

Вплив концентрації вуглецевого, базальтового волокон і графіту на теплопровідність та зношування композиційного матеріалу на основі ароматичного поліаміду

Г. О. Сіренко¹, Л. В. Базюк¹, В. П. Свідерський², С. М. Тараненко²

¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника

57, вул. Шевченка, Івано-Франківськ, 76000, Україна

²Хмельницький національний університет

11, вул. Інститутська, Хмельницький, 29016, Україна

Методами математичного планування експерименту та пошуку оптимальних рішень досліджено вплив концентрації вуглецевого, базальтового волокон і графіту на теплопровідність та зношування композиційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду.

Вступ

Встановлено залежність теплопровідності композицій на основі ароматичного поліаміду та комбінованого наповнювача з високим і низьким коефіцієнтом теплопровідності від температури при різних концентраціях складових композиту [1]. Результати виявили лінійні залежності коефіцієнта теплопровідності від температури. Це дозволяє спрогнозувати поведінку матеріалів при різних температурах, а також обґрунтовано вибрати композиційний матеріал для вузлів тертя, що працюють без чи при обмеженому навантаженні.

Мета роботи полягала в тому, щоб виявити вплив вмісту багатокомпонентних наповнювачів на інтенсивність зношування та коефіцієнт теплопровідності композиційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду методом математичного планування експерименту та проаналізувати і порівняти ці залежності за допомогою двовимірних перерізів.

Експериментальна частина

Об'єктом дослідження були композиційні матеріали на основі ароматичного поліаміду (АПА) фенілон С-2 (продукт поліконденсації метафенілендіаміну і дихлорангідридів ізофталевої (60 %) і терефталевої (40 %) кислот), наповнених високоміцним графітованим вуглецевим волокном із стрічки ВМН-4; базальтовим волокном і колоїдним графітом С-1. Властивості цих матеріалів наведені в [2–7], де класифікацію вуглецевих волокон визначено за [8]: НМ – високомодульне; ПАН – з поліакрилонітрильної тканини, стрічки або волокна; $\rho = 1940 \text{ кг/м}^3$ – питома густина волокна; $\gamma = 1 \%$ – відносне подовження при розриві; $d_b = 6 \text{ мкм}$ – середній діаметр волокна; $\sigma_b = 2,0\text{--}2,5 \text{ ГПа}$ – міцність волокна при розтягуванні; $E_b = 240\text{--}300 \text{ ГПа}$ – модуль пружності волокна при розтягуванні; $T_k = 2673 \pm 20 \text{ К}$ – кінцева

температура термообробки волокнистих матеріалів [1–3].

Базальтові волокна отримані з мінералів Берестовецького родовища і мали такі характеристики: $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$; $\gamma = 1\text{--}4 \%$; $d_b = 11 \text{ мкм}$; $\sigma_b = 1,8\text{--}2,2 \text{ ГПа}$; $E_b = 93\text{--}114 \text{ ГПа}$ [4–6].

Колоїдний графіт С-1 був отриманий графітизацією термоантрациту при $2773 \pm 100 \text{ К}$ з наступним дробленням у колоїдному млинку. Графіт С-1 мав такі характеристики: вміст золи 1,5 %; вологість 0,5 %; тонкість млива: розмір частинок 1 – 80 мкм, розмір частинок основної фракції 1 – 8 мкм (75 %), залишок на ситі з отворами 63 мкм – менше 0,5 % [7].

Композиції на основі ароматичного поліаміду і дисперсій волокон, порошок графіту або вуглецевих волокон отримували за ХМА-технологією [9]. Волокна до і після змішування мали об'ємний (масовий) γ -розподіл за довжинами в межах 20 – 1200 мкм [10]. Заготовки були виготовлені за технологією переробки ароматичних поліамідів пресуванням [11]. Волокна були розташовані хаотично в шарах, перпендикулярних до зусилля пресування, напрямку деформування та напрямку теплового потоку при дослідженні теплопровідності від температури і паралельних поверхні тертя.

Теплопровідність досліджуваних матеріалів вимірювали за допомогою приладу ИТЛ-400 в монотонному режимі нагрівання на зразках циліндричної форми. Вимірювання проводили згідно зі стандартною методикою при температурі 373 і 473 К.

Антифрикційні властивості досліджували на трибометрі [12] за схемою „сфера – площина”. Дослідження було поділено на два етапи: для першого етапу температуру ($T_1 = 473 \pm 2 \text{ К}$) визначали на відстані 1–2 мм від поверхні тертя термпарою ХК і вторинного приладу електронного потенціометра КСП – 4

на відстані шляху тертя $S_1 = 0-10$ км і навантаженні $N_{11} = 200$ Н при обмеженому мащенні 10 % від номінального авіаційною оливою МС-20; на другому етапі дослідження інтенсивності зношування проводили при тій самій температурі ($T_1 = T_2 = 473 \pm 2$ К) і обмеженому мащенні на відстані шляху тертя $S_2 = 10 - 25$ км і навантаженні $N_{21} = 350$ Н.

Дослідження при терті без мащення проведені при $N_1 = 100$ Н; $v = 0,42$ м/с; $T_3 = 373 \pm 2$ К по сталі 45 (HB $4,6 \pm 0,2$ ГПа; $R_{a0} = 0,30 \pm 0,05$ мкм).

Результати та обговорення

Із застосуванням планування експерименту виконано дослідження закономірностей зношування антифрикційного матеріалу на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2, наповненого вуглецевим волокном, графітованого при 2400 °С, базальтовим волокном і колоїдним графітом С-1 і їх зв'язку з його теплофізичними властивостями в залежності від наповнювача.

