

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис

Трибоповерхневі властивості полімерного композиту під час тертя та зношування по анізотропній шорсткій поверхні сталі 45

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57,
м. Івано-Франківськ, 76025, Україна, e-mail: orijant@gmail.com

Досліджено закономірності зміни анізотропної шорсткості поверхонь сталі 45 під час тертя та зношування у парі з полімерним композитом. Виявлено, що топографія спряженої з полімерним композитом металевої поверхні є домінуючим чинником у визначенні величини зносу карбопластика як на початку, так і в процесі тертя та зношування, коли шорсткість металевої поверхні твориться самим композитом. Встановлено, що інваріантні комбінації моментів нульового порядку у більшій мірі лінійно впливають на знос полімерного зразка, ніж інваріантні комбінації моментів другого порядку, при цьому знос нелінійно залежить від інваріантних комбінацій моментів четвертого порядку.

Ключові слова: шорсткість, інтенсивність зношування, анізотропна поверхня, тертя, композиційний полімерний матеріал, моменти спектральної щільності, мінорантний ряд.

Стаття постуила до редакції 23.07.2014; прийнята до друку 15.09.2014.

Вступ

У роботах [1-41] проаналізовані параметри математичного опису шорстких поверхонь та методи їх досліджень. Так, у роботах [42-59] досліджуються ізотропні шорсткі поверхні твердих тіл, при цьому математичний опис ізотропних та анізотропних шорстких поверхонь проведений на основі теорії випадкового поля [60, 61]. Зокрема, у цих роботах досліджується: щільність ймовірностей розподілу висот вершин [43, 53, 57], розподіл висот вершин [44], середня виступів шорсткої поверхні [50], розподіл середніх кривин у вершинах нерівностей [44, 48, 49, 56], градієнт поверхні [44, 46], повна кривина [45, 49], головні кривини [45] та відношення головних кривин [45] у вершинах мікронерівностей, дискутується питання означення ізотропності нано- та мікросшорсткої поверхні [47], досліджується щільність плям контакту шорсткої поверхні з рівною [42, 50] та явище злиття плям контакту під час навантаження сильно анізотропних шорстких поверхонь [42].

Теорія [62] застосовувалась для аналізу ізотропної поверхні при пружному контакті [63, 64], при пластичній течії [65, 66] і при адгезії [67]. У [68] розглянуті деякі наближені методи отримання характеристик анізотропної поверхні, а в [69, 70] – розрахунки з використанням моделі ізотропних поверхонь.

У [71] виявлені закономірності зміни параметрів шорсткості ізотропної поверхні сталі 45 під час тертя та зношування у парі з полімерним композитом, а також проаналізовані результати та встановлені мінорантні ряди впливу моментів спектральної щільності поверхні металу на інтенсивність зношування полімерного композиту на основі вуглецевих волокон та полімерної матриці – ароматичного поліаміду або політетрафторетилену.

I. Теоретична частина

1.1. Автокореляційна функція анізотропної шорсткої поверхні. Нехай анізотропна шорстка поверхня описана рівнянням $z = z(x, y)$, де z – випадкова функція для двох змінних x і y (випадкове поле), а x, y – декартові координати на середній площині висот шорсткої поверхні, але разом з тим статистичні характеристики поверхні залежать від напрямків $\theta = \arctg(k_y/k_x)$ та інваріантні до переміщення початку координат на поверхні (однорідна поверхня). У якості поверхні, від якої здійснюється відлік висот, є площа, яка відповідає середній висоті шорсткої поверхні.

Випадкова функція z , яка описує таку шорстку статистично однорідну анізотропну поверхню, має автокореляційну функцію $R(x, y)$ і допускає її спектральний розклад Фур'є $\Phi(k_x, k_y)$ на гармонічні компоненти, де k_x, k_y – компоненти хвильового

вектора $\bar{\mathbf{k}}$, модуль якого дорівнює $|\bar{\mathbf{k}}| = 2\pi/\lambda$ з довжиною хвилі λ .

Тоді автокореляційна функція за означенням [62] дорівнює:

$$R(x, y) = \lim_{\substack{L_1 \rightarrow \infty \\ L_2 \rightarrow \infty}} \frac{1}{4L_1L_2} \int_{-L_1}^{L_1} \int_{-L_2}^{L_2} z(x_1, y_1) z(x_1 + \Delta x, y_1 + \Delta y) dx_1 dy_1. \quad (1)$$

1.2. Спектральною щільністю (СЩ) анізотропної шорсткої поверхні є перетворення Фур'є від функції $R(x, y)$ [62]:

$$\Phi(K_x, K_y) = \frac{1}{4p^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x, y) \exp[-i(xK_x + yK_y)] dx dy, \quad (2)$$

а зворотне перетворення $\Phi(k_x, k_y)$ [62]:

$$R(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(K_x, K_y) \exp[i(xK_x + yK_y)] dK_x dK_y. \quad (3)$$

З виразу (1) видно, що $R(0, 0) = \sigma^2$, де σ^2 – дисперсія, а σ – середнє квадратичне (стандартне) відхилення висоти нерівностей [62, 72]. Тому з (3) витікає [62, 72]:

$$S^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(k_x, k_y) dk_x dk_y. \quad (4)$$

Вираз (4) відбиває те, що функція $\Phi(k_x, k_y)$ визначає той внесок у величину дисперсії σ^2 , який додає різні спектральні компоненти, що відповідають хвилям з хвильовим числом k і довжинами [105]: $\lambda = 2\pi/|\bar{\mathbf{k}}|$ та напрямками [62]: $\theta = \arctg(k_x/k_y)$. Для ізотропних поверхонь функція Φ залежить тільки від змінної $k \equiv |\bar{\mathbf{k}}|$. Моменти спектральної щільності (СЩ) анізотропної шорсткої поверхні визначаються так [62, 72]:

$$m_{pq} = \text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(k_x, k_y) k_x^p k_y^q dk_x dk_y, \quad (5)$$

де Re – дійсна частина числа. Згідно (5) маємо: $m_{00} = \sigma^2$.

1.3. Щільність ймовірностей розподілу висот вершин випадкової анізотропної шорсткої поверхні. Залежність щільності ймовірностей розподілу висот вершин анізотропної поверхні [44, 57] від $e'_1 = z/m_{00} = z/S$ – безрозмірної (нормованої) висоти:

$$\begin{aligned} p_{sum}(e'_1) &= \frac{1}{4} D^{-1} p^{-3} \Delta^{-1/2} m_{00}^{1/2} m_{22}^{5/2} \times \\ &\times \exp\left[-\frac{\Delta_2 m_{00}}{2\Delta_{12}} (e'_1)^2\right] \int_{-\infty}^0 \exp(A_1 t^2 + A_7 e'_1 t) dt \times \\ &\times \int_0^{-t} (t^2 - r^2) r dr \int_0^{2p} \exp[A_4 r^2 \cos^2 j + \\ &+ A_5 r^2 \cos j \sin j + A_6 r^2 \sin^2 j + \\ &+ (A_2 t + A_8 e'_1) r \cos j + (A_3 t + A_9 e'_1) r \sin j] dj, \end{aligned} \quad (6)$$

де $A_1 = -\frac{m_{22}(\Delta_6 + 2\Delta_8 + \Delta_{11})}{2\Delta_{12}}$;

$$A_2 = -\frac{m_{22}(\Delta_6 - \Delta_{11})}{\Delta_{12}}; \quad A_3 = \frac{m_{22}(\Delta_7 + \Delta_{10})}{\Delta_{12}};$$

$$A_4 = -\frac{m_{22}(\Delta_6 - 2\Delta_8 + \Delta_{11})}{2\Delta_{12}};$$

$$A_5 = \frac{m_{22}(\Delta_7 - \Delta_{10})}{\Delta_{12}}; \quad A_6 = -\frac{\Delta_9 m_{22}}{2\Delta_{12}};$$

$$A_7 = \frac{(\Delta_3 + \Delta_5)(m_{00} m_{22})^{1/2}}{\Delta_{12}};$$

$$A_8 = \frac{(\Delta_3 - \Delta_5)(m_{00} m_{22})^{1/2}}{\Delta_{12}}; \quad A_9 = -\frac{\Delta_4 (m_{00} m_{22})^{1/2}}{\Delta_{12}};$$

$\Delta, \Delta_1, \dots, \Delta_{12}, D, t, p, \varphi$.

