
КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 621.893 (088.8)

Л.Я. Мідак, Г.О. Сіренко

Вплив технологічних параметрів на фізико-механічні властивості композиційного матеріалу на основі політетрафторетилену та карбонового волокна

*Прикарпатський університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна*

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

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

L.Ya. Midak, H.A. Sirenko

The Influence of Solid Oil and Technological Factors on Antifriction and other Mechanical Properties of Composite Material Based on Polytetrafluorethylene and Carbon Fiber

*'Vasyl Stefanyk' Precarpathian University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine*

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

Key words: composition material, polytetrafluorethylene, carbon fiber, friction, tear, solid oil, time of mixing of composition, time of previous pounding.

Стаття поступила до редакції 09.02.2008; прийнята до друку 2.03.2008.

Вступ

Композиційні матеріали, які отримані за хемо-механо-активаційною технологією [1], що армовані низькомодульними карбовими 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, сталями 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, щоб виявити вплив вмісту твердого мастила (дисульфиду молібдену MoS_2) та спеціального карбонового волокна (КВ), часу попереднього подрібнення КВ та часу змішування композиції на високообертному агрегаті на тертя та зношування, а також механічні властивості композиційних матеріалів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) методом математичного планування експерименту.

І. Експеримент

Вуглецева тканина була виготовлена з гідратцелюлозної, шляхом попередньої обробки у 20% водному розчині антипіренів $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

$10\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (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 $\sim 3 \times 3$ см попередньо подрібнювали в дробарці ножового типу МРП-1 при 7000 об/хв. (частота обертання ножа 117 c^{-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]:

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

де $\Gamma(x)$ – гама-функція

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

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

після попереднього подрібнення волокон $\alpha = 80-1000 \text{ мкм}$; $\delta = 0,25-3,8$;

після змішування і подрібнення композиції $\alpha = 50-700 \text{ мкм}$; $\delta = 0,5-4,2$.

Для вирішення завдання лінійного аналізу дроблених волокон використовували автоматичний аналізатор зображень мікрооб'єктів "Морфоквант" із обчислювальною машиною ЕС-5060, який був налагоджений на максимальну кількість кроків 512, мінімальний крок 0,2 мкм, діапазон кроків при скануванні 512×512 і кількість різних ступенів тонів 128, відносна похибка лінійних розмірів становила 0,2%. Програма забезпечувала аналіз 250 частинок на 1 пробу (кількість проб 20-25). Проведено 5 рівноточних контрольних вимірювань довжин волокон у композиції мікроскопічним методом (об'єм вибірки кожного вимірювання 2000-3000 довжин волокон). Порівняння двох вибірок – оптичної та морфоквантової – за критерієм χ^2 виявило їх статистичну однорідність. Підбір і

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

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

Антифрикційні властивості досліджували на трибометрі [1] за схемою "сфера – площина" в режимі змінних питомих навантажень при сталому нормальному навантаженні на один зразок $N_i = 100 \text{ Н}$. 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 сталі 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 пропускатись вода для відведення тепла тертя. Швидкість ковзання дорівнювала 1,15 м/с, температура поверхні контртіла $323 \pm 2 \text{ K}$.

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 питоме навантаження змінюється від $p \approx \text{НВ} = 40-55 \text{ МПа}$ полімерного матеріалу до граничного $p = p_{кр} \approx 8-12 \text{ МПа}$; цій ділянці відповідають позначення:

- об'ємної питомої інтенсивності зношування:

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

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 $S_2 = 2 \dots 12 \text{ км}$, в якій питоме навантаження змінюється від $p = p_{кр} \approx 8-12 \text{ МПа}$ до $p = 6-9 \text{ МПа}$; цій ділянці відповідають позначення:

- об'ємної питомої інтенсивності зношування:

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

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

- коефіцієнтів тертя на початку (5-10 м) $\mu_{2п} \approx \mu_{1к}$ та в кінці ковзання $\mu_{2к}$ ($S_2 = 12 \text{ км}$).

Міцність при розриві та відносне видовження при розтягуванні визначали на кільцевих зразках діаметрами $d = 50 \times 40 \text{ мм}$ і висотою $h = 10 \text{ мм}$ за

допомогою жорстких напівдисків за ГОСТ 11262-80 при випробуваннях на машині "Інстрон" при швидкості руху повзуна 0,25 см/хв.; питому ударну в'язкість – на стержнях діаметром $d = 15$ мм і довжиною $h = 80$ мм згідно ГОСТ 4647-80 при випробуваннях на ударному копрі КМ-0,4. Похибка при випробуваннях коливалася в межах 5-15%. 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 ± 1 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 ($\mu_{1n}, \mu_{1k}, \mu_{2k}$), міцності при розриві ($\sigma_{p,k}$), відносного подовження при розтягуванні (ϵ_k) та питомої ударної в'язкості (A_k) при варіюванні таких факторів: вміст твердого мастила дисульфиду молибдену MoS_2 (C_{MoS_2}), вміст низькомодульного карбонового волокна (C_{KB}), час попереднього подрібнення карбонового волокна в МРП-1 ($t_{пдр}$), час змішування композиції в МРП-1 ($t_{зм}$) (табл.). Вплив твердого мастила (з одночасною зміною технологічних параметрів) на антифрикційні і механічні властивості композиційних матеріалів на основі ПТФЕ досліджено за чотирифакторним ротатабельним планом другого порядку [11,12]. Порядок реалізації точок плану був рандомізований за таблицею випадкових чисел [13].