У проведеному дослідженні параметрами оптимізації були: питома інтенсивність зношування (I_1, I_2, I_3) і коефіцієнт теплопровідності ($\lambda_{373}, \lambda_{473}$, де індекси є температурами випробувань) композиції на основі ароматичного поліаміду (фенілон С-2), а незалежними змінними факторами – концентрація графітованого вуглецевого волокна, базальтового волокна і колоїдного графіту С-1. Зміну теплофізичних властивостей, закономірності зношування вибраних матеріалів представлялося описати інтерполяційними моделями в достатньо широкому інтервалі варіювання факторів. Враховуючи дане завдання і випадковість процесів зношування та зміни теплофізичних властивостей, що знаходяться під впливом цілого комплексу змінних факторів, представлялася нелінійна залежність між параметрами оптимізації і вибраними в експерименті факторами.

Порівняно з іншими планами сильніший критерій оптимальності мають рототабельні плани другого порядку Бокса, особливо корисні та дуже ефективні при кількості факторів $k=3$ [13,14]. Тому для дослідження дієздатності композиції в залежності від наповнювача використовувалося рототабельне планування другого порядку при $k=3$. У цьому випадку

застосовували матрицю планування, згідно з якою загальна кількість дослідів рівна $N=20$, у тому числі по шість повторних дослідів у центрі («нульовій» ділянці) та «зірковій» ділянці плану ($n_0=6, n_\alpha=6$) і вісім дослідів у «ядрі» плану ($n_\gamma=8$) [13,15].

Найменування факторів, інтервали і рівні їх варіювання наведені в табл. 1.

За допомогою матриці планування і прийнятих інтервалів та рівнів варіювання побудували робочу матрицю, яку пізніше використовували при проведенні експерименту (табл. 2). Кількість дослідів плану визначили за формулою:

$$N = n_\gamma + n_\alpha + n_0, \quad (1)$$

де $n_\gamma = p^k = 2^k, p = 2$ ($x_{iu} = \pm 1$) кількість рівнів; $n_\alpha = p \cdot k = 2 \cdot 3; n_0 = 6$ за [13].

«Зіркове» плече розраховували за формулою:

$$\alpha = p^{k/4} = 2^{3/4} = \sqrt[4]{8} \approx 1,682, \quad (2)$$

тоді кількість рівнів у «зірковій» ділянці плану дорівнює 3 ($x_{iu} = \pm 1,682; 0$).

План експерименту (табл. 2) задовольняв рототабельним умовам оптимальності [16]:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = N\lambda_2, \text{ де } i = 1, 2, 3, \dots, k, \quad (3)$$

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 x_{ju}^2 = N\lambda_4, \text{ де } i, j = 1, 2, 3, \dots, k, i \neq j; \quad (4)$$

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^4 = 3N\lambda_4, \text{ де } i, j = 1, 2, 3, \dots, k, \quad (5)$$

де λ_2, λ_4 – деякі довільним чином вибрані сталі, що задовольняють нерівності (умовам невідродженості матриці планування):

$$\lambda_4^* = \frac{\lambda_4}{\lambda_2^2} > \frac{k}{k+2}. \quad (6)$$

За [16] практично λ_4^* можна розрахувати так:

$$\lambda_4^* = \frac{k \cdot N}{(k+2)(N-n_0)}. \quad (7)$$

Побудувати правильну фігуру (рототабельний план) за умов (7) можна лише для $k = 2$ і 4. Для $k = 3$ з 5 правильних фігур у тривимірному просторі для

Таблиця 1. Позначення факторів, рівні та інтервали варіювання

Найменування фактора	Вміст графітованого волокна, %	Вміст графіту, %	Вміст базальтового волокна, %
Натуральне позначення	$C_{ВВ}$	$C_{ГР}$	$C_{БВ}$
Кодоване позначення	X_1	X_2	X_3
Рівні варіювання			
-1,682	3,41	2,31	4,00
-1,000	9,81	6,50	13,12
0	19,20	12,65	26,50
+1,000	28,59	18,80	39,88
+1,682	34,99	22,99	49,01
Інтервал варіювання, ε_i	9,39	6,15	13,38

Таблиця 2. Матриця рототабельного планування другого порядку і робоча матриця експерименту

Номер досліджу	Матриця планування			Робоча матриця		
	X_1	X_2	X_3	$C_{BB},$ мас. ч.	$C_{Гр},$ мас. ч.	$C_{БВ},$ мас. ч.
1	+1	+1	+1	28,59	18,8	39,88
2	+1	+1	-1	28,59	18,8	13,12
3	+1	-1	+1	28,59	6,5	39,88
4	+1	-1	-1	28,59	6,5	13,12
5	-1	+1	+1	9,81	18,8	39,88
6	-1	+1	-1	9,81	18,8	13,12
7	-1	-1	+1	9,81	6,5	39,88
8	-1	-1	-1	9,81	6,5	13,12
9	-1,682	0	0	3,4	12,65	26,5
10	+1,682	0	0	35,0	12,65	26,5
11	0	-1,682	0	19,2	2,3	26,5
12	0	+1,682	0	19,2	2,3	26,5
13	0	0	-1,682	19,2	12,65	4,2
14	0	0	+1,682	19,2	12,65	48,8
15	0	0	0	19,2	12,65	26,5
16	0	0	0	19,2	12,65	26,5
17	0	0	0	19,2	12,65	26,5
18	0	0	0	19,2	12,65	26,5
19	0	0	0	19,2	12,65	26,5
20	0	0	0	19,2	12,65	26,5

$N = 20$ точок можна побудувати план на додекаедрі [16]. Але, незважаючи на те, що вершини цієї фігури (план) задовольняють умовам рототабельності (3) – (5), спостерігається виродження значення λ_4^* , яке дорівнює 0,6 і нерівність (6) перетворюється у рівність (за (7) $\lambda_4^* = 0,8571$).

Пошук значень λ_2 і λ_4 привів до таких результатів:
 $\lambda_2 = 0,6828$, $\lambda_4 = 0,4$,
звідки $\lambda_4^* = 0,8579$, що близько до (7).