Розглядаючи ізотропну шорстку поверхню як поодинокий випадок анізотропної шорсткої поверхні, коли АКФ і моменти СЩ не залежать від напрямку, на підставі (5), будемо мати співвідношення:

$$m_{00} = m_0; \quad m_{20} = m_{02} = m_2; \quad (7)$$

$$m_{11} = m_{13} = m_{31} = 0; \quad 3m_{22} = m_{40} = m_{04} = m_4.$$

За [62] для опису ізотропних шорстких поверхонь необхідно використати три спектральні моменти (m_0, m_2 і m_4) і один параметр широко-смугастості спектру $\alpha = (m_0 m_4)/m_2^2$, який не залежить від орієнтації системи координат на поверхні та змінюється в межах: $1,5 \leq \alpha < +\infty$.

У загальному випадку щільність ймовірностей висот вершин ізотропної поверхні залежить від двох параметрів: α і e'_1 , а в граничних випадках (при $\alpha \rightarrow 1,5$ або $\alpha \rightarrow +\infty$) – від одного параметра e'_1 .

Для $\alpha \rightarrow \infty$ спостерігається гавсовський розподіл щільності ймовірностей висот вершин за $e'_1 = -3,5 \dots +3,5$, при цьому $0 \leq p(e'_1) \leq 0,4$, а при $\alpha = 1,5$ маємо релеєвський розподіл у межах $0 \leq e'_1 \leq +3,5$, при цьому $0 \leq p(e'_1) \leq 0,627$.

Щільність ймовірностей висот $\varepsilon_1 = z$ поверхні [44, 57]:

$$p(e_1) = \sqrt{(2ps^2)} \exp\left(-\frac{e_1^2}{2S^2}\right). \quad (8)$$

1.4. Функція розподілу висот вершин анізотропної шорсткої поверхні [62], яка визначає частку тих вершин, у яких величини висот не перевищують значення e'_1 :

$$f(e'_1) = \int_{-\infty}^{e'_1} p(e'_1) de'_1, \quad (9)$$

де $0 \leq f(e'_1) \leq 1$ за $0 \leq e'_1 < 3,5$ та $1,5 \leq \alpha < \infty$.

1.5. Середня кривина анізотропної шорсткої поверхні у вершині виступів висотою e'_1 [44, 56]:

$$\begin{aligned}
 EK_{sum}(\mathbf{e}') = & -m_{22}^{1/2} \left\{ \left[\frac{m_{00}^{1/2} m_{22}^{5/2}}{4Dp^3 \Delta^{1/2}} \exp\left[-\frac{\Delta_2 m_{00}}{2\Delta_{12}} (\mathbf{e}')^2\right] \int_{-\infty}^0 t \exp(A_1 t^2 + A_7 \mathbf{e}'_1 t) dt \times \right. \right. \\
 & \times \int_0^{-t} (t^2 - r^2) r dr \int_0^{2p} \exp[A_4 r^2 \cos^2 j + A_5 r^2 \cos j \cdot \sin j + A_6 r^2 \sin^2 j + \\
 & \left. \left. + (A_2 t + A_8 \mathbf{e}'_1) r \cos j + (A_3 t + A_9 \mathbf{e}'_1) r \sin j \right] dj \right\} / \left(\frac{1}{4} D^{-1} p^{-3} \Delta^{-1/2} m_{00}^{1/2} m_{22}^{5/2} \times \right. \\
 & \times \exp\left[-\frac{\Delta_2 m_{00}}{2\Delta_{12}} (\mathbf{e}')^2\right] \int_{-\infty}^0 \exp(A_1 t^2 + A_7 \mathbf{e}'_1 t) dt \int_0^{-t} (t^2 - r^2) r dr \int_0^{2p} \exp[A_4 r^2 \cos^2 j + \\
 & \left. \left. + A_5 r^2 \cos j \sin j + A_6 r^2 \sin^2 j + (A_2 t + A_8 \mathbf{e}'_1) r \cos j + (A_3 t + A_9 \mathbf{e}'_1) r \sin j \right] dj \right\}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

де E – позначення математичного сподівання.

1.6. Градієнт випадкової анізотропної шорсткої поверхні визначається за [44, 46, 62, 73]:

$$Eq_{sum} = \sqrt[4]{\frac{4\Delta_1}{p^2}} \exp\left(\frac{h_1}{2}\right) E_1(\sqrt{1 - \exp(-2h_1)}), \quad (11)$$

де зворотній гіперболічний косинус [74]:

$$h_1 = Arch \frac{M_2}{2\sqrt{\Delta_1}}, \quad (12)$$

де $\frac{M_2}{2\sqrt{\Delta_1}} \geq 1$; $E_1(\alpha)$ – повний еліптичний інтеграл

Лежандра 2-го роду.

1.7. За [62] для опису ізотропних шорстких поверхонь достатньо використати три спектральні моменти (\mathbf{m}_0 , \mathbf{m}_2 і \mathbf{m}_4) і один параметр широкосмугаості спектра $\alpha = (m_0 m_4) / m_2^2$, який не залежить від орієнтації системи координат на поверхні. Лонг-Гітінс [73] показав, що для опису анізотропної поверхні необхідно використати 9 спектральних моментів: m_{00} , m_{20} , m_{02} , m_{11} , m_{13} , m_{31} , m_{22} , m_{40} , m_{04} , але при $i+j \leq 4$ існують лише 7 їх інваріантних комбінацій, які не залежать від орієнтації системи координат:

- нульового порядку: $M_0 = m_{00}$; (13)

- другого порядку $\begin{cases} M_2 = (m_{02} + m_{20}); \\ M_3 = (m_{20} m_{02} - m_{11}^2); \end{cases}$ (14)
(15)

- четвертого порядку $\begin{cases} M_4 = (m_{40} + 2m_{22} + m_{04}); \\ M_5 = (m_{40} m_{04} - 4m_{13} m_{31} + 3m_{22}^2); \end{cases}$ (16)
(17)

- четвертого порядку $\begin{cases} M_6 = (m_{40} + m_{22})(m_{22} + m_{04}) - (m_{31} + m_{13})^2; \\ M_7 = m_{40}(m_{22} m_{04} - m_{13}^2) - m_{31}(m_{31} m_{04} - m_{13} m_{22}) + m_{22}(m_{31} m_{13} - m_{22}^2). \end{cases}$ (18)
(19)

1.8. Введемо в науковий обіг 8 параметрів широкосмугаості спектру анізотропної поверхні:

$$a_1 = \frac{M_0 M_4}{M_2^2} = \frac{m_{00}(m_{40} + 2m_{22} + m_{04})}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (20)$$

$$a_2 = \frac{M_0 M_5}{M_2^2} = \frac{m_{00}(m_{40} m_{04} - 4m_{13} m_{31} + 3m_{22}^2)}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (21)$$

$$a_3 = \frac{M_0 M_6}{M_2^2} = \frac{m_{00}[(m_{40} + m_{22})(m_{22} + m_{04}) - (m_{31} + m_{13})^2]}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (22)$$

$$a_4 = \frac{M_0 M_7}{M_2^2} = \frac{m_{00}[m_{40}(m_{22} m_{04} - m_{13}^2) - m_{31}(m_{31} m_{04} - m_{13} m_{22}) + m_{22}(m_{31} m_{13} - m_{22}^2)]}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (23)$$

$$a_5 = \frac{M_0 M_4}{M_3^2} = \frac{m_{00}(m_{40} + 2m_{22} + m_{04})}{(m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2}; \quad (24)$$

$$a_6 = \frac{M_0 M_5}{M_3^2} = \frac{m_{00}(m_{40}m_{04} - 4m_{13}m_{31} + 3m_{22}^2)}{(m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2}; \quad (25)$$

$$a_7 = \frac{M_0 M_6}{M_3^2} = \frac{m_{00}[(m_{40} + m_{22})(m_{22} + m_{04}) - (m_{31} + m_{13})^2]}{(m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2}; \quad (26)$$

$$a_8 = \frac{M_0 M_7}{M_3^2} = \frac{m_{00}[m_{40}(m_{22}m_{04} - m_{13}^2) - m_{31}(m_{31}m_{04} - m_{13}m_{22}) + m_{22}(m_{31}m_{13} - m_{22}^2)]}{(m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2}. \quad (27)$$