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

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

де Y_s – координати нового центру; B_{ij} – коефіцієнти рівняння (3) в канонічній формі (4); X_i – 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 двовірних 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)-(12), які адекватно описують залежності інтенсивності зношування I_{1k} ($S_1 = 0 \dots 2$ км) [mm^3/Hm] і I_{2k} ($S_2 = 2 \dots 12$ км) [mm^3/Hm], коефіцієнтів тертя на початку тертя μ_{1n} ($S_1 = 5-10$ м), і в кінці першого μ_{1k} ($S_2 = 2$ км) і другого μ_{2k} ($S_1 = 12$ км) режимів зношування, міцності при розриві $\sigma_{p,k}$ [МПа], питомої ударної в'язкості A_k [kJ/m^2] та відносного видовження при розтягуванні ϵ_k (%) від факторів:

$$I_1 = (64,3565 + 1,5979x_1 - 1,2657x_2 - 7,757x_3 + 1,1159x_4 + 4,8525x_1x_2 + 3,2505x_1^2 + 11,0355x_2^2 + 2,5978x_3^2) 10^{-7} \quad (5)$$

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

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

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

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

$$\sigma_{p,k} = 16,496 - 0,913x_1 - 1,466x_2 + 0,469x_3 + 0,661x_1x_2 - 0,234x_1x_3 + 0,269x_1x_4 + 0,254x_2x_3 - 0,339x_2x_4 - 0,464x_3x_4 - 0,183x_1^2 - 0,372x_2^2 - 0,58x_3^2 - 0,697x_4^2 \quad (10)$$

$$A_k = 28,774 - 7,885x_1 - 32,455x_2 + 5,392x_3 + 14,216x_4 + 6,469x_1x_2 - 3,306x_2x_3 - 11,881x_2x_4 - 7,669x_3x_4 + 3,570x_1^2 + 9,173x_2^2 - 2,83x_3^2 + 4,743x_4^2 \quad (11)$$

$$\epsilon_k = 31,845 - 12,414x_1 - 58,951x_2 + 10,754x_3 + 23,615x_4 + 11,944x_1x_2 + 3,619x_1x_3 - 2,044x_1x_4 - 11,069x_2x_3 - 22,581x_2x_4 - 13,831x_3x_4 + 6,651x_1^2 + 22,738x_2^2 + 2,71x_3^2 + 8,548x_4^2 \quad (12)$$

На інтенсивність об'ємного зношування на I-му етапі суттєвий вплив мають всі лінійні ефекти, причому $\epsilon(X_4) \approx \epsilon(X_2) < \epsilon(X_1) < \epsilon(X_3)$, де ϵ – лінійний ефект. Тому, найзначніший вплив має лінійний ефект часу змішування композиції, причому при збільшенні часу змішування інтенсивність зношування зменшується. Суттєвий

вплив також має ефект взаємодії вмісту твердого мастила і карбонового волокна. На інтенсивність об'ємного зношування на II-му етапі для лінійних ефектів спостерігається аналогічне співвідношення впливу, але збільшення вмісту дисульфиду молібдену зменшує інтенсивність зношування, а також вплив мають всі ефекти взаємодії факторів.

На коефіцієнт тертя на початку тертя впливають лінійні ефекти вмісту КВ, часу змішування композиції та часу попереднього подрібнення КВ, а також ефекти взаємодії вмісту дисульфиду молібдену і КВ, вмісту твердого мастила і часу попереднього подрібнення КВ, вмісту КВ і часу змішування, а також обох часових факторів.

На міцність при розриві впливають лінійні ефекти вмісту твердого мастила, карбонового волокна і час змішування композиції, причому міцність при розриві збільшується при зменшенні вмісту дисульфиду молібдену і карбонового волокна, але $\epsilon(X_1) < \epsilon(X_2)$. Значний вплив мають всі ефекти взаємодій факторів. На відносне подовження при розтягуванні, як і на міцність при розриві, впливають всі ефекти взаємодій факторів, але щодо лінійних ефектів, то $\epsilon(X_1) \ll \epsilon(X_2)$, а також значний вплив має лінійний ефект часу

змішування композиції. На ударну в'язкість впливають лінійні ефекти всіх факторів, причому, як і для відносного подовження при розтягуванні $\epsilon(X_1) \ll \epsilon(X_2)$, також ефекти взаємодій вмісту твердого мастила і карбонового волокна, вмісту КВ і часу змішування композиції, вмісту КВ і часу попереднього подрібнення КВ, а також обох часових факторів.

На механічні властивості суттєвий вплив мають всі квадратичні ефекти. Збільшення вмісту твердого мастила і КВ призводить до зменшення механічних властивостей, а збільшення часу змішування композиції і часу попереднього подрібнення сприяють збільшенню механічних властивостей.

Ортогональними інваріантами цілої раціональної функції другого порядку (1) від 3 аргументів є функції:

$$J_1 = b_{11} + b_{22} + b_{33} \quad (13)$$

$$J_2 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12}/2 \\ b_{21}/2 & b_{22} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{11} & b_{13}/2 \\ b_{31}/2 & b_{33} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{22} & b_{23}/2 \\ b_{32}/2 & b_{33} \end{vmatrix} \quad (14)$$

$$J_3 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & b_{13}/2 \\ b_{21}/2 & b_{22} & b_{23}/2 \\ b_{31}/2 & b_{32}/2 & b_{33} \end{vmatrix} \quad (15)$$

$$K_4 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & b_{13}/2 & b_1/2 \\ b_{21}/2 & b_{22} & b_{23}/2 & b_2/2 \\ b_{31}/2 & b_{32}/2 & b_{33} & b_3/2 \\ b_1/2 & b_2/2 & b_3/2 & b_0 \end{vmatrix} \quad (16)$$

а функції:

$$K_2 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_1/2 \\ b_1/2 & b_0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{22} & b_2/2 \\ b_2/2 & b_0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{33} & b_3/2 \\ b_3/2 & b_0 \end{vmatrix} \quad (17)$$

$$K_3 = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12}/2 & b_1/2 \\ b_{21}/2 & b_{22} & b_2/2 \\ b_1/2 & b_2/2 & b_0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{11} & b_{13}/2 & b_1/2 \\ b_{31}/2 & b_{33} & b_3/2 \\ b_1/2 & b_3/2 & b_0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} b_{22} & b_{23}/2 & b_2/2 \\ b_{32}/2 & b_{33} & b_3/2 \\ b_2/2 & b_3/2 & b_0 \end{vmatrix} \quad (18)$$

є інваріантами однорідного ортогонального перетворення функції (1).

