

---

---

## ФІЗИКА ТА ХІМІЯ ПОВЕРХНІ

---

---

УДК 621.891+621.89+621.567; 539.62

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис

### Властивості полімерного композиту під час тертя та зношування по ізотропній та анізотропній шорсткій поверхні твердого тіла

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна*

Досліджено закономірності зміни ізотропної та 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, ізотропна поверхня, анізотропна поверхня, тертя, композиційний полімерний матеріал, моменти спектральної щільності, мінорантний ряд.

H.O. Sirenko, L.M. Soltys

### Properties of Polymer Composite in Friction and Wear on Isotropic and Anisotropic Rough Surface of Solid State

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,  
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine*

Regularities of change of isotropic and 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.

**Key words:** roughness, intensity of wear, isotropic surface, anisotropic surface, friction, composite polymer material, moments of spectral density, minorant rows.

*Стаття постуила до редакції 19.11.2014; прийнята до друку 15.12.2014.*

#### Вступ

У роботах [1-41] проаналізовані параметри математичного опису шорстких поверхонь та методи їх досліджень. Так, у роботах [42-59, 83] 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 мікросорсткої 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 площина, 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  $\bar{k}$ , модуль якого дорівнює  $|\bar{k}| = 2\pi/\lambda$  з довжиною хвилі  $\lambda$ .

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]:

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

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  $\sigma^2$  – дисперсія, а  $\sigma$  – середнє квадратичне (стандартне) відхилення висоти нерівностей [62, 72]. Тому з (3) витікає [62, 72]:

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

Вираз (4) відбиває те, що функція  $\Phi(k_x, k_y)$  визначає той внесок у величину дисперсії  $\sigma^2$ , який додає різні спектральні компоненти, що відповідають хвилям з хвильовим числом  $k$  і довжинами [105]:  $\lambda = 2\pi/|\bar{k}|$  та напрямками [62]:  $\theta = \arctg(k_y/k_x)$ . Для ізотропних поверхонь функція  $\Phi$  залежить тільки від змінної  $k \equiv |\bar{k}|$ . 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  $\text{Re}$  – 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  $\varepsilon'_1 = z/m_{00} = z/\sigma$  – безрозмірної (нормованої) висоти:

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

де  $A_1 = -\frac{m_{22}(\Delta_6 + 2\Delta_8 + \Delta_{11})}{2\Delta_{12}}$ ;  $A_2 = -\frac{m_{22}(\Delta_6 - \Delta_{11})}{\Delta_{12}}$ ;  $A_3 = \frac{m_{22}(\Delta_7 + \Delta_{10})}{\Delta_{12}}$ ;

$$A_4 = -\frac{m_{22}(\Delta_6 - 2\Delta_8 + \Delta_{11})}{2\Delta_{12}}; \quad A_5 = \frac{m_{22}(\Delta_7 - \Delta_{10})}{\Delta_{12}}; \quad A_6 = -\frac{\Delta_9 m_{22}}{2\Delta_{12}}; \quad A_7 = \frac{(\Delta_3 + \Delta_5)(m_{00} m_{22})^{1/2}}{\Delta_{12}};$$

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

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

**1.4. 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:**

$$m_{00} = m_0; \quad m_{20} = m_{02} = m_2; \quad m_{11} = m_{13} = m_{31} = 0; \quad 3m_{22} = m_{40} = m_{04} = m_4. \quad (7)$$

Звідки за (6) щільність ймовірностей розподілу висот вершин ізотропної поверхні [44, 57, 62]:

$$p_{sum}(\varepsilon'_1) = \frac{\sqrt{3}C_1}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{C_1} - 2 \right) J_0 + \varepsilon'_1 \sqrt{\frac{3}{\alpha}} J_1 + 2J_2 \right] = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left\{ \exp[-C_1(\varepsilon'_1)^2] \sqrt{\frac{3(2\alpha-3)}{\alpha^2}} \varepsilon'_1 + \right. \\ \left. + \exp\left[-\frac{(\varepsilon'_1)^2}{2}\right] (1 + \operatorname{erf}\beta) \frac{3\sqrt{2\pi}}{2\alpha} [(\varepsilon'_1)^2 - 1] + \sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{\alpha(\varepsilon'_1)^2}{2(\alpha-1)}\right] (1 + \operatorname{erf}\gamma) \sqrt{\frac{\alpha}{3(\alpha-1)}} \right\}, \quad (8)$$

де  $\beta = \varepsilon'_1 \sqrt{\frac{3}{2(2\alpha-3)}}$ ;  $\gamma = \varepsilon'_1 \sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha-1)(2\alpha-3)}}$ ;

$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$  – інтеграл ймовірностей похибок [74];

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = \frac{\alpha}{2\alpha-3}; \quad C_2 = C_1 \sqrt{\frac{12}{\alpha}}; \\ \alpha = \frac{m_0 m_4}{m_2^2} - \text{параметр широкосмугастості спектру шорсткої ізотропної випадкової поверхні;} \end{array} \right.$$

$1,5 \leq \alpha < \infty$ . Фізичний смисл параметра  $\alpha$  пов'язаний з характеристичною шириною СЩ-поверхні: широкий спектр містить значний діапазон довжин хвиль (характеристична ширина зростає:  $\alpha \rightarrow \infty$ ), а вузький спектр – всі хвилі мають приблизно однакову довжину (характеристична ширина зменшується:  $\alpha \rightarrow 1,5$ ).

За [62] для опису ізотропних шорстких поверхонь необхідно використати три спектральні моменти ( $m_0, m_2$  і  $m_4$ ) і один параметр широкосмугастості спектру  $\alpha = (m_0 m_4) / m_2^2$ , який не залежить від орієнтації системи координат на поверхні та змінюється в межах:  $1,5 \leq \alpha < +\infty$ . Для граничних значень  $\alpha$  щільність ймовірностей розподілу висот вершин ізотропної поверхні дорівнює [62]:

- при  $\alpha \rightarrow 1,5$  ( $\beta \rightarrow \infty$ ;  $\gamma \rightarrow \infty$ ;  $C_1 \rightarrow \infty$ ):

$$p(\varepsilon'_1) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\varepsilon'_1)^2}{2}\right] \left\{ (\varepsilon'_1)^2 - 1 + \exp[-(\varepsilon'_1)^2] \right\}, \quad \varepsilon'_1 \geq 0 \\ 0, \quad \varepsilon'_1 < 0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

тобто розподіл (8) близький до релеєвського розподілу;

- при  $\alpha \rightarrow \infty$  ( $\beta \rightarrow 0$ ;  $\gamma \rightarrow 0$ ;  $C_1 \rightarrow 1/2$ ):

$$p(\varepsilon'_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\varepsilon'_1)^2}{2}\right], \quad (10)$$

тобто розподіл (8) підпорядкований гауссовському розподілу.

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

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

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

$$p(\varepsilon_1) = \sqrt{(2\pi\sigma^2)} \exp\left(-\frac{\varepsilon_1^2}{2\sigma^2}\right). \quad (11)$$

**1.5. Функція розподілу висот вершин анізотропної та ізотропної шорсткої поверхні [62], яка визначає частку тих вершин, у яких величини висот не перевищують значення  $\varepsilon'_1$ :**

$$f(\varepsilon'_1) = \int_{-\infty}^{\varepsilon'_1} p(\varepsilon'_1) d\varepsilon'_1, \quad (12)$$

