

Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак, І.В. Кравець, І.М. Кузик

Вплив вмісту компонентів композиційного полімерного матеріалу на основі політетрафторетилену на його протизносні властивості

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна*

Методами математичного планування експерименту та пошуку оптимальних рішень досліджено вплив вмісту твердого мастила дисульфиду молібдену та технологічних параметрів (вмісту спеціального вуглецевого волокна, часу його попереднього подрібнення та часу змішування композиції) на антифрикційні властивості композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену та вуглецевого волокна.

Ключові слова: композиційний матеріал, політетрафторетилен, вуглецеве волокно, тертя, зношування, тверде мастило, час змішування композиції, час попереднього подрібнення.

H.A. Sirenko, L.Ya. Midak, I.V. Kravets', I.M. Kuzyk

The Influence of components' concentration of composite material based on polytetrafluoretylene on its antiwear properties

*Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine*

The influence of concentration of solid oil and technological factors (concentration of special carbon fiber, time of its previous pounding and time of mixing of composition) on antifriction properties of composite materials based on polytetrafluoretylene and carbon fiber is researched using methods of mathematics planning of experiment and search of optimal decisions.

Key words: composite material, polytetrafluoretylene, carbon fiber, friction, wear, solid oil, time of mixing of composition, time of its previous pounding.

Стаття постуила до редакції 3.09.2008; прийнята до друку 16.10.2008.

Вступ

Композиційні матеріали, які отримані за хемо-механо-активаційною технологією [1], що армовані низькомодульними вуглецевими карбонізованими або високомодульними графітованими волокнами і дисперсними наповнювачами набувають все більшого використання для створення деталей і вузлів машин і апаратури з високими вимогами щодо механічної міцності, антифрикційних властивостей та ін. [2]. Вони можуть бути застосовані у парі з титаном, крицями та їх стопами у рухомих і нерухомих ущільненнях рідинних хроматографів, ущільнювальних елементах реакторів, насосів хімічних

виробництв, які працюють у висококонцентрованих сольових розчинах або водних розчинах сильних кислот і лугів тощо [3].

Мета роботи полягала в тому, щоби виявити вплив вмісту твердого мастила (дисульфиду молібдену MoS_2) та спеціального вуглецевого волокна (ВВ), часу попереднього подрібнення КВ та часу змішування композиції на високообертному агрегаті на тертя та зношування композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) методом математичного планування експерименту.

І. Експериментальна частина

Вуглецева тканина була виготовлена з гідратцелюлозної, шляхом попередньої обробки у

20% водному розчині антипіренів $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (1:1) і відпалювання в середовищі природного газу послідовно при кінцевих температурах $723 \pm 10 \text{ K}$ та $1123 \pm 20 \text{ K}$ зі швидкістю протягування через руркову піч опору "Таммана" 10 м за годину.

Виготовлена вуглецева тканина УТМ-8 містила: 60-65% С, 1,1-4,5% Н, 3,5-4,5% О, 3,0-3,6% сполук В та 3,0-3,6% сполук Р, 21-26% зола [4] (за мінімальним вмістом Н і О елементний склад відповідав формулі $\text{C}_{36}\text{H}_5\text{O}$ [5]). На поверхні волокна тканини містився піровуглець (внаслідок часткового розкладу метану), пекові та смоляні відкладення [1]. Вуглецева тканина УТМ-8 мала: розривну міцність 70-235 Н/см по основі та 20-100 Н/см по підтканню, волокна тканини мали діаметр 10-12 мкм, міцність при розриві 0,52-0,60 ГПа, модуль пружності 27-47 ГПа [6].

Смужки тканини $\sim 3 \times 3 \text{ см}$ попередньо подрібнювали в дробарці ножового типу МРП-1 при 7000 об/хв. (частота обертання ножа 117 с^{-1} , максимальна швидкість 78 м/с) на протязі від 4 до 28 хв., змішували з порошками ПТФЕ марки "фторлон-4" та дисульфиду молібдену марки МВЧ-1 (розмір частинок 5-14 мкм, основна фракція 7 мкм) і, разом з тим, подрібнювали композицію в цій дробарці з такими ж параметрами на протязі від 3,5 до 31,5 хв. до об'ємного (масового) розподілу волокон за довжинами l за ймовірним законом Вейбулла [7]:

$$p_1(l) = \frac{\delta}{\alpha} \cdot \frac{1}{\Gamma(1 + 1/\delta)} \left(\frac{l}{\alpha}\right)^\delta \exp\left[-\left(\frac{l}{\alpha}\right)^\delta\right],$$

де $\Gamma(x)$ – гамма-функція

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t) \cdot t^{x-1} dt$$

$p_1(l) = 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-6} \text{ мкм}^{-1}$ – щільність ймовірності розподілу волокон за довжинами; і параметрами розподілу:

- після попереднього подрібнення волокон $\alpha = 80\text{-}1000 \text{ мкм}$; $\delta = 0,25\text{-}3,8$;
- після змішування і подрібнення композиції $\alpha = 50\text{-}700 \text{ мкм}$; $\delta = 0,5\text{-}4,2$.

Підбір і перевірку підпорядкування емпіричного розподілу теоретичному здійснювали за процедурою [8] і критерієм χ^2 [9].

