроіскрового покриття на ливарному алюмінієвому сплаві Ал-25 з метою застосування його для зміцнення та відновлення першої компресійної канавки. Трибовипробування провадилися за умов високотемпературного фреттингу [2].

Надалі було визначено наступну проблемну ділянку поршня - його спідницю в зонах, перпендикулярних до поршневого пальця [3,4]. Можна згадати лише основні проблеми, до яких призводить передчасний знос спідниць поршнів. Для ка-

мери згоряння: олива в камері згоряння миттєво коксується в нагар; як наслідок – залягають компресійні та маслос'ємні кільця; суттєво зношується гільза циліндра та канавки поршнів; зношується клапан-сідло, погіршується робота форсунки та свічки. Для картеру двигуна: частинки сажі створюють суттєві частинки абразиву для зношування; підвищується кислотність оливи, понижується її термічна стабільність; як наслідок підвищується зношування корінних та шатунних шийок колінчастого валу; зношування вкладишів опорних поверхонь та поверхонь противаг колінчастого валу. Тобто зношування спідниці поршня призводить до зниження ресурсу чи не всіх деталей гарячої та холодної частин ДВЗ [5-6]. Тому була вчинена спроба розробки некоштовного та неенергоємного покриття для всієї поверхні поршнів ДВЗ, що вирішували б комплекс задач підвищення зносостійкості та теплопровідності.

Методика дослідження. Для отримання шихти композиційного покриття використовували вихідні порошки: карбід кремнію марки 64С (ГОСТ 26 327 – 84) середнім розміром 45-55 мкм, оксид алюмінію (ТУ 6-09-03-350-73) з частинками середнім розміром 45-50 мкм.

Для досліджень використовувалися зразки з алюмінієвого сплаву Ал25 (ГОСТ 1583-93) дискової форми, зовнішній діаметр \varnothing 90 мм, внутрішній

Ø 50 мм, та натурні поршні двигуна Deutz. (рис. 1). Покриття наносили на бічну сторону. У якості контртіла використовували пальці, виготовлені з сірого чавуну перлітного класу СЧ-21-40 (ГОСТ 5950-73) Ø 10 мм. Для формування композиційних покриттів із вихідних порошків невід'ємною операцією є їх взаємне перемішування і розмелення.



а)



б)



в)

Рис. 1. Натурні поршні двигуна Deutz, після знежирювання (а), після видалення оксидної плівки чистим піском (б), після нанесення покриття інтрузією піском з компонентами шихти $\text{SiC}-\text{Al}_2\text{O}_3$ (в)

Для отримання покриття з кераміки на основі SiC з домішками Al_2O_3 , порошкові компоненти у відповідних пропорціях змішували з одночасним подрібненням протягом 1-4 годин для отримання необхідного фракційного складу в лабораторному планетарному млині «Санд-1» у середовищі спирту. Після розмелення шихту сушили і просіювали. Гранулометричний склад отриманих сумішей після розмелювання визначали у водяному середовищі на лазерному мікроаналізаторі «SK Lazer Micron Sizer PRO 7000».

Покриття в роботі наносили новаторським методом, а саме, на устаткуванні, призначеному для попередньої підготовки поверхні для нанесення покриттів у піскоструминній установці, додаючи в робоче середовище – кварцевий пісок розміром 0,5-1 мм, додавали також суміші компонентів покриття $\text{SiC}-\text{Al}_2\text{O}_3$ середнім розміром частинок 3-8 мкм. Зразки та натурні поршні обробляли соплом ежекційного типу в захисному кожусі установки. Таким чином, за рахунок динамічної дії крупнозернистого робочого середовища на дрібнодисперсні компоненти покриття вони індентувалися у поверхню.

Робоче середовище не осаджувалося на поверхні. Для подальшої фіксації покриття деталі проходили термічну обробку у звичайній муфельній печі за температур 200, 300 та 400 °С.

Для моделювання максимальної швидкості руху поршня в точці (5-6 м/с), що дорівнює половині робочого ходу, використовували схему тертя «площина-площина», де покриття було нанесено на дискові (що моделює поршень), а торець чавунного пальця було хонінговано (моделює гільзу).

Таким чином, вирішувалися важливі задачі щодо визначення трибосумісності розробленого покриття з матеріалом контртіла, а саме, чи не зношуватиме воно дзеркало гільзи циліндра.