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

**1.6. Середня кривина шорсткої поверхні у вершині виступів висотою  $\varepsilon'_1$ .**

**1.6.1. Анізотропна поверхня [44, 56]:**

$$\begin{aligned} EK_{sum}(\varepsilon'_1) = & -m_{22}^{1/2} \left\{ \left[ \frac{m_{00}^{1/2} m_{22}^{5/2}}{4D\pi^3 \Delta^{1/2}} \exp \left[ -\frac{\Delta_2 m_{00}}{2\Delta_{12}} (\varepsilon'_1)^2 \right] \int_{-\infty}^0 t \exp(A_1 t^2 + A_7 \varepsilon'_1 t) dt \times \right. \right. \\ & \times \int_0^{-t} (t^2 - \rho^2) \rho d\rho \int_0^{2\pi} \exp[A_4 \rho^2 \cos^2 \varphi + A_5 \rho^2 \cos \varphi \cdot \sin \varphi + A_6 \rho^2 \sin^2 \varphi + \\ & \left. \left. + (A_2 t + A_8 \varepsilon'_1) \rho \cos \varphi + (A_3 t + A_9 \varepsilon'_1) \rho \sin \varphi \right] d\varphi \right\} / \left( \frac{1}{4} D^{-1} \pi^{-3} \Delta^{-1/2} m_{00}^{1/2} m_{22}^{5/2} \times \right. \\ & \times \exp \left[ -\frac{\Delta_2 m_{00}}{2\Delta_{12}} (\varepsilon'_1)^2 \right] \int_{-\infty}^0 \exp(A_1 t^2 + A_7 \varepsilon'_1 t) dt \int_0^{-t} (t^2 - \rho^2) \rho d\rho \int_0^{2\pi} \exp[A_4 \rho^2 \cos^2 \varphi + \\ & \left. \left. + A_5 \rho^2 \cos \varphi \sin \varphi + A_6 \rho^2 \sin^2 \varphi + (A_2 t + A_8 \varepsilon'_1) \rho \cos \varphi + (A_3 t + A_9 \varepsilon'_1) \rho \sin \varphi \right] d\varphi \right\}, \end{aligned} \quad (13)$$

де E – позначення математичного сподівання.

**1.6.2. Ізотропна поверхня [62]:**

$$EK_{sum}(\varepsilon'_1) = \sqrt{\frac{m_4}{3}} \cdot \frac{J_3(\varepsilon'_1) - 2J_1(\varepsilon'_1) + 2J_5(\varepsilon'_1)}{J_2(\varepsilon'_1) - 2J_0(\varepsilon'_1) + 2J_4(\varepsilon'_1)}, \quad (14)$$

де  $J_0, \dots, J_5$  – функції параметрів  $\varepsilon'_1$  і  $\alpha$  [62]:

$$J_0 = \sqrt{\frac{\pi}{2C_1}} \exp \left[ -\frac{(\varepsilon'_1)^2}{2} \right] (1 + erf\beta);$$

$$J_1 = \frac{1}{C_1} \left\{ \exp[-C_1(\varepsilon'_1)^2] + \beta \sqrt{\pi} \exp \left[ -\frac{(\varepsilon'_1)^2}{2} \right] (1 + erf\beta) \right\};$$

$$J_2 = \sqrt{\frac{2}{C_1^3}} \left\{ \beta \exp[-C_1(\varepsilon'_1)^2] + \sqrt{\pi} \exp \left[ -\frac{(\varepsilon'_1)^2}{2} \right] (1 + erf\beta) (\beta^2 + 1/2) \right\};$$

$$J_3 = \frac{2}{C_1^2} \left\{ \exp[-C_1(\varepsilon'_1)^2] (1 + \beta^2) + \sqrt{\pi} \exp \left[ -\frac{(\varepsilon'_1)^2}{2} \right] (1 + erf\beta) (\beta^3 + 3\beta/2) \right\};$$

$$J_4 = \sqrt{\frac{\pi}{2(1+C_1)}} \exp \left[ -\frac{\alpha(\varepsilon'_1)^2}{2(\alpha-1)} \right] (1 + erf\gamma);$$

$$J_5 = \frac{1}{C_1+1} \left\{ \exp[-C_1(\varepsilon'_1)^2] + \gamma \sqrt{\pi} (1 + erf\gamma) \exp \left[ -\frac{\alpha(\varepsilon'_1)^2}{2(\alpha-1)} \right] \right\}.$$

Цей же результат за [44, 56]:

$$E\bar{K}_{sum}(\varepsilon'_1) = \sqrt{\frac{m_4}{3}} \left[ \frac{\frac{\varepsilon'_1}{C_1} \sqrt{\frac{3}{\alpha}} J_0 + \left( \frac{2}{C_1} + \frac{3(\varepsilon'_1)^2}{\alpha} - 2 \right) J_1 + 2J_3}{\left( \frac{1}{C_1} - 2 \right) J_0 + \varepsilon'_1 \sqrt{\frac{3}{\alpha}} J_1 + 2J_2} \right]. \quad (15)$$

Граничні залежності для  $\bar{K}_{sum}(\varepsilon'_1)$  [62]:

- при  $\alpha \rightarrow 1,5$   $\bar{K}_{sum}(\varepsilon'_1) = \varepsilon'_1 \sqrt{\frac{2}{3}} m_4, \quad \varepsilon'_1 \geq 0$   
 $0, \quad \varepsilon'_1 < 0$
- при  $\alpha \rightarrow \infty$   $\bar{K}_{sum}(\varepsilon'_1) = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{m_4}{\pi}}$ .

**1.7. Градієнт випадкової шорсткої поверхні** визначається за [44, 46, 62, 73].

**1.7.1. Анізотропна поверхня:**

$$Eq_{sum} = \sqrt[4]{\frac{4\Delta_1}{\pi^2}} \exp\left(\frac{\eta_1}{2}\right) E_1\left(\sqrt{1 - \exp(-2\eta_1)}\right), \quad (16)$$

де зворотній гіперболічний косинус [74]:

$$\eta_1 = Arch \frac{M_2}{2\sqrt{\Delta_1}}, \quad (17)$$

де  $\frac{M_2}{2\sqrt{\Delta_1}} \geq 1$ ;  $E_1(x)$  – повний еліптичний інтеграл Лежандра 2-го роду.

**1.7.2. Для ізотропної поверхні** [44]  $\Delta_1 = m_2^2$ ;  $M_2 = 2m_2$ ;  $\eta_1 = 0$ , тоді вираз (16) набуде вигляду [44, 46, 62]:

$$Eq_{sum} = \sqrt{\frac{\pi m_2}{2}}. \quad (18)$$

**1.8. За [62] для опису ізотропних шорстких поверхонь** достатньо використати три спектральні моменти ( $m_0$ ,  $m_2$  і  $m_4$ ) і один параметр широкосмугастості спектра  $\alpha = (m_0 m_4) / m_2^2$ , який не залежить від орієнтації системи координат на поверхні. Лонге-Гігінс [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:  $M_0 = m_{00}$ ; (19)

- другого порядку  $\begin{cases} M_2 = (m_{02} + m_{20}); \\ M_3 = (m_{20} m_{02} - m_{11}^2); \end{cases}$  (20)  
(21)

- четвертого порядку  $M_4 = (m_{40} + 2m_{22} + m_{04});$  (22)

- четвертого порядку  $M_5 = (m_{40} m_{04} - 4m_{13} m_{31} + 3m_{22}^2);$  (23)

- четвертого порядку  $M_6 = (m_{40} + m_{22})(m_{22} + m_{04}) - (m_{31} + m_{13})^2;$  (24)

- четвертого порядку  $M_7 = m_{40}(m_{22} m_{04} - m_{13}^2) - m_{31}(m_{31} m_{04} - m_{13} m_{22}) + m_{22}(m_{31} m_{13} - m_{22}^2).$  (25)

**1.9. Введемо в науковий обіг 8 параметрів широкосмугастості спектру анізотропної поверхні:**

$$\alpha_1 = \frac{M_0 M_4}{M_2^2} = \frac{m_{00}(m_{40} + 2m_{22} + m_{04})}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (26)$$

$$\alpha_2 = \frac{M_0 M_5}{M_2^2} = \frac{m_{00}(m_{40} m_{04} - 4m_{13} m_{31} + 3m_{22}^2)}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (27)$$

$$\alpha_3 = \frac{M_0 M_6}{M_2^2} = \frac{m_{00}[(m_{40} + m_{22})(m_{22} + m_{04}) - (m_{31} + m_{13})^2]}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (28)$$

$$\alpha_4 = \frac{M_0 M_7}{M_2^2} = \frac{m_{00} [m_{40} (m_{22} m_{04} - m_{13}^2) - m_{31} (m_{31} m_{04} - m_{13} m_{22}) + m_{22} (m_{31} m_{13} - m_{22}^2)]}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (29)$$

$$\alpha_5 = \frac{M_0 M_4}{M_3^2} = \frac{m_{00} (m_{40} + 2m_{22} + m_{04})}{(m_{20} m_{02} - m_{11}^2)}; \quad (30)$$

$$\alpha_6 = \frac{M_0 M_5}{M_3^2} = \frac{m_{00} (m_{40} m_{04} - 4m_{13} m_{31} + 3m_{22}^2)}{(m_{20} m_{02} - m_{11}^2)}; \quad (31)$$

$$\alpha_7 = \frac{M_0 M_6}{M_3^2} = \frac{m_{00} [(m_{40} + m_{22})(m_{22} + m_{04}) - (m_{31} + m_{13})^2]}{(m_{20} m_{02} - m_{11}^2)}; \quad (32)$$

$$\alpha_8 = \frac{M_0 M_7}{M_3^2} = \frac{m_{00} [m_{40} (m_{22} m_{04} - m_{13}^2) - m_{31} (m_{31} m_{04} - m_{13} m_{22}) + m_{22} (m_{31} m_{13} - m_{22}^2)]}{(m_{20} m_{02} - m_{11}^2)}. \quad (33)$$