При цьому умови рототабельності (3) – (5) виконуються:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = 13,6569; N \lambda_2 = 13,6560 \quad (8)$$

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 x_{ju}^2 = 8,0; N \lambda_4 = 8,0 \quad (9)$$

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^4 = 24,0; 3N \lambda_4 = 24,0 \quad (10)$$

В якості математичної моделі прийнято поліном другого порядку, у вигляді:

$$y_u = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2, \quad (11)$$

де y_u – значення λ та I , або в канонічній формі:

$$Y - Y_s = B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2 + B_{33} X_3^2, \quad (12)$$

де Y_s – координати нового центру; B_{11}, B_{22}, B_{33} – коефіцієнти рівняння (11) у канонічній формі (12); X_1, X_2, X_3 – нові змінні.

Коефіцієнти регресії визначали за рівняннями (з урахуванням [13,15]):

$$b_0 = \frac{2A}{N} \left[(\lambda_4^*)^2 (k+2) \sum_{u=1}^N y_u - c \cdot \lambda_4^* \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u \right]; \quad (13)$$

$$b_i = \frac{c \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{N}; \quad (14)$$

$$b_{ij} = \frac{c^2}{N \cdot \lambda_4^*} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u; \quad (15)$$

$$b_{ii} = \frac{Ac^2}{N} \left[(k+2) \lambda_4^* - k \right] \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + \frac{Ac^2}{N} (1 - \lambda_4^*) \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - \frac{2Ac}{N} \cdot \lambda_4^* \sum_{u=1}^N y_u, \quad (16)$$

$$\text{де } c = \frac{N}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad (17)$$

$$A = \frac{1}{2\lambda_4^* [(k+2)\lambda_4^* - k]}; \quad (18)$$

N – загальна кількість дослідів;

u – поточний дослід (точка плану табл. 2).

Дисперсію відновлення визначали за результатами паралельних дослідів у центрі плану. Значущість коефіцієнтів регресії в рівнянні знаходили з урахуванням відомого значення дисперсії відновлення. Для оцінки значущості знайдених коефіцієнтів регресії застосовували такі формули (з урахуванням [13,15,16]):

$$S^2\{b_0\} = \frac{2A \cdot \lambda_4^* (k+2)}{N} S^2\{y\}; \quad (19)$$

$$S^2\{b_i\} = \frac{cS^2\{y\}}{N}; \quad (20)$$

$$S^2\{b_{ij}\} = \frac{c^2}{N} S^2\{y\}; \quad (21)$$

$$S^2\{b_{ii}\} = \frac{A \cdot c^2 [(k+1)\lambda_4^* - (k-1)]}{N} S^2\{y\}, \quad (22)$$

де $S^2\{y\}$ – дисперсія помилки за паралельними спостереженнями в «нульовій» ділянці, яка пов'язана з дисперсією відновлення, при $n = 1$ повторних дослідів у «ядрі» та «зірковій» ділянках плану.

$$S^2\{y_{uo}\} = \frac{S^2\{y_{uo}\}}{n_0}, \quad (23)$$

де $S^2\{y_{uo}\}$ – дисперсія відновлення; n_0 – кількість повторів у «нульовій» ділянці.

Довірчий інтервал для відповідних коефіцієнтів визначали за [13]:

$$\Delta b = \pm t_{\text{табл.}} \cdot S\{b_i\}, \quad (24)$$

де $t_{\text{табл.}}$ – вибрано з розподілу Стюдента [17] для рівня значущості $\alpha = 0,05$ і числа ступенів вільності $f = n_0 - 1 = 5$;

$$S\{b_i\} = +\sqrt{S^2\{b_i\}}. \quad (25)$$

Порівняння абсолютних величин коефіцієнтів регресії і відповідних довірчих інтервалів показало, що з довірою вірогідністю 0,95 можна вважати значущими частину коефіцієнтів рівняння, яке і перевіряли з v – значущими коефіцієнтами на адекватність за формулою (з урахуванням [13]):

$$S^2_{\text{Ад.}} = \frac{\sum_{u=1}^N (y_u - \hat{y}_u)^2 - \sum_{u_0=1}^{n_0} (y_{u_0} - \bar{y}_0)^2}{N - \beta - (n_0 - 1)}, \quad (26)$$

де y_u – результати окремих експериментів, включаючи і повтори в «нульовій» точці;

\hat{y}_u – результат розрахований за рівняннями, що перевірялися на адекватність;

u_0 – позначення окремого результату в «нульовій» точці;

\bar{y}_0 – середнє арифметичне всіх результатів у «нульовій» ділянці;

n_0 – кількість дослідів у «нульовій» ділянці ($n_0 = 6$).

Виявилось, що модель другого порядку можна вважати адекватною з 95 %-вою довірою вірогідністю за критерієм Фішера $F_{\text{розр.}} < F_{\text{табл.}}$ [17].

У результаті реалізації робочої матриці були отримані адекватні рівняння інтенсивності зношування і коефіцієнта теплопровідності, що дають можливість виявити залежність питомої інтенсивності зношування і коефіцієнта теплопровідності матеріалу від вмісту в ньому графіту, вуглецевого і базальтового волокон.

Інтенсивність зношування для I етапу під час мащення:

$$I_1 = 10^{-7} (3,482 - 0,685x_1 - 0,443x_2x_3 + 0,412x_1^2 - 0,584x_2^2 - 0,718x_3^2). \quad (27)$$

Для II етапу під час мащення:

$$I_2 = 10^{-7} (2,122 + 0,685x_3 + 0,329x_1x_2 - 0,488x_1x_3 + 0,226x_1^2 + 0,278x_2^2 - 0,255x_3^2). \quad (28)$$

При роботі без мащення:

$$I_3 = 10^{-7} (5,234 - 2,486x_1 + 2,533x_2 + 4,013x_3 + 2,112x_2x_3 + 1,655x_1^2 + 2,733x_2^2 + 3,124x_3^2). \quad (29)$$

Аналіз рівнянь інтенсивності зношування в залежності від складу показує, що перший період тертя (0...10 км) у граничному мащенні найбільше значення має концентрація вуглецевого волокна (значущий лінійний коефіцієнт при x_1), причому знак “-” при інших членах рівняння говорить про те, що із зростанням вмісту вуглецевого волокна (x_1) зменшується інтенсивність зношування композиції, тобто зростає зносостійкість матеріалу. Концентрація базальтового волокна і графіту на цьому етапі не впливає. Лінійні коефіцієнти x_2 і x_3 незначущі.