1.9. Введемо у науковий обіг узагальнений параметр широкосмугастості (α_k , де $k \equiv Q, q, a, g, h$ – вид середньої) СЩ анізотропної поверхні; побудованого на частинних параметрах широкосмугастості спектру, за інваріантами спектральних моментів:

- середню кубічну $\alpha_Q = \sqrt[3]{\left(\sum_{i=1}^{n=8} \alpha_i^3\right)/n}$; (28)

- середню квадратичну $\alpha_q = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n=8} \alpha_i^2\right)/n}$; (29)

- середню арифметичну $\alpha_a = \left(\sum_{i=1}^{n=8} \alpha_i\right)/n$; (30)

- середню геометричну $\alpha_g = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n=8} \alpha_i}$; (31)

де D – позначення добутку;

- середню гармонійну

$$\alpha_h = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^{n=8} \left(\frac{1}{\alpha_i}\right)\right]/n} = n \cdot \left[\sum_{i=1}^{n=8} \left(\frac{1}{\alpha_i}\right)\right]^{-1}, \quad (32)$$

між якими існує співвідношення мінорантного ряду:

$$a_Q > a_q > a_a > a_g > a_h. \quad (33)$$

1.10. Також введемо у науковий обіг узагальнений параметр широкосмугастості СЩ анізотропної поверхні як узагальнену функцію бажаності d, побудованого на частинних функціях бажаності: $0 \leq d_i \leq 1$, де $d_i = \exp[-\exp(-\alpha')]$; $\alpha' = b_0 + b_1\alpha_i$;

$$\alpha' = b_0 + b_1\alpha_i + b_{11}\alpha_i^2; \alpha' = b_0 \ln \alpha_i^{b_1}; \dots; \alpha = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i}.$$

II. Експериментальна частина

2.1. Матеріали досліджень.

Досліджували анізотропну поверхню контртіла із сталі 45 (HB 4,50 ± 0,02 ГПа) та композиту на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого волокна УТМ-8.

2.2. Методи випробування.

1. Тертя та зношування даних матеріалів без

машення вивчали на трибометрі ХТІ-72М за схемою [I-1] [75], де I – вид контакту, 1 – форма зразка: торець пальчика діаметром 10 ± 0,05 мм і висотою 15 ± 0,1 мм ковзав по площині металевому контртіла; контртіло було виконано порожнистим діаметром 60 ± 0,15 мм, висотою 35 ± 0,2 мм, товщиною робочої частини поверхні тертя 5 ± 0,2 мм або у вигляді диску діаметром 60 ± 0,1 мм і висотою (10 - 15) ± 0,1 мм, яке розміщали у відповідне гніздо порожнинного тіла. Через порожнину контртіла проходила холодна вода, або розміщувався термонагрівач, завдяки яким підтримувався заданий тепловий режим поверхні тертя вуглецевої сталі 45, термообробленої до HB 4,5 ± 0,2 ГПа, з вихідним середнім арифметичним відхиленням профілю поверхні [71]: Ra₀ = 0,085 мкм (дослід № 70); Ra₀ = 0,22 мкм (дослід № 72); Ra₀ = 0,49 мкм (дослід № 73); Ra₀ = 0,85 мкм (дослід № 74); Ra₀ = 1,42 мкм (дослід № 75); питоме навантаження на 3 зразки складало p = 3 МПа (нормальне навантаження на 1 зразок N_i = 235,62Н); швидкість ковзання v = 1,1 м/с; температура поверхні сталі T = 373 ± 1 К, яка була визначена термopарою ХК на відстані 1 ± 0,05 мм від поверхні тертя контртіла, а величини (в mV) записувались на стрічку потенціометра КСП-4, шлях тертя складав S ≤ 1000 - 3200 км (сумарний час тертя τ = 253 - 808 год.) із заміром величини зносу через 50 - 200 км (τ_i = 12,6-50,4 год.).

2. Полімерні зразки послідовно припрацьовували на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості, що знаходилися на масивному плоскому металевому тілі. Металево контртіло шліфували, а потім оброблювали на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості у випадкових напрямках (для того, щоб отримати поверхню, яка була б близькою до анізотропної поверхні). Далі полімерні зразки припрацьовували на металевому контртілі при робочих трибопараметрах випробувань до досягнення приблизно 100 % дзеркальної поверхні. Після припрацьовування полімерних зразків металеве контртіло знову припрацьовували на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості, що знаходилися на масивному плоскому металевому тілі.

3. Профілограми мікрошорсткості поверхонь

знімали за допомогою профілометра-профілографа ВЭИ «Калибр» моделі «201» та моделі «252». Для одного напрямку знімали 50-60 базових довжин профілограм для металевого контргіла і 10-15 базових довжин профілограм для полімерного зразка. Для ізотропної поверхні профілограму знімали під кутом $\sim 45^\circ$ до напрямку ковзання. Ділянки зйомки поверхні були рівнорозподілені за слідом тертя. Статистичні характеристики різних ділянок поверхні були однаковими в статистичному відношенні.

Профілограми оброблялися за методом МНК: знаходили середньоарифметичне відхилення профілю поверхні R_a , щільність нулів D_0 і щільність екстремумів D_{extr} . Виміряна R_a і розрахункова за профілограмами D_0 (для моделі «252» D_0 виміряна) були статистично рівні.

Великий об'єм виборки і рівномірний розподіл її по поверхні контргіла або зразка забезпечили рівень вмісту довгохвильових компонентів спектру, і, таким чином, показність моментів спектральної щільності. Границя дрібномасштабних мікронерівностей у ділянці малих довжин хвиль спектру була обмежена величиною, яка не перебільшувала у 2-3 рази похибку вимірювань. Параметр широкосмугастості спектру α був більше 1,8, тобто тієї величини, яка характерна для «білого шуму».

За результатами обробки профілограм визначали моменти нульового m_{00} , другого m_{02} , m_{20} , m_{11} та четвертого m_{13} , m_{31} , m_{22} , m_{04} , m_{40} порядків спектральної щільності (СЩ) розподілу висот вершин нерівностей, кривин у вершинах нерівностей та градієнтів шорсткої поверхні.

III. Результати та обговорення

3.1. Коефіцієнти кореляцій (R_i) між питомими інтенсивностями об'ємного зношування композиту та інваріантами моментів спектральної щільності (СЩ) нульового порядку M_1 (мкм^2), пов'язаного з висотами вершин мікро- та нанонерівностей, інваріантами моментів СЩ другого порядку M_2 і M_3 (безрозмірні величини), які пов'язані з градієнтом поверхні та інваріантами моментів СЩ четвертого порядку M_4 (мкм^{-2}), M_5 і M_6 (мкм^{-4}), M_7 (мкм^{-6}), які пов'язані з кривиною у вершині мікро- та нанонерівностей вихідної поверхні або поверхні, що утворилася в процесі тертя та зношування в кінці шляху 300 км $M_1', M_2', M_3', M_4', M_5', M_6', M_7'$, наведені у табл. 1.

За принципом аналогії однакових за природою та механізмом явищ із означеннями інваріантних комбінацій M_i 9-ти спектральних моментів, які, за Лонге-Гігінсом [73], описують анізотропну випадкову поверхню, нульового порядку – m_{00} ; другого порядку – m_{20} , m_{02} , m_{11} ; четвертого порядку – m_{13} , m_{31} , m_{22} , m_{40} , m_{04} , та введеними нами [58] у науковий обіг 8-ми параметрів широкосмугастості спектральної щільності розподілу нерівностей анізотропної поверхні α_i , розрахуємо частинні інваріантні комбінації коефіцієнтів кореляцій (R_i)

лінійного зв'язку питомої інтенсивності об'ємного зношування (I_j) з інваріантними комбінаціями (α_i) спектральних моментів (M_i).