Дослідження процесу зношування покриттів ($\text{SiC}-\text{Al}_2\text{O}_3$), отриманих за різних технологічних режимів, провадили на лабораторній торцевій машині тертя по схемі «площина-площина», конструкція якої дозволяє визначати в процесі експерименту коефіцієнт тертя. Трибовипробування проводили без підігріву та охолодження в умовах без мастильних матеріалів, як за найнесприятливіших режимів роботи пари тертя «поршень-гільза циліндра» в умовах задирів та мастильного голодування.

Випробування проводили за швидкостей ковзання 5-6 м/с і навантажень у 2-4 МПа, що моделює роботу контактної зони пари тертя «поршень - гільза циліндра». Величина основних параметрів визначалась після завершення процесу припрацювання до стабілізації коефіцієнта тертя і вагового зношування пари тертя. У процесі експери-

менту на кожне значення випробовувалось 3–5 зразків, а остаточні параметри визначались як середні значення з отриманих даних. Довжина шляху при випробуваннях складала 1 км. Для вмісту матеріалів, у яких знос складав менше 5 мкм/км, довжина шляху складала 10 км, а величина зносу на 1 км визначалась як десята частина від сумарного зношування, при цьому вважали, що всі 10 км зразок зношувався рівномірно.

Результати досліджень та отримані показники моделювання зносостійкості.

Захисне покриття, що розробляється, є композиційним та мусить наноситися незатратним фізичним методом, а саме, на серійній піскоструминній машині за рахунок інтрузії компонентів покриття у струмені кварцевого піску. Таким чином, було визначено два основні фактори, що впливають на масоперенос (покривистість) покриття та власне його зносостійкість: це середній розмір d частинки компонентів шихти SiC–Al₂O₃ та температура фінальної обробки нанесеного покриття T .

Математичну обробку результатів випробувань проводили із застосуванням методики математичної теорії планування експерименту [7-8], що дало можливість використовувати математичний апарат не тільки при обробці результатів дослідження, а й при підготовці та проведенні дослідів, а також істотно скоротити час при виконанні дослідницької роботи. Для цього здійснювали обчислення коефіцієнтів регресії для некомпозиційного ротатбельного плану другого порядку для числа факторів $K = 2$. Для виконання умови ортогональності базисних функцій, за допомогою яких визначалися коефіцієнти регресії, і для зручності розрахунку переходимо 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 числа факторів $K = 2$.

Параметри оптимізації:

Y_1 – лінійне зношування (I, мкм);

Y_2 – коефіцієнт тертя, μ .

Шукана функція відгуку у факторному просторі має вигляд для другого порядку:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2.$$

Лінійні і квадратичні ефекти визначалися за формулами [7]:

$$B_0 = Y_0, \tag{1}$$

$$B_i = A \sum_{U=1}^N X_{iU} Y_U, \tag{2}$$

$$B_{ii} = B \cdot \sum_{U=1}^N X_{iU}^2 Y_U + C \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{U=1}^N X_{iU}^2 Y_U - \frac{B_0}{p}, \tag{3}$$

$$B_{ij} = D \cdot \sum_{U=1}^N X_{iU} X_{jU} Y_U, \tag{4}$$

де A, B, C, D – константи, що залежать від числа факторів K , в нашому випадку: $K = 2$; $A = 0,5$; $B = 0,33$; $C = -0,1$; $D = 0,15$; $p = 2$.

Таблиця 1. Умови дослідів дослідження зносостійкості композиційних покриттів

Фактори	Розмір частинки X_1, d , [мкм]	Температура обробки X_2, T [°C]
Верхній рівень (+1)	8	400
Нижній рівень (-1)	3	200
Основний рівень (0)	5	300
Інтервал варіювання (J)	3	100

Таблиця 2. Центральний некомпозиційний ротатбельний план 2-го порядку для числа факторів $K = 2$

№ до сл	Фактори					Дослідні параметри оптимізації		Розрахункові параметри оптимізації	
	X_1	X_2	X_1X_2	X_1^2	X_2^2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2
1	1	1	1	1	1	45,6	0,24	66,73	0,34
2	1	-1	-1	1	1	19,4	0,19	35,79	0,18
3	-1	1	-1	1	1	32,1	0,35	41,19	0,56
4	-1	-1	1	1	1	15,7	0,22	16,13	0,36
5	1	0	0	1	0	25,6	0,21	35,15	0,18
6	0	1	0	0	1	10,7	0,15	34,61	0,31
7	-1	0	0	1	0	20,2	0,27	12,55	0,38
8	0	-1	0	0	1	25,3	0,15	6,61	0,13
9	0	0	0	0	0	4,5	0,14	4,50	0,14