Зразки виробляли з композиції пресуванням за технологією переробки фторопластів [10].

Протизносні властивості досліджували на трибометрі [1] за схемою "сфера – площина" в режимі змінних питомих навантажень при сталому нормальному навантаженні на один зразок $N_1 = 100 \text{ Н}$. Три полімерні 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 зношування на мікроскопі. Зразки контактували сферичною частиною по плоскій

поверхні контртіла зі криці 30Х13 (твердість НВ 4,3 МПа, 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 прогукскалась вода для відведення тепла тертя. Швидкість ковзання дорівнювала 1,15 м/с, температура поверхні контртіла $323 \pm 2 \text{ К}$.

За прийнятою схемою фрикційного контакту можна виділити дві характерні ділянки випробувань (режими, етапи зношування):

1) ділянка нелінійної залежності зношування від шляху тертя $S_1 = 0 \dots 2 \text{ км}$, в якій питома навантаження змінюється від $p \approx \text{НВ} = 40\text{-}55 \text{ МПа}$ полімерного матеріалу до граничного $p = p_{кр} \approx 8\text{-}12 \text{ МПа}$; цій ділянці відповідають позначення:

- об'ємної питомої інтенсивності зношування:

$$I_1 = \frac{\Delta V_1}{N_1 \cdot S_1}, \quad (1)$$

де ΔV_1 – зношений об'єм за $S_1 = 2 \text{ км}$;

- коефіцієнтів тертя на початку (5-10 м) $\mu_{1п}$ та в кінці ковзання $\mu_{1к}$ ($S_1 = 2 \text{ км}$);

2) ділянка приблизно лінійної залежності зносу від шляху тертя $S_2 = 2 \dots 12 \text{ км}$, у якій питома навантаження змінюється від $p = p_{кр} \approx 8\text{-}12 \text{ МПа}$ до $p = 6\text{-}9 \text{ МПа}$; цій ділянці відповідають позначення:

- об'ємної питомої інтенсивності зношування:

$$I_2 = \frac{\Delta V_2}{N_1 \cdot \Delta S_2}, \quad (2)$$

де ΔV_2 – зношений об'єм за $\Delta S_2 = S_2 - S_1 = 10 \text{ км}$;

- коефіцієнтів тертя на початку $\mu_{2п} \approx \mu_{1к}$ і в кінці ковзання $\mu_{2к}$ ($S_2 = 12 \text{ км}$).

Зразки після пресування і термообробки витримували при 296-298 К не менше 14 днів, а потім їх 24 год. кондиціонували згідно ГОСТ 10681-75 при $296 \pm 1 \text{ К}$ і відносній вологості $65 \pm 2\%$. При цих же параметрах проводили випробування.

II. Результати і обговорення

Оптимізацію проводили за такими параметрами: інтенсивності зношування полімерних зразків (I_1, I_2), коефіцієнта тертя ($\mu_{1п}, \mu_{1к}, \mu_{2к}$) при варіюванні таких факторів: вміст твердого мастила дисульфиду молібдену MoS_2 (C_{MoS_2}), вміст низькомодульного вуглецевого волокна ($C_{\text{КВ}}$), час попереднього подрібнення вуглецевого волокна в МРП-1 ($t_{\text{подр}}$), час змішування композиції в МРП-1 ($t_{\text{зм}}$) (табл.). Вплив твердого мастила (з одночасною зміною технологічних параметрів) на антифрикційні властивості композиційних матеріалів на основі ПТФЕ досліджено за чотирифакторним рототабельним планом другого порядку [11,12].

Позначення факторів, інтервали та рівні варіювання для такого плану приведені в табл. 1. Порядок реалізації точок плану був

рандомізований за таблицею випадкових чисел [13].

Таблиця 1

Позначення факторів, інтервали та рівні варіювання

Найменування фактора	Розмірність	Натуральне позначення	Кодоване позначення	Рівні варіювання					Інтервал варіювання
				-2	-1	0	+1	+2	
Вміст твердого мастила дисульфиду молібдену MoS ₂	мас. %	C(MoS ₂)	X ₁	1	5	9	13	17	4
Вміст низькомодульного вуглецевого волокна	мас. %	C(BB)	X ₂	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	5
Час змішування композиції	хв.	t _{зм}	X ₃	3,5	10,5	17,5	24,5	31,5	7
Час попереднього подрібнення	хв.	t _{подр}	X ₄	4	10	16	22	28	6

Матриця планування і обробка результатів експерименту за процедурою [11,12] дозволили отримати математичну модель у загальному вигляді полінома другого порядку:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^{k=4} b_j x_j + \sum_{i,j=1}^{k=4} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{k=4} b_{ii} x_i^2, \quad (3)$$

де b_j, b_{ij}, b_{ii} (j, i = 0, 1, 2, 3, 4) – коефіцієнти рівняння (3), або в канонічній формі:

$$Y - Y_s = B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + B_{44}X_4, \quad (4)$$

де Y_s – координати нового центру; B_{ij} – коефіцієнти рівняння (3) в канонічній формі (4); X_j – нові змінні.