Результати розрахунків R_i занесені в табл. 1. Введення у науковий обіг узагальненого параметру широкосмугастості (α_k , де $k \equiv Q, q, a, g, h$ – вид середньої) СЩ анізотропної поверхні дозволило, відповідно, за принципом аналогії (28)-(32), розрахувати узагальнений коефіцієнт кореляцій лінійного зв'язку \bar{R}_k між питомою інтенсивністю об'ємного зношування I_j та α_k . Результати розрахунків $\bar{R}_Q, \bar{R}_q, \bar{R}_a, \bar{R}_g, \bar{R}_h$ занесені у табл. 1.

3.2. Статистичну оцінку значущості коефіцієнтів кореляцій та їх інваріантних комбінацій, включаючи й узагальненого коефіцієнта кореляцій, лінійних зв'язків $I_j = f(M_i)$, $I_j = f(\alpha_i)$, $I_j = f(\alpha_k)$, дано:

- за критичним коефіцієнтом кореляцій $r_{кр}\{q = 1 - (\alpha/2); f = n - 2\}$ [76, 77], де $\alpha = 0,05$ – рівень значущості, f – число вільностей, а $n = 8$ – кількість варіантів, тоді за [76] $r_{кр}\{q = 0,975; f = 6\} = 0,7067$, при цьому ступінь лінійності лінійного зв'язку визначали за співвідношеннями:

$$\xi_1(r) = \frac{|r_p|}{r_{кр}}; \xi_1(R) = \frac{|R_p|}{r_{кр}}; \xi_1(\bar{R}) = \frac{|\bar{R}_p|}{r_{кр}}, \quad (34)$$

де r_p, R_p, \bar{R}_p – розрахункові значення коефіцієнтів кореляцій, частинних інваріантних комбінацій коефіцієнтів кореляції та середнього значення узагальненого коефіцієнта кореляцій, а ступінь нелінійності – за співвідношеннями:

$$\xi_2(r) = \frac{r_{кр}}{|r_p|}; \xi_2(R) = \frac{r_{кр}}{|R_p|}; \xi_2(\bar{R}) = \frac{r_{кр}}{|\bar{R}_p|}; \quad (35)$$

- за теоретичним (табличним) значенням критерію Стьюдента [76] $t_T\{q = 1 - (\alpha/2); f = n - 2\} = t_T\{q = 0,975; f = 6\} = 2,447$ (для $\alpha = 0,05$), порівнюючи його з розрахованою t-статистикою t_p [77]:

$$|t'_p| = \frac{r_p}{\sqrt{1 - r_p^2}} \sqrt{n - 2}; |t''_p| = \frac{R_p}{\sqrt{1 - R_p^2}} \sqrt{n - 2};$$

$$|t'''_p| = \frac{\bar{R}_p}{\sqrt{1 - \bar{R}_p^2}} \sqrt{n - 2}, \quad (36)$$

визначаючи ступінь лінійності лінійного зв'язку за співвідношеннями:

$$\xi_1(t') = \frac{|t'_p|}{t_T}; \xi_1(t'') = \frac{|t''_p|}{t_T}; \xi_1(t''') = \frac{|t'''_p|}{t_T}, \quad (37)$$

а ступінь нелінійності – за співвідношеннями:

$$\xi_2(t') = \frac{t_T}{|t'_p|}; \xi_2(t'') = \frac{t_T}{|t''_p|}; \xi_2(t''') = \frac{t_T}{|t'''_p|}; \quad (38)$$

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляцій між питомими інтенсивностями об'ємного зношування композиту та інваріантними комбінаціями спектральних моментів, частинного та узагальненого параметрів широкосмугаєстості спектру анізотропної шорсткої поверхні металевого контртіла

Величина	Шлях тертя			
	0...50км (I ₁)	200...300км (I ₄)	300...400км (I ₅)	300-400км (I ₅ ')
Інваріантні комбінації спектральних моментів (M _i)	Коефіцієнти кореляцій зв'язків інтенсивностей зношування (I _i) та інваріантних комбінацій спектральних моментів M _i			
M ₁	0,943	0,708	0,252	0,749
M ₂	0,881	0,825	0,667	0,912
M ₃	0,834	0,785	0,622	0,893
M ₄	0,612	0,584	0,914	0,608
M ₅	0,675	0,621	0,797	0,637
M ₆	0,510	0,531	0,856	0,549
M ₇	0,582	0,488	0,831	0,520
Частинні параметри широкосмугаєстості спектру (α _i)	Частинні інваріантні комбінації коефіцієнтів кореляцій (R _i) зв'язків I _j = f(α _i)			
α ₁ (R ₁)	0,7436	0,6075	0,5177	0,5475
α ₂ (R ₂)	0,8201	0,6460	0,4514	0,5736
α ₃ (R ₃)	0,6196	0,5524	0,4849	0,4944
α ₄ (R ₄)	0,7071	0,5076	0,4707	0,4683
α ₅ (R ₅)	0,8297	0,6710	0,5953	0,5711
α ₆ (R ₆)	0,9151	0,7135	0,5191	0,5983
α ₇ (R ₇)	0,6914	0,6101	0,5576	0,5156
α ₈ (R ₈)	0,7890	0,5607	0,5413	0,4884
Узагальнений параметр широкосмугаєстості спектру (α)	Середні значення узагальненого коефіцієнта кореляцій R _k зв'язків I _j = f(α _k)			
α _Q (\bar{R}_Q)	0,7743	0,6151	0,5211	0,5358
α _q (\bar{R}_q)	0,7694	0,6119	0,5192	0,5340
α _a (\bar{R}_a)	0,7645	0,6086	0,5173	0,5322
α _g (\bar{R}_g)	0,7595	0,6053	0,5154	0,5303
α _h (\bar{R}_h)	0,7544	0,6020	0,5135	0,5285

- за добутком $\sigma_r \cdot z$ ($q=1-\alpha/2$), де $s_r = \frac{1}{\sqrt{n-3}} =$

0,4472 – середнє квадратичне відхилення нормального розподілу випадкової величини перетворення Фішера (z); $z_q = z_T$ ($q = 1 - \alpha/2$) = $z_{0,975} = 1,96$ [77] – квантиль нормованого нормального розподілу [77], тоді добуток ($z_T \cdot \sigma_z$) = 0,8765, розраховуючи значення випадкової величини z_p перетворення Фішера:

$$z'_p = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+r_p}{1-r_p} \right); \quad z''_p = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+R_p}{1-R_p} \right);$$

$$z'''_p = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+\bar{R}_p}{1-\bar{R}_p} \right) \quad (39)$$

та визначаючи ступінь лінійності лінійного зв'язку за співвідношеннями:

$$\xi_1(z') = \frac{|z'_p|}{(\sigma_r \cdot z_q)}; \quad \xi_1(z'') = \frac{|z''_p|}{(\sigma_r \cdot z_q)}; \quad \xi_1(z''') = \frac{|z'''_p|}{(\sigma_r \cdot z_q)}, \quad (40)$$

а ступінь нелінійності – за співвідношеннями:

$$\xi_2(z') = \frac{(\sigma_r \cdot z_q)}{|z_p|}; \xi_2(z'') = \frac{(\sigma_r \cdot z_q)}{|z_p''|}; \xi_2(z''') = \frac{(\sigma_r \cdot z_q)}{|z_p'''|}. \quad (41)$$

3.3. Результати розрахунків за формулами (34)-(41) перевірки статистичних нульових гіпотез

для генеральних коефіцієнтів кореляцій:

$$H_0 : \rho' = 0; \quad H_0 : \rho'' = 0; \quad H_0 : \rho''' = 0$$

↑ оцінка ↑ оцінка ↑ оцінка

$$r_p \neq 0 \quad R_p \neq 0 \quad \bar{R}_p \neq 0$$

Таблиця 2

Значущість і сила лінійних зв'язків (для $\alpha = 0,05$) між питомою інтенсивністю об'ємного зношування (I_j) композиту на основі ПТФЕ + 20 % карбонізованого волокна УТМ-8 та інваріантних комбінацій моментів (M_i) спектральної щільності (СЩ) анізотропної поверхні контртіла із сталі 45, параметрами широкосмугастості (α_i) СЩ та узагальненого параметра широкосмугастості СЩ цієї спряженої поверхні