Використовуючи наведені формули, можна обчислити коефіцієнти регресії:

Для зносу Y_1 :

$$\begin{aligned} B_0 &= 4,5 & B_{12} &= 1,47 \\ B_1 &= 11,300 & B_{11} &= 19,348 \\ B_2 &= 14,000 & B_{22} &= 16,114 \end{aligned}$$

Для коефіцієнта тертя Y_2 :

$$\begin{aligned} B_0 &= 0,14 & B_{12} &= -0,012 \\ B_1 &= -0,1000 & B_{11} &= 0,1404 \\ B_2 &= 0,0900 & B_{22} &= 0,0810. \end{aligned}$$

Дисперсія дослідів визначається за формулою:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{U=1}^{n_0} (y_{0U} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}. \quad (5)$$

Для Y_1 : $S_y^2 = 0,010000$ Для Y_2 : $S_y^2 = 0,000100$,

з числом ступенів вільності $f_1 = n_0 - 1$, де n_0 - число дослідів на основному рівні; y_0 - середнє арифметичне значення y_{0U} , $n_0 = 3$; $f_1 = 2$.

Для визначення статистичної значущості лінійних і квадратичних ефектів визначаємо їх дисперсії:

$$S_{B_0}^2 = \frac{S_y^2}{n_0}, \quad (6)$$

$$S_{B_i}^2 = A \cdot S_y^2, \quad (7)$$

$$S_{B_{ii}}^2 = \left(B + \frac{1}{p^2 n_0} \right) \cdot S_y^2, \quad (8)$$

$$S_{B_{ij}}^2 = D \cdot S_y^2. \quad (9)$$

Для Y_1 :

$$S_{B_0}^2 = 0,00333333$$

$$S_{B_i}^2 = 0,0050000$$

$$S_{B_{ii}}^2 = 0,00413333$$

$$S_{B_{ij}}^2 = 0,0015.$$

Для Y_2 :

$$S_{B_0}^2 = 0,000033$$

$$S_{B_i}^2 = 0,0000500$$

$$S_{B_{ii}}^2 = 0,0000413$$

$$S_{B_{ij}}^2 = 0,0000150.$$

Визначаємо середньоквадратичні відхилення коефіцієнтів регресії:

Для Y_1 :

$$S_{B_0} = 0,057735$$

$$S_{B_i} = 0,070711$$

$$S_{B_{ii}} = 0,064291$$

$$S_{B_{ij}} = 0,04.$$

Для Y_2 :

$$S_{B_0} = 0,005774$$

$$S_{B_i} = 0,007071$$

$$S_{B_{ii}} = 0,006429$$

$$S_{B_{ij}} = 0,003873.$$

Далі визначаємо довірчі інтервали коефіцієнтів регресії за формулою

$$\Delta B_i = \pm t_{\alpha, N} \cdot S_{B_i}, \quad (10)$$

де t - критерій Ст'юдента (вибирається з таблиць); $\alpha = 0,05$ - рівень значущості, у нашому випадку, для числа дослідів $N = 9$ і для рівня значущості $\alpha = 0,05$ - $t = 2,13$.

Для Y_1 :

$$\Delta B_0 = \pm 0,1230$$

$$\Delta B_i = \pm 0,1506$$

$$\Delta B_{ii} = \pm 0,1369$$

$$\Delta B_{ij} = \pm 0,0825.$$

Для Y_2 :

$$\Delta B_0 = \pm 0,0123$$

$$\Delta B_i = \pm 0,0151$$

$$\Delta B_{ii} = \pm 0,0137$$

$$\Delta B_{ij} = \pm 0,0082.$$

Коефіцієнт регресії слід вважати статистично значущим, якщо його абсолютне значення дорівнює або перевищує величину довірчого інтервалу. Таким чином для зносу маємо 6 статистично значущих коефіцієнтів регресії, для коефіцієнта тертя маємо 4 статистично значущих коефіцієнтів регресії. Для визначення дисперсії адекватності S_{ad}^2 обчислюємо суму квадратів відхилень між розрахованими і експериментальними значеннями відгуку у всіх точках плану (SS_{ocm}):

$$SS_{ocm} = \sum_{U=1}^N (y_{U_{розр}} - y_{U_{експ}})^2. \quad (11)$$

Для Y_1 : $SS_{ocm} = 1868,873576$. Для Y_2 :

$SS_{ocm} = 0,11424216$.