Для обробки експериментальних даних і отримання математичних моделей функцій відгуку використали формули [11, 12], число повторних дослідів в кожній точці плану дорівнювало 3. Однорідність ряду дисперсій оцінювали за критеріями Фішера і Кохрана, для визначення значимості коефіцієнтів моделі використовували t-критерій Стьюдента, адекватності моделі – F-критерій Фішера [8, 14, 15], а побудову двовимірних перерізів поверхонь функцій відгуку здійснювали за процедурою [12]. Всі гіпотези приймали чи відкидали з рівнем значущості критерію 0,05.

У результаті реалізації плану одержані рівняння поверхні відгуку (5)-(9), які адекватно описують залежності інтенсивності зношування I_{1к} (S₁ = 0...2 км) [мм³/Нм] і I_{2к} (S₂ = 2...12 км) [мм³/Нм], коефіцієнтів тертя на початку тертя μ_{1п} (S₁ = 5-10 м), і в кінці першого μ_{1к} (S₂ = 2 км) і другого μ_{2к} (S₁ = 12 км) режимів зношування від досліджуваних факторів.

$$I_1 = (64,3565 + 1,5979x_1 - 1,2657x_2 - 7,757x_3 +$$

$$+ 1,1159x_4 + 4,8525x_1x_2 + 3,2505x_1^2 + 11,0355x_2^2 + 2,5978x_3^2) 10^{-7} \quad (5)$$

$$I_2 = (7,6742 - 0,5926x_1 - 0,3714x_2 - 1,4382x_3 + 0,4032x_4 - 0,2406x_1x_2 + 0,3181x_1x_3 - 0,8594x_1x_4 - 0,4894x_2x_3 - 0,9119x_2x_4 + 0,3069x_3x_4 + 1,1031x_3^2) 10^{-7} \quad (6)$$

$$\mu_{1п} = 0,2273 + 0,0019x_2 + 0,0067x_3 - 0,0131x_4 + 0,0066x_1x_2 + 0,0084x_1x_4 + 0,0049x_2x_3 + 0,0151x_3x_4 + 0,0055x_1^2 + 0,0148x_2^2 + 0,0058x_4^2 \quad (7)$$

$$\mu_{1к} = 0,2355 - 0,0221x_1 + 0,0166x_2 + 0,0169x_3 + 0,0143x_1x_2 - 0,0043x_1x_3 + 0,0121x_1x_4 + 0,0188x_3x_4 - 0,006x_1^2 + 0,011x_2^2 - 0,0145x_3^2 + 0,0068x_4^2 \quad (8)$$

$$\mu_{2к} = 0,2062 - 0,0255x_1 + 0,0161x_2 + 0,0107x_3 - 0,006x_4 + 0,0114x_1x_2 + 0,0152x_1x_4 + 0,007x_2^2 + 0,0067x_4^2 \quad (9)$$

Аналіз одержаних рівнянь за допомогою інваріантів означення центру фігури та виду поверхні [12] показав, що для інтенсивності зношування на першому етапі залежність функції відгуку від трьох факторів (X₁, X₃, X₄) при фіксованому значенні четвертого фактора (X₂ = 0) має вигляд еліптичного параболоїда (J₃ ≠ 0; K₄ ≠ 0; K₄ < 0), для інтенсивності зношування на другому етапі, коефіцієнтів тертя на початку першого та другого етапів тертя при фіксованому значенні четвертого фактора (X₂ = 0) – двопорожнинного гіперболоїда (J₃ ≠ 0; I₃ ≤ 0; K₄ < 0), для коефіцієнта тертя в кінці другого етапу залежність функції відгуку від трьох факторів (X₂, X₃, X₄) при фіксованому значенні четвертого фактора (X₁ = 0)

має вигляд еліпсоїда обертання ($J_3 \neq 0$; $J_1, J_2, J_3 > 0$; $K_4 < 0$).

При виборі оптимальних параметрів скористасмося двовимірними перерізами функцій відгуку (1) при фіксованому значенні двох факторів, що дає змогу одержати уявлення про закономірності зміни критерія оптимізації при варіюванні факторів. Для цього, фіксуємо кожен з факторів на певному рівні (-2; 0; +2 тощо), визначаємо координати нового центру $S(X_1; X_2)$, кут повороту нових осей координат (α) і перетворюємо одержані рівняння регресії в канонічні у вигляді:

$$Y - Y_s = B_{ij}X_j^2 + B_{ii}X_i^2 \quad (10)$$

Одержали наступні результати:

для інтенсивності лінійного зношування на першому етапі:

при $x_2 = 0$ і $x_4 = -2$: $S(-0,25; 1,49)$; $\alpha = 0^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 56,1378 = 3,2505X_1^2 + 2,5978X_3^2; \quad (11)$$

при $x_2 = 0$ і $x_4 = 0$: $S(-0,25; 1,49)$; $\alpha = 0^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 58,3696 = 3,2505X_1^2 + 2,5978X_3^2; \quad (12)$$

при $x_2 = 0$ і $x_4 = 2$: $S(-0,25; 1,49)$; $\alpha = 0^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 60,6014 = 3,2505X_1^2 - 2,5978X_3^2; \quad (13)$$

для інтенсивності лінійного зношування на другому етапі:

при $x_2 = 0$ і $x_4 = -2$: $S(31,00; -3,54)$; $\alpha = -8^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 27,9594 = -0,0225X_1^2 + 1,1256X_3^2; \quad (14)$$