**1.10. Введемо у науковий обіг узагальнений параметр широкосмугастості** ( $\alpha_k$ , 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 
$$\alpha_Q = \sqrt[3]{\left(\sum_{i=1}^{n=8} \alpha_i^3\right)} / n; \quad (34)$$

- середню квадратичну 
$$\alpha_q = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n=8} \alpha_i^2\right)} / n; \quad (35)$$

- середню арифметичну 
$$\alpha_a = \left(\sum_{i=1}^{n=8} \alpha_i\right) / n; \quad (36)$$

- середню геометричну 
$$\alpha_g = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n=8} \alpha_i}, \quad (37)$$

де  $D$  – позначення добутку;

- середню гармонійну 
$$\alpha_h = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^{n=8} \left(\frac{1}{\alpha_i}\right)\right]} / n = n \cdot \left[\sum_{i=1}^{n=8} \left(\frac{1}{\alpha_i}\right)\right]^{-1}, \quad (38)$$

між якими існує співвідношення мінорантного ряду:

$$\alpha_Q > \alpha_q > \alpha_a > \alpha_g > \alpha_h. \quad (39)$$

**1.11. 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

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

## II. Експериментальна частина

### 2.1. Матеріали досліджень.

Досліджували зносостійкість композиційних матеріалів – карбопластиків графелон-20 і флубон-15(20) [75-77] на основі:

1. Ароматичного поліаміду (АП) [78], наповненого вуглецевими волокнами УТ-4, УТМ-8, ТГН-2м, ТМП-3 (Пк: 12% піровуглецю), ТКК-1 (Пк: 0,2-3,0% SiC), ТКЦ-1 (Пк: 0,8-4,0% ZrC), ТГН-Т850, ТГН-Т1200, ТГН-Т1350, ТГН-Т1600, ТГН-Т2000, ТГН-Т2300, ТГН-Т2400, «Мтілон», «ГПП», ЛУ-2, ВМН-4, ВМН-4Ф (Пк: 10% F), DEA, «Евлан», «Сатурн» під час тертя та зношування графелону-20 по сталі 45.

У композитний матеріал вводили вуглецеві волокна: з температурою кінцевої термообробки  $T_k = 723, 1123, 1473, 1623, 1823, 2073, 2273, 2573, 2673, 2873$  К; частково карбонізовані (УТ-4), карбонізовані (УТМ-8, ТГН-Т850, ТГН-Т1200, ТГН-Т1350, ТГН-Т1600); на основі гідратцелюлози (ГЦ), поліакрилонітрилу (ПАН) та кополімеру ГЦ+ПАН; без та з покриттями (ПК) графітованого волокна ТГН-2м: 12% піровуглецю (ТМП-3); 0,2-3,0% SiC (ТКК-1) або 0,8-4% ZrC (ТКЦ-1) та властивостями: низькомодульні низькоміцні (НМ-НТ); низькомодульні (LM); високомодульні (НМ), середньої (МТ) або високої міцності (НТ) та високомодульні

високоміцні (НМ-НТ) тощо.

2. Політетрафторетилену (ПТФЕ) [79], наповненого 20% карбонізованого низькомодульного (LM) вуглецевого волокна УТМ-8, отриманого з гідратцелюлозного волокна (при термообробці за температури 1123 К в середовищі  $\text{CH}_4$  в присутності антипіренів  $\text{Na}_2\text{V}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  та  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ) під час тертя та зношування без мащення флубону-15(20) по сталі 45.

## 2.2. Методи випробування.

**1. Тертя та зношування даних матеріалів** без мащення вивчали на трибометрі ХТІ-72М за схемою [I-1] [77], де I – вид контакту, 1 – форма зразка: торець пальчика діаметром  $10 \pm 0,05$  мм і висотою  $15 \pm 0,1$  мм ковзав по площині металевого контртіла; контртіло було виконано порожнистим діаметром  $60 \pm 0,15$  мм, висотою  $35 \pm 0,2$  мм, товщиною робочої частини поверхні тертя  $5 \pm 0,2$  мм або у вигляді диску діаметром  $60 \pm 0,1$  мм і висотою  $(10-15) \pm 0,1$  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 НВ  $4,5 \pm 0,2$  ГПа, з вихідним середнім арифметичним відхиленням профілю поверхні [71]:  $Ra_0 = 0,085$  мкм (дослід №70);  $Ra_0 = 0,22$  мкм (дослід №72);  $Ra_0 = 0,49$  мкм (дослід №73);  $Ra_0 = 0,85$  мкм (дослід №74);  $Ra_0 = 1,42$  мкм (дослід №75); питоме навантаження на 3 зразки складало  $p = 3$  МПа (нормальне навантаження на 1 зразок  $N_i = 235,62$ Н); швидкість ковзання  $v = 1,1$  м/с; температура поверхні сталі  $T = 373 \pm 1$  К, яка була визначена термпарою ХК на відстані  $1 \pm 0,05$  мм від поверхні тертя контртіла, а величини (в mV) записувались на стрічку потенціометра КСП-4, шлях тертя складав  $S \leq 1000-3200$  км (сумарний час тертя  $\tau = 253-808$  год.) із заміром величини зносу через 50-200 км ( $\tau_i = 12,6-50,4$  год.).

**2. Зміни шорсткості ізотропних поверхонь** сталевого контртіла та спряженого з ним карбопластика графелон-20 на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 вивчали після 150 км тертя та зношування без мащення за температури поверхні сталі 45 (НВ  $4,52 \pm 0,14$  ГПа, вихідна шорсткість  $Ra_0 = 0,2151 \pm 0,0252$  мкм)  $T = 423 \pm 2$  К. Швидкість ковзання 3-х циліндричних зразків діаметром 10 мм плоскими торцями по поверхні сталі 45 становила  $v = 1,1$  м/с, питоме навантаження –  $p = 3$  МПа, нормальне навантаження на 1 зразок –  $N_i = 235,6$  Н, коефіцієнт взаємного перекриття поверхонь 3-х зразків та контртіла дорівнювало  $\text{КВП} = 0,21$ . Зразки попередньо припрацьовували (10 км) по сталі 45 ( $Ra_0 = 0,05 \pm 0,01$  мкм) за питомим навантаженням  $p = 0,5$  МПа та температурою  $323 \pm 1$  К, тому отримували високу рівну (дзеркального вигляду) поверхню ( $Ra_0 = 0,0355 \pm 0,0052$  мкм) перед основними випробуваннями.

**3. Зміни шорсткості ізотропних поверхонь** сталевого контртіла та спряженого з ним карбопластика флубон-15(20) на основі ПТФЕ вивчали під час тертя та зношування без мащення по сталі 45 (НВ  $4,50 \pm 0,12$  ГПа) з вихідною шорсткістю поверхні  $Ra_0 = 0,085; 0,22; 0,49; 0,85; 1,42$  мкм. Шорсткість поверхонь сталі 45 і полімерного зразка вимірювали через 0; 50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 1000 км шляху тертя, температура поверхні сталі  $373 \pm 1$  К. Швидкість ковзання 3-х циліндричних зразків діаметром 10 мм плоскими торцями по поверхні сталі 45 становила  $v = 1,1$  м/с, питоме навантаження –  $p = 3$  МПа, нормальне навантаження на 1 зразок –  $N_i = 235,6$  Н, коефіцієнт взаємного перекриття поверхонь 3-х зразків та контртіла дорівнювало  $\text{КВП} = 0,21$ .