Далі віднімаємо від неї суму квадратів, використану для визначення дисперсії дослідів за результатами експерименту на основному рівні (SS_y):

$$SS_y = \sum_{U=1}^{n_0} (y_{0U} - \bar{y}_0)^2. \quad (12)$$

Для Y_1 : $SS_y = 0,0200$. Для Y_2 : $SS_y = 0,000200$.

Різниця між відхиленнями:

$$SS_{ad} = SS_{ocm} - SS_y. \quad (13)$$

Для Y_1 : $SS_{ad} = 1868,8536$. Для Y_2 :

$SS_{ad} = 0,114042$.

Розділена на число ступенів свободи

$$f_2 = N - k' - (n_0 - 1). \quad (14)$$

Для Y_1 : $f_2 = 1$ Для Y_2 : $f_2 = 3$, де k - число статистично значущих коефіцієнтів регресії, для Y_1 , $k = 6$, для Y_2 , $k = 4$ є дисперсією адекватності рівняння регресії:

$$SS_{ad}^2 = \frac{SS_{ad}}{f_2}. \quad (15)$$

Для Y_1 : $SS_{ao}^2 = 1868,853576$. Для Y_2 : $SS_{ao}^2 = 0,038014058$. Далі обчислюємо розрахункове значення критерію Фішера для отриманих моделей:

$$F_{f_2;f_1} = \frac{S_{ao}^2}{S_y^2} \quad (16)$$

Для Y_1 : $F_{f_2;f_1} = 186,885358$. Для Y_2 : $F_{f_2;f_1} = 3,801$. Визначаємо табличні значення для чисел ступенів вільності чисельника і знаменника, відповідно, і для рівня значущості $\alpha = 0,05$:

Для Y_1 : $F_{2;2} = 224,6$. Для Y_2 : $F_{1;2} = 8,84$.

Гіпотеза про адекватність моделі може бути прийнята, якщо розрахункове значення F-критерію не перевищує табличного для обраного рівня значущості. Остаточна модель, отримана після ротатабельного планування другого порядку, має вигляд: для зносу Y_1 (рис. 2.):

$$Y_1 = 4,5 + 11,3X_1 + 14X_2 + 1,47X_1X_2 + 19,348X_1^2 + 16,114X_2^2,$$

для коефіцієнта тертя Y_2 (Рис. 3.):

$$Y_2 = 0,14 + 0,09X_2 + 0,1404X_1^2 + 0,081X_2^2.$$

Перехід від кодованих до натуральних значень факторів здійснюється за формулами:

$$x_1 = \frac{X_1 - 5}{3}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 300}{100}.$$

За отриманими даними побудовані двомірні графічні залежності (рис. 2 та 3). Таким чином, можна провести аналіз впливу всіх двох факторів на зносостійкість (величину зносу) та енерговитрати роботи трибосполучення (коефіцієнт тертя). Розроблена модель дає можливість комплексно і науково оцінити вплив факторів на шукану функцію відгуку, провести оптимізаційні заходи та математичну обробку регресійної залежності.

Зокрема, для остаточного вирішення оптимізаційної задачі можна вибрати два результати. Згідно проведеному моделюванню за адекватними статистичними моделями та враховуючи вплив всіх точок факторного простору, можна визначити фактори, що відповідають найбільш оптимальним параметрам оптимізації.

Так мінімальне значення зносу покриття 0,10976 мкм/км відповідає наступним факторам: температура обробки покриття 280 °С, розмір часточок 4,5 мкм. А мінімальне значення коефіцієнта тертя покриття 0,11516 відповідає наступним факторам: температура обробки покриття 300 °С, розмір часточок 4,5 мкм.