Аналіз одержаних рівнянь за допомогою цих інваріантів означення центру фігури та виду поверхні [12] показав, що для інтенсивності зношування на першому етапі залежність функції відгуку від трьох факторів (X_1, X_2, X_4) при фіксованому значенні четвертого фактора ($X_3 = 0$) має вигляд еліптичного параболоїда ($J_3 \neq 0; K_4 \neq 0; K_4 < 0$), для інтенсивності зношування на другому

етапі, коефіцієнтів тертя в кінці першого та другого етапів тертя при фіксованому значенні четвертого фактора ($X_3 = 0$) – двопорожнинного гіперболоїда ($J_3 \neq 0; I_3 \leq 0; K_4 < 0$), для коефіцієнта тертя на початку тертя при фіксованому значенні четвертого фактора ($X_3 = 0$) – уявного еліпсоїда ($J_3 \neq 0; J_1, J_2, J_3 > 0; K_4 > 0$), для міцності при розриві при фіксованому значенні четвертого фактора ($X_3 = 0$) – однопорожнинного параболоїда ($J_3 \neq 0; J_1, J_2 \leq 0; K_4 > 0$), для відносного

видовження при розтягуванні і ударної в'язкості при фіксованому значенні четвертого фактора ($X_3 = 0$) – 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, фіксуючи кожен з факторів на певному рівні (-1; 0; +1 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:

$$Y - Y_c = B_1 X_1^2 + B_2 X_2^2 \quad (19)$$

Одержали наступні результати:

для інтенсивності лінійного зношування на першому етапі:

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1, 83$: $S (-0,4; 0,1)$; $\alpha = -16^\circ$;
канонічне рівняння

$$Y - 61,9542 = 2,5563X_1^2 + 11,7297X_2^2; \quad (20)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1$: $S (-0,4; 0,1)$; $\alpha = -16^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 62,8804 = 2,5563X_1^2 + 11,7297X_2^2; \quad (21)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 0$: $S (-0,4; 0,1)$; $\alpha = -16^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 63,9963 = 2,5563X_1^2 + 11,7297X_2^2; \quad (22)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 1$: $S (-0,4; 0,1)$; $\alpha = -16^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 65,1122 = 2,5563X_1^2 + 11,7297X_2^2; \quad (23)$$

для інтенсивності лінійного зношування на другому етапі:

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1,83$: $S (5,4; 4,1)$; $\alpha = 45^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 12,2213 = -0,1203X_1^2 + 0,1203X_2^2; \quad (24)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1$: $S (2,2; 1,1)$; $\alpha = 45^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 7,8704 = -0,1203X_1^2 + 0,1203X_2^2; \quad (25)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 0$: $S (-1,5; -2,5)$; $\alpha = 45^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 8,5890 = -0,1203X_1^2 + 0,1203X_2^2; \quad (26)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 1$: $S (-5,3; -6,0)$; $\alpha = 45^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 15,8220 = -0,1203X_1^2 + 0,1203X_2^2; \quad (27)$$

для коефіцієнта тертя на початку тертя:

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1,83$: $S (1,7; -0,4)$; $\alpha = -18^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2575 = 0,0044X_1^2 + 0,0159X_2^2; \quad (28)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1$: $S (0,9; -0,3)$; $\alpha = -18^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2421 = 0,0044X_1^2 + 0,0159X_2^2; \quad (29)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 0$: $S (0; -0,1)$; $\alpha = -18^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2272 = 0,0044X_1^2 + 0,0159X_2^2; \quad (30)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 1$: $S (-0,8; 0,1)$; $\alpha = -18^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2166 = 0,0044X_1^2 + 0,0159X_2^2; \quad (31)$$

для коефіцієнта тертя в кінці першого

етапу:

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1,83$: $S (-2,6; 0,9)$; $\alpha = -32^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,3231 = -0,0104X_1^2 + 0,0055X_2^2; \quad (32)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1$: $S (-2,1; 0,6)$; $\alpha = -32^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2798 = -0,0104X_1^2 + 0,0055X_2^2; \quad (33)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 0$: $S (-1,5; 0,2)$; $\alpha = -32^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2540 = -0,0104X_1^2 + 0,0055X_2^2; \quad (34)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 1$: $S (-1,0; -0,1)$; $\alpha = -32^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2460 = -0,0104X_1^2 + 0,0055X_2^2; \quad (35)$$

для коефіцієнта тертя в кінці другого етапу:

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1,83$: $S (-7,1; 4,7)$; $\alpha = -29^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,4680 = -0,0032X_1^2 - 0,0102X_2^2; \quad (36)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1$: $S (-1,5; 3,6)$; $\alpha = -29^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,3656 = -0,0032X_1^2 + 0,0102X_2^2; \quad (37)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 0$: $S (-1,4; 2,2)$; $\alpha = -29^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2772 = -0,0032X_1^2 + 0,0102X_2^2; \quad (38)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 1$: $S (-1,4; 0,9)$; $\alpha = -29^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 0,2272 = -0,0032X_1^2 + 0,0102X_2^2; \quad (39)$$

для міцності при розриві:

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1,83$: $S (9,8; 7,5)$; $\alpha = 37^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 4,1326 = 0,0662X_1^2 - 0,6212X_2^2; \quad (40)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1$: $S (9,9; 7,3)$; $\alpha = 37^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 5,8809 = 0,0662X_1^2 - 0,6212X_2^2; \quad (41)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 0$: $S (10,0; 6,9)$; $\alpha = 37^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 6,8487 = 0,0662X_1^2 - 0,6212X_2^2; \quad (42)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 1$: $S (10,1; 6,6)$; $\alpha = 37^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 6,5724 = 0,0662X_1^2 - 0,6212X_2^2; \quad (43)$$

для відносного видовження при розтягуванні:

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1,83$: $S (0,4; 0,3)$; $\alpha = -18^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 13,0352 = 4,6764X_1^2 + 24,7126X_2^2; \quad (44)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1$: $S (0,0; 0,8)$; $\alpha = -18^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 2,2014 = 4,6764X_1^2 + 24,7126X_2^2; \quad (45)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 0$: $S (-0,3; 1,4)$; $\alpha = -18^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y + 6,8277 = 4,6764X_1^2 + 24,7126X_2^2; \quad (46)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 1$: $S (-0,7; 2,0)$; $\alpha = -18^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y + 11,4596 = 4,6764X_1^2 + 24,7126X_2^2; \quad (47)$$

для ударної в'язкості:

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1,83$: $S (0,8; 0,3)$; $\alpha = -25^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 7,7238 = 2,0924X_1^2 + 10,6506X_2^2; \quad (48)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = -1$: $S (0,1; 1,1)$; $\alpha = -25^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y - 7,7238 = 2,0924X_1^2 + 10,6506X_2^2; \quad (49)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 0$: $S(-0,7; 2,0)$; $\alpha = -25^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y + 1,2367 = 2,0924X_1^2 + 10,6506X_2^2; \quad (50)$$