## 4. Методика експериментального дослідження шорсткої поверхні тертя.

Математичний опис анізотропної та ізотропної шорсткої поверхні на основі теорії випадкового поля приведений у [44-46, 56-59, 62, 73, 81, 83, 85-87].

Знаходили статистичні характеристики поверхні тертя за відповідними параметрами профілограм за методом [19, 55, 62]. Для цього знімали п'ять профілограм поверхні, виміряних у непаралельних довільних напрямках. Для розрахунків на ЕОМ підготовлених даних використовували методику [19, 62].

### I. Вибірковий аналіз випадкових ізотропних поверхонь.

За Лонге-Гігінсом [84]:

1) розраховували щільність нулів  $D_{zero, \theta}$  – число перетинів профілограми зі середньою арифметичною лінією, що припадає на одиницю довжини профілограми, та екстремумів (максимумів + мінімумів профілограми шорсткої випадкової поверхні), за формулами [84]:

$$D_{zero, \theta} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}; \quad (40)$$

$$D_{extr, \theta} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}; \quad (41)$$

де індекс « $\theta$ » вказує, що статистична характеристика відноситься до профілограми, а не означає анізотропію (за профілограмою розраховують за МНК середнє квадратичне відхилення точок профілограми від середньої лінії  $\sigma = \sqrt{m_0} = Rq = Ra \sqrt{\pi/2}$ , коли профілограму записують на приладі профілометра-профілографа моделі ВЭИ «Калибр» та безпосередньо зчитують значення  $Ra$  на моделі «252»).

2) після цього визначали  $m_2$  за (40) та  $m_4$  за (41), підрахувавши кількість «нулів» та «екстремумів» на одиницю базової довжини профілограми [62, 84]:

$$m_2 = \pi^2 \sigma^2 (D_{zero, \theta})^2 = \pi^2 m_0 (D_{zero, \theta})^2; \quad (42)$$

$$m_4 = \pi^4 \sigma^2 (D_{zero,\theta})^2 (D_{extr,\theta})^2 = \pi^4 m_0 (D_{zero,\theta})^2 (D_{zero,\theta})^2. \quad (43)$$

Параметр ширококосмугастості спектру  $\alpha$  визначається за [62]:

$$\alpha = \frac{m_0 m_4}{m_2^2} = \left( \frac{D_{extr,\theta}}{D_{zero,\theta}} \right)^2, \quad 1,5 \leq \alpha < +\infty. \quad (44)$$

Оцінку середнього квадратичного значення ширини спектру зробимо за виразом:

$$\Lambda = 1 - \frac{1}{\alpha} = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4}. \quad (45)$$

З-за симетрії щільність піків (максимумів) профілограми дорівнює половині відповідної щільності екстремумів [62]:

$$D_{peak,\theta} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}. \quad (46)$$

За (42), (43) отримаємо:

$$D_{peak,\theta} = \frac{1}{2} D_{extr,\theta}. \quad (47)$$

Для щільності вершин шорсткої випадкової поверхні маємо вираз [62]:

$$D_{sum} = \frac{1}{6\pi\sqrt{3}} \left( \frac{m_4}{m_2} \right), \quad (48)$$

тоді, порівнюючи (46) з (48), отримаємо співвідношення між щільностями вершин поверхні  $D_{sum}$  та її профілограми  $D_{peak}$ :

$$D_{sum} = \frac{2\pi \cdot D_{peak}^2}{3\sqrt{3}} \approx 1,2092 D_{peak}^2 = \frac{\pi \cdot D_{extr}^2}{6\sqrt{3}} \approx 0,3023 \cdot D_{extr}^2. \quad (49)$$

Сучасні прилади дозволяють отримувати вихідний сигнал  $m_0, m_2, m_4$ .

## II. Вибірковий аналіз анізотропних випадкових поверхонь.

Для аналізу анізотропної поверхні необхідно визначити дев'ять моментів СЩ [62]:

нульового порядку –  $m_{00}$ ;

другого порядку –  $m_{20}, m_{02}, m_{11}$ ;

четвертого порядку –  $m_{13}, m_{22}, m_{31}, m_{04}, m_{40}$ .

Моменти спектральної щільності профілограми шорсткої поверхні за [62] визначаються так:

$$m_{n\theta_i} = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\theta_i}(k') (k')^n dk'. \quad (50)$$

Моменти СЩ анізотропної поверхні  $m_{pq}$  та СЩ її профілограми пов'язані між собою такими залежностями [84]:

$$m_{n\theta_i} = m_{n0} \cos^n \theta_i + C_1^n m_{n-1,1} \cos^{n-1} \theta_i \sin \theta_i + C_2^n m_{n-2,2} \cos^{n-2} \theta_i \sin^2 \theta_i + \dots + m_{0n} \sin^n \theta_i, \quad (51)$$

$$\text{де } C_m^n = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

З цією метою на поверхні тертя довільно вибирали нульовий напрямок, який не співпадав з напрямком слідів технологічної обробки, напрямком ковзання та інших напрямків технологічних чи природних впливів, і знімали профілограми в непаралельних перерізах  $\theta_i = \theta_j, i \neq j$ . Тоді можна записати для 3-х моментів СЩ профілограми  $n$  співвідношень (51):

- для моменту нульового порядку –  $n$  співвідношень виду:

$$m_{0\theta_i} = m_{00}, \quad \text{де } i = 1, \dots, n; \quad (52)$$

- для моментів другого порядку –  $n$  співвідношень виду:

$$m_{2\theta_i} = m_{20} \cos^2 \theta_i + 2m_{11} \cos \theta_i \sin \theta_i + m_{02} \sin^2 \theta_i, \quad (53)$$

де  $i = 1, \dots, n$ , причому будь-які три із  $n$  рівнянь (53) лінійно незалежні;

- для моментів четвертого порядку –  $n$  співвідношень виду:

$$m_{4\theta_i} = m_{40} \cos^4 \theta_i + 4m_{31} \cos^3 \theta_i \sin \theta_i + 6m_{22} \cos^2 \theta_i \sin^2 \theta_i + 4m_{13} \cos \theta_i \sin^3 \theta_i + m_{04} \sin^4 \theta_i, \quad (54)$$

де  $i = 1, \dots, n$ , причому будь-які п'ять із  $n$  рівнянь (54) лінійно незалежні.



Таким чином, для визначення характеристик анізотропної поверхні необхідно зняти п'ять профілограм, вимірених в непаралельних напрямках, наприклад,  $\theta_i=0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ$ . Для кожного напрямку визначаємо три моменти  $m_{0\theta_i}, m_{2\theta_i}, m_{4\theta_i}$  і, застосовуючи метод найменших квадратів (МНК) для обробки інформації, отримуємо формули:

$$m_{00} = \frac{1}{5}(m_{0,0^\circ} + m_{0,30^\circ} + m_{0,45^\circ} + m_{0,60^\circ} + m_{0,90^\circ}); \quad (55)$$

$$m_{20} = \frac{1}{10} \left[ 6m_{2,0^\circ} + \left( 7 + \frac{5}{\sqrt{3}} \right) m_{2,30^\circ} - (1 + 2\sqrt{3})m_{2,45^\circ} - (3 + \sqrt{3})m_{2,60^\circ} + \left( 1 + \frac{4}{\sqrt{3}} \right) m_{2,90^\circ} \right]; \quad (56)$$

$$m_{11} = \frac{1}{10} \left[ -\left( \frac{3}{2} + 2\sqrt{3} \right) m_{2,0^\circ} - (2 - \sqrt{3})m_{2,30^\circ} + (7 + 2\sqrt{3})m_{2,45^\circ} - (2 - \sqrt{3})m_{2,60^\circ} - \left( \frac{3}{2} + 2\sqrt{3} \right) m_{2,90^\circ} \right]; \quad (57)$$