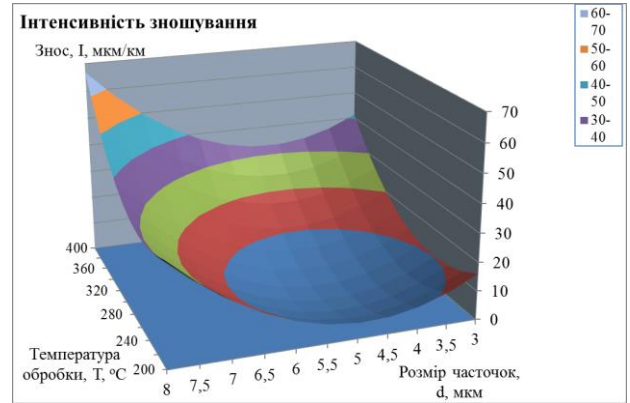


Рис. 2. Результат моделювання залежності зносу від температури обробки та розміру частинок

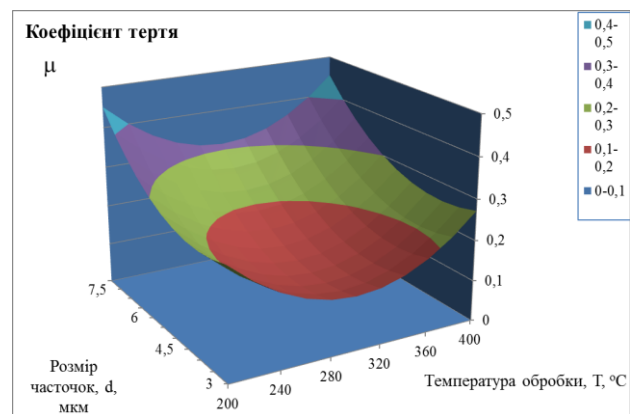


Рис. 3. Результат моделювання залежності коефіцієнта тертя від температури обробки і розміру частинок

Висновки

1. У процесі розмелення композиції SiC–Al₂O₃ протягом 4 годин середній розмір частинок складає 3 мкм, що сприятливо для покриттів, які працюють у парі з чавунними деталями, наприклад, поршні двигунів внутрішнього згоряння авіаційної наземної техніки. Сировина для компонентів такого покриття наявна в достатній кількості в ресурсній базі України, що посилить технологічну незалежність наукової розробки.

2. З шихти середнім розміром 8,7; 4,9 та 3,8 мікрметрів були отримані покриття, що відносяться до інтрузійних на звичайній піскоструминній машині. Після фінішної термічної обробки за температур 200, 300 та 400 °С покриття виявили стабільну структуру, адгезію та задовільні триботехнічні характеристики.

3. Досліджені триботехнічні характеристики композиційних покриттів в умовах, що моделюють найнесприятливіші режими роботи пари тертя «спідниця поршня – гільза циліндра». Встановле-

но, що їх зносостійкість чутлива до технологічних режимів нанесення та за умов розміру частинок 5 мкм та температури фінішної обробки 300 °С отримане найменше значення інтенсивності зношування 4,5 мкм/км. За коефіцієнтами тертя покриття працюють в антифрикційному діапазоні.

4. Оптимізаційне поліномінальне моделювання зносостійкості отриманих композиційних покриттів з належною адекватністю підтвердило отримані дані та дещо скоригувало їх у сторону зменшення розміру часточок та температури фінальної обробки.

Список літератури:

1. Варюхно В. В., Довгаль А. Г., Бурдюженко Л. В., Лісовий Є. М. Моделювання зносостійкості електроіскрових покриттів при відсутності мащення. // Вісник НАУ. - № 2. - 2004. - С. 63-66. 2. Н. Ф. Дмитриченко, В. В. Варюхно, А. В. Кулінич, А. Г. Довгаль, В. П. Коба Пролонгация ресурса деталей силовых установок авиационной наземной техники в условиях эксплуатации. // Металлофизика и новейшие технологии. - Том. 39, № 1. сiчень 2017. - С. 69-82. 3. М. Дмитриченко, О. Тамаргазін, О. Білякович, А. Довгаль, А. Савчук, Ю. Туриця, О. Міланенко Дискретні електро-іскрові покриття для зміцнення спідниць поршнів двигунів внутрішнього згорання. // Systemy i Srodki Transportu Samochodowego. - Wibrane Zagadnienia. - Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukasiewicza. - Monografia nr 7. - Seria: Transport. - 2016. - С. 129-134. 4. Довгаль А. Г. Розробка композиційного матеріалу для сідел клапанів двигунів внутрішнього згорання авіаційної наземної техніки. // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 8-а Міжнародна науково-практична конференція. 28-29 вересня 2017 р. Херсон. Херсонська державна морська академія. - Матеріали. - Херсон: 2017. - С. 212-217. 5. Приймак Л. Б. Зносостійкість композиційного матеріалу для сідел клапанів на основі карбонітриду титану. // Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 8-а Міжнародна науково-практична конференція. 28-29 вересня 2017 р. Херсон. Херсонська державна морська академія. - Матеріали. - Херсон: 2017. - С. 279-283. 6. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. - М.: Наука, - 1980. - 228 с. 7. 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.