при $x_2 = 0$ і $x_4 = 0$: $S(-8,38; 1,86)$; $\alpha = -8^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 8,8233 = -0,0225X_1^2 + 1,1256X_3^2; \quad (15)$$

при $x_2 = 0$ і $x_4 = 2$: $S(-47,83; 7,27)$; $\alpha = -8^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 60,7325 = -0,0225X_1^2 + 1,1256X_3^2; \quad (16)$$

для коефіцієнта тертя на початку тертя:

при $x_2 = 0$ і $x_3 = -2$: $S(-6,36; 8,33)$; $\alpha = -44^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,0331 = 0,0014X_1^2 + 0,0099X_4^2; \quad (17)$$

при $x_2 = 0$ і $x_3 = 0$: $S(-1,9; 2,5)$; $\alpha = -44^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2108 = 0,0014X_1^2 + 0,0099X_4^2; \quad (18)$$

при $x_2 = 0$ і $x_3 = 2$: $S(2,51; -3,29)$; $\alpha = -44^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2125 = 0,0014X_1^2 + 0,0099X_4^2; \quad (19)$$

для коефіцієнта тертя в кінці першого етапу:

при $x_2 = 0$ і $x_3 = -2$: $S(0,87; 1,98)$; $\alpha = -22^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,1005 = -0,0085X_1^2 + 0,0009X_4^2; \quad (20)$$

при $x_2 = 0$ і $x_3 = 0$: $S(-0,97; 0,86)$; $\alpha = -22^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2462 = -0,0085X_1^2 + 0,0009X_4^2; \quad (21)$$

при $x_2 = 0$ і $x_3 = 2$: $S(-2,82; -0,26)$; $\alpha = -22^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2497 = -0,0085X_1^2 + 0,0009X_4^2; \quad (22)$$

для коефіцієнта тертя в кінці другого етапу:

при $x_1 = 0$ і $x_3 = -2$: $S(-1,15; 0,45)$; $\alpha = 0^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,1743 = 0,007X_2^2 + 0,0067X_4^2; \quad (23)$$

при $x_1 = 0$ і $x_3 = 0$: $S(-1,15; 0,45)$; $\alpha = 0^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,1957 = 0,007X_2^2 + 0,0067X_4^2; \quad (24)$$

при $x_1 = 0$ і $x_3 = 2$: $S(-1,15; 0,45)$; $\alpha = 0^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2171 = 0,007X_2^2 + 0,0067X_4^2. \quad (25)$$

На рис. 1 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування зразків композиту на першому етапі (I_1) від вмісту твердого мастила $C(MoS_2)$ (%) та часу змішування композиції $t_{зм}$ (хв.) при фіксованому значенні вмісту вуглецевого волокна $C(BB) = 17,5$ ($X_2 = 0$) та фіксованому часі попереднього подрібнення наповнювача $t_{подр} = 4$ ($X_4 = -2$), 16 ($X_4 = 0$), 28 ($X_4 = 2$) хв. Аналіз цих перерізів показує, що при вмісті вуглецевого волокна 17,5% і мінімальному часу подрібнення наповнювача (рис. 1а) на першому етапі випробувань мінімальна інтенсивність зношування буде спостерігатись в широкому діапазоні значень вмісту твердого мастила і високих значеннях часу змішування композиції. При зменшенні часу змішування композиції інтенсивність зношування буде зростати і не залежатиме від вмісту MoS_2 у композиції. При збільшенні часу попереднього подрібнення вуглецевого волокна і незмінному вмісті наповнювача характер залежності не змінюється, координати нового центру залишаються незмінними, але мінімальні значення функції відгуку зростають (рис. 1б, в). Максимальні значення інтенсивності зношування спостерігаються для низько- або високонаповнених дисульфідом молібдену композитів.

На рис. 2 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування зразків композиту на другому етапі (I_2) від вмісту твердого мастила $C(MoS_2)$ (%) та часу змішування композиції $t_{зм}$ при фіксованому значенні вмісту карбонового волокна $C(BB) = 17,5$ ($X_2 = 0$) та фіксованому часі попереднього подрібнення карбонового волокна $t_{подр} = 4$ ($X_4 = -2$), 16 ($X_4 = 0$), 28 ($X_4 = 2$) хв. Аналіз цих перерізів показує, що при вмісті вуглецевого волокна 17,5% і мінімальному часу подрібнення наповнювача (рис. 2а) мінімальні значення інтенсивності зношування спостерігаються для низьконаповнених MoS_2 композитів при високому часі змішування. При збільшенні вмісту твердого мастила та одночасному зменшенні часу змішування композиції функція відгуку зростає. Для високонаповнених твердим мастилом матеріалів лінії рівних значень функції відгуку спостерігаються для широкого діапазону значень часу змішування композицій.