$$m_{02} = \frac{1}{10} \left[ \left( 1 + \frac{4}{\sqrt{3}} \right) m_{2,0^\circ} - (3 + \sqrt{3})m_{2,30^\circ} - (1 + 2\sqrt{3})m_{2,45^\circ} + \left( 7 + \frac{5}{\sqrt{3}} \right) m_{2,60^\circ} + 6m_{2,90^\circ} \right]; \quad (58)$$

$$m_{40} = m_{4,0^\circ}; \quad (59)$$

$$m_{31} = -\left( \frac{1}{4} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) m_{4,0^\circ} + (1 + \sqrt{3})m_{4,30^\circ} - \left( \frac{3}{2} + \sqrt{3} \right) m_{4,45^\circ} + \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) m_{4,60^\circ} - \frac{1}{4} m_{4,90^\circ}; \quad (60)$$

$$m_{22} = \frac{4\sqrt{3} + 3}{18} m_{4,0^\circ} - \frac{8\sqrt{3} + 12}{9} m_{4,30^\circ} + \frac{8 + 4\sqrt{3}}{3} m_{4,45^\circ} - \frac{8\sqrt{3} + 12}{9} m_{4,60^\circ} + \frac{4\sqrt{3} + 3}{18} m_{4,90^\circ}; \quad (61)$$

$$m_{13} = -\frac{1}{4} m_{4,0^\circ} + (1 + \sqrt{3})m_{4,30^\circ} - \left( \frac{3}{2} + \sqrt{3} \right) m_{4,45^\circ} + (1 + \sqrt{3})m_{4,60^\circ} - \left( \frac{1}{4} + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) m_{4,90^\circ}; \quad (62)$$

$$m_{04} = m_{4,90^\circ}. \quad (63)$$

Використовуючи метод [62, 84] визначали моменти СЩ профілограм:

$$m_{00} = \sigma^2 = \frac{1}{n} \frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^n R_{a\theta_i}^2; \quad (64)$$

$$m_{2\theta_i} = m_{00} (\pi D_{0,\theta_i})^2; \quad (65)$$

$$m_{4\theta_i} = m_{00} (\pi^2 D_{0,\theta_i} D_{extr,\theta_i})^2, \quad (66)$$

що дозволяє розрахувати моменти СЩ поверхні.

**5. Полімерні зразки послідовно припрацьовували** на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості, що знаходилися на масивному плоскому металевому тілі. Металеve 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 припрацювання полімерних зразків металеве контртіло знову припрацьовували на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості, що знаходилися на масивному плоскому металевому тілі.

**6. Профілограми мікросороткості поверхонь** знімали за допомогою профілометра-профілографа ВЭИ «Калибр» моделі «201» та моделі «252». Для одного напрямку знімали 50-60 базових довжин профілограм для металевого контртіла 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  $D_{extr}$ . Вимірjana  $R_a$  і розрахункова за профілограмами  $D_0$  (для моделі «252»  $D_0$  вимірjana) були статистично рівні.

Великий об'єм виборки і рівномірний розподіл її по поверхні контртіла 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  $\alpha$  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. Ізотропна поверхня.

##### I. Дослідження полімерного композиту графелон-20.

У табл. 1 приведені результати зміни шорсткості ізотропних поверхонь сталевого контртіла та спряженого з ним карбопластика на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2, наповненого дисперсією 20 об.% вуглецевих волокон – графелон-20.

Як видно з табл. 1, у межах однієї технології отримання вуглецевих волокон спостерігаються такі закономірності зміни шорсткості поверхонь сталі 45 під час тертя та зношування у парі з композитом графелон-20:

##### • для волокон на основі ГЦ:

1) для вуглецевих волокон, які не зазнали видалення розчинниками продуктів піролізу та продуктів перетворення антипіренів за 723 К у середовищі  $\text{CH}_4$ , зміна шорсткості (висотний параметр) поверхні композиту в процесі тертя та зношування для частинно карбонізованого волокна  $\sqrt{m_0}$  зменшується на 0,113 мкм (УТ-4), карбонізованих – на 0,012 мкм (УТМ-8), а графітованих – зростає на 0,074 мкм (ТГН-2м);

2) у тому випадку, коли, після стадії частинної карбонізації за  $T_k=723$  К у середовищі  $\text{N}_2$ , проводили операцію видалення цих продуктів (технологія отримання ТГН-Т), для волокон термооброблених за  $T_k=1123-1473$  К шорсткість поверхні зростає на 0,025-0,037 мкм, за температур карбонізації волокон  $T_k=1623-1873$  К шорсткість поверхні зменшується на 0,051-0,063 мкм, а за  $T_k=2273-2673$  К – зростає на 0,062-0,076 мкм;

3) будь-яке покриття графітованого волокна ТГН-2м (12% піровуглецем, 0,2-3,0% SiC, 0,8-2,0% ZrC) приводить, на відміну до непокритого волокна, до зменшення вихідної шорсткості поверхні сталі 45 на 0,100-0,125 мкм;

##### • для волокон на основі ПАН та кополімеру ПАН+ГЦ:

1) для низькомодульних, низької міцності волокон, графітованих за  $T_k=2873$  К (голково-пробивні повсті «Мтілон», «ГПП») вихідна шорсткість поверхні сталі 45 зменшується на 0,09-0,104 мкм у процесі тертя та зношування;

2) для високомодульних (ВМН-4, ВМН-4 фторованого) середньої («Евлан») та високої (ДЕА, ЛУ-2) міцності волокон та волокон високомодульних високоміцних (НМ-НТ), графітованих за  $T_k=2073-2673$  К, вихідна шорсткість поверхні сталі 45 зменшується на 0,201-0,250 мкм.

Вихідна шорсткість поверхонь зразків композитів графелон-20, наповнених низькомодульними вуглецевими волокнами УТ-4, УТМ-8, ТГН-2м, ММП-3, ТКК-1, ТКЦ-1, ТГН-Т850, ТГН-Т1200, ТГН-Т1350, ТГН-Т1600, ТГН-Т2000, ТГН-Т2300, ТГН-Т2400, термооброблених за 723-2673К, незалежно від технології отримання вуглецевого волокна та поверхневого покриття піровуглецем, SiC чи ZrC, збільшується на  $\sqrt{m_0}=0,043-0,143$  мкм, наповнених низькомодульними низької міцності волокнами, графітованих за  $T_k=2873$  К із ПАН або ПАН-ГЦ («Мтілон», «ГПП») збільшується на  $\sqrt{m_0}=0,202-0,215$  мкм, а наповнених високомодульними, середньої чи високої міцності, чи високомодульними високоміцними вуглецевими волокнами, графітованими за  $T_k=2673$  К з ПАН-волокон, зростає у більшій ступені на  $\sqrt{m_0}=0,851-0,955$  мкм.

Топографія поверхні спряженого металу є домінуючим фактором у визначенні величини зносу карбопластиків не тільки на початку тертя (тобто пов'язане з параметрами вихідної поверхні), але і в процесі тертя, коли спряжена поверхня твориться самим композитом.

За результатами табл. 1 розраховані вибіркові коефіцієнти кореляцій і дана статистична оцінка їх значущості за критичним значенням цих коефіцієнтів:

1) для всіх досліджених волокон ( $N=21$ ), які були введені в полімерну матрицю (полімерний композит) кореляційний зв'язок між абсолютними величинами шорсткості вихідної поверхні ( $\sqrt{m_0}$ )<sub>в</sub> та поверхнею, що утворилася внаслідок процесів тертя та зношування ( $\sqrt{m_0}$ )<sub>т</sub>, дорівнював:

##### • для металевого контртіла:

$r_{1,2}=0,0253 < r_{кр} \{q=1-\alpha/2=0,975 (\alpha=0,05); f=N-2=19\} = 0,4329$  [80], тобто між величинами шорсткості поверхонь вихідної та після тертя існує надійний ( $p=0,95$ ) нелінійний зв'язок зі ступенем нелінійності  $\xi_2(r) = r_{кр}/|r_{1,2}| = 17,11$  та залишками ступеня лінійності у нелінійному зв'язку  $\xi_1(r) = |r_{1,2}|/r_{кр} = 0,058$ ;