Величина	Ступінь лінійності (ξ_1) та ступінь нелінійності (ξ_2) кореляційних зв'язків $I_j = f(M_i)$, $I_j = f(\alpha_i)$, $I_j = f(\alpha)$ на шляху тертя							
	0...50км (I_1)		200...300км (I_4)		300...400км (I_5)		300-400км (I_5')	
	ξ_1	ξ_2	ξ_1	ξ_2	ξ_1	ξ_2	ξ_1	ξ_2
А. За критичним коефіцієнтом кореляцій ($r_{кр}$)								
M_1	1,334	0,749	1,002	0,998	0,357	2,804	1,060	0,944
M_2	1,247	0,802	1,167	0,857	0,944	1,060	1,291	0,775
M_3	1,180	0,847	1,111	0,900	0,880	1,136	1,264	0,791
M_4	0,866	1,155	0,826	1,210	1,293	0,773	0,860	1,162
M_5	0,955	1,047	0,879	1,138	1,128	0,887	0,901	1,109
M_6	0,722	1,386	0,751	1,331	1,211	0,826	0,777	1,287
M_7	0,824	1,214	0,691	1,448	1,176	0,850	0,736	1,359
α_1	1,052	0,950	0,860	1,163	0,733	1,365	0,775	1,291
α_2	1,161	0,862	0,914	1,094	0,639	1,566	0,812	1,232
α_3	0,877	1,141	0,782	1,279	0,686	1,457	0,700	1,429
α_4	1,001	0,999	0,718	1,392	0,666	1,501	0,663	1,509
α_5	1,174	0,852	0,950	1,053	0,842	1,187	0,808	1,237
α_6	1,295	0,772	1,010	0,991	0,735	1,361	0,847	1,181
α_7	0,978	1,022	0,863	1,158	0,789	1,267	0,730	1,371
α_8	1,116	0,896	0,793	1,260	0,766	1,306	0,691	1,447
α_Q	1,096	0,913	0,870	1,149	0,737	1,356	0,758	1,319
α_q	1,089	0,919	0,866	1,155	0,735	1,361	0,756	1,323
α_a	1,082	0,924	0,861	1,161	0,732	1,366	0,753	1,328
α_g	1,075	0,931	0,857	1,168	0,729	1,371	0,750	1,333
α_h	1,068	0,937	0,852	1,174	0,727	1,376	0,748	1,337
Б. За критерієм Стьюдента (t_T)								
M_1	2,837	0,353	1,004	0,997	0,261	3,836	1,132	0,884
M_2	1,864	0,537	1,461	0,684	0,896	1,116	2,226	0,449
M_3	1,513	0,661	1,269	0,788	0,795	1,258	1,986	0,504
M_4	0,775	1,291	0,720	1,389	2,255	0,443	0,767	1,305
M_5	0,916	1,092	0,793	1,261	1,321	0,757	0,827	1,209
M_6	0,594	1,685	0,627	1,594	1,658	0,603	0,658	1,521
M_7	0,716	1,396	0,560	1,787	1,495	0,669	0,609	1,641
α_1	1,113	0,898	0,766	1,306	0,606	1,651	0,655	1,527
α_2	1,435	0,697	0,847	1,180	0,506	1,975	0,701	1,427
α_3	0,790	1,266	0,663	1,508	0,555	1,802	0,569	1,756
α_4	1,001	0,999	0,590	1,696	0,534	1,873	0,531	1,885
α_5	1,488	0,672	0,906	1,104	0,742	1,348	0,696	1,436
α_6	2,272	0,440	1,019	0,981	0,608	1,645	0,748	1,338
α_7	0,958	1,044	0,771	1,297	0,672	1,487	0,602	1,660
α_8	1,286	0,778	0,678	1,475	0,644	1,552	0,560	1,785
α_Q	1,225	0,816	0,781	1,281	0,611	1,636	0,635	1,574

Продовження таблиці 2

α_q	1,206	0,829	0,774	1,291	0,608	1,644	0,632	1,582
α_a	1,187	0,842	0,768	1,302	0,605	1,653	0,629	1,589
α_g	1,169	0,856	0,761	1,314	0,602	1,661	0,626	1,597
α_h	1,150	0,869	0,755	1,325	0,599	1,669	0,623	1,605
В. За перетворенням Фішера та добутком ($z_T \cdot \sigma_z$)								
M_1	2,013	0,497	1,008	0,993	0,294	3,403	1,107	0,903
M_2	1,575	0,635	1,337	0,748	0,919	1,088	1,756	0,569
M_3	1,370	0,730	1,207	0,828	0,831	1,204	1,639	0,610
M_4	0,813	1,231	0,763	1,311	1,770	0,565	0,805	1,242
M_5	0,935	1,069	0,829	1,206	1,244	0,804	0,859	1,164
M_6	0,642	1,558	0,675	1,482	1,458	0,686	0,704	1,421
M_7	0,759	1,317	0,609	1,643	1,359	0,736	0,658	1,521
α_1	1,094	0,915	0,804	1,243	0,654	1,529	0,701	1,426
α_2	1,320	0,758	0,877	1,141	0,555	1,802	0,745	1,343
α_3	0,826	1,210	0,709	1,410	0,604	1,656	0,618	1,618
α_4	1,006	0,995	0,638	1,567	0,583	1,715	0,580	1,726
α_5	1,354	0,738	0,927	1,079	0,783	1,278	0,741	1,350
α_6	1,778	0,563	1,020	0,980	0,656	1,524	0,788	1,269
α_7	0,971	1,030	0,809	1,236	0,718	1,393	0,651	1,537
α_8	1,219	0,820	0,723	1,383	0,691	1,446	0,609	1,642
α_Q	1,176	0,850	0,818	1,222	0,659	1,517	0,683	1,465
α_q	1,162	0,860	0,812	1,231	0,656	1,524	0,680	1,471
α_a	1,149	0,870	0,806	1,240	0,653	1,531	0,677	1,478
α_g	1,135	0,881	0,800	1,250	0,650	1,538	0,674	1,484
α_h	1,122	0,892	0,794	1,259	0,647	1,545	0,671	1,491

зведені в табл. 2. У табл. 2 жирним шрифтом відмічені значущі коефіцієнти кореляції. Як видно з табл. 1, за оцінками значущості коефіцієнтів лінійних кореляцій лінійного зв'язку $I_j = f(M_i)$ спостерігаються такі нерівності за I_i та шляхом тертя у мінорантному ряді впливу M_i на I_i :

$$S_1 = 0 \dots 50 \text{ км } (I_1): [(M_1) > (M_2, M_3)] > (M_4, M_5, M_6, M_7);$$

$$S_4 = 200 \dots 300 \text{ км } (I_4): [(M_2, M_3) > (M_1)] > (M_4, M_5, M_6, M_7);$$

$$S_5 = 300 \dots 400 \text{ км } (I_5): [(M_4, M_5, M_6, M_7)] > (M_2, M_3) > (M_1);$$

$$S_5' = 300-400 \text{ км } (I_5'): [(M_2, M_3) > (M_1)] > (M_4, M_5, M_6, M_7).$$

Таким чином, закономірності, що виявлені для ізотропних поверхонь [71], аналогічно проявляються і для анізотропних поверхонь.