при $x_3 = 0$ і $x_4 = 1$: $S(-1,6; 3,0)$; $\alpha = -25^\circ$;

канонічне рівняння

$$Y + 12,0174 = 2,0924X_1^2 + 10,6506X_2^2; \quad (51)$$

На рис. 1 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку інтенсивності зношування зразків композиції $(I_1 \text{ і } I_2)$ від вмісту карбонового волокна $C_{ВВ}$ (%) та дисульфиду молібдену C_{MoS_2} (%) при фіксованому значенні часу змішування композиційного матеріалу $t_{зм} = 17,5$ хв. ($X_3 = 0$) та фіксованому часі попереднього подрібнення карбонового волокна $t_{подр} = 5$ ($X_4 = -1,83$), 10 ($X_4 = -1$), 16 ($X_4 = 0$) і 22 хв. ($X_4 = +1$). Аналіз цих перерізів показує, що на першому етапі випробувань мінімальна інтенсивність

зношування буде спостерігатися при вмісті MoS_2 в межах 3,4-14% та при вмісті карбонового волокна в межах 15-22%. При низькому (менше 9,4%) та при високому (більше 25%) вмісті КВ спостерігається різке збільшення інтенсивності об'ємного зношування, яке не залежить від вмісту MoS_2 . При збільшенні часу попереднього подрібнення КВ та незмінному часі змішування композиції спостерігається зменшення ділянки мінімальної інтенсивності зношування.

На другому етапі випробувань при низькому значенні часу подрібнення КВ мінімальні значення інтенсивності зношування спостерігаються для низького вмісту твердого мастила і КВ і поступово збільшуються зі збільшенням вмісту дисульфиду молібдену і карбонового волокна, причому збільшення вмісту твердого мастила веде до зменшення вмісту КВ і навпаки. При високому вмісті КВ інтенсивність

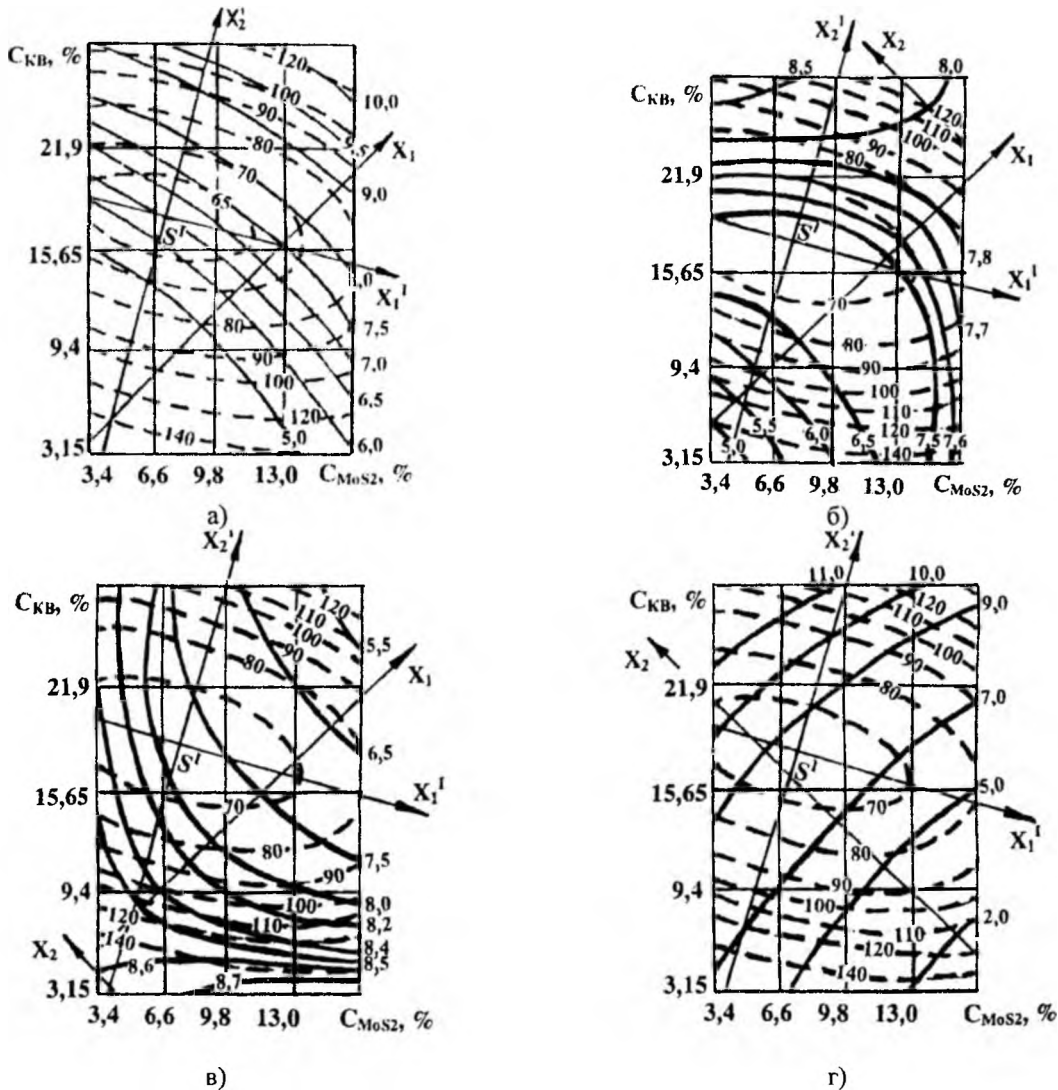


Рис. 1. Двовимірні перерізи функції відгуку питомої інтенсивності зношування при $t_{зм} = 17,5$ хв. ($X_3 = 0$) змішування композиції і $t_{подр} = 5$ ($X_4 = -1,83$) (а), 10 ($X_4 = -1$) (б), 16 ($X_4 = 0$) (в) і 22 ($X_4 = +1$) (г) хв. попереднього подрібнення карбонового волокна (кривоквані лінії – перший етап $S_1 = 0 \dots 2$ км, суцільні – другий етап випробувань $S_2 = 2 \dots 12$ км). На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини інтенсивності зношування I (10^{-7} [мм³/НМ]).