При зростанні шляху тертя (10...25 км) закономірності дещо змінюються. Значущий лінійний коефіцієнт при x_3 говорить про те, що чим більший вміст базальтового волокна в композиції, тим вища інтенсивність зношування, тобто матеріал має більші абразивні властивості.

Аналіз рівняння інтенсивності зношування при терті без мащення показує, що за лінійними коефіцієнтами найбільший ефект зменшення інтенсивності дає вміст вуглецевого волокна, збільшує інтенсивність зношування графіт і базальтове волокно, причому останнє в більшій мірі.

Для коефіцієнтів теплопровідності отримані такі рівняння:

$$\lambda_{473} = 0,584 + 0,041x_1 + 0,096x_2 - 0,025x_1x_2 - 0,035x_1x_3 + 0,05x_1^2 + 0,067x_2^2 + 0,054x_3^2; \quad (30)$$

$$\lambda_{373} = 0,543 + 0,03x_1 + 0,096x_2 - 0,03x_1x_2 + 0,056x_1^2 + 0,07x_2^2 + 0,061x_3^2; \quad (31)$$

Аналіз цих рівнянь показує, що коефіцієнт теплопровідності зростає при збільшенні вмісту вуглецевого волокна і графіту, причому збільшення вмісту графіту впливає більше, ніж збільшення вмісту вуглецевого волокна при будь-якій температурі.

На основі поліноміальної моделі можна оцінити ступінь впливу кожного з факторів, що міститься в моделі, на досліджуваний процес. Значущість лінійних і нелінійних ефектів визначається величиною і знаком відповідного коефіцієнта в рівнянні. Чим більший коефіцієнт за абсолютною величиною, тим більш суттєвий вплив фактора для прийнятих інтервалів варіювання. Слід відмітити, що оцінку впливу того чи іншого фактора за величиною і знаком коефіцієнта математичної моделі можна виявити тільки для лінійного поліноміального рівняння, яке не містить ефектів взаємодії. Для поліноміальних рівнянь, що

містять ефекти взаємодій і квадратичні ефекти, вплив будь-якого фактора можна оцінити лише на основі вибірки із багатофакторної моделі тільки тих ефектів, що містять індекси, які належать до оцінюючого фактора.

Ортогональними інваріантами раціональної функції другого порядку від трьох аргументів є функції J_1, J_2, J_3, K_4 [18]. Аналіз одержаних рівнянь за допомогою цих інваріантів означення центра фігури та виду поверхні показав, що для поверхонь рівних значень інтенсивностей зношування на першому етапі при обмеженому мащенні залежність функції відгуку від трьох факторів (x_1, x_2, x_3) має вигляд однопорожнинного гіперболоїда ($J_3 \neq 0; J_1, J_2 \leq 0; K_4 > 0$), поверхонь рівних значень інтенсивностей зношування на другому етапі при обмеженому мащенні – двопорожнинного гіперболоїда ($J_3 \neq 0; J_2, J_3 \leq 0; K_4 < 0$), поверхонь рівних значень інтенсивності зношування без мащення та коефіцієнтів теплопровідності при температурах 373 і 473K – уявного еліпсоїда ($J_3 \neq 0; J_1, J_2, J_3 > 0; K_4 \neq 0; K_4 > 0$).

При виборі оптимальних параметрів скористаємося двовимірними перерізами функцій відгуку (11) при фіксованому значенні одного фактора, що дає змогу отримати уявлення про закономірності зміни критерію оптимізації при варіюванні факторів на певному рівні. Для цього, фіксуючи кожен фактор на певному рівні ($x_1 = -1,5; 0; +1,5$), визначаємо координати нового центра $S(X_2, X_3)$, кут повороту нових осей координат (α) і перетворюємо отримані рівняння регресії в канонічні у вигляді (12). Отримали такі результати:

- для інтенсивності зношування в обмеженому мащенні на першому етапі:

$$1) \text{ при } X_1 = -1,5: \\ S(0; 0); \alpha = -36^\circ 372; Y - 5,4365 \cdot 10^{-7} = -0,4244 \cdot 10^{-7} X_2^2 - 0,8776 \cdot 10^{-7} X_3^2 \quad (32)$$

$$2) \text{ при } X_1 = 0: \\ S(0; 0); \alpha = -36^\circ 372; Y - 3,4820 \cdot 10^{-7} = -0,4244 \cdot 10^{-7} X_2^2 - 0,8776 \cdot 10^{-7} X_3^2 \quad (33)$$

$$3) \text{ при } X_1 = +1,5: \\ S(0; 0); \alpha = -36^\circ 372; Y - 3,3815 \cdot 10^{-7} = -0,4244 \cdot 10^{-7} X_2^2 - 0,8026 \cdot 10^{-7} X_3^2 \quad (34)$$

- для інтенсивності зношування в обмеженому мащенні на другому етапі:

$$4) \text{ при } X_1 = -1,5: \\ S(0,89; 2,78); \alpha = 0^\circ; Y - 4,3800 \cdot 10^{-7} = 0,2780 \cdot 10^{-7} X_2^2 - 0,2550 \cdot 10^{-7} X_3^2 \quad (35)$$

$$5) \text{ при } X_1 = 0: \\ S(0; 1,34); \alpha = 0^\circ; Y - 2,3470 \cdot 10^{-7} = 0,2780 \cdot 10^{-7} X_2^2 - 0,2550 \cdot 10^{-7} X_3^2 \quad (36)$$

$$6) \text{ при } X_1 = +1,5: \\ S(-0,89; -0,09); \alpha = 0^\circ; Y - 2,4136 \cdot 10^{-7} = 0,2780 \cdot 10^{-7} X_2^2 - 0,2550 \cdot 10^{-7} X_3^2 \quad (37)$$