##### • для полімерного композиту:

$r_{3,4}=0,6762 > r_{кр} \{q=0,975; f=19\} = 0,4329$  [80], тобто між величинами шорсткості поверхонь вихідної та після тертя існує надійний ( $p=0,95$ ) лінійний зв'язок зі ступенем лінійності  $\xi_1(r) = |r_{3,4}|/r_{кр} = 1,562$  та залишками ступеня нелінійності у лінійному зв'язку  $\xi_2(r) = r_{кр}/|r_{3,4}| = 0,640$ ;

Зміна шорсткості ізотропних поверхонь: контртіла із сталі 45 та карбопластика графелон-20 на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 + 20% об. вуглецевого волокна до ( $S_0=0$  км) та після ( $S_1=150$  км) тертя та зношування

Вуглецеве волокно				$\sqrt{m_0}$ , мкм					
марка	вихідне органічне волокно	$T_k$ , К	тип вуглецевого волокна	стал 45			карбопластик		
				$(\sqrt{m_0})_1$ до випробування (1)	$(\sqrt{m_0})_2$ після випробування (2)	зміна шорсткості $\Delta_{2-1}$	$(\sqrt{m_0})_1$ до випробування (1)	$(\sqrt{m_0})_2$ після випробування (2)	зміна шорсткості за час тертя $\Delta_{2-1}$
УТ-4	ГЦ	723	LM	0,251	0,138	-0,113	0,046	0,188	+0,142
УТМ-8	ГЦ	1123	LM	0,288	0,276	-0,012	0,045	0,100	+0,055
ТГН-2м	ГЦ	2673	LM	0,252	0,326	+0,074	0,038	0,138	+0,100
ТМП-3 (Пк: 12% піровуглецю)	ГЦ	2673	LM	0,238	0,138	-0,100	0,038	0,175	+0,137
ТКК-1 (Пк: 0,2-3,0% SiC)	ГЦ	2673	LM	0,254	0,134	-0,120	0,042	0,184	+0,142
ТКЦ-1 (Пк: 0,8-4,0% ZrC)	ГЦ	2673	LM	0,257	0,132	-0,125	0,044	0,187	+0,143
ТГН-Т850	ГЦ	1123	LM	0,276	0,313	+0,037	0,039	0,152	+0,113
ТГН-Т1200	ГЦ	1473	LM	0,301	0,326	+0,025	0,044	0,150	+0,106
ТГН-Т1350	ГЦ	1623	LM	0,252	0,201	-0,051	0,040	0,100	+0,060
ТГН-Т1600	ГЦ	1873	LM	0,276	0,213	-0,063	0,045	0,088	+0,043
ТГН-Т2000	ГЦ	2273	LM	0,276	0,338	+0,062	0,040	0,125	+0,085
ТГН-Т2300	ГЦ	2573	LM	0,250	0,326	+0,076	0,039	0,150	+0,111
ТГН-Т2400	ГЦ	2673	LM	0,248	0,320	+0,072	0,040	0,153	+0,113
«Мтілон»	ПАН+ ГЦ	2873	LM-LT	0,253	0,163	-0,090	0,048	0,263	+0,215
«ГПП»	ПАН	2873	LM-LT	0,254	0,150	-0,104	0,049	0,251	+0,202
ЛУ-2	ПАН	2673	НТ	0,300	0,050	-0,250	0,048	1,003	+0,955
ВМН-4	ПАН	2673	НМ	0,276	0,056	-0,220	0,048	0,927	+0,879
ВМН-4Ф (Пк: 10% F)	ПАН	2673	НМ	0,286	0,050	-0,236	0,047	0,915	+0,868
DEA	ПАН	2073	НТ	0,255	0,054	-0,201	0,051	0,902	+0,851
«Евлан»	ПАН	2673	МТ	0,263	0,048	-0,215	0,047	0,982	+0,935
«Сатурн»	ПАН	2673	НМ-НТ	0,260	0,042	-0,218	0,048	0,998	+0,950

2) для полімерних композитів, наповнених вуглецевими волокнами ТГН-Т, отриманих за однією технологією з ГЦ за температури кінцевої термообробки  $T_k=1123-2673$  К ( $N=7$ ) між температурою термообробки та зміною вихідної шорсткості поверхні складових пари полімерний композит – металеве контртіло у наслідок тертя та зношування існує кореляційний зв'язок:

• для металевого контртіла:

$r_{5,6}=0,4942 < r_{кр} \{q=0,975; f=N-2=5\}=0,7545$  [80], тобто між величинами зміни шорсткості вихідної поверхні сталі 45 після тертя і температурою кінцевої термообробки вуглецевих волокон існує надійний ( $p=0,95$ ) нелінійний кореляційний зв'язок зі ступенем нелінійності  $\xi_2(r)=1,527$  та залишками ступеня лінійності у нелінійному зв'язку  $\xi_1(r)=0,655$ ;

**•для полімерного композиту:**

$r_{5,6} = 0,1490 < r_{кр} \{q=0,975; f=5\} = 0,7545$  [80], тобто між величинами зміни шорсткості поверхонь вихідної та після тертя та температурою кінцевої термообробки вуглецевих волокон існує надійний ( $p=0,95$ ) нелінійний кореляційний зв'язок зі ступенем нелінійності  $\xi_2(r)=5,064$  та залишками ступеня лінійності у нелінійному зв'язку  $\xi_1(r)=0,197$ ;

**3) для полімерних композицій**, наповнених вуглецевими волокнами, представленими у табл. 1, між змінами шорсткості поверхні металевого контртіла  $[(\Delta\sqrt{m_0})_в-(\Delta\sqrt{m_0})_т]_{м_е}$  та полімерного композиту  $[(\Delta\sqrt{m_0})_в-(\Delta\sqrt{m_0})_т]_{пк}$  у процесі тертя та зношування існує надійний ( $p=0,95$ ) лінійний кореляційний зв'язок  $r_{5,7} = |-0,8275| > r_{кр} \{q=0,975; f=5\} = 0,7545$  зі ступенем лінійності  $\xi_1(r)=1,097$  та залишками ступеня нелінійності у лінійному зв'язку  $\xi_2(r)=0,912$ .

**II. Дослідження полімерного композиту флубон-15(20).**

Встановимо лінійний кореляційний зв'язок результатів, приведених у [81], і, відповідно, за абсолютною величиною коефіцієнта кореляції, складемо мінорантні ряди за силою впливу спектральних моментів СЩ на питому інтенсивність об'ємного зношування за такими співвідношеннями:

1) сили впливу величин вихідних ( $S=0$  км) моментів СЩ ( $m_0, m_2, m_4$ ) ізотропної шорсткої поверхні контртіла зі сталі 45 на питому інтенсивність об'ємного зношування ( $I_j$ ) полімерного композиту флубон-15(20) на шляху тертя  $\Delta S_j$ , де  $j=1, 2, \dots, 11$  (табл. 2);

2) сили впливу величин моментів СЩ ( $m_0', m_2', m_4'$ ) ізотропної шорсткої поверхні контртіла зі сталі 45, визначених перед  $j$ -етапом випробувань ( $\Delta S_j' = S_{j+1}' - S_j'$ ) на питому інтенсивність об'ємного зношування ( $I_{j+1}'$ ) полімерного композиту на  $\Delta S_j'$  етапі тертя (табл. 3);

3) сили впливу післядії процесів тертя та зношування полімерного композиту на інтервалі шляху тертя  $\Delta S_j$  за оцінкою величини моментів СЩ шорсткої ізотропної поверхні контртіла зі сталі 45 на шляху тертя  $S_j$ , де  $j=0, 1, 2, \dots, 10$ , на питому інтенсивність об'ємного зношування полімерного композиту на інтервалі шляху тертя  $\Delta S_{11} = 900-1000$  (табл. 4);

4) сили впливу процесів тертя та зношування за оцінкою питомої інтенсивності об'ємного зношування ( $I_j'$ ) полімерного композиту на інтервалі шляху тертя  $\Delta S_j'$  на шорсткість ізотропної поверхні за спектральними моментами  $m_0', m_2', m_4'$  поверхні контртіла зі сталі 45, визначених після  $j$ -етапу шляху тертя (табл. 5).

