

Г.О. Сіренко<sup>1</sup>, Л.В. Базюк<sup>1</sup>, В.П. Свідерський<sup>2</sup>

## Зв'язок теплофізичних та антифрикційних властивостей композиційних матеріалів з концентрацією багатокomпонентних наповнювачів

<sup>1</sup> Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка 57, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна

<sup>2</sup> Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016, Україна

Методами математичного планування експерименту та пошуку оптимальних рішень досліджено вплив концентрації вуглецевого волокна, графіту і базальтового волокна на теплопровідність та зношування композиційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду. Побудовано двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування та коефіцієнта теплопровідності від вмісту вуглецевого волокна та графіту при фіксованому значенні вмісту базальтового волокна.

**Ключові слова:** композиційні матеріали, вуглецеві волокна, графіт, базальтові волокна, ароматичний поліамід, наповнювач, теплопровідність, інтенсивність зношування

*Стаття поступила до редакції 17.11.2005; прийнята до друку 15.01.2006.*

### 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]. Дані результати виявили лінійні залежності коефіцієнта теплопровідності від температури. Це дозволяє спрогнозувати теплову поведінку матеріалів при різних температурах, а також обґрунтовано вибрати композиційний матеріал для вузлів тертя, що працюють без мащення і при обмеженому мащенні.

Мета роботи полягала в тому, щоби виявити вплив концентрації багатокomпонентних наповнювачів на інтенсивність зношування при обмеженому мащенні і без мащення та коефіцієнт теплопровідності композиційних матеріалів на основі ароматичного поліаміду методом математичного планування експерименту.

### І. Експериментальна частина

Об'єктом дослідження були композиційні матеріали на основі ароматичного поліаміду фенолон С-2 (продукт поліконденсації метафенілендіаміна 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 приведені 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;  $\gamma = 1,0 \%$  – відносне подовження при розриві;  $d_b = 6,0 \text{ мкм}$  – 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 в 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, порошоків графіту або вуглецевих волокон отримували за ХМА-технологією [9]. Подрібнення вихідних вуглецевих волокнистих матеріалів проводилось в молотковій дробарці КДУ "Українка" при 3000 об./хв. робочих органів, а потім

в млинку ножового типу МРП-1 при 7000 об./хв. (частота обертання ножа  $117 \text{ с}^{-1}$ , максимальна швидкість 78 м/с) 10 хв. для вуглецевих волокон і 20 хв. для базальтового волокна до одержання волокна з насипною густиною  $\rho = 30\text{-}50 \text{ кг/м}^3$ . Порошки ароматичного поліаміду і наповнювачів змішували в млинку МРП-1 при 7000 об./хв. за 5 хв. При цьому процес змішування, разом з тим, супроводжувався додатковим подрібненням порошків полімеру, графіту і волокон. Волокна до і після змішування мали об'ємний (масовий) гамма-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, які були перпендикулярні до зусилля пресування, напрямку деформування та напрямку теплового потоку при дослідженні теплопровідності від температури і паралельні поверхні тертя.

Теплопровідність досліджуваних матеріалів вимірювали за допомогою приладу ИТЛ-400 в монотонному режимі нагрівання на зразках циліндричної форми. Плоскі поверхні зразків притиралися шліфувальним порошком на контрольній плиті до шорсткості поверхні  $R_z = 0,63$ . Вимірювання проводили згідно стандартної методики. При введенні в експлуатацію вимірювача ИТЛ-400 робили градування. Вимірювання проводили при температурі 373 і 473 К.

Антифрикційні властивості досліджували на трибометрі [12] за схемою „сфера-площина”. Зразки були виконані висотою  $15 \pm 0,1 \text{ мм}$  і діаметром  $10 \pm 0,1 \text{ мм}$  з кінцевою сферою радіусом 6,35 мм. Зразки закріплювали у знімній головці, що дозволяло без порушення контакту вимірювати діаметр плями зносу на мікроскопі. Зразки контактували сферичною частиною по плоскій поверхні контртіла зі сталі 30X13 (твердість НВ  $4,3 \pm 0,2 \text{ ГПа}$ , вихідна шорсткість поверхні  $Ra_0 = 0,08 \pm 0,02 \text{ мкм}$ ) діаметром  $60 \pm 0,15 \text{ мм}$  і висотою  $10 \pm 0,15 \text{ мм}$ . Контртіло закріплювалося у гнізді підставки, через порожнину якої пропускала вода для відведення тепла тертя. Чашка, в якій знаходилися контртіло і зразки, мала бокові і подові нагрівачі. Швидкість ковзання дорівнювала  $v = 1,15 \text{ м/с}$ . Подальше 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 термопарою ХК і вторинного приладу електронного потенціометра КСП-4 на відстані шляху тертя  $S_1 = 0\text{-}10 \text{ км}$  і навантаженні  $N_{1i} = 200 \text{ Н}$  при обмеженому мащенні 10 % від номінального авіаційною оливою МС-20; на другому етапі дослідження інтенсивності зношування проводили при тій самій температурі ( $T_1 = T_2 = 473 \pm 2 \text{ К}$ ) і обмеженому мащенні на відстані шляху тертя  $S_2 = 10\text{-}25 \text{ км}$  і навантаженні  $N_{2i} = 350 \text{ Н}$ .