- для інтенсивності зношування без мащення:

$$7) \text{ при } X_1 = -1,5: \\ S(-0,25; -0,56); \alpha = -38^\circ 452; Y - 11,2523 \cdot 10^{-7} = 1,8552 \cdot 10^{-7} X_2^2$$

$$+ 4,0018 \cdot 10^{-7} X_3^2 \quad (38)$$

8) при $X_1 = 0$:

$$S(-0,25; -0,56); \alpha = -38^\circ 452; Y - 3,7995 \cdot 10^{-7} = 1,8552 \cdot 10^{-7} X_2^2 + 4,0018 \cdot 10^{-7} X_3^2 \quad (39)$$

9) при $X_1 = +1,5$:

$$S(-0,25; -0,56); \alpha = -38^\circ 452; Y - 3,7943 \cdot 10^{-7} = 1,8552 \cdot 10^{-7} X_2^2 + 4,0018 \cdot 10^{-7} X_3^2 \quad (40)$$

- для коефіцієнта теплопровідності при температурі 473 K:

10) при $X_1 = -1,5$:

$$S(-1,00; -0,49); \alpha = 0^\circ; Y - 0,5557 = 0,0670 \cdot X_2^2 + 0,0540 \cdot X_3^2 \quad (41)$$

11) при $X_1 = 0$:

$$S(-0,72; 0); \alpha = 0^\circ; Y - 0,5496 = 0,0670 \cdot X_2^2 + 0,0540 \cdot X_3^2 \quad (42)$$

12) при $X_1 = +1,5$:

$$S(-0,45; +0,49); \alpha = 0^\circ; Y - 0,7326 = 0,0670 \cdot X_2^2 + 0,0540 \cdot X_3^2 \quad (43)$$

- для коефіцієнта теплопровідності при температурі 373 K:

13) при $X_1 = -1,5$:

$$S(-1,01; 0); \alpha = 0^\circ; Y - 0,5530 = 0,0700 \cdot X_2^2 + 0,0610 \cdot X_3^2 \quad (44)$$

14) при $X_1 = 0$:

$$S(-0,69; 0); \alpha = 0^\circ; Y - 0,5101 = 0,0700 \cdot X_2^2 + 0,0610 \cdot X_3^2 \quad (45)$$

15) при $X_1 = +1,5$:

$$S(-0,36; 0); \alpha = 0^\circ; Y - 0,7047 = 0,0700 \cdot X_2^2 + 0,0610 \cdot X_3^2 \quad (46)$$

На рис. 1 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування зразків на першому етапі в обмеженому мащенні (I_1) та коефіцієнта теплопровідності при температурі 473K (λ_{473}) від вмісту графіту $C_{ГР}$ (%) та базальтового волокна $C_{БВ}$ (%) при фіксованому значенні вмісту вуглецевого волокна $C_{ВВ} = 5,12\%$ ($x_1 = -1,5$) (рис. 1а), $C_{ВВ} = 19,20\%$ ($x_1 = 0$) (рис. 1б), $C_{ВВ} = 33,29\%$ ($x_1 = +1,5$) (рис. 1в). На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини інтенсивності зношування $I_1 \cdot 10^{-7}$, мм³/(Н·м) та коефіцієнта теплопровідності λ_{473} , Вт/(м·К).

Як видно з рис. 1, мінімальні значення інтенсивності зношування на першому етапі при низькому вмісті вуглецевого волокна спостерігаються для мінімального і максимального вмісту графіту і базальтового волокна. Поступове зростання концентрації графіту і базальтового волокна до центру факторного простору супроводжується зростанням інтенсивності зношування. При наступному зростанні вмісту графіту і базальтового волокна до максимальних значень спостерігається зменшення інтенсивності зношування. Тобто, на інтенсивність зношування впливає взаємодія концентрацій графіту і базальтового волокна.

При зростанні концентрації вуглецевого волокна до 33,29 % виявляється втрата зміни графіту, яка не залежить від вмісту базальтового волокна. При збільшенні

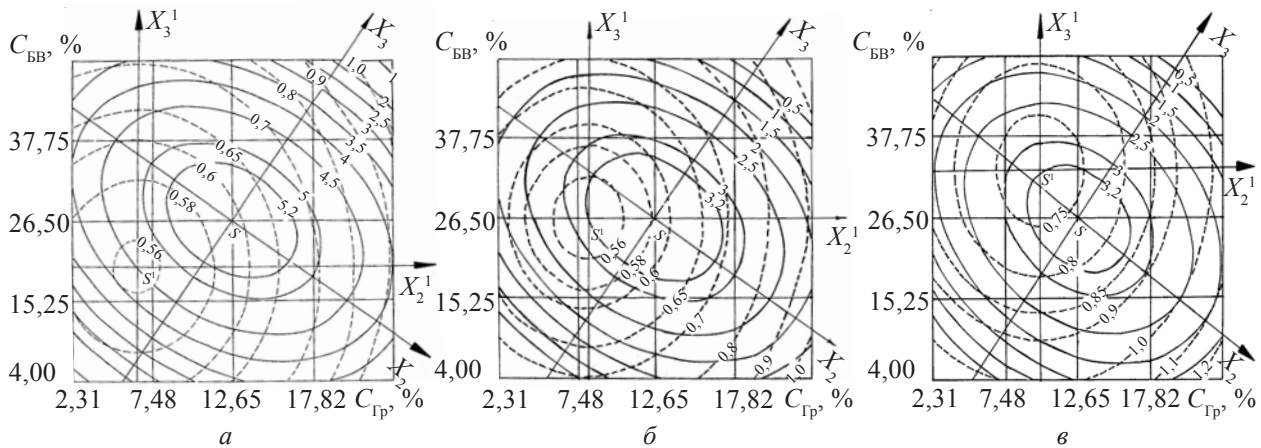


Рис. 1. Двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування під час першого етапу $S_1 = 0 \dots 10$ км при обмеженому машенні (суцільні лінії) та коефіцієнта теплопровідності при температурі 473 К (крисковані лінії) від вмісту графіту $C_{Гр}$ та базальтового волокна $C_{БВ}$ при фіксованому значенні вмісту вуглецевого волокна $C_{БВ} = 5,12\%$ ($x_1 = -1,5$) (а), $19,20\%$ ($x_1 = 0$) (б) і $33,29\%$ ($x_1 = +1,5$) (в).