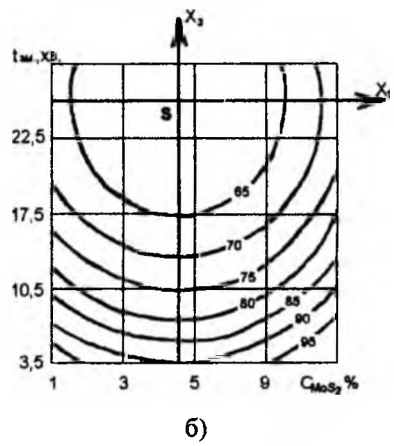
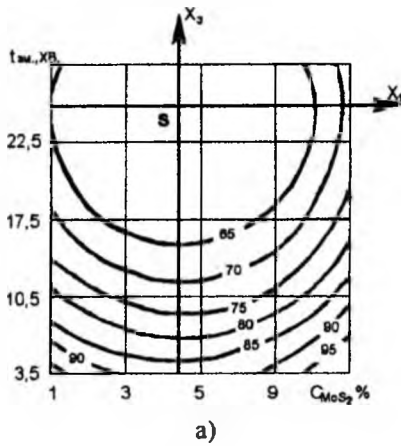


Рис. 1. Двовимірні перерізи функції відгуку питомої інтенсивності зношування на першому етапі при вмісті вуглецевого волокна $C(BB) = 17,5\%$ ($X_2 = 0$) і часі попереднього подрібнення наповнювача $t_{подр} = 4$ ($X_4 = -2$) (а), 16 ($X_4 = 0$) (б), 28 ($X_4 = 2$) (в) хв. На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини інтенсивності зношування I (10^{-7}) [$мм^3/Н·м$]

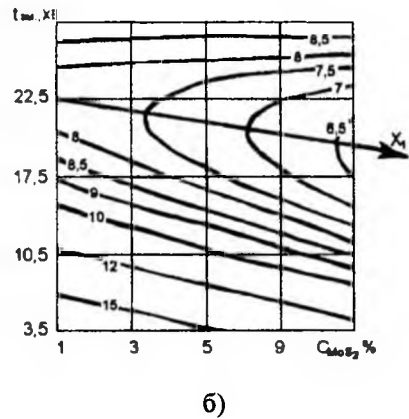
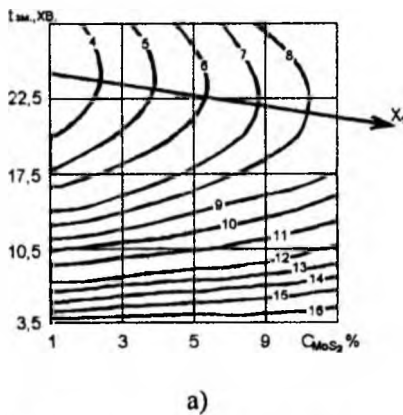
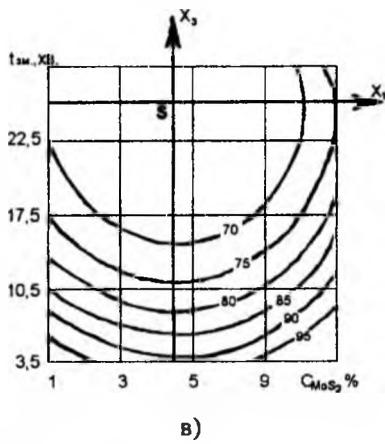
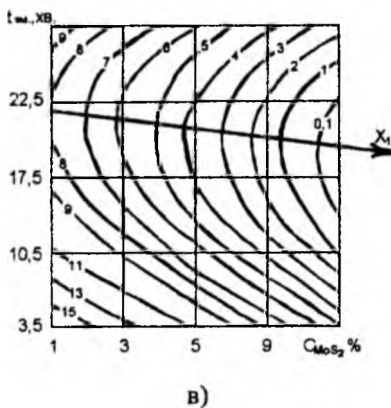
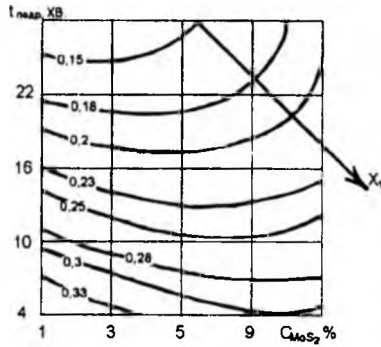
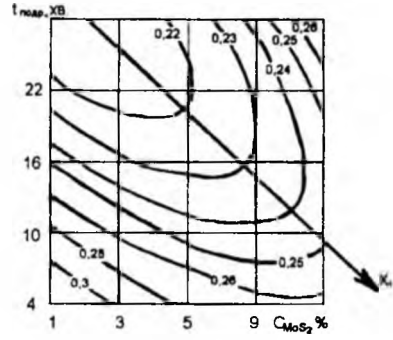


Рис. 2. Двовимірні перерізи функції відгуку питомої інтенсивності зношування на другому етапі при вмісті вуглецевого волокна $C(BB) = 17,5\%$ ($X_2 = 0$) і часі попереднього подрібнення наповнювача $t_{подр} = 4$ ($X_4 = -2$) (а), 16 ($X_4 = 0$) (б), 28 ($X_4 = 2$) (в) хв. На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини інтенсивності зношування I (10^{-7}) [$мм^3/Н·м$]

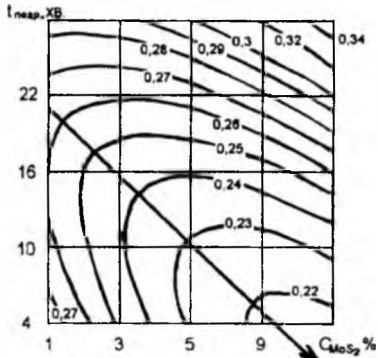




а)