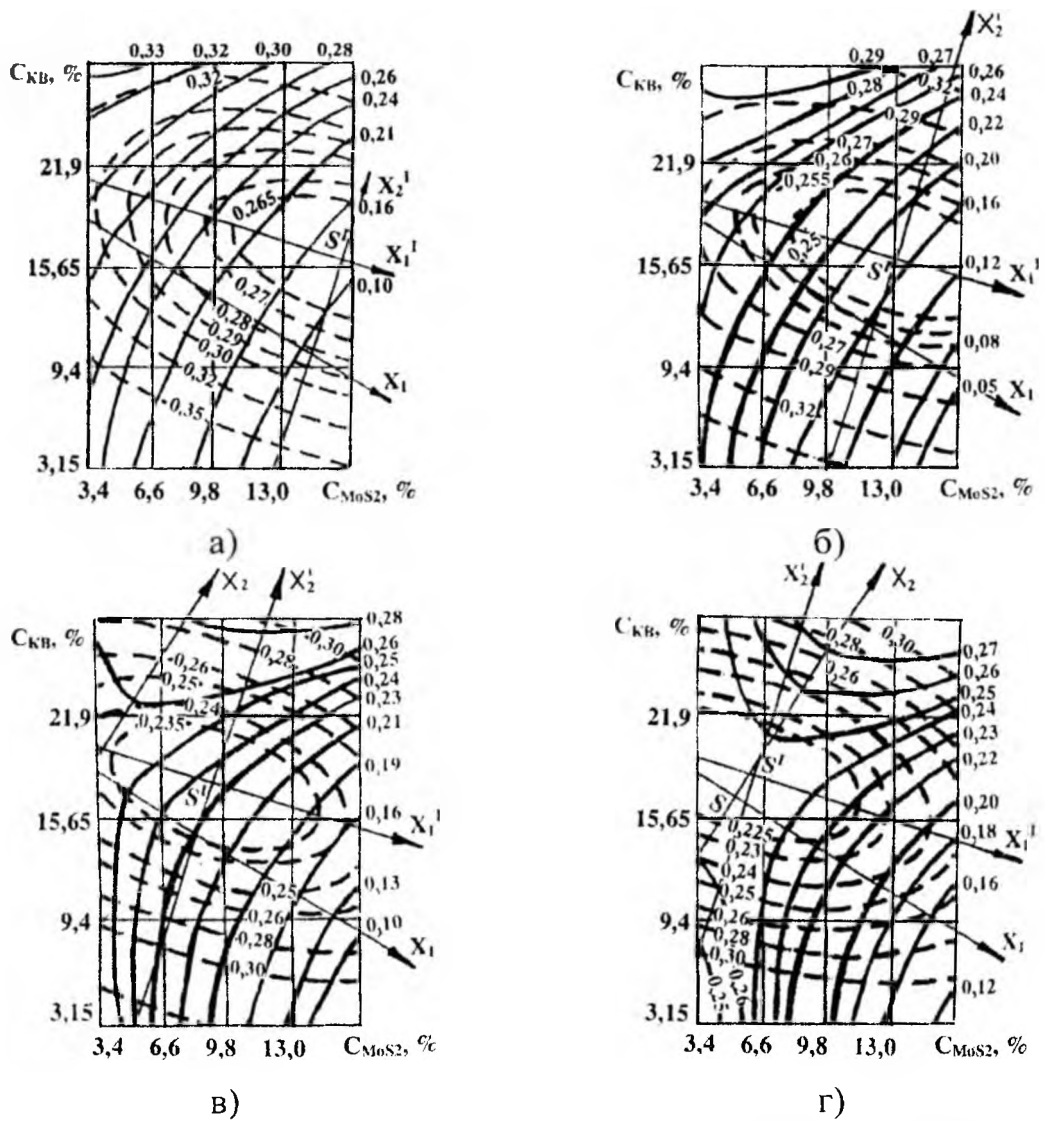


Рис. 2. Двовимірні перерізи функції відгуку – коефіцієнтів тертя при $t_{зм} = 17,5$ хв. ($X_3 = 0$) змішування композиції і $t_{подр} = 5$ ($X_4 = -1,83$) (а), 10 ($X_4 = -1$) (б), 16 ($X_4 = 0$) (в) і 22 ($X_4 = +1$) (г) хв. попереднього подрібнення карбонового волокна (кривокані лінії – на початку першого етапу $S_1 = 0...2$ км, суцільні – на початку другого етапу випробувань $S_2 = 2...12$ км). На кривих рівнях значень функції відгуку наведені величини коефіцієнтів тертя $\mu_{лн}, \mu_{лк}$.

зношування буде високою не залежно від вмісту MoS_2 . При поступовому збільшенні часу попереднього подрібнення мінімальна інтенсивність зношування спостерігається для високонаповнених композицій при високому вмісті твердого мастила (рис. 1в), при часі попереднього подрібнення КВ 22 хв. (рис 1г) мінімальне зношування спостерігається для низьконаповнених композицій при високому вмісті MoS_2 . Для всієї ділянки факторного простору вмісту MoS_2 і для ділянки факторного простору з вмістом КВ 3-22% інтенсивність зношування залежить від взаємодії вмісту MoS_2 і КВ і поступово збільшується зі збільшенням вмісту дисульфиду молібдену і карбонового волокна.

Для $I_{1к}$ при збільшенні часу попереднього

подрібнення і незмінному часі змішування композиції координати нового центру незмінні. Для $I_{2к}$ при збільшенні часу попереднього подрібнення спостерігається різке зменшення нового центру за межами ділянки факторного простору. Це свідчить про те, що на першому етапі інтенсивність об'ємного зношування буде залежати від часу змішування композиції, тоді як на другому етапі інтенсивність зношування є дуже чутливим параметром часу попереднього подрібнення карбонового волокна.