вмісту вуглецевого волокна спостерігається зменшення інтенсивності зношування, характер залежності не змінюється, центр нових координат не зміщується.

Мінімальні значення коефіцієнта теплопровідності спостерігаються при вмісті графіту в межах 4 – 8 % і базальтового волокна в межах 17 – 23 %. Лінії рівних значень теплопровідності спостерігаються в широкому інтервалі концентрацій базальтового волокна, тому теплопровідність у даному випадку залежить від концентрації графіту і не залежить від концентрації базальтового волокна. Чим більший вміст графіту, тим вищий коефіцієнт теплопровідності. При збільшенні концентрації вуглецевого волокна спостерігається зміщення нового центра координат у бік вищої концентрації базальтового волокна, при незмінному вмісті графіту. Чим вищий

вміст вуглецевого волокна, тим більший коефіцієнт теплопровідності.

На рис. 2 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування зразків на другому етапі з обмеженим машенням (I_2) та коефіцієнта теплопровідності при температурі 473 К (λ_{473}) від вмісту графіту $C_{Гр}$ (%) та базальтового волокна $C_{БВ}$ (%) при фіксованому значенні вмісту вуглецевого волокна $C_{БВ} = 5,12\%$ ($x_1 = -1,5$) (рис. 2а), $C_{БВ} = 19,20\%$ ($x_1 = 0$) (рис. 2б), $C_{БВ} = 33,29\%$ ($x_1 = +1,5$) (рис. 2в). На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини інтенсивності зношування $I_2 \cdot 10^{-7}$, мм³/(Н·м) та коефіцієнта теплопровідності λ_{473} , Вт/(м·К).

Як видно з рис. 2, мінімальні значення інтенсивності зношування на другому етапі з машенням (I_2) характерні для всієї ділянки факторного простору вмісту графіту і для композицій з низьким вмістом

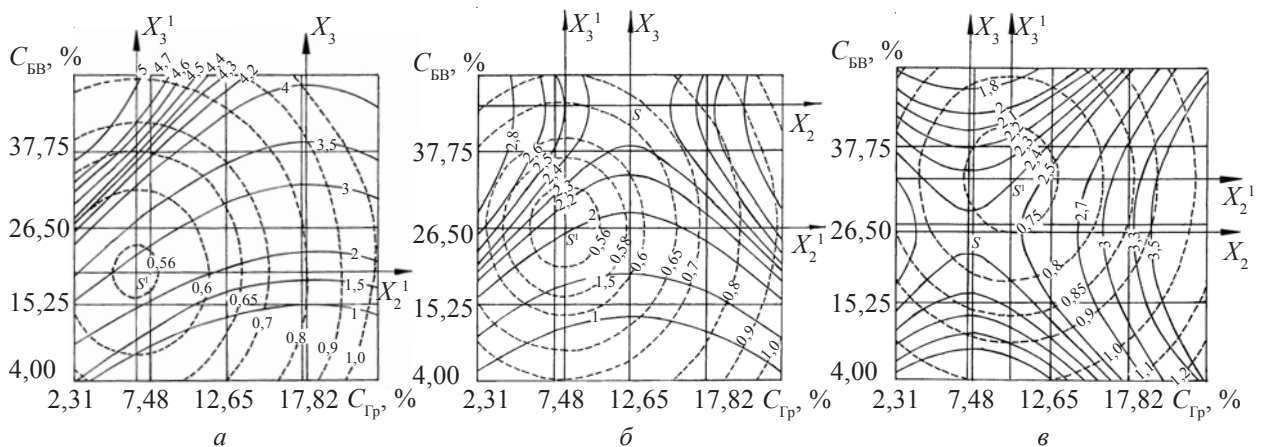


Рис. 2. Двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування під час другого етапу $S_2 = 10 \dots 25$ км при обмеженому машенні (суцільні лінії) та коефіцієнта теплопровідності при температурі 473 К (крисковані лінії) від вмісту графіту $C_{Гр}$ та базальтового волокна $C_{БВ}$ при фіксованому значенні вмісту вуглецевого волокна $C_{БВ} = 5,12\%$ ($x_1 = -1,5$) (а), $19,20\%$ ($x_1 = 0$) (б) і $33,29\%$ ($x_1 = +1,5$) (в).

базальтового волокна (4 – 20 %). Максимальні значення I_2 характерні для мінімального вмісту графіту та для широкої ділянки факторного простору вмісту базальтового волокна (більше 26 %). Із зростанням вмісту базальтового волокна спостерігається значне зростання I_2 незалежно від концентрації графіту. При поступовому зростанні концентрації вуглецевого волокна (рис. 2б) максимальні значення I_2 спостерігаються уже при мінімальному і максимальному вмісті графіту та для широкої ділянки факторного простору вмісту базальтового волокна. При наступному зростанні концентрації вуглецевого волокна (рис. 2в) мінімальні значення I_2 спостерігаються для низько-наповнених графітом композицій з низьким та високим вмістом базальтового волокна. Максимальні значення I_2 характерні для високонаповнених графітом композицій в широкій ділянці факторного простору вмісту базальтового волокна. При зростанні концентрації вуглецевого волокна спостерігається зміщення нового центра координат у факторний простір.