Дослідження при терті без мащення проведені при  $N_i = 100 \text{ Н}$ ,  $v = 0,42 \text{ м/с}$ ,  $T_3 = 373 \pm 2 \text{ К}$  по сталі 45 (НВ  $4,6 \pm 0,2 \text{ ГПа}$ ;  $Ra_0 = 0,3 \pm 0,05 \text{ мкм}$ ).

## II. Результати та обговорення

Із застосуванням планування експерименту виконано дослідження закономірностей зношування антифрикційного матеріалу на основі ароматичного поліаміду (ПА) фенілон С-2, наповненого вуглецевим волокном (ВВ), графітованого при  $2400^\circ\text{C}$ , базальтовим волокном (БВ) і колоїдним графітом (Гр) 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 довільно 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 більш сильніший критерій оптимальності мають рототабельні плани другого порядку Бокса, особливо корисні та дуже ефективні при кількості факторів, рівних  $k = 3$  [13,14]. Тому для дослідження дієздатності композиції в залежності від наповнювача використовувалося рототабельне планування другого порядку при  $k = 3$ . В цьому випадку застосовували матрицю планування, згідно якої загальна кількість дослідів рівна  $N = 20$ , в тому числі по шість повторних дослідів в центрі («нульовій» ділянці) та «зірковій» ділянці плану ( $n_0 = 6, n_\alpha = 6$ ) і вісім дослідів в «ядрі» плану ( $n_\beta = 8$ ) [13,15].

Найменування факторів, інтервали і рівні їх варіювання приведені нижче (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:

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

де  $n_\beta = p^k = 2^3 = 8$ ,  $p = 2$  ( $x_{iu} = \pm 1$ ) кількість рівнів;  
 $n_\alpha = p \cdot k = 2 \cdot 3 = 6$ ;  
 $n_0 = 6$  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]:

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

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

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

де  $\lambda_2, \lambda_4$  – деякі довільним чином вибрані сталі, що задовольняють нерівності (умовам невиродженості матриці планування):

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

За [16] практично  $\lambda_4^*$  можна розрахувати так:

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

Побудувати правильну фігуру (рототабельний план) за умов (7) можливо лише для  $k = 2$  і  $4$ . Для  $k = 3$  з  $5$  правильних фігур у тривимірному просторі для  $N = 20$  точок можливо побудувати план на додекаедрі [16]. Але, незважаючи на те, що вершини цієї фігури (план) задовольняють умовам рототабельності (3)-(5), спостерігається виродження значення  $\lambda_4^*$ , яке дорівнює  $0,6$  і нерівність (6) перетворюється у рівність (за (7)  $\lambda_4^* = 0,8571$ ).

Пошук значень  $\lambda_2$  і  $\lambda_4$  привело 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:

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

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

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

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

$$y_u = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (11)$$

де  $y_u$  – значення  $\lambda$  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) в канонічній формі (12);  $X_1, X_2, X_3$  – нові змінні.

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

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

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

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

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

$$\cdot \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - \frac{2Ac}{N} \cdot \lambda_4^* \sum_{u=1}^N y_u$$

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

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

$N$  – загальна кількість дослідів;

$u$  – текучий дослід (точка плану табл. 2).

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

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

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

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

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
-1,0	9,81	6,50	13,12
0	19,20	12,65	26,50
+1,0	28,59	18,80	39,88
+1,682	34,99	22,99	49,01
Інтервал варіювання, $\epsilon_i$	9,39	6,15	13,38

Таблиця 2

Матриця рототабельного планування другого порядку і робоча матриця експерименту

Номер досліджу	Матриця планування			Робоча матриця		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	C (ВВ), 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

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

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

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

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 Стьюдента [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 довірчою вірогідністю 0,95 можна рахувати значущими частину коефіцієнтів рівняння, яке і перевіряли з  $\beta$  – значущими коефіцієнтами на адекватність за формулою (з врахуванням [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 в «нульовій» ділянці;

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

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

В 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 волокна.

Інтенсивність зношування для I етапу під час мащення:

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

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...10км) в 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 володіє більшими абразивними властивостями.

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 наступні 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 відносяться до оцінюючого фактору.