Як видно з табл. 2, вихідні параметри шорсткості поверхні сталі 45 – спектральні моменти СЩ нульового порядку  $m_0$ , пов'язаного з висотою мікронерівностей, другого порядку  $m_2$ , пов'язаного з градієнтом поверхні та четвертого порядку  $m_4$ , пов'язаного з кривиною у вершині мікронерівностей, впливають (за коефіцієнтом кореляції) на питому інтенсивність об'ємного зношування полімерного композиту за такими співвідношеннями у залежності від шляху тертя таким чином:

1) на початкову шляху тертя  $S=0-100$  км привалює висотний параметр ( $m_0$ ), потім градієнт поверхні ( $m_2$ ) та кривина ( $m_4$ );

2) далі на шляху тертя 200-600 км привалюють (періодично через 200 км тертя) градієнт поверхні ( $m_2$ ), потім висотний параметр ( $m_0$ ) та кривина ( $m_4$ ), змінюючи на параметр кривини ( $m_4$ ), який перевищує за впливом параметр градієнта поверхні ( $m_2$ ) та висотний параметр ( $m_0$ );

3) далі на шляху тертя  $S \geq 600$  км найбільш впливовим параметром є кривина ( $m_4$ ), друге місце посідає параметр або градієнта поверхні ( $m_2$ ), або висотний ( $m_0$ ). Ці зміни наймовірніше пов'язані з формуванням на поверхнях тертя проміжної плівки.

Як видно з табл. 3, аналогічний вплив на  $I_j$  полімерного композиту виявлений для параметрів ізотропної шорсткості поверхні зі сталі 45, значення яких безпосередньо виявлені перед  $j$ -етапом тертя:

1) на етапі тертя від 0 до 100 км привалює висотний параметр ( $m_0$ ), потім параметр градієнта поверхні ( $m_2$ ) та параметр кривини поверхні ( $m_4$ );

2) у межах шляху тертя від 100 до 600 км співвідношення параметрів через 100 км періодично змінюється від  $m_0' > m_2' > m_4'$  до  $m_2' > m_4' > m_0'$ ;

3) у межах шляху тертя  $S_j \geq 600$  км співвідношення параметрів  $m_2' > m_4' > m_0'$  через 100 км змінюється на співвідношення  $m_4' > m_2' > m_0'$ , чи  $m_4' > m_0' > m_2'$ , при цьому після  $S_j \geq 800$  км впливи параметрів  $m_0, m_2, m_4$  на  $I_j$  полімерного композиту значно послаблюються, ймовірно, що на стан проміжної плівки починають діяти інші чинники.

Як видно з табл. 4, віддалений вплив (післядія) параметрів  $j$ -го етапу шляху тертя, де  $j=0, 1, 2, \dots, 10$ , на інтенсивність зношування полімерного композиту ( $I_{11}$ ) на  $j=11$  етапі шляху тертя привалюють два параметри СЩ:

1)  $m_4, m_2$  в межах  $S_j=0-500$  км;

2) в межах  $S_j=600-800$  км –  $m_4, m_0$ ;

3) за  $S_{10} \geq 900$  км впливи  $m_0, m_2, m_4$  значно послаблюються, бо на перше місце виступають інші чинники.

Як видно з табл. 5, вплив процесів тертя та зношування (за оцінками  $I_j$  полімерного композиту) на формування шорсткості поверхні контртіла зі сталі 45 після  $j$ -етапу шляху тертя, пов'язаний з одним параметром СЩ:

1) в межах шляху тертя 0-100 км –  $m_0$ ;

2) 200-500 км – чергуються через 100 км  $m_4$  з  $m_0$ ;

3) в межах 600-1000 км – переважно  $m_4$ .

Таблиця 2

Вплив величин вихідних ( $S=0$  км) моментів спектральної щільності ( $m_0, m_2, m_4$ ) ізотропної шорсткої поверхні сталевого контртіла на питому інтенсивність об'ємного зношування ( $I_j$ ) полімерного композиту флубон-15(20) на шляху тертя  $\Delta S_j$  (де  $j=1, 2, \dots, 11$ )

Шлях тертя, на якому визначені $m_0, m_2, m_4$	Шлях тертя $\Delta S_j$ (км), на якому визначена $I_j$	Коефіцієнт кореляцій між $m_i$ та $I_j$			Мінорантний ряд за силою впливу $m_i$ на $I_j$
		$r_0$	$r_2$	$r_4$	
$S_0=0$ км	$\Delta S_1=0\dots 50$	0,9810	0,9577	0,1714	$m_0 > m_2 \gg m_4$
$S_0=0$ км	$\Delta S_2=50\dots 100$	0,9831	0,9301	0,0713	$m_0 > m_2 \gg m_4$
$S_0=0$ км	$\Delta S_3=100\dots 200$	-0,0215	0,3264	0,9101	$m_4 > m_2 \gg m_0$
$S_0=0$ км	$\Delta S_4=200\dots 300$	0,7553	0,8288	0,3265	$m_2 > m_0 > m_4$
$S_0=0$ км	$\Delta S_5=300\dots 400$	0,2666	0,6731	0,9105	$m_4 > m_2 > m_0$
$S_0=0$ км	$\Delta S_6=400\dots 500$	0,6244	0,8055	0,3473	$m_2 > m_0 > m_4$
$S_0=0$ км	$\Delta S_7=500\dots 600$	0,1506	0,5712	0,8493	$m_4 > m_2 \gg m_0$
$S_0=0$ км	$\Delta S_8=600\dots 700$	0,2951	0,5591	0,6913	$m_4 > m_2 > m_0$
$S_0=0$ км	$\Delta S_9=700\dots 800$	0,7038	0,8122	0,2046	$m_2 > m_0 > m_4$
$S_0=0$ км	$\Delta S_{10}=800\dots 900$	0,1028	0,0132	-0,1356	$m_4 > m_0 \gg m_2$
$S_0=0$ км	$\Delta S_{11}=900\dots 1000$	0,1608	0,4936	0,8261	$m_4 > m_2 \gg m_0$

Таблиця 3

Вплив величин моментів спектральної щільності нульового ( $m_0'$ ), другого ( $m_2'$ ) та четвертого ( $m_4'$ ) порядків ізотропної шорсткої поверхні, контртіла зі сталі 45, визначених перед  $j$ -етапом ( $S_j'$ ) шляху тертя ( $\Delta S_j'=S_{j+1}'-S_j'$ ), на питому інтенсивність об'ємного зношування ( $I'_{j+1}$ ) композиту

Шлях тертя, на якому визначені $m_0', m_2', m_4'$	Шлях тертя $\Delta S_j'$ (км), на якому визначена $I'_{j+1}$	Коефіцієнт кореляцій між $m_i'$ та $I'_{j+1}$			Мінорантний ряд за силою впливу $m_i'$ на $I_j'$
		$r_0'$	$r_2'$	$r_4'$	
$S_0=0$ км	$\Delta S_1=0\dots 50$	0,9810	0,9577	0,1715	$m_0' > m_2' \gg m_4'$
$S_1=50$ км	$\Delta S_2=50\dots 100$	0,9873	0,2386	0,0161	$m_0' \gg m_2' > m_4'$
$S_2=100$ км	$\Delta S_3=100\dots 200$	0,1241	0,8660	0,9159	$m_4' > m_2' \gg m_0'$
$S_3=200$ км	$\Delta S_4=200\dots 300$	0,5980	0,4811	0,2715	$m_0' > m_2' \gg m_4'$
$S_4=300$ км	$\Delta S_5=300\dots 400$	0,7711	0,9368	0,8787	$m_2' > m_4' > m_0'$
$S_5=400$ км	$\Delta S_6=400\dots 500$	0,7478	-0,0649	0,0285	$m_0' \gg m_2' \geq m_4'$
$S_6=500$ км	$\Delta S_7=500\dots 600$	0,3052	0,8208	0,5829	$m_2' > m_4' > m_0'$
$S_7=600$ км	$\Delta S_8=600\dots 700$	0,2194	0,4430	0,7904	$m_4' > m_2' > m_0'$
$S_8=700$ км	$\Delta S_9=700\dots 800$	0,6802	0,7256	-0,0722	$m_2' > m_0' \gg m_4'$
$S_9=800$ км	$\Delta S_{10}=800\dots 900$	0,0554	-0,0225	-0,0826	$m_4' > m_0' > m_2'$
$S_{10}=900$ км	$\Delta S_{11}=900\dots 1000$	0,1828	-0,2116	-0,1836	$m_2' > m_4' > m_0'$