Для коефіцієнта теплопровідності мінімальні його значення спостерігаються для композицій з низьким вмістом графіту (4 – 8 %) та з вмістом базальтового волокна 16 – 24 %. Теплопровідність у даному випадку залежить від концентрації графіту і не залежить від концентрації базальтового волокна. Чим більший вміст графіту, тим вищий коефіцієнт теплопровідності. Збільшення вмісту вуглецевого волокна приводить до зміщення нового центра координат у бік вищих значень вмісту базальтового волокна.

На рис.3 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування зразків на третьому етапі без мащення (I_3) та коефіцієнта теплопровідності при температурі 373К (λ_{373}) від вмісту графіту $C_{Гр}$ (%) та базальтового волокна $C_{БВ}$ (%) при фіксованому значенні вмісту вуглецевого волокна $C_{БВ} = 5,12$ % ($x_1 = -1,5$) (рис. 3а), $C_{БВ} = 19,20$ % ($x_1 = 0$) (рис. 3б),

$C_{БВ} = 33,29$ % ($x_1 = +1,5$) (рис. 3в). На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини інтенсивності зношування $I_3 \cdot 10^{-7}$, мм³/(Н·м) та коефіцієнта теплопровідності λ_{373} , Вт/(м·К).

Аналіз цих результатів показує, що мінімальна інтенсивність зношування без мащення при мінімальному вмісті вуглецевого волокна буде спостерігатися при вмісті графіту в межах 7 – 14 % та при вмісті базальтового волокна в межах 14 – 26 %. При низькому та високому вмісті базальтового волокна спостерігається різке зростання I_3 , яке не залежить від вмісту графіту. Значення I_3 при мінімальному вмісті вуглецевого волокна набагато вищі, ніж при максимальному. Із зростанням вмісту вуглецевого волокна I_3 зменшується, характер її залежності не змінюється і координати нового центра незмінні.

Для теплопровідності при температурі 373К мінімальні її значення при низькому вмісті вуглецевого волокна спостерігаються для композицій, що містять 4 – 9 % графіту і 23 – 30 % базальтового волокна. При даній температурі коефіцієнт теплопровідності залежить від вмісту графіту і не залежить від вмісту базальтового волокна. Чим більша концентрація графіту, тим вища теплопровідність композиції. При зростанні вмісту вуглецевого волокна характер залежності не змінюється, коефіцієнт теплопровідності зростає і зона його мінімальних значень зміщується в бік більшого вмісту графіту.

Порівнюючи рис. 3 з рис. 1 і 2, видно, що інтенсивність зношування при терті без мащення набагато вища, ніж інтенсивність зношування на першому і другому етапах під час мащення.

Розрахунок точок екстремуму для одержаних функцій відгуку показав, що майже всі оптимуми знаходяться у факторному просторі. Виняток становить тільки інтенсивність зношування на другому етапі під час обмеженого мащення при мінімальному вмісті

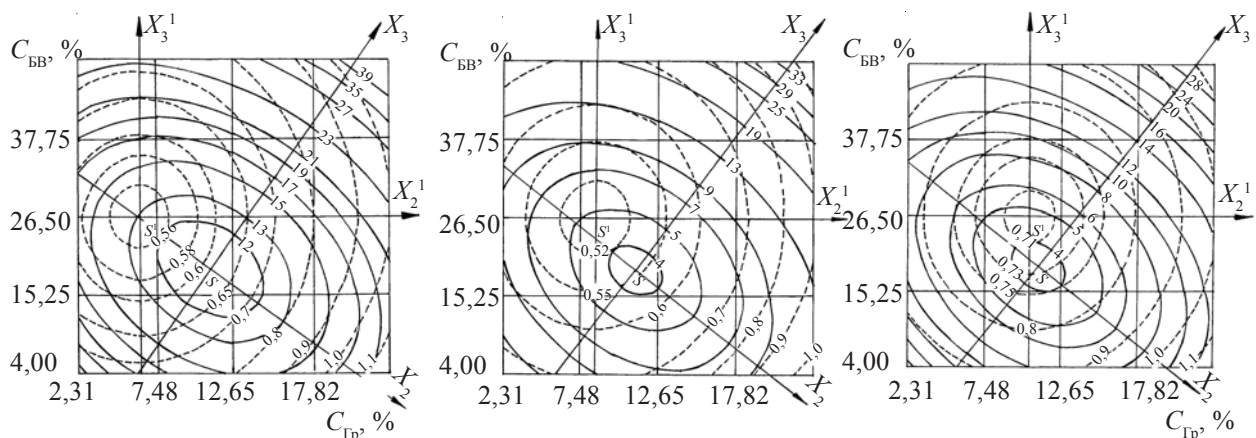


Рис. 3. Двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування під час тертя без мащення (суцільні лінії) та коефіцієнта теплопровідності при температурі 373К (кривовані лінії) від вмісту графіту $C_{Гр}$ та базальтового волокна $C_{БВ}$ при фіксованому значенні вмісту вуглецевого волокна $C_{БВ} = 5,12$ % ($x_1 = -1,5$) (а), $19,20$ % ($x_1 = 0$) (б), $33,29$ % ($x_1 = +1,5$) (в).

вуглецевого волокна ($x_1 = -1,5$), для якої оптимум знаходиться далеко за межами факторного простору.

Так для інтенсивності зношування при обмеженому мащенні і без мащення визначальною є структура композиційного матеріалу і важливий вплив має вміст всіх трьох наповнювачів, тоді як для коефіцієнтів теплопровідності важливу роль відіграє вміст вуглецевого волокна і графіту, а роль базальтового волокна незначна.