На рис. 2 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку коефіцієнта тертя зразків композиції на початку та в кінці першого етапу ($\mu_{лн}$ і $\mu_{лк}$) від вмісту карбонового волокна $C_{KB}(\%)$ та дисульфиду молібдену $C_{MoS_2}(\%)$ при фіксованому значенні часу змішування

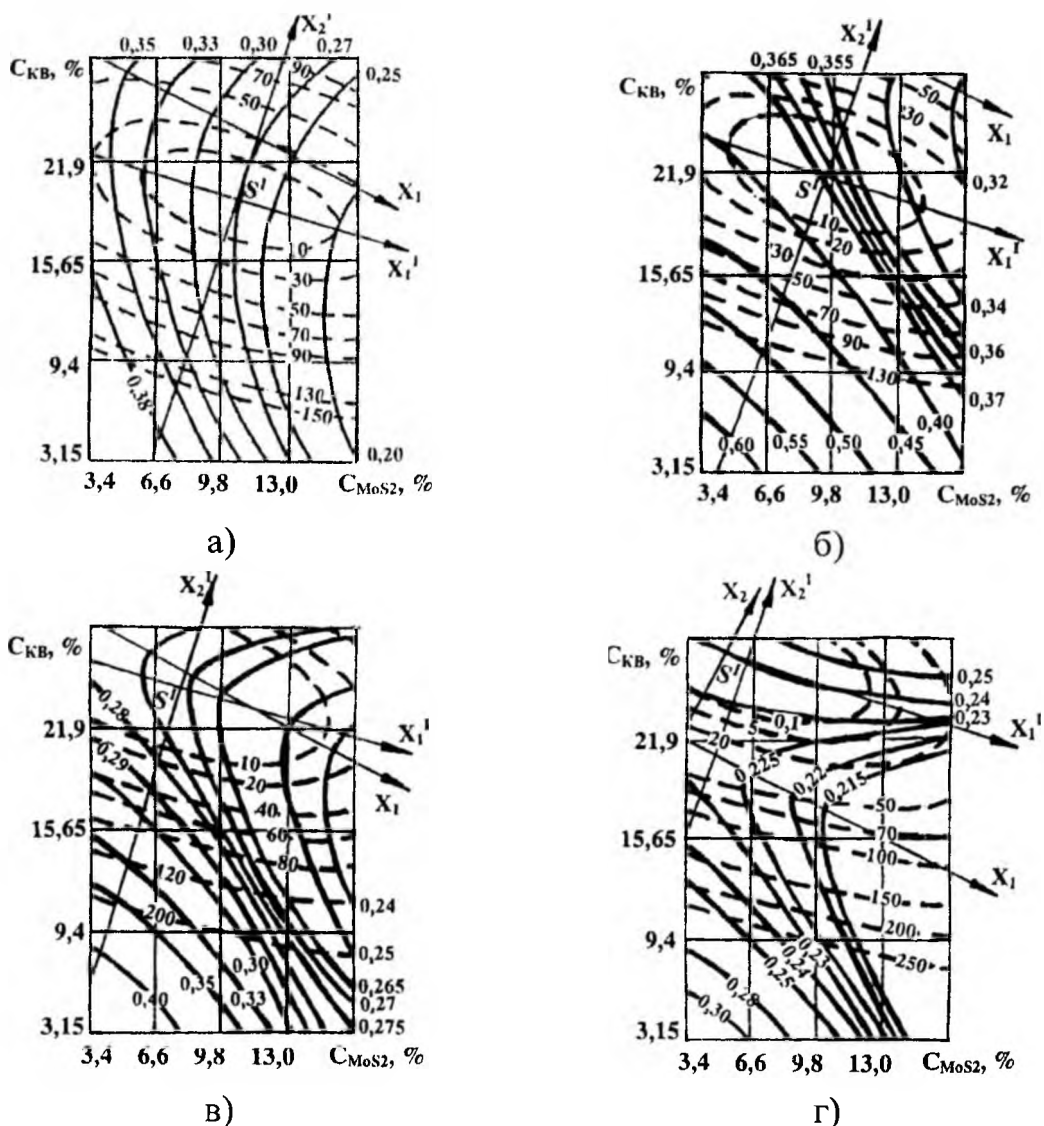


Рис. 3. Двовимірні перерізи функції відгуку – коефіцієнта тертя і відносного видовження при розтягуванні при $t_{зм} = 17,5$ хв. ($X_3 = 0$) змішування композиції і $t_{подр} = 5$ ($X_4 = -1,83$) (а), 10 ($X_4 = -1$) (б), 16 ($X_4 = 0$) (в) і 22 ($X_4 = +1$) (г) хв. попереднього подрібнення карбонового волокна (крисковані лінії – відносно видовження при розтягуванні, суцільні – коефіцієнт тертя в кінці другого етапу випробувань). На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини коефіцієнта тертя μ_{2k} і відносного видовження при розтягуванні $\epsilon_{кв}$ (%).

композиційного матеріалу $t_{зм} = 17,5$ хв. ($X_3 = 0$) та фіксованому часі попереднього подрібнення карбонового волокна $t_{подр} = 5$ ($X_4 = -1,83$), 10 ($X_4 = -1$), 16 ($X_4 = 0$) і 22 хв. ($X_4 = +1$). Мінімальні значення коефіцієнта тертя на початку випробувань спостерігаються для композицій з вмістом КВ 12-21%. Збільшення часу попереднього подрібнення карбонового волокна призводить до помітного зменшення коефіцієнта тертя, а також до зміщення зони мінімальних його значень в сторону меншого вмісту твердого мастила. Для низьконаповнених композицій (менше 12%) значне зменшення вмісту MoS_2 веде до незначного збільшення вмісту КВ і навпаки, а для високонаповнених композицій коефіцієнт

тертя не залежить від вмісту MoS_2 . При збільшенні часу попереднього подрібнення КВ новий центр дещо зміщується в сторону вищих значень вмісту КВ і значно зміщується в сторону нижчого вмісту MoS_2 , що свідчить про те, що тривале попереднє подрібнення волокон призводить до зменшення коефіцієнта тертя при низькому вмісті твердого мастила.