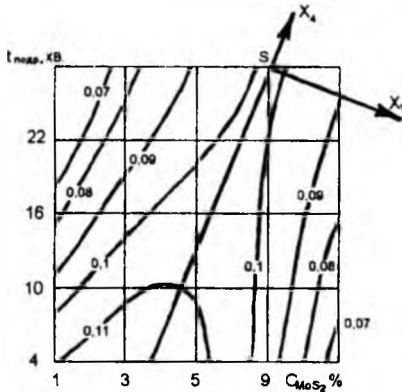


б)

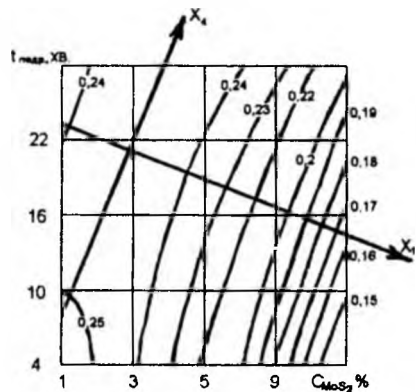


в)

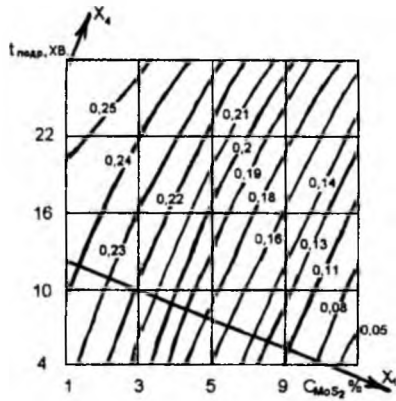
Рис. 3. Двовимірні перерізи функції відгуку коефіцієнта тертя на початку першого етапу при фіксованому значенні вмісту вуглецевого волокна $C(BB) = 17,5\%$ ($X_2 = 0$) та фіксованому часі змішування композиції $t_{зм} = 3,5$ ($X_3 = -2$) (а), $17,5$ ($X_3 = 0$) (б), $31,5$ ($X_3 = 2$) (в) хв. На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини коефіцієнтів тертя.



а)



б)



в)

Рис. 4. Двовимірні перерізи функції відгуку коефіцієнта тертя в кінці першого етапу при фіксованому значенні вмісту вуглецевого волокна $C(BB) = 17,5\%$ ($X_2 = 0$) та фіксованому часі змішування композиції $t_{зм} = 3,5$ ($X_3 = -2$) (а), $17,5$ ($X_3 = 0$) (б), $31,5$ ($X_3 = 2$) (в) хв. На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини коефіцієнтів тертя.

При мінімальних значеннях $t_{зм}$ інтенсивність зношування матеріалів є високою і не залежить від вмісту MoS_2 . При збільшенні часу попереднього подрібнення карбонового волокна і незмінному вмісті наповнювача (рис. 2 б, в) характер залежності змінюється. Мінімальні значення функції відгуку спостерігається для високонаповнених MoS_2 композицій та $t_{зм} = 17,5 - 22$ хв. При зменшенні вмісту твердого мастила інтенсивність зношування матеріалів зростає. Максимальні значення функції відгуку спостерігаються при $X_3 \rightarrow \min$ або $X_3 \rightarrow \max$ для всього діапазону значень вмісту MoS_2 . При максимальному часі попереднього подрібнення (рис. 2в) наповнювача мінімальні значення інтенсивності зношування зменшуються в 40-65 разів і спостерігаються для високонаповнених твердим мастилом композицій при $t_{зм} = 15 - 25$ хв.

На рис. 3 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку коефіцієнту тертя (μ_{1n}) від вмісту твердого мастила $C(MoS_2)$ (%) та часу попереднього подрібнення вглицевого волокна $t_{подр}$ при фіксованому значенні вмісту вуглицевого волокна $C(BB) = 17,5$ ($X_2 = 0$) та фіксованому часі змішування композиції $t_{зм} = 3,5$ ($X_3 = -2$), $17,5$ ($X_3 = 0$), $31,5$ ($X_3 = 2$) хв. Аналіз цих перерізів показує, що при $C(BB) = 17,5\%$ та $t_{зм} = 3,5$ хв. (рис. 3а) мінімальні значення коефіцієнту тертя спостерігаються для полімерних композитів з вмістом твердого мастила 1-10% та часом попереднього подрібнення ВВ 26-28 хв. Зі зменшенням часу попереднього подрібнення коефіцієнт тертя композитів зростає і не залежить від вмісту твердого мастила, а лінії рівних значень функцій відгуку спостерігаються для всього діапазону значень $C(MoS_2)$. Зі збільшенням часу змішування композиції (рис. 3 б, в) мінімальні значення функцій відгуку зростають, а їх ділянка розширюється. Максимальні значення коефіцієнту тертя характерні для низьконаповнених MoS_2 композицій з $t_{подр} = 4-8$ хв., або високонаповнених MoS_2 композицій з $t_{подр} = 24-28$ хв. При максимальному часі змішуванні композиції і незмінному вмісті КВ 17,5% характер залежності змінюється. Мінімальні значення функцій відгуку спостерігаються для високонаповнених MoS_2 композицій при мініальному часі попереднього подрібнення карбонового волокна. Зі збільшенням $t_{подр}$ та зменшенням вмісту MoS_2 μ_{1n} зростає. Максимальні значення спостерігаються для високонаповнених MoS_2 композицій при максимальному часі подрібнення ВВ.