Bibliography (transliterated):

1. Variyukhno V. V., Dovgal A. G., Burduzhenko L. V., Lisoviy Ye. M. (2004) "Modelling of the Wear Resistance of Electro Spark Coatings without Lubricants." *Proceeding of NAU ["Modelirovaniye iznosostoykosti elektroiskrovih pokritiy bez smazochnih materialov" Vestnik NAU]*, №2, P. 63-66. 2. N. F. Dmytrichenko, V. V. Variyukhno, A. V. Kulynich, A. G. Dovgal, V. P. Coba (2017) "Lifetime Prolongation of the Power Plants Elements of Aircraft Ground Support Equipment in Operational Conditions." *Metal Physics and Newest Technologies. ["Prodovzhennya resursu detaley silovih ustanovok aviatsiynoyi nazemniyi tekhniki v umovah eksploatatsiyi" Metalofizika i niveyshiye tekhnologii]* Vol. 39, № 1. January., P. 69-82. 3. M. Dmytrichenko, O. Tamargazin, O. Bilyakovich, A. Dovgal, A. Savchuk, Yu. Turitsya, O. Milanenko (2016) "Discrete Electro-Spark Coatings for Strengthening of the Piston Shirts of Internal Combustion Engine." *Systemy i Srodki Transportu Samochodowego. Wibrane Zagadnienia. Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukasiewicza. ["Diskretni elektroiskrovi pokrittya dlya zmitsnenna spidnits porshniv dviguniv vnutrishnyogo zgorannya" Systemy i Srodki Transportu Samochodowego. Wibrane Zagadnienia. Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukasiewicza.] Monografia nr 7., Seria: Transport., C. 129-134.* 4. Dovgal A. G. (2017) "Development of the Composition Material for the Valves Saddles of the Internal Combustion Engines of Aircraft Ground Support Equipment." *Modern Power Plants of Transport and Technologies and Equipment for Their Maintenance. 8-th International Theoretical and Practical Conference. ["Rozrobka kompozitsiynogo materialu dlya sidel klapaniv dviguniv vnutrishnyogo zgorannya aviatsiynoyi nazemnoyi tekhniki" Suchasni silovi ustanivki transportu i tekhnologii ta obladnannya dlya yih obslugovuvannya, 8-ma mizhnarodna teoretichna i praktichna konferentsiya]* 28-29 September 2017. Cherson. Cherson State Marine Academy, Materials., Cherson: P. 212-217. 5. Pryimak L. B. (2017) "Wear Resistance of Composition Material for Valves Saddles Based on the Titanium Carbide." *Modern Power Plants of Transport and Technologies and Equipment for Their Maintenance. 8-th International Theoretical and Practical Conference. ["Znosostiykist kompozitsiynogo materialu dlya sidel klapaniv na osnovi karbonitridu titanu" Suchasni silovi ustanivki transportu i tekhnologii ta obladnannya dlya yih obslugovuvannya, 8-ma mizhnarodna teoretichna i praktichna konferentsiya]* 28-29 September 2017. Cherson. Cherson State Marine Academy. Materials., Cherson, P. 279-283. 6. Yevdokimov Yu. A., Kolesnikov V. I., Teterin A. I. (1980) *Planning and Analysis of Experiment for Tasks Solving of Friction and Wear. [Planirovaniye i analiz eksperimenta dlya resheniya zadach treniya i iznosa]* Moscow: Science, 228 p. 7. Novik F. S. (1970, 1972) *Mathematical Methods of Experimentants Planning in Metal Science. In 2 parts. [Matematicheskiye metody planirovaniya eksperimenta v metallovedeniyi]* Moscow: Moscow Institute of Steel, I part., 110 p., II part., 118 p.

Надійшла до редакції 02.07.2018 р.

Приймак Людмила Борисівна – кандидат техн. наук, доцент кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: Ludmila-joy@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-4024-0941>.

Довгаль Андрій Григорович – кандидат техн. наук, доцент кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: Ludmila-joy@ukr.net., <http://orcid.org/0000-0003-1300-0192>.