Для коефіцієнта тертя в кінці першого етапу мінімальні значення спостерігаються для низьконаповнених композицій при високому вмісті MoS_2 . При зменшенні вмісту MoS_2 і незмінному вмісті КВ коефіцієнт тертя збільшується. При збільшенні часу попереднього подрібнення новий початок координат зміщується

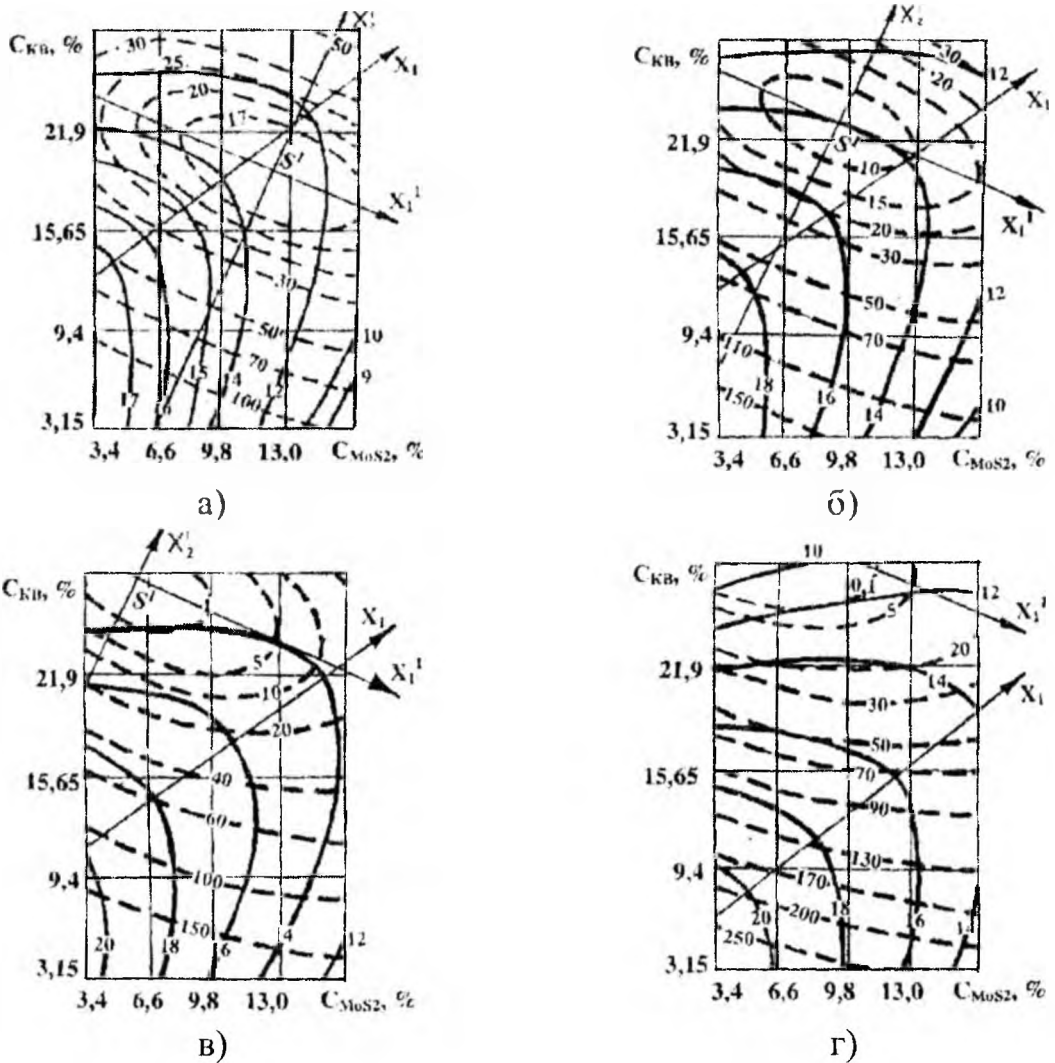


Рис. 4. Двомірні перерізи функції відгуку – міцності при розриві і питомої ударної в'язкості при $t_{зм} = 17,5$ хв. ($X_3 = 0$) змішування композиції і $t_{подр} = 5$ ($X_4 = -1,83$) (а), 10 ($X_4 = -1$) (б), 16 ($X_4 = 0$) (в) і 22 ($X_4 = +1$) (г) хв. попереднього подрібнення карбонового волокна (крисковані лінії – ударна в'язкість, суцільні – міцність при розриві). На кривих рівних значень функції відгуку наведені величини міцності при розриві $\sigma_{р,к}$ [МПа] і питомої ударної в'язкості A_k [кДж/м²].

в сторону зменшення вмісту KB і збільшення вмісту MoS_2 , а це призводить до збільшення мінімальних значень коефіцієнта тертя і до зменшення максимальних його значень при незмінних відповідних значеннях вмісту MoS_2 і KB. При збільшенні часу попереднього подрібнення KB і незмінному часу змішування полімерної композиції високі значення коефіцієнта тертя спостерігається для низьконаповнених композицій при низькому вмісті MoS_2 і для високонаповнених композицій, причому для високонаповнених композицій поступове збільшення часу попереднього подрібнення KB спричиняє зменшення коефіцієнта тертя.

На рис. 3 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку коефіцієнта тертя зразків композиції в кінці другого етапу та відносного подовження при розтягуванні ($\mu_{2к}$ і ϵ_k) від вмісту

карбонового волокна $C_{KB}(\%)$ та дисульфиду молибдену $C_{MoS_2}(\%)$ при фіксованому значенні часу змішування композиційного матеріалу $t_{зм} = 17,5$ хв. ($X_3 = 0$) та фіксованому часу попереднього подрібнення карбонового волокна $t_{подр} = 5$ ($X_4 = -1,83$), 10 ($X_4 = -1$), 16 ($X_4 = 0$) і 22 хв. ($X_4 = +1$). Мінімальні значення коефіцієнта тертя в кінці другого етапу при низькому часі попереднього подрібнення спостерігаються на широкій ділянці факторного простору вмісту KB при високому вмісті MoS_2 , причому при низькому часі попереднього подрібнення KB коефіцієнт тертя практично не залежить від вмісту KB. При збільшенні часу попереднього подрібнення KB ділянка мінімальних значень коефіцієнта тертя розширюється (рис. 3 в, г) і зміщується в сторону нижчого вмісту KB і MoS_2 . Так при тривалому попередньому подрібненні KB з'являється ділянка мінімальних значень коефіцієнта тертя для

низьконаповнених композицій при високому вмісті MoS_2 . Для часу попереднього подрібнення більше 5 хв. при незмінному часі змішування композиції КВ зменшення вмісту КВ веде до збільшення вмісту MoS_2 і навпаки. Ця залежність порушується при високому часі попереднього подрібнення КВ для високонаповнених композицій, коли незначне зменшення вмісту КВ спричиняє значне збільшення вмісту MoS_2 . При збільшенні часу попереднього подрібнення КВ і незмінному часі змішування композиції коефіцієнт тертя зменшується (рис. 3 б, в, г), що вказує на те, що μ_{2k} є дуже чутливим параметром часу попереднього подрібнення карбонового волокна.