Таблиця 4

Вплив післядії процесів тертя та зношування полімерного композиту на шляху тертя  $\Delta S_j$  за оцінкою величини моментів СЦ  $m_0', m_2', m_4'$  шорсткої ізотропної поверхні контргіла зі сталі 45 на шляху тертя  $S_j$  (де  $j=0, 1, 2, \dots, 10$ ) на питому інтенсивність об'ємного зношування композиту на шляху тертя  $\Delta S_{11}=900\dots 1000$

Процедура оцінки післядії процесів $S_j \rightarrow \Delta S_{11}=900-1000$ км	Коефіцієнти кореляцій між моментами СЦ ізотропної шорсткої поверхні сталевого контргіла $m_0', m_2', m_4'$ та питомою інтенсивністю об'ємного зношування $I_{11}'$ ( $\Delta S_{11}=900\dots 1000$ ) композиту			Мінорантний ряд за силою впливу $m_i'$ на $I_{11}'$
	$r_0'$	$r_2'$	$r_4'$	
$S_0=0$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,1608	0,4936	0,8261	$m_4' \gg m_2' > m_0'$
$S_1=50$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,2490	0,8285	0,8159	$m_2' \geq m_4' \gg m_0'$
$S_2=100$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,3394	0,8543	0,8193	$m_2' \geq m_4' \gg m_0'$
$S_3=200$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,4661	0,7899	0,8088	$m_4' \geq m_2' \gg m_0'$
$S_4=300$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,5418	0,8567	0,8065	$m_2' \geq m_4' \gg m_0'$
$S_5=400$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,4712	0,8169	0,8089	$m_2' \geq m_4' \gg m_0'$
$S_6=500$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,3706	0,7082	0,5260	$m_2' > m_4' > m_0'$
$S_7=600$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,0844	-0,0281	0,4600	$m_4' \gg m_0' > m_2'$
$S_8=700$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,2153	0,1147	0,5032	$m_4' \gg m_0' \geq m_2'$
$S_9=800$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,2069	0,1601	0,7436	$m_4' \gg m_0' \geq m_2'$
$S_{10}=900$ км $\rightarrow \Delta S_{11}$	0,1828	-0,2116	-0,1836	$m_2' \geq m_4' \geq m_0'$

Таблиця 5

Вплив процесів тертя та зношування за оцінкою питомої інтенсивності об'ємного зношування ( $I_j'$ ) композиту на  $j$ -шляху тертя  $\Delta S_j$  на величини моментів спектральної щільності нульового ( $m_0'$ ), другого ( $m_2'$ ) та четвертого ( $m_4'$ ) порядків ізотропної шорсткої поверхні сталевого контргіла, визначених після  $j$ -етапу шляху тертя

Шлях тертя $\Delta S_j$ (км), на якому визначена $I_j'$	Шлях тертя, на якому визначені $m_0', m_2', m_4'$	Коефіцієнти кореляцій між $m_i'$ та $I_j'$			Мінорантний ряд за силою впливу $m_i'$ на $I_j'$
		$r_0'$	$r_2'$	$r_4'$	
0...50	$S_1=50$ км	0,9966	0,3359	0,1183	$m_0' \gg m_2' > m_4'$
50...100	$S_2=100$ км	0,9901	0,2066	0,0158	$m_0' \gg m_2' \gg m_4'$
100...200	$S_3=200$ км	0,1543	0,7155	0,9158	$m_4' > m_2' \gg m_0'$
200...300	$S_4=300$ км	0,8184	0,6887	0,2739	$m_0' > m_2' > m_4'$
300...400	$S_5=400$ км	0,5513	0,4759	0,7379	$m_4' > m_0' > m_2'$
400...500	$S_6=500$ км	0,6523	0,3826	0,0071	$m_0' > m_2' \gg m_4'$
500...600	$S_7=600$ км	0,0336	0,0219	0,5455	$m_4' \gg m_0' \geq m_2'$
600...700	$S_8=700$ км	0,2726	0,1035	0,6930	$m_4' > m_0' > m_2'$
700...800	$S_9=800$ км	0,6999	0,8660	0,2188	$m_2' > m_0' > m_4'$
800...900	$S_{10}=900$ км	0,0640	0,4800	0,7221	$m_4' > m_2' \gg m_0'$
900...1000	$S_{11}=1000$ км	0,1442	0,1525	0,7345	$m_4' \gg m_2' \geq m_0'$

### 3.2. Анізотропна поверхня.

**1) Коефіцієнти кореляцій ( $R_i$ )** між питомими інтенсивностями об'ємного зношування композиту та інваріантами моментів спектральної щільності (СЩ) нульового порядку  $M_1$  (мкм<sup>2</sup>), 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<sup>-2</sup>),  $M_5$  і  $M_6$  (мкм<sup>-4</sup>),  $M_7$  (мкм<sup>-6</sup>), 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. 6.

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 введенними нами [58] у науковий обіг 8-ми параметрів широкосмугастості спектральної щільності розподілу нерівностей анізотропної поверхні  $\alpha_i$ , розрахуємо частинні інваріантні комбінації коефіцієнтів кореляцій ( $R_i$ ) лінійного зв'язку питомої інтенсивності об'ємного зношування ( $I_j$ ) з інваріантними комбінаціями ( $\alpha_i$ ) спектральних моментів ( $M_i$ ).

Результати розрахунків  $R_i$  занесені в табл. 1. Введення у науковий обіг узагальненого параметру широкосмугастості ( $\alpha_k$ , де  $k \equiv Q, q, a, g, h$  – вид середньої) СЩ анізотропної поверхні дозволило, відповідно, за принципом аналогії (34)-(38), розрахувати узагальнений коефіцієнт кореляцій лінійного зв'язку  $\bar{R}_k$  між питомою інтенсивністю об'ємного зношування  $I_j$  та  $\alpha_k$ . Результати розрахунків  $\bar{R}_Q, \bar{R}_q, \bar{R}_a, \bar{R}_g, \bar{R}_h$  занесені у табл. 6.

**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**  $r_{кр}\{q=1-(\alpha/2); f=n-2\}$  [80, 82], де  $\alpha=0,05$  – рівень значущості,  $f$  – число вільностей, а  $n=8$  – кількість варіантів, тоді за [80]  $r_{кр}\{q=0,975; f=6\}=0,7067$ , при цьому ступінь лінійності лінійного зв'язку визначали за співвідношеннями:

$$\xi_1(r) = \frac{|r_p|}{r_{кр}}; \xi_1(R) = \frac{|R_p|}{r_{кр}}; \xi_1(\bar{R}) = \frac{|\bar{R}_p|}{r_{кр}}, \quad (67)$$

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

$$\xi_2(r) = \frac{r_{кр}}{|r_p|}; \xi_2(R) = \frac{r_{кр}}{|R_p|}; \xi_2(\bar{R}) = \frac{r_{кр}}{|\bar{R}_p|}; \quad (68)$$

• **за теоретичним (табличним) значенням критерію Стюдента** [80]  $t_T\{q=1-(\alpha/2); f=n-2\} = t_T\{q=0,975; f=6\}=2,447$  (для  $\alpha=0,05$ ), порівнюючи його з розрахованою t-статистикою  $t_p$  [82]:

$$|t'_p| = \frac{r_p}{\sqrt{1-r_p^2}} \sqrt{n-2}; |t''_p| = \frac{R_p}{\sqrt{1-R_p^2}} \sqrt{n-2}; |t'''_p| = \frac{\bar{R}_p}{\sqrt{1-\bar{R}_p^2}} \sqrt{n-2}, \quad (69)$$

визначаючи ступінь лінійності лінійного зв'язку за співвідношеннями:

$$\xi_1(t') = \frac{|t'_p|}{t_T}; \xi_1(t'') = \frac{|t''_p|}{t_T}; \xi_1(t''') = \frac{|t'''_p|}{t_T}, \quad (70)$$

а ступінь нелінійності – за співвідношеннями:

$$\xi_2(t