Тамаргазін Олександр Анатолійович – доктор техн. наук, проф., завідувач кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: avia-icaa@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0002-9941-3600>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОРШНЕЙ ДВС АВИАЦИОННОЙ НАЗЕМНОЙ ТЕХНИКИ

О. А. Тамаргазин, А. Г. Довгал, Л. Б. Приймак

Проведено математическое моделирование отдельных триботехнических характеристик интрузионных покрытий, предназначенных для поверхностей поршней двигателей внутреннего сгорания, изготовленных из литейных алюминиевых сплавов. Проблема износостойкости поршней является одной из наибольших научных проблем применения двигателей и в двигателестроительной отрасли. Научное исследование износостойкости алюминиевых сплавов поршней является важным для разработки технологии поверхностного упрочнения. В качестве компонентов для композиционных покрытий использовались карбид кремния и оксид алюминия разного гранулометрического состава. Были избраны основные факторы нанесения покрытий для определения критических для износостойкости и качества покрытия. Покрытия наносили методом интрузии в струе песка пескоструйной машины и фиксировали окончательной термической обработкой. Среду покрытия смешивали со струей песка в процессе нанесения покрытия. Таким образом, наименьшие частицы наносились на подложку в потоке струи песка, а основная среда песок отторгалась с поверхности. Результаты полученных триботехнических характеристик использовали для построения регрессионных полиномиальных зависимостей и определения их коэффициентов. Порядок полинома был избран равным двум соответственно количеству факторов. Высшая степень полинома является бесполезной, так как не влияет на точность расчетных данных. Для определения точности расчетов была оценена адекватность модели. Так был рассчитан критерий Фишера для разработанной полиномиальной модели и сравнен с табличным для определения адекватности модели, а также для определения статистической значимости коэффициентов полиномиальной модели. В качестве факторов оптимизации был избран размер частицы покрытия и температура окончательной термической обработки. В качестве функции отклика была избрана износостойкость покрытия, которая характеризует ресурс и коэффициент трения, который указывает на возможное схватывание в рабочих условиях. Были определены коэффициенты полиномиальных моделей, определена их статистическая значимость и построенные двумерные графические зависимости. Получены модели были проверены на адекватность посредством статистических критериев Стьюдента и Фишера в каждой точке модели. На основе визуальной оптимизации полученных моделей были сформированы рекомендации относительно технологических режимов нанесения покрытий на поверхности поршней ДВС АНТ.

MODELLING OF WEAR RESISTANCE OF COMPOSITION COATING FOR PISTON SURFACES OF ICE aircraft GROUND SUPPORT EQUIPMENT

O. A. Tamargazin, A. G. Dovgal, L. B. Pryimak

Mathematic modeling of some tribotechnical description of intrusive coating intended for piston surfaces of internal combustion engines made of cast aluminium alloys has been held. The problem of piston wear resistance is one of the biggest scientific problem of the engine applicators and engine building industry. The scientific research of the aluminium alloy wear resistance of pistons is vital for development of superficial strengthening technology. As the components of composition coatings the silicon carbide and aluminium oxide of different granulometric content has been selected. The main factors of the coating deposition have been chosen for detection of the most crucial for the wear resistance and coatings quality. The coating had been deposited by the intrusion method in the sand stream of sandblast machine and finally fixed by eventual thermal treatment. The coating media had been mixed with the sand blast stream in the process of coating depositions. Thus the smallest particles have been deposited on the substrate in the sand blast stream and the main media of the sand had been rejected from the coating surface. Results of acquired tribotechnical descriptions had been used for development of regression polynomial expressions and determination of their factors. The order of the polynomial had been chosen being equal to the two complying the number of the factor. The higher number degree of the polynomial is useless as is not influencing the precision of the calculated results. In order to determine the calculation precisions the model adequacy has been estimated. Thus the Fisher's criteria have been calculated for the polynomial models developed comparing with the tabular ones in order to detect the models adequacy, as well as estimation of the statistical significance of the polynomial models factors. As the optimization factors the size of the coating particles and the temperature of eventual treatment have been selected. As the response function the wear resistance of the coating, that describes the life time and friction factor, that indicates the possible seizure in the working conditions. The factors of polynomial models have been determined, their statistical significance has been determined and two-dimensional diagrams have been plotted. Acquired models have been checked for adequacy using the statistical Fisher's and Student's criteria in each point of the model. On the ground of visual optimization of the acquired models, recommendations have been composed on deposition modes of coating application on the piston surfaces of AGSE ICE.