3.4. Результати (табл. 1) дозволили скласти мінорантні ряди за величиною щільності кореляційних зв'язків $I_j = f(\alpha_i)$ за частинними інваріантними комбінаціями коефіцієнтів лінійних кореляцій (R_i) для певних шляхів тертя S_j :

$$S_1 = 0 \dots 50 \text{ км } (I_1):$$

$$[\alpha_6 > \alpha_5 > \alpha_2 > \alpha_8 > \alpha_1 > \alpha_4] > \alpha_7 > \alpha_3;$$

$$S_4 = 200 \dots 300 \text{ км } (I_4):$$

$$[\alpha_6] > \alpha_5 > \alpha_2 > \alpha_7 > \alpha_1 > \alpha_8 > \alpha_3 > \alpha_4;$$

$$S_5 = 300 \dots 400 \text{ км } (I_5):$$

$$\alpha_5 > \alpha_7 > \alpha_8 > \alpha_6 > \alpha_1 > \alpha_3 > \alpha_4 > \alpha_2;$$

$$S_5' = 300-400 \text{ км } (I_5'):$$

$$\alpha_6' > \alpha_2' > \alpha_5' > \alpha_1' > \alpha_7' > \alpha_3' > \alpha_8' > \alpha_4'.$$

Як видно з табл. 1, величини узагальненого параметра широкосмугастості СЩ анізотропної поверхні і його впливу на I_j для всіх шляхів тертя можна розташувати у мінорантний ряд: $\alpha_Q > \alpha_q > \alpha_a > \alpha_g > \alpha_h$, при цьому для шляху тертя $\Delta S_j = 0 \dots 50$ км цей ряд відповідає значущим коефіцієнтам кореляцій. Як видно з табл. 2 та вище наведеного аналізу, всі 3 методи перевірки нульової гіпотези та значущості вибірових коефіцієнтів кореляцій привели до однакових якісних результатів:

- на початку тертя ($\Delta S_1 = 0 \dots 50$ км) інтенсивність зношування композиту (I_1) лінійно залежить від інваріантних комбінацій моментів спектральної щільності (СЩ) шорсткої, анізотропної вихідної поверхні контргіла, в першу чергу від M_1 , яка пов'язана із нульовим моментом СЩ – з висотою нерівностей [ступінь лінійності кореляційного зв'язку $\xi_1 = 1,334$ за $r_{кр}$; $\xi_1 = 2,837$ за t_T ; $\xi_1 = 2,013$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$], а потім – від інваріантних комбінацій M_2, M_3 , які пов'язані моментами СЩ другого порядку – із градієнтом вихідної поверхні [ступінь лінійності кореляційного зв'язку $\xi_1 = 1,247$ та $1,180$ відповідно M_2 та M_3 за $r_{кр}$; $\xi_1 = 1,864$ та $1,513$ відповідно за t_T ; $\xi_1 = 1,575$ та $1,370$ відповідно за $(z_T \cdot \sigma_z)$] і далі нелінійно залежить від інваріантних комбінацій M_4, M_5, M_6, M_7 , які пов'язані із кривиною вихідної поверхні у вершинках нерівностей – моментами СЩ четвертого порядку [ступінь нелінійності кореляційного зв'язку $\xi_2 = 1,047-1,386$ для M_4-M_7 за $r_{кр}$; $\xi_2 = 1,092-1,685$ для M_4-M_7 за t_T ; $\xi_2 = 1,069-1,558$ для M_4-M_7 за $(z_T \cdot \sigma_z)$];

• на шляху тертя 200-300 км провідну роль відіграє градієнт поверхні – інваріантні комбінації M_2, M_3 , які пов'язані з моментами другого порядку [ступінь лінійності кореляційного зв'язку $\xi_1=1,111-1,167$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,269-1,461$ за t_T ; $\xi_1=1,207-1,337$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$], а потім висота нерівностей – інваріантна комбінація M_1 , яка пов'язана з нульовим моментом СЩ [$\xi_1=1,002$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,004$ за t_T ; $\xi_1=1,008$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$], а потім нелінійно I_4 залежить від M_4, M_5, M_6, M_7 , які пов'язані із моментами СЩ четвертого порядку – кривиною поверхні [ступінь нелінійності кореляційного зв'язку $\xi_2=1,138-1,448$ за $r_{кр}$; $\xi_2=1,261-1,787$ за t_T ; $\xi_2=1,206-1,643$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$ для M_4-M_7];

• при $\Delta S_j=300-400$ км головну роль у зносостійкості композиту відіграє кривина поверхні контртіла – інваріанти комбінацій моментів четвертого порядку СЩ вихідної поверхні M_4, M_5, M_6, M_7 [ступінь лінійності зв'язків $I_5=f(M_4, M_5, M_6, M_7)$ становить $\xi_1=1,128-1,293$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,321-2,255$ за t_T ; $\xi_1=1,244-1,770$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$ для M_4-M_7], потім M_2, M_3 [$\xi_1=0,880-0,944$ за $r_{кр}$; $\xi_1=0,795-0,896$ за t_T ; $\xi_1=0,831-0,919$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$], а після того – M_1 [$\xi_1=0,357$ за $r_{кр}$; $\xi_1=0,261$ за t_T ; $\xi_1=0,294$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$]. При цьому між I_5 та інваріантними комбінаціями M_1 , пов'язаним з моментом нульового порядку – висотою нерівностей вихідної поверхні існує нелінійний зв'язок [ступінь нелінійності кореляційного зв'язку $I_5=f(M_1)$ становить $\xi_2=2,804$ за $r_{кр}$; $\xi_2=3,836$ за t_T ; $\xi_2=3,403$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$], а між I_5 та інваріантними комбінаціями M_2, M_3 , що пов'язані з моментами СЩ другого порядку – градієнтом вихідної поверхні [ступінь нелінійності кореляційних зв'язків $I_5=f(M_2, M_3)$ становить $\xi_2=1,060-1,136$ за $r_{кр}$; $\xi_2=1,116-1,258$ за t_T ; $\xi_2=1,088-1,204$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$ для M_2, M_3];

• якщо при $\Delta S_j=300-400$ км давати оцінку сили зв'язку $I_5=f(M_i)$, де M_i – інваріантні комбінації моментів СЩ не вихідної поверхні, а тієї, що утворилася у процесі тертя та зношування на момент $S=300$ км, то ми повертаємося до оцінок (більш значущих кількісно) кореляційних зв'язків $I_5=f(M_i)$, що відповідають зв'язку $I_4=f(M_i)$ на шляху тертя $\Delta S_4=200...300$ км: інтенсивність зношування композиту лінійно залежить, в першу чергу, від інваріантних комбінацій M_2, M_3 , що пов'язані з моментами СЩ другого порядку шорсткої поверхні на початковий момент шляху тертя $S=300$ км [ступінь лінійності кореляційного зв'язку $I_5=f(M_2, M_3)$ становить $\xi_1=1,264-1,291$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,986-2,226$ за t_T ; $\xi_1=1,639-1,756$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$], а потім лінійно залежить від інваріантної комбінації M_1 , що пов'язана з моментом нульового порядку – висотою нерівностей шорсткої поверхні на початку тертя $S=300$ км [ступінь лінійності кореляційного зв'язку $I_5=f(M_1)$ становить $\xi_1=1,060$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,132$ за t_T ; $\xi_1=1,107$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$]. При цьому I_5 нелінійно залежить від інваріантних комбінацій M_4, M_5, M_6, M_7 , які пов'язані з моментами СЩ четвертого порядку шорсткої поверхні на момент шляху тертя $S=300$ км – кривиною поверхні [ступінь нелінійності кореляційного зв'язку $I_5=f(M_4, M_5, M_6, M_7)$ становить $\xi_2=1,109-1,359$ за $r_{кр}$; $\xi_2=1,209-1,641$ за t_T ; $\xi_2=1,164-1,521$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$].

При оцінці (табл. 2) щільності кореляційних зв'язків між інтенсивністю зношування композиту (I_j) та частинними параметрами широкосмугаєстості спектрів (α_i) анізотропної поверхні контртіла, які пов'язані з інваріантними комбінаціями (M_i), знайдено, що для I_j лише з $\alpha_1=f(M_1, M_2, M_4)$, $\alpha_2=f(M_1, M_5, M_6)$, $\alpha_4=f(M_1, M_2, M_7)$, $\alpha_5=f(M_1, M_3, M_4)$, $\alpha_6=f(M_1, M_3, M_5)$, $\alpha_8=f(M_1, M_3, M_7)$ вихідної поверхні на шляху тертя $\Delta S_1=0...50$ км та з $\alpha_6=f(M_1, M_3, M_5)$ вихідної поверхні на шляху тертя $\Delta S_2=200...300$ км існує надійний лінійний зв'язок зі ступенем лінійності $\xi_1=1,001-1,295$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,001-2,272$ за t_T ; $\xi_1=1,006-1,778$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$. Для решти випадків – кореляційні зв'язки нелінійні зі ступенями нелінійності $\xi_2=1,022-1,566$ за $r_{кр}$; $\xi_2=1,044-1,975$ за t_T ; $\xi_2=1,030-1,802$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$.