Для відносного видовження при розтягуванні мінімальні його значення при низькому часі попереднього подрібнення КВ спостерігаються при низькому часі попереднього подрібнення КВ для композицій з вмістом КВ 19-25% при вмісті твердого мастила 5-15%. В міру зменшення вмісту КВ відносно видовження при розтягуванні збільшується і майже не залежить від вмісту MoS_2 . Збільшення часу попереднього подрібнення при незмінному часі змішуванні композиції призводить до зміщення нового центру в сторону вищих значень вмісту КВ і нижчих значень вмісту MoS_2 та розширення зони мінімальних значень відносного подовження при розтягуванні. Так при тривалому попередньому подрібненні КВ мінімальні значення ϵ_k спостерігаються для високонаповнених композицій майже для всієї ділянки факторного простору вмісту MoS_2 .

На рис. 4 зображено двовимірні перерізи функцій відгуку міцності при розриві та ударної в'язкості зразків композиції ($\sigma_{p,k}$ і A_k) від вмісту карбонового волокна $C_{\text{ВВ}}(\%)$ та дисульфиду молібдену $C_{\text{MoS}_2}(\%)$ при фіксованому значенні часу змішування композиційного матеріалу $t_{\text{зм}} = 17,5$ хв. ($X_3 = 0$) та фіксованому часі попереднього подрібнення карбонового волокна $t_{\text{подр}} = 5$ ($X_4 = -1,83$), 10 ($X_4 = -1$), 16 ($X_4 = 0$) і 22 хв. ($X_4 = +1$). Максимальні значення міцності при розриві при низькому часі попереднього подрібнення КВ спостерігаються для композицій з вмістом КВ 3-14% при низькому вмісті MoS_2 , а мінімальні – для низьконаповнених композицій при високому вмісті MoS_2 . У міру зменшення значень міцності при розриві ділянка факторного простору вмісту КВ значно розширюється. Збільшення часу попереднього подрібнення КВ при незмінному часі змішування композиції призводить до збільшення значень $\sigma_{p,k}$ без порушення загальної закономірності. При тривалому попередньому подрібненні КВ з'являється ще одна ділянка мінімальних значень міцності при розриві: для високонаповнених композицій при низькому вмісті MoS_2 .

Мінімальні значення ударної в'язкості при низькому часі попереднього подрібнення КВ

характерні для композицій з вмістом КВ 16-22% на широкій ділянці факторного простору вмісту MoS_2 . Зменшення вмісту КВ призводить до різкого збільшення ударної в'язкості. Так для низьконаповнених композицій характерні високі значення ударної в'язкості, яка майже не залежить від вмісту MoS_2 . Збільшення часу попереднього подрібнення КВ при незмінному часі змішування композиції призводить до різкого зміщення нового початку координат в сторону вищих значень КВ і нижчих значень MoS_2 . Це супроводжується розширенням зони мінімальних значень ударної в'язкості при часі попереднього подрібнення більше 5 хв. Так при тривалому попередньому подрібненні КВ мінімальну ударну в'язкість мають високонаповнені композиції на всій ділянці факторного простору вмісту MoS_2 . Збільшення часу попереднього подрібнення карбонового волокна при незмінному часі змішування полімерної композиції спричиняє різке збільшення значень ударної в'язкості, особливо для низьконаповнених композицій.

Висновки

1. Мінімальні значення інтенсивності об'ємного зношування на першому етапі тертя спостерігаються для високонаповнених композицій, а на другому етапі – для низьконаповнених композицій. Зі збільшенням часу попереднього подрібнення карбонового волокна послаблюється залежність інтенсивності зношування від вмісту твердого мастила. На другому етапі інтенсивність зношування є дуже чутливим параметром часу попереднього подрібнення карбонового волокна.

2. Для коефіцієнтів тертя на початку першого і другого етапів тертя мінімальні їх значення спостерігаються для низьконаповнених композицій при високому вмісті твердого мастила. Збільшення часу попереднього подрібнення карбонового волокна призводить до помітного зменшення коефіцієнта тертя на початку першого етапу, а також до зміщення зони мінімальних його значень в сторону меншого вмісту твердого мастила, а для коефіцієнта тертя на початку другого етапу – до збільшення його мінімальних і зменшення максимальних значень при незмінних відповідних значеннях вмісту MoS_2 і КВ. При збільшенні часу попереднього подрібнення КВ і незмінному часі змішування композиції коефіцієнт тертя в кінці другого етапу зменшується, що вказує на те, що μ_{2k} є дуже чутливим параметром часу попереднього подрібнення карбонового волокна. На всі коефіцієнти тертя має вплив взаємодія вмісту твердого мастила і карбонового волокна.

3. Механічні властивості композицій на основі політетрафторетилену сильно залежать від

вмісту наповнювача і слабо від вмісту твердого мастила. Максимальні значення механічних властивостей спостерігаються для низьконаповнених композицій. Збільшення часу

попереднього подрібнення карбонового волокна при незмінному часі змішування композиції призводить до різкого збільшення механічних властивостей матеріалу.

Література

1. Сіренко 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.Я. Антифрикційні властивості титану та його сплавів // Вісник Прикарпат. ун-ту., Сер. Хімія. - 2002. - вип. II. - С. 97-114.
4. Антифрикционная композиция флуобон-15: А.с. 1244933, С08J5/16, С08I.27/18 / Г.А. Сиренко, Н.И. Кретов, В.П. Свицерский, Б.О. Таланкин, С.С. Кононюк. - № 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. Свицерский, 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. - 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.И. 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. - 340 с.
12. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. - М.: Легкая индустрия, 1974. - 262 с.
13. Спиридонов А.А., Васильев Н.Г. Планирование эксперимента. - Свердловск: Урал. политех. ин-т, 1975. - 150 с.
14. Жлуктенко 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.

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

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