Це дає можливість зробити висновки про оптимальний склад і технологію композиційного матеріалу:

- для інтенсивності зношування в обмеженому мащенні на першому етапі:

$C_{\text{extr BB}}=27,00\%$; $C_{\text{extr Гр}}=12,65\%$; $C_{\text{extr ББ}}=26,50\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % об.:

$C_{\text{АПА}}=44,31$; $C_{\text{ББ}}=26,32$; $C_{\text{Гр}}=21,14$; $C_{\text{ББ}}=8,23$

- для інтенсивності зношування в обмеженому мащенні на другому етапі:

$C_{\text{extr BB}}=27,70\%$; $C_{\text{extr Гр}}=9,35\%$; $C_{\text{extr ББ}}=32,88\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % об.:

$C_{\text{АПА}}=41,36$; $C_{\text{ББ}}=28,36$; $C_{\text{Гр}}=7,83$; $C_{\text{ББ}}=22,45$

- для інтенсивності зношування без мащення:

$C_{\text{extr BB}}=26,25\%$; $C_{\text{extr Гр}}=11,13\%$; $C_{\text{extr ББ}}=19,02\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % об.:

$C_{\text{АПА}}=54,95$; $C_{\text{ББ}}=24,62$; $C_{\text{Гр}}=8,54$; $C_{\text{ББ}}=11,89$

- для коефіцієнта теплопровідності при температурі 473 К:

$C_{\text{extr BB}}=12,61\%$; $C_{\text{extr Гр}}=7,44\%$; $C_{\text{extr ББ}}=23,46\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % об.:

$C_{\text{АПА}}=68,84$; $C_{\text{ББ}}=11,45$; $C_{\text{Гр}}=5,52$; $C_{\text{ББ}}=14,19$

- для коефіцієнта теплопровідності при температурі 373 К:

$C_{\text{extr BB}}=14,70\%$; $C_{\text{extr Гр}}=7,80\%$; $C_{\text{extr ББ}}=26,50\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % об.:

$C_{\text{АПА}}=63,13$; $C_{\text{ББ}}=14,11$; $C_{\text{Гр}}=5,83$; $C_{\text{ББ}}=16,93$.

Література

1. Сиренко Г. О., Базюк Л. В., Свідерський В. П., Тараненко С. М. // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – 6, № 3. – С. 498 – 506.
2. Сиренко Г. А., Свідерський В. П., Герасимов В. Д., Никонов В. З. Антифрикционные термостойкие полимеры. – К.: Техника, 1978. – 246 с.
3. Сиренко Г.А. Антифрикционные карбопластики. – К.: Техніка, 1985. – 195с.
4. Джигирис Д.Д., Волинский А.К., Козловский П.П. и др. Базальто-волокнистые композиционные материалы и конструкции. – 1980. – С.54–81.
5. Мор Дж. Стекланные волокна. Наполнители для полимерных композиционных материалов. – 1981. – С. 540 – 587.
6. Сабраманиэн Р., Аустин Х. Базальтовые волокна // Наполнители для полимерных композиционных материалов. – М.: Химия, 1981. – С. 587 – 595.
7. Белов С.И., Сигарев А.М., Соляков В.К., Черных В.А. // Конструкционные материалы на основе графита. – 1966. – № 2. – С. 27 – 34.
8. Свідерський В. П., Федоришин О. І. // Вісник Прикарп. ун-ту. Сер. Хімія, (І). – 2001. – С. 118 –132.
9. А.с. 1736171 СССР, МКИ⁶ C08J5/16; C08L27/18. Способ получения антифрикционной композиции «флубон» / Г. А. Сиренко, А. Ф. Будник. – Оpubл. 1992.
10. Сиренко Г. О., Шийчук О. В. // Композиц. полімер. матеріали. – 2001. –25, №1. – С.49 – 53.

11. Л. Б. Соколов, В. Д. Герасимов, В. М. Савинов, В. К. Беляков Термостойкие ароматические полиамиды. – М.: Химия, 1975. – 256с.
12. Сиренко Г. О. Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термостійких полімерів та вуглецевих волокон. – Дис... доктора техн. наук. – К.: Ін-т матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, 1997. – 431с.
13. Тихомиронов В. Б. Планирование и анализ эксперимента. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262с.
14. Бродский В. З., Бродский Л. И., Голикова Т. И. и др. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей. – М.: Металлургия, 1982. – 752с.
15. К. Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 287 с.
16. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экспериментальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340с.
17. Зажигаев Л. С., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Атомиздат, 1978. – 232с.
18. Сиренко Г. О., Мідак Л. Я. // Полімер. журн. – 2004. – 26, №3. – С. 186 – 194.

Надійшла до редакції 1 лютого 2006 р.

Влияние концентрации углеродного, базальтового волокон и графита на теплопроводность и износ композиционного материала на основе ароматического полиамида

Г. А. Сиренко¹, Л. В. Базюк¹, В. П. Свидерский², С. Н. Тараненко²

¹Прикарпатский национальный университет имени Василя Стефаника
57, ул. Шевченко, Ивано-Франковск, 76000, Украина

²Хмельницкий национальный университет
11, ул. Институтская, Хмельницкий, 29016, Украина

Методами математического исследования эксперимента и поиска оптимальных решений исследовано влияние концентрации углеродного, базальтового волокон и графита на теплопроводность и износ композиционных материалов на основе ароматического полиамида.

The influence of the concentration of carbon and basalt fibers, graphite on thermal conductivity and wear of composite material based on aromatic polyamide

H. A. Sirenko¹, L. V. Bazyuk¹, V. P. Svidersky², S. N. Taranenko²

¹Precarpathian National University named after Vasil Stefanyk
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk 76000, Ukraine

²Khmelnitsky National University
11, Instytutska Str., Khmelnytsky, 29016, Ukraine

The influence of concentration of carbon fiber, graphite and basalt fiber on thermal conductivity and wear of composite material based on aromatic polyamide is researched using methods of mathematics planning of experiment and search of optimal decisions.