Створення узагальненого параметра широкосмугаєстості α на основі частинних параметрів широкосмугаєстості спектру анізотропної поверхні за середніми величинами, дозволяє дати оцінку сили кореляційних зв'язків $I_j = f(\alpha)$, провівши розрахунки коефіцієнтів кореляцій для залежностей $I_j = f(\alpha_k)$, де k відноситься до кубічної (Q), квадратичної (q), арифметичної (a), геометричної (g) та гармонійної (h) середньої α [необхідність розрахунку α для k-середніх обґрунтовано неповною розкритою природою та механізмом процесу зношування на анізотропній поверхні під час використання одного (узагальненого) параметра широкосмугаєстості спектру)].

Як видно з табл. 2, спостерігається лінійна залежність $I_j=f(\alpha_k)$ (для всіх k) лише для початкового шляху тертя $\Delta S_j=0...50$ км зі ступенями лінійності $\xi_1=1,068-1,096$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,150-1,225$ за t_T ; $\xi_1=1,122-1,176$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$. Для решти шляхів тертя та всіх k спостерігається нелінійна кореляція для залежностей $I_j=f(\alpha_k)$ зі ступенями нелінійності $\xi_2=1,149-1,376$ за $r_{кр}$; $\xi_2=1,281-1,669$ за t_T ; $\xi_2=1,222-1,545$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$.

Висновки

1. Уперше для анізотропних шорстких поверхонь введено у науковий обіг означення 8-ми частинних параметрів та узагальнений параметр широкосмугаєстості спектру, який побудований на частинних параметрах широкосмугаєстості спектральної щільності (СЩ), які, у свою чергу, пов'язані з інваріантами моментів СЩ, або на частинних функціях бажаності, пов'язаних параметрами широкосмугаєстості спектру.

2. Уперше для анізотропних шорстких поверхонь у науковий обіг введені означення, створених за принципом аналогії, комбінацій коефіцієнтів кореляцій, завдяки яким виявлена сила зв'язків інваріантів спектральних моментів СЩ, частинних та узагальнених параметрів широкосмугаєстості СЩ з питомою інтенсивністю об'ємного зношування.

3. Питома інтенсивність об'ємного зношування карбопластика на основі ПТФЕ та карбонізованих волокон під час динамічного контакту з поверхнею контртіла сталі 45 залежить від вихідних моментів СЩ нульового, другого та четвертого порядків по-

верхні контртіла у більшій степені на початку шляху тертя та зношування $\Delta S=0\dots 50$ км, ніж $\Delta S=300-400$ км під час випробувань у вологому повітрі в режимі поміркованих питомих навантажень, тобто топографія поверхні спряженого металу є домінуючим чинником у визначенні величини зносу карбопластиків не тільки на початку тертя (тобто пов'язане з параметрами вихідної поверхні), але і в процесі тертя та зношування, коли шорстка спряжена поверхня створюється самим композитом.

4. Встановлено, що на початку динамічного контакту (шлях тертя $S=0\dots 50$ км) інваріантні комбінації моментів спектральної щільності шорсткої поверхні металевого контртіла, що зв'язані з нульовим моментом (з висотним параметром), у більшій степені лінійно впливають на інтенсивність зношування карбопластика, ніж інваріантні комбінації, що пов'язані із спектральними моментами другого порядку

(градієнтом поверхні), а вплив інваріантних комбінацій, що пов'язані з моментами четвертого порядку, впливають нелінійно; під час подальшого динамічного контакту ($S=200-300$ км) цей вплив аналогічний, лише різниця полягає у тому, що лідером стають інваріанти, що пов'язані з градієнтом поверхні (лінійно), потім з висотою нерівностей (лінійно) і потім нелінійно із кривиною у вершині мікронерівностей; під час більш довгого динамічного контакту $S>300$ км лідером стають інваріанти, що пов'язані з кривиною (лінійно), потім градієнтом поверхні (нелінійно) та значно менше – з висотою мікронерівностей (нелінійно).

Сіренко Г.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії;

Солтис Л.М. – кандидат хімічних наук, викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії...

- [1] Ju.V. Ashkerov, Ju.V. Zaikin, A.Ju. Paplev, *Trenie i iznos* 5(1), 651 (1984).
- [2] N.V. Balabanova, S.A. Chizhik, Z. Rimuza, *Trenie i iznos* 27(5), 514 (2006).
- [3] N.K. Bachinskaja, *Issledovanija kontaktnyh karakteristik sherohovatyh, sil'no anizotropnyh poverhnoстей*: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.04 (Hmel'nickij, 1994).
- [4] A. Bengtsson, A. Renberg, *Trenie i iznos* 7 (1), 27 (1986).
- [5] Je.A. Bulanov, *Trenie i iznos*, 27 (2), 132 (2006).
- [6] A.I. Burja, A.D. Derkach, V.I. Shemavnev, *Trenie i iznos*, 27 (1), 98 (2006).
- [7] V.A. Valetov, *Trudy LKI «Tehnologija korpusostroenija, sudovogo mashinostroenija i svarki v sudostroenii»* (Leningrad), 19 (1978).
- [8] N.B. Demkin, *Trenie i iznos*, 3 (4), 586 (1982).
- [9] N.B. Demkin, S.V. Udalov, V.A. Alekseev, V.V. Izmajlov, A.N. Bolotov, *Trenie i iznos*, 29 (3), 231 (2008).
- [10] M.N. Dobychin, *Trenie i iznos*, 1 (2), 341 (1980).
- [11] I.V. Kragel's'kij, V.V. Aleksin, V.S. Kolebanov i dr., *Harakteristiki vzaimodejstvija v mikrogeometrii, opredelajushhie kontaktnoe vzaimodejstvie sherohovatyh poverhnoстей* (IMASH, Moskva, 1973).
- [12] I.V. Kragel's'kij, *Trenie i iznos*, 1 (1), 12 (1980).
- [13] I.I. Kudish, *Trenie i iznos*, 12 (2), 197 (1991).
- [14] V.B. Lemberskij, *Trenie i iznos*, 4 (2), 301 (1983).
- [15] N.K. Myshkin, M.I. Petrokovec, S.A. Chizhik, V.V. Konchic, A.I. Sviridenok, *Trenie i iznos*, 4 (5), 845 (1983).
- [16] L.Ju. Pruzhanskij, *Trenie i iznos*, 4 (5), 801 (1983).
- [17] A.I. Sviridenok, T.F. Kalmykova, *Trenie i iznos*, 1 (5), 898 (1980).
- [18] I.O. Sivak, V.V. Savuljak, S.I. Suhorukov, E.I. Sivak, *The Bulletin of Politechnic Institute of Jassi*. XLVIII (LII), 3-4, 165 (2002).
- [19] G.A. Sirenko, N.F. Semenjuk, *3 Vsesoju. soveshhanija po uplotnitel'noj tehnike* (VNIİkompres-sormash, Sumy, 1982), s. 46.
- [20] V.T. Fonotov, I.A. Vjatkin, Ju.V. Volkov, *Problemy trenija i iznashivaniya*, (4), 66 (1973).
- [21] Ja. Cuan, S.A. Chizhik, Ju.M. Pleskachevskij, A.L. Zajcev, *Trenie i iznos*, 28 (1), 77 (2007).
- [22] I.H. Chepoveckij, V.I. Levitas, S.A. Jushhenko, *Trenie i iznos*, 7 (5), 841 (1986).
- [23] I.H. Chepoveckij, V.L. Strizhakov, *Trenie i iznos*, 2 (5), 928 (1981).
- [24] A.A. Chernov, *BSJe*, (13), 435 (1973).
- [25] V.M. Shavelin, A.S. Shheglov, *Trenie i iznos*, 7 (1), 148 (1986).
- [26] I.B. Shenderov, A.S. Duhanin, V.A. Kalinov, *Trenie i iznos*, 10 (2), 313 (1989).
- [27] V.G. Shherbinskij, *Trenie i iznos*, 12 (6), 1133 (1991).
- [28] M.O. Jakobson, *Kachestvo poverhnosti detalej mashin*, (5), 120 (1961).
- [29] V.M. Baranov, E.M. Kudryavstev, G.A. Sarychev, A.Z. Stopyra, *Friction and wear*, 24 (2), 139 (2002).
- [30] A.Ya. Grigoriev, K.-L. Cho, N.K. Myshkin, *Friction and wear*, 22 (2), 128 (2000).
- [31] V.S. Kharchenkov, V.A. Pogonyshv, V.I. Lemeshko, *Friction and wear*, 21 (1), 91 (1999).
- [32] A.A. Khmyl, A.P. Dostanko, V.G. Anisimovich, S.A. Chizhik, *Friction and wear*, 18 (4), 491 (1996).
- [33] V.M. Khokhlov, *Friction and wear* 19(3), 415 (1997).