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 центру 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, фіксуємо кожен фактор на певному рівні ( $x_3 = -1,5; 0; +1,5$ ), визначаємо координати нового центру  $S (X_1, X_2)$ , кут повороту нових осей координат ( $\alpha$ ) і перетворюємо отримані рівняння регресії в канонічні у вигляді (12). Отримали наступні результати:

**для інтенсивності зношування в обмеженому мащенні на першому етапі:**

1) при  $X_3 = -1,5$ :

$$S(0,83; 0,57); \alpha = 0^0; Y - 1,7708 \cdot 10^{-7} = 0,4120 \cdot 10^{-7} X_1^2 - 0,5840 \cdot 10^{-7} X_2^2 \quad (32)$$

2) при  $X_3 = 0$ :

$$S(0,83; 0); \alpha = 0^0; Y - 3,1973 \cdot 10^{-7} = 0,4120 \cdot 10^{-7} X_1^2 - 0,5840 \cdot 10^{-7} X_2^2 \quad (33)$$

3) при  $X_3 = +1,5$ :

$$S(0,83; -0,57); \alpha = 0^0; Y - 1,7708 \cdot 10^{-7} = 0,4120 \cdot 10^{-7} X_1^2 - 0,5840 \cdot 10^{-7} X_2^2 \quad (34)$$

**для інтенсивності зношування в обмеженому мащенні на другому етапі:**

4) при  $X_3 = -1,5$ :

$$S(-2,84; 1,68); \alpha = -40^0 29' 30''; Y + 0,5205 \cdot 10^{-7} = 0,0860 \cdot 10^{-7} X_1^2 + 0,2280 \cdot 10^{-7} X_2^2 \quad (35)$$

5) при  $X_3 = 0$ :

$$S(0; 0); \alpha = -40^0 29' 30''; Y - 2,1220 \cdot 10^{-7} = 0,0860 \cdot 10^{-7} X_1^2 - 0,2280 \cdot 10^{-7} X_2^2 \quad (36)$$

6) при  $X_3 = +1,5$ :

$$S(2,84; -1,68); \alpha = -40^0 29' 30''; Y - 1,5345 \cdot 10^{-7} = 0,0860 \cdot 10^{-7} X_1^2 - 0,2280 \cdot 10^{-7} X_2^2 \quad (37)$$

**для інтенсивності зношування без мащення:**

7) при  $X_3 = -1,5$ :

$$S(0,75; 0,12); \alpha = 0^0; Y - 8,2731 \cdot 10^{-7} = 1,6550 \cdot 10^{-7} X_1^2 + 2,7330 \cdot 10^{-7} X_2^2 \quad (38)$$

8) при  $X_3 = 0$ :

$$S(0,75; -0,46); \alpha = 0^0; Y - 3,7136 \cdot 10^{-7} = 1,6550 \cdot 10^{-7} X_1^2 + 2,7330 \cdot 10^{-7} X_2^2 \quad (39)$$

9) при  $X_3 = +1,5$ :

$$S(0,75; -1,04); \alpha = 0^0; Y - 14,3760 \cdot 10^{-7} = 1,6550 \cdot 10^{-7} X_1^2 + 2,7330 \cdot 10^{-7} X_2^2 \quad (40)$$

**для коефіцієнта теплопровідності при температурі 473 K:**

10) при  $X_3 = -1,5$ :

$$S(-1,17; -0,93); \alpha = 27^0 52'; Y - 0,6060 = 0,0434 \cdot X_1^2 + 0,0736 \cdot X_2^2 \quad (41)$$

11) при  $X_3 = 0$ :

$$S(-0,62; -0,83); \alpha = 27^0 52'; Y - 0,5314 = 0,0434 \cdot X_1^2 + 0,0736 \cdot X_2^2 \quad (42)$$

12) при  $X_3 = +1,5$ :

$$S(-0,07; -0,73); \alpha = 27^0 52'; Y - 0,6709 = 0,0434 \cdot X_1^2 + 0,0736 \cdot X_2^2 \quad (43)$$

**для коефіцієнта теплопровідності при температурі 373 K:**

13) при  $X_3 = -1,5$ :

$$S(-0,18; -0,67); \alpha = 32^0 28'; Y - 0,6456 = 0,0465 \cdot X_1^2 + 0,0796 \cdot X_2^2 \quad (44)$$

14) при  $X_3 = 0$ :

$$S(-0,19; -0,72); \alpha = 32^{\circ}28';$$

$$Y - 0,5023 = 0,0465 \cdot X_1^2 + 0,0796 \cdot X_2^2 \quad (45)$$

15) при  $X_3 = +1,5$ :

$$S(-0,18; -0,67); \alpha = 32^{\circ}28';$$

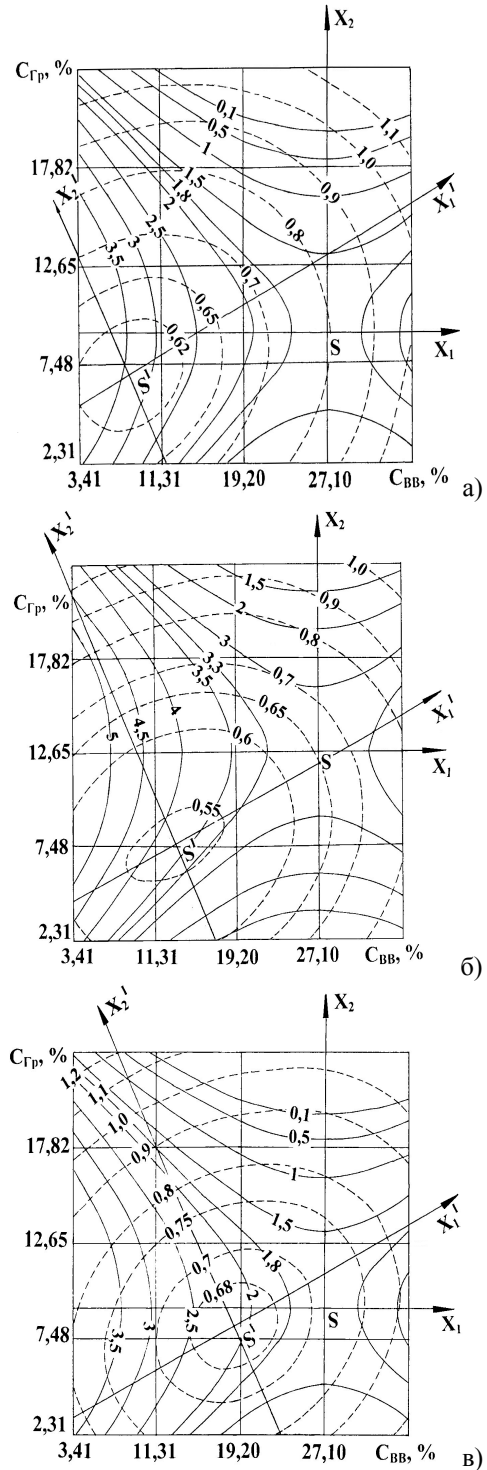
$$Y - 0,6456 = 0,0465 \cdot X_1^2 + 0,0796 \cdot X_2^2 \quad (46)$$

На рис. 1 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування зразків на першому етапі в обмеженому машенні ( $I_1$ ) та коефіцієнта теплопровідності при температурі 473 К ( $\lambda_{473}$ ) від вмісту вуглецевого волокна  $C_{БВ}$  (%) та графіту  $C_{ГР}$  (%) при фіксованому значенні вмісту базальтового волокна  $C_{БВ} = 6,43\%$  ( $x_3 = -1,5$ ) (рис. 1а),  $C_{БВ} = 26,50\%$  ( $x_3 = 0$ ) (рис. 1б),  $C_{БВ} = 46,57\%$  ( $x_3 = +1,5$ ) (рис. 1в).

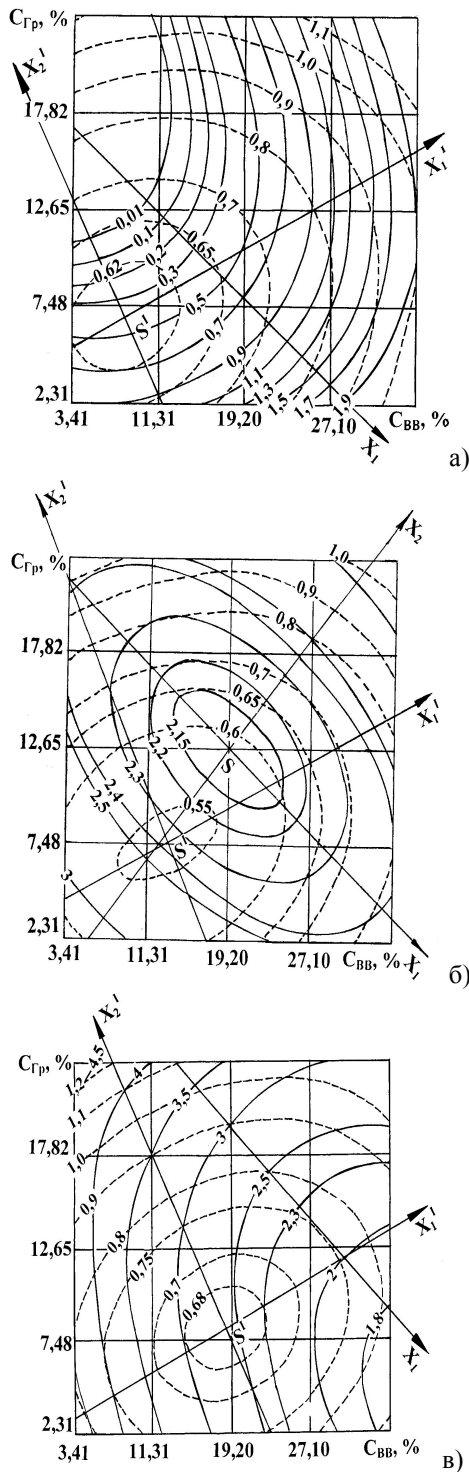
Як видно з рис. 1, мінімальні значення інтенсивності зношування на першому етапі при низькому вмісті базальтового волокна спостерігаються для максимального вмісту графіту в широкій ділянці факторного простору вмісту вуглецевого волокна, причому у міру зменшення значень  $I_1$ , ділянка факторного простору вмісту вуглецевого волокна значно зменшується. Максимальні значення  $I_1$  спостерігаються на широкій ділянці факторного простору вмісту графіту при низькому вмісті вуглецевого волокна. Поступове зростання концентрації базальтового волокна (рис. 1,б) приводить до збільшення значень функції відгуку. Мінімальні значення  $I_1$  спостерігаються при мінімальному і максимальному вмісті графіту в широкій ділянці факторного простору вмісту вуглецевого волокна. Наступне збільшення концентрації базальтового волокна від 26,50 до 46,57 % (рис. 1в) приводить до зменшення значень  $I_1$ . Для  $I_1$  при збільшенні концентрації базальтового волокна координати нового центру практично залишаються незмінними.

Мінімальні значення коефіцієнта теплопровідності при температурі 473 К ( $\lambda_{473}$ ) і мінімальному вмісті базальтового волокна спостерігаються для низьконаповнених вуглецевим волокном і графітом композицій. Максимальні значення коефіцієнта теплопровідності характерні для високонаповнених композицій, тобто із зростанням вмісту вуглецевого волокна і графіту, теплопровідність зростає. Поступове зростання вмісту базальтового волокна приводить спочатку до зменшення значень функції відгуку, а потім до їх збільшення. Це вказує на те, що великий вплив на теплопровідність має взаємодія двох концентраційних факторів. При зростанні вмісту базальтового волокна від 26,50 до 46,57 % (рис. 1в) спостерігається збільшення теплопровідності із зростанням вмісту графіту. Для високонаповнених графітом композицій  $\lambda_{473}$  не залежить від вмісту вуглецевого волокна. При зростанні вмісту базальтового волокна ділянка мінімальних значень теплопровідності зміщується у бік вищих значень вмісту вуглецевого волокна і графіту.

На рис. 2 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування зразків на другому етапі з обмеженим машенням ( $I_2$ ) та коефіцієнта теплопровідності при температурі 473К ( $\lambda_{473}$ ) від



**Рис. 1.** Двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування та коефіцієнта теплопровідності від вмісту вуглецевого волокна  $C_{БВ}$  (%) та графіту  $C_{ГР}$  (%) при фіксованому значенні вмісту базальтового волокна  $C_{БВ} = 6,43\%$  ( $x_3 = -1,5$ ),  $26,50\%$  ( $x_3 = 0$ ),  $46,57\%$  ( $x_3 = +1,5$ ) (крисковані лінії – коефіцієнт теплопровідності при температурі 473К, суцільні – інтенсивність зношування під час першого етапу  $S_1 = 0 \dots 10$  км при обмеженому машенні). На кривих рівних функцій відгуку приведені величини інтенсивності зношування  $I_1$  ( $10^{-7}$  [мм<sup>3</sup>/Н·м]) та коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{473}$  (Вт/м·К).



**Рис. 2.** Двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування та коефіцієнта теплопровідності від вмісту вуглецевого  $C_{BV}$  (%) та графіту  $C_{GP}$  (%) при фіксованому значенні вмісту базальтового волокна  $C_{BV} = 6,43\%$  ( $x_3 = -1,5$ ),  $26,50\%$  ( $x_3 = 0$ ),  $46,57\%$  ( $x_3 = +1,5$ ) (кривоквані лінії – коефіцієнт теплопровідності при температурі  $473\text{K}$ , суцільні – інтенсивність зношування під час другого етапу  $S_2 = 10 \dots 25$  км при обмеженому мащенні). На кривих рівних значень функції відгуку приведені величини інтенсивності зношування  $I_2$  ( $10^{-7}$   $[\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}]$ ) та коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{473}$  ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ).

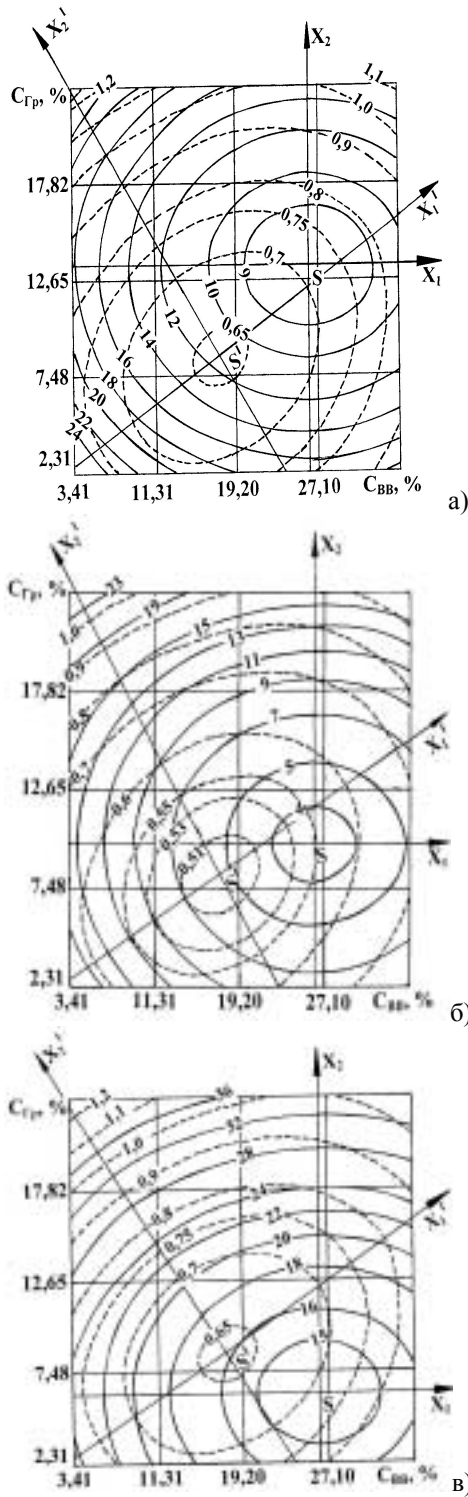
вмісту вуглецевого волокна  $C_{BV}$  (%) та графіту  $C_{GP}$  (%) при фіксованому значенні вмісту базальтового волокна  $C_{BV} = 6,43\%$  ( $x_3 = -1,5$ ) (рис. 2а),  $C_{BV} = 26,50\%$  ( $x_3 = 0$ ) (рис. 2б),  $C_{BV} = 46,57\%$  ( $x_3 = +1,5$ ) (рис. 2в).

Як видно з рис. 2, мінімальні значення інтенсивності зношування на другому етапі з мащенням ( $I_2$ ) спостерігаються для композицій з низьким вмістом вуглецевого волокна в широкій ділянці факторного простору вмісту графіту. Максимальні значення  $I_2$  характерні для високонаповнених вуглецевим волокном композицій з низьким і високим вмістом графіту. Із зростанням вмісту графіту  $I_2$  зменшується. Із зростанням вмісту вуглецевого волокна  $I_2$  зростає, незалежно від вмісту графіту. Поступове зростання вмісту базальтового волокна від 6,43 до 26,50 % (рис. 2,б) приводить до того, що різке зростання  $I_2$  спостерігається при низькому і високому вмісті графіту. Наступне зростання концентрації базальтового волокна від 26,50 до 46,57 % (рис. 2,в) приводить до того, що із збільшенням вмісту вуглецевого волокна  $I_2$  зменшується, незалежно від вмісту графіту. Зростання вмісту базальтового волокна приводить до значного збільшення значень інтенсивності зношування. При мінімальному і максимальному вмісті базальтового волокна новий початок координат знаходиться за межами ділянки факторного простору.

На рис. 3 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування зразків на третьому етапі без мащення ( $I_3$ ) та коефіцієнта теплопровідності при температурі  $373\text{K}$  ( $\lambda_{373}$ ) від вмісту вуглецевого волокна  $C_{BV}$  (%) та графіту  $C_{GP}$  (%) при фіксованому значенні вмісту базальтового волокна  $C_{BV} = 6,43\%$  ( $x_3 = -1,5$ ) (рис. 3а),  $C_{BV} = 26,50\%$  ( $x_3 = 0$ ) (рис. 3б),  $C_{BV} = 46,57\%$  ( $x_3 = +1,5$ ) (рис. 3,в).

Аналіз цих результатів показує, що мінімальна інтенсивність зношування без мащення при мінімальному вмісті базальтового волокна буде спостерігатися при вмісті вуглецевого волокна в межах 20-31 % та при вмісті графіту в межах 9-16 %. Максимальні значення  $I_3$  характерні для низько- і високонаповнених графітом композицій в широкій ділянці факторного простору вмісту вуглецевого волокна. Поступове зростання вмісту базальтового волокна приводить спочатку до зменшення значень  $I_3$  (рис. 3,б), а потім – до різкого зростання. При максимальному вмісті базальтового волокна (рис. 3,в) мінімальні значення  $I_3$  спостерігаються для низьконаповнених графітом композицій. Чим більший вміст графіту і чим менший вміст вуглецевого волокна, тим більша інтенсивність зношування. Із зростанням вмісту базальтового волокна характер залежності практично не змінюється, координати нового центру зміщуються в сторону меншого вмісту графіту, при незмінному вмісті вуглецевого волокна.

Для теплопровідності при температурі  $373\text{K}$  ( $\lambda_{373}$ ) мінімальні її значення при низькому вмісті базальтового волокна спостерігаються для



**Рис. 3.** Двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування та коефіцієнта теплопровідності від вмісту вуглецевого волокна  $C_{BB}$  (%) та графіту  $C_{Gr}$  (%) при фіксованому значенні вмісту базальтового волокна  $C_{BB} = 6,43\%$  ( $x_3 = -1,5$ ),  $26,50\%$  ( $x_3 = 0$ ),  $46,57\%$  ( $x_3 = +1,5$ ) (крисковані лінії – коефіцієнт теплопровідності при температурі  $373\text{ K}$ , суцільні – інтенсивність зношування при терті без мащення). На кривих рівних значень функції відгуку приведені величини інтенсивності зношування  $I_3$  ( $10^{-7}$  [ $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ]) та коефіцієнта теплопровідності  $\lambda_{373}$  ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$ ).

композицій, що містять 15-20 % вуглецевого волокна і 7-10 % графіту. Із зростанням вмісту вуглецевого волокна і графіту теплопровідність збільшується. Максимальні значення теплопровідності характерні для високонаповнених графітом композицій з низьким та високим вмістом вуглецевого волокна. При збільшенні вмісту базальтового волокна від 6,43 до 26,50 % значення  $\lambda_{373}$  зменшуються і ділянка мінімальних значень розширюється. При наступному зростанні концентрації базальтового волокна від 26,50 до 46,57 % залежність теплопровідності від концентраційних факторів дуже близька до залежності при мінімальному вмісті базальтового волокна (порівняти рис. 3,а і 3,в). Із зростанням вмісту базальтового волокна характер залежності не змінюється, координати нового центру залишаються незмінними.

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. Теплопровідність не залежить від вмісту базальтового волокна.

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 і максимальному вмісті базальтового волокна ( $x_3 = \pm 1,5$ ), для якої оптимуми знаходяться далеко за межами факторного простору. Крім того, екстремальні точки збігаються з точками оптимуму, одержаними при побудові двовимірних перерізів при фіксованих значеннях різних факторів.

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:**

$C_{extr}(BB) = 27,00\%$ ;  $C_{extr}(Gr) = 12,65\%$ ;  $C_{extr}(BB) = 26,50\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % (об.):

$C(ПА) = 44,31\%$ ;  $C(BB) = 26,32\%$ ;  $C(Gr) = 21,14\%$ ;  $C(BB) = 8,23\%$

**для інтенсивності зношування в обмеженому мащенні на другому етапі:**

$C_{extr}(BB) = 27,70\%$ ;  $C_{extr}(Gr) = 9,35\%$ ;  $C_{extr}(BB) = 32,88\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % (об.):

$C(ПА) = 41,36\%$ ;  $C(BB) = 28,36\%$ ;  $C(Gr) = 7,83\%$ ;  $C(BB) = 22,45\%$

**для інтенсивності зношування без мащення:**

$C_{extr}(BB) = 26,25\%$ ;  $C_{extr}(Gr) = 11,13\%$ ;  $C_{extr}(BB) = 19,02\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % (об.):



$C(\text{ПА}) = 54,95\%$ ;  $C(\text{ВВ}) = 24,62\%$ ;  $C(\text{Гр}) = 8,54\%$ ;  
 $C(\text{ВВ}) = 11,89\%$

**для коефіцієнта теплопровідності при температурі 473 К:**

$C_{\text{extr}}(\text{ВВ})=12,61\%$ ;  $C_{\text{extr}}(\text{Гр})=7,44\%$ ;  $C_{\text{extr}}(\text{ВВ})=23,46\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % (об.):

$C(\text{ПА}) = 68,84\%$ ;  $C(\text{ВВ}) = 11,45\%$ ;  $C(\text{Гр}) = 5,52\%$ ;  
 $C(\text{ВВ}) = 14,19\%$

**для коефіцієнта теплопровідності при температурі 373 К:**

$C_{\text{extr}}(\text{ВВ}) = 14,70\%$ ;  $C_{\text{extr}}(\text{Гр})=7,80\%$ ;  $C_{\text{extr}}(\text{ВВ})=26,50\%$

Вміст матричного полімерного матеріалу та наповнювачів у % (об.):

$C(\text{ПА}) = 63,13\%$ ;  $C(\text{ВВ}) = 14,11\%$ ;  $C(\text{Гр}) = 5,83\%$ ;  
 $C(\text{ВВ}) = 16,93\%$ .

Розрахунок середніх екстремальних точок, осереднених для інтенсивності зношування привів до таких результатів:

$\bar{C}_{\text{extr}}\text{ВВ}=26,98\%$ ,  $\bar{C}_{\text{extr}}\text{Гр}=11,04\%$ ,  $\bar{C}_{\text{extr}}\text{ВВ}=26,17\%$ .

Цим середнім відповідають такі значення параметрів оптимізації:  $I_1 = 3,1538 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $I_2 = 2,2172 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $I_3 = 3,7444 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ .

Розрахунок середніх екстремальних точок, осереднених для коефіцієнта теплопровідності привів до таких результатів:

$\bar{C}_{\text{extr}}\text{ВВ}=13,66\%$ ,  $\bar{C}_{\text{extr}}\text{Гр}=7,62\%$ ,  $\bar{C}_{\text{extr}}\text{ВВ}=24,98\%$ .

Цим середнім відповідають такі значення параметрів оптимізації:  $\lambda_{473} = 0,5945 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $\lambda_{373} = 0,4994 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

Розрахунок середніх екстремальних точок за всіма параметрами привів до таких результатів:

$\bar{C}_{\text{extr}}\text{ВВ}=23,45\%$ ,  $\bar{C}_{\text{extr}}\text{Гр}=9,68\%$ ,  $\bar{C}_{\text{extr}}\text{ВВ} = 25,67\%$  .

Цим середнім відповідають такі значення параметрів оптимізації:  $I_1 = 3,1038 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $I_2 = 2,1317 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $I_3 = 3,6888 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $\lambda_{473} = 0,5889 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;  $\lambda_{373} = 0,5448 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

## Висновки

1. На інтенсивність зношування на першому і другому етапах при обмеженому мащенні суттєвий вплив має концентрація базальтового волокна.
2. Значення інтенсивності зношування без мащення набагато вищі, ніж при обмеженому мащенні.
3. Теплопровідність при температурах 473 і 373К збільшується, із зростанням вмісту вуглецевого волокна і графіту. Поступове зростання вмісту базальтового волокна приводить спочатку до зменшення значень коефіцієнта теплопровідності, а потім до їх збільшення.
4. Тому, застосовуючи дані рівняння, а також експериментальні залежності, можна в досліджуваному інтервалі температур і концентрацій наповнювачів прогнозувати питому інтенсивність зношування, знаючи коефіцієнт теплопровідності розробленого матеріалу.

**Сіренко Г.О.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладної і теоретичної хімії;

**Базюк Л.В.** – аспірант кафедри теоретичної і прикладної хімії;

**Свідерський В.П.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри зносостійкості та надійності машин.

- [1] Г.О. Сіренко, Л.В. Базюк, В.П. Свідерський, С.М. Тараненко. Залежність теплофізичних властивостей від температури для багатокомпонентної композиції на основі ароматичного поліаміду // *Фізика і хімія твердого тіла*, **6**(3), сс. 498 – 506 (2005).
- [2] Г.А. Сиренко, В.П. Свидерский, В.Д. Герасимов, В.З. Никонов. *Антифрикционные термостойкие полимеры*. Техника, Киев. 246 с. (1978).
- [3] Г. А. Сиренко. *Антифрикционные карбопластики*. Техніка, Київ, 195 с. (1985).
- [4] Д.Д. Джигирис, А.К. Волинский, П.П. Козловский и др. Основы технологии получения базальтовых волокон и их свойства // *Базальто-волокнистые композиционные материалы и конструкции*, сс. 54–81 (1980).
- [5] Дж. Мор. Стекланные волокна // *Наполнители для полимерных композиционных материалов*, сс. 540 – 587 (1981).
- [6] Р. Сабраманиэн, Х. Аустин. *Базальтовые волокна // Наполнители для полимерных композиционных материалов*. Химия, Москва. сс. 587 – 595 (1981).
- [7] С.И. Белов, А.М. Сигарев, В.К. Соляков, В.А. Черных. О некоторых причинах разнотности искусственного графита // *Конструкционные материалы на основе графита*, **2**, сс. 27 – 34 (1966)
- [8] В.П. Свідерський, О.І. Федоришин. Аналітичний огляд науково-технічних основ і властивостей антифрикційних карбопластиків: 1. Вуглецеві волокна // *Вісник Прикарп. ун-ту*. Сер. Хімія, (I). сс. 118-132 (2001).
- [9] А.с. 1736171 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L27/18. *Способ получения антифрикционной композиции «флубон»* / Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник (Украина). (1992).
- [10] Г.О. Сіренко, О.В. Шийчук. Математичний опис процесу дроблення вуглецевих волокон для наповнених полімерів // *Композиційні полімерні матеріали*, **25**(1), сс. 49 – 53 (2001).
- [11] Л.Б. Соколов, В.Д. Герасимов, В.М. Савинов, В.К. Беляков. *Термостойкие ароматические полиамиды*. Химия, Москва. 256 с. (1975).

- [12] Г.О. Сіренко *Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термостійких полімерів та вуглецевих волокон*: Дис. доктора техн. наук. Ін-т матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, Київ. 431 с. (1997).
- [13] В.Б. Тихомиронов. *Планирование и анализ эксперимента*. Легкая индустрия, Москва. 262 с. (1974).
- [14] В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова и др. *Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей*. Металлургия, Москва. 752 с. (1982).
- [15] К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер и др. *Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов*. Мир, Москва. 584 с. (1977).
- [16] В.В. Налимов, Н.А. Чернова. *Статистические методы планирования экспериментальных экспериментов*. Наука, Москва. 340 с. (1965).
- [17] Л.С. Зажиганов, А.А. Кишьян, Ю.И. Романиков. *Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента*. Атомиздат, Москва. 232 с. (1978).
- [18] Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак. Дослідження впливу технологічних параметрів та твердого мастила на механічні властивості композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену і карбонового волокна // *Полімерний журнал*, **26**(3), сс. 186 – 194 (2004).

G.O. Sirenko<sup>1</sup>, L.V. Bazyuk<sup>1</sup>, V.P. Svidersky<sup>2</sup>

## **The Contact of the Thermophysical and Antifriction Properties of Composite Polymeric Materials from Concentration of Filler with Many Components**

<sup>1</sup> 'Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine

<sup>2</sup> Hmelnytsky 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.