На рис. 4 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку коефіцієнту тертя ($\mu_{1к}$) від вмісту твердого мастила $C(MoS_2)$ (%) та часу попереднього подрібнення вуглицевого волокна $t_{подр}$ при фіксованому значенні вмісту карбонового волокна $C(BB) = 17,5$ ($X_2 = 0$) та фіксованому часі змішування композиції $t_{зм} = 3,5$ ($X_3 = -2$), $17,5$ (X_3

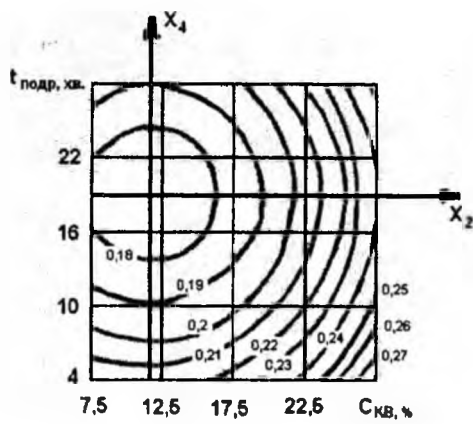
$= 0$), $31,5$ ($X_3 = 2$) хв. Аналіз цих перерізів показує, що мінімальні значення коефіцієнта тертя (рис. 4а) спостерігаються для низьконаповнених MoS_2 композитів при $t_{подр} = 20-28$ хв. та високонаповнених твердим мастилом композитів з $t_{подр} = 4-8$ хв. Для композитів з вмістом MoS_2 5-15% спостерігаються максимальні значення коефіцієнта тертя, які майже не залежать від $t_{подр}$ ВВ. Зі збільшенням часу змішування композиції координати нового центру зміщуються в сторону низьконаповнених MoS_2 композитів, а характер залежності не змінюється (рис. 4 б, в). Максимальні значення функцій відгуку зростають в 2,5 рази, а їх ділянка розширюється.

На рис. 5 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку коефіцієнту тертя ($\mu_{2к}$) від вмісту карбонового волокна $C(BB)$ (%) та часу його попереднього подрібнення $t_{подр}$ при фіксованому значенні вмісту твердого мастила $C_{MoS_2} = 9\%$ ($X_1 = 0$) та фіксованому часі змішування композиції $t_{зм} = 3,5$ ($X_3 = -2$), $17,5$ ($X_3 = 0$), $31,5$ ($X_3 = 2$) хв.

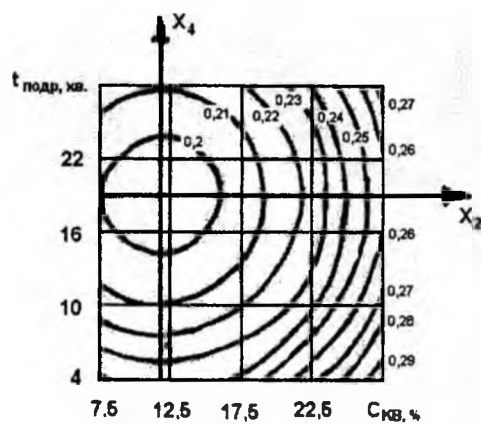
Аналіз цих перерізів показує, що мінімальні значення коефіцієнта тертя $\mu_{2к}$ (рис. 5а) спостерігаються для композитів з вмістом наповнювача 7,5 – 15% та часом його подрібнення 15 – 24 хв. Зі збільшенням вмісту ВВ у композиті та одночасному зменшенні часу його попереднього подрібнення композиції коефіцієнт тертя в кінці другого етапу $\mu_{2к}$ зростає. Для високонаповнених ВВ композитів ($C_{KB} > 17,5\%$) функція відгуку $\mu_{2к}$ майже не залежить від фактора X_4 . При збільшенні часу змішування полімерної композиції та незмінному вмісту MoS_2 у ній координати нового центру та характер залежності функцій відгуку залишаються незмінними. Мінімальні значення $\mu_{2к}$ збільшуються, а їх ділянка звужується (рис. 5 б, в). Максимальні значення коефіцієнта тертя в кінці другого етапу спостерігаються для високонаповнених ВВ композиційних матеріалів ($C_{KB} = 20 - 25\%$) з низьким часом попереднього подрібнення наповнювача ($t_{подр} = 4 - 8$ хв.) або, навпаки, при його тривалому подрібненні ($t_{подр} > 25$ хв.). При $t_{подр} = 6 - 10$ хв. для широкої ділянки значень вмісту вуглицевого волокна $\mu_{2к} = 0,22 - 0,25$ і майже не залежить від вмісту наповнювача (рис. 5 б, в).