- [34] T.R. Thomas, *Wear* 79(1), 73 (1982).
- [35] T.R. Thomas, *Wear* 33(2), 205 (1975).
- [36] V.P. Tikhomirov, O.A. Gorlenko, *Friction and wear* 18(1), 74 (1996).
- [37] A.I. Voyachek, *Friction and wear* 18(3), 307 (1996).
- [38] D.J. Whitehouse, J.F. Archard, *Proceedings of the Royal Soc.* 316(A), 97 (1970).
- [39] D.J. Whitehouse, J.F. Archard, *Surface Mechanics, Proceedings of the ASME Annual winter meeting, Los Angeles, Calif, November 16 (1969).*
- [40] A.A. Yevtushenko, E.G. Ivanik, E.V. Kovalenko, *Friction and wear* 20(1), 17 (1998).
- [41] I.A. Zharov, *Friction and wear* 18(6), 715 (1996).
- [42] N.F. Semenjuk, N.K. Bachinskaja, *Problemy tribologii* (3), 103 (1998).
- [43] N.F. Semenjuk, *Trenie i iznos* 7(6), 1017 (1986).
- [44] N.F. Semenjuk, G.A. Sirenko, *Trenie i iznos* 1(3), 465 (1980).
- [45] N.F. Semenjuk, G.A. Sirenko, *Trenie i iznos* 1(5), 815 (1980).
- [46] M.F. Semenjuk, G.O. Sirenko, L.M. Soltis, *Fizika i himija tverdogo tila* 12(1), 200 (2011).
- [47] M.F. Semenjuk, G.O. Sirenko, L.M. Soltis, *Visnik Prikar. nac. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (IH)*, 62 (2010).
- [48] N.F. Semenjuk, K.S. Sokolan, *Problemy tribologii* 2 (2000).
- [49] N.F. Semenjuk, *Trenie i iznos* 7(5), 830 (1986).
- [50] N.F. Semenjuk, *Trenie i iznos* 7(1), 85 (1986).
- [51] N.F. Semenjuk, E.V. Terleckaja, *Problemy tribologii* (1), 83 (1998).
- [52] N.F. Semenjuk, E.V. Terleckaja, *Problemy tribologii* (1), 90 (1998).
- [53] G.O. Sirenko, O.V. Kuzishin, L.Ja. Midak, *Chetverta mizhnarodna naukovo-praktichna konferencija «Rozvitok naukovih doslidzen' 2008» (InterGrafika, Poltava, 2008)*, s. 38.
- [54] G.O. Sirenko, M.F. Semenjuk, *I Mizhnarod. simpozium "Fiziko-himichna mehanika kompozicijnih materialiv" (Ivano-Frankivs'k, 1993)*, s. 53.
- [55] G.O. Sirenko, M.F. Semenjuk, L.M. Soltis, *Visnik Prikar. nac. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (H)*, 123 (2010).
- [56] G.O. Sirenko, M.F. Semenjuk, L.M. Soltis, *Fizika i himija tverdogo tila* 11(4), 914 (2010).
- [57] G.O. Sirenko, M.F. Semenjuk, L.M. Soltis, *Fizika i himija tverdogo tila* 11(3), 768 (2010).
- [58] G.O. Sirenko, L.M. Soltis, *Fizika i himija tverdogo tila* 11(2), 423 (2010).
- [59] G.O. Sirenko, L.M. Soltis, *Visnik Prikar. nac. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (VII)*, 104 (2009).
- [60] A.P. Husu, Ju.R. Vittenberg, V.A. Pal'mov, *Sherohovatost' poverhnostej. Teoretiko-verojatnostnyj podhod (Nauka, Moskva, 1975).*
- [61] M.I. Jadrenko, *Spektral'naja teorija sluchajnyh polej (Vishha shk., Kiev, 1980).*
- [62] P.R. Najjak, *Problemy trenija i smazki* 93 (Ser. F, 3), 85 (1971).
- [63] I.Ja. Shtaerman, *Kontakt'naja zadacha teorii uprugosti (Gostehizdat, Moskva-Leningrad, 1949).*
- [64] M.G. Cooper, B.B. Mikis, M.M. Yovanovich, *International Journal of heat and mass transfer* 12, 279 (1969).
- [65] A.W. Bush, R.D. Gibson, G.P. Keogh, *Res. Comm. Mech.* 3, 169 (1976).
- [66] A.W. Bush, R.D. Gibson, T.R. Thomas, *Wear* 35, 87 (1976).
- [67] A.W. Bush, R.D. Gibson, G.P. Keogh, *Wear* 40, 399 (1976).
- [68] S.B. Ajnbinder, Je.L. Tjunina, *Vvedenie v teoriju trenija polimerov (Zinatne, Riga, 1978).*
- [69] S.B. Ajnbinder, Je.L. Tjunina, *Mehanika polimerov* (2), 241 (1977).
- [70] S.B. Ajnbinder, Je.L. Tjunina, *Mehanika polimerov* (4), 651 (1977).
- [71] G.O. Sirenko, L.M. Soltis, *Fizika i himija tverdogo tila* 14 (3), 636 (2013).
- [72] N.F. Semenjuk, T.F. Kalmykova, *Trenie i iznos* 4 (3), 467 (1983).
- [73] M.S. Longe-Higgins, *Statisticheskaja geometrija sluchajnyh poverhnostej (Mir, Moskva, 1964).*
- [74] G. Korn, T. Korn, *Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov: Opredelenija, teoremy, formuly. Izd. 4-e (Nauka, Moskva, 1978).*
- [75] G.O. Sirenko, *Stvorennja antifrikcijnih materialiv na osnovi poroshkiv termotrivkijh polimeriv ta vuglecevih volokon: Dis. ... dokt. tehn. nauk (In-t problem materialoznavstva im. I.M. Francevicha NANU, Kiïv, 1997).*
- [76] P. Mjuller, P. Nojman, R. Shtorm, *Tablicy po matematicheskoj statistike (Finansy i statistika, Moskva, 1982).*
- [77] M.N. Stepnov, *Statisticheskaja obrabotka rezul'tatov mehanicheskijh ispytanij (Mashinostroenie, Moskva, 1972).*

H.O. Sirenko, L.M. Soltys

Tribosurface Properties of Polymer Composite in Friction and Wear on Anisotropic Rough Surface of Steel 45

Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine, e-mail: orijant@gmail.com

Regularities of change of anisotropic roughness surfaces of steel 45 in friction and wear in a pair with polymer composite has been researched. It has been detected that the topography of the conjugated metal surface with polymer composite is the dominant factor in determining the value of wear of carbon-plastics at both the start and in the process friction and wear when the metal surface roughness is created by the composite. It has been established that the invariant combinations of zero-order moments in greater degree linearly influences on wear of the polymer sample than invariant combinations of second-order moments, and the wear nonlinearly depends from invariant combinations of fourth-order moments.

Keywords: roughness, intensity of wear, anisotropic surface, friction, composite polymer material, moments of spectral density, minorant rows.