Висновки

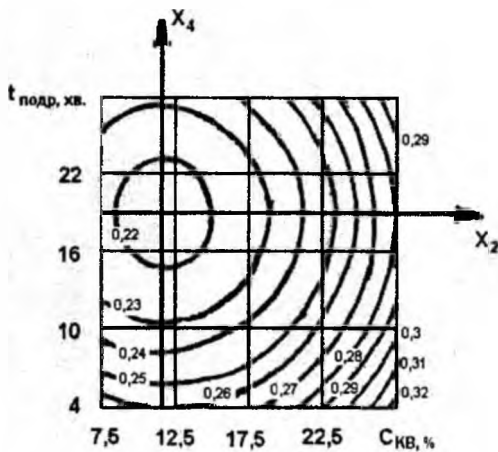
1. Встановлено, що мінімальні значення інтенсивності об'ємного зношування на першому етапі тертя будуть спостерігатись в широкому діапазоні значень вмісту твердого мастила і високих значеннях часу змішування композиції. При зменшенні часу змішування композиції інтенсивність зношування буде зростати і не залежатиме від вмісту MoS_2 у композиції. Для другого етапу тертя інтенсивність зношування більшою мірою залежить від вмісту твердого мастила.



а)



б)



в)

Рис. 5. Двовимірні перерізи функції відгуку коефіцієнта тертя в кінці другого етапу при фіксованому значенні вмісту твердого мастила $C(\text{MoS}_2) = 9\%$ ($X_1 = 0$) та фіксованому часі змішування композиції $t_{\text{зм}} = 3,5$ ($X_3 = -2$) (а), $17,5$ ($X_3 = 0$) (б), $31,5$ ($X_3 = 2$) (в) хв. На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини коефіцієнтів тертя.

2. Встановлено, що зі зменшенням часу попереднього подрібнення коефіцієнт тертя на початку тертя зростає і не залежить від вмісту твердого мастила, а лінії рівних значень функції відгуку спостерігаються для всього діапазону значень $C(\text{MoS}_2)$. Зі збільшенням часу змішування композиції мінімальні значення функцій відгуку зростають, а їх ділянка розширюється.

3. Мінімальні значення коефіцієнта тертя в

кінці другого етапу $\mu_{2к}$ при мінімальному часі змішування композиту спостерігаються для композицій з вмістом наповнювача 7,5 – 15% та часом його подрібнення 15 – 24 хв. При збільшенні часу змішування полімерної композиції та незмінному вмісті MoS_2 у ній мінімальні значення $\mu_{2к}$ збільшуються, а їх ділянка звужується.

Література

1. Сиренко Г.О. Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термостійких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. доктора техн. наук: 05.16.06. - К.: Ін-т матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ, 1997. - 431 с.
2. Сиренко Г.А. Антифрикционные карбопластики. - К.: Техніка, 1985. - 195 с.
3. Мідак Л. Антифрикційні властивості титану та його сполук // Вісник Прикарпат. ун-ту. Сер. Хімія. - 2002. - Вип. (II). - С. 97-114.
4. Антифрикционная композиция флубон-15/ Г.А. Сиренко, Н.И. Кретов, В.П. Сви́дский, Б.О. Таланкин, С.С. Кононюк: А.с. 1244933, С08J5/16, С08L27/18. - № 3697338; Заяв. 30.11.83.- Бюл. № 26. - 1986.
5. К вопросу об изучении процесса превращения углеродистых волокон при высоких температурах/ Н.М. Черненко, В.Г. Морозов, А.Т. Каверов, С.Д. Федосеев// Применение синтетических материалов. - 1975. - С. 52-56.
6. Антифрикционные термостойкие полимеры/ Г.А. Сиренко, В.П. Сви́дский, В.Д. Герасимов, В.З. Никонов. - К.: Техніка, 1978. - 246 с.

7. Сіренко Г.О., Шийчук О.В. Математичний опис процесу дроблення вуглецевих волокон для наповнених полімерів// Композиційні полімерні матеріали. – 2003. – Т. XXV, №1. - С. 49-53.
8. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. - М. Атомиздат, 1978. - 232 с.
9. Степнов М.Н. Статистическая обработка результатов механических испытаний. - М.: Машиностроение, 1972. - 232 с.
10. Справочник по пластическим массам. В 2 т / под ред. В.М. Катаева, В.А. Попова, Б.И. Сажина. - М.: Химия, 1975. - Т.1. - 448 с. – Т.2. - 568 с.
11. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. - М.: Наука, 1965. - 340с.
12. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. - М.: Легкая индустрия, 1974. - 262с.
13. Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента. – Свердловск: Урал. политех. ин-т, 1975. - 150 с.
14. Жлуктечко В.І., Наконечний С.І., Савіна С.С. Теорія ймовірностей і математична статистика: в 2-х ч.- Ч. II. Математична статистика. - К.: Нац. екон. ун-т, 2001. - 336 с.
15. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. - М.: Мир, 1971. - 408 с.

Сіренко Г.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної хімії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Мідак Л.Я. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри теоретичної і прикладної хімії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Кравець І.В. – студент V курсу спеціальності «хімія» Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Кузик І.М. – студент V курсу спеціальності «хімія» Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Рецензент

Шийчук О.В. – доктор хімічних наук, професор кафедри теоретичної і прикладної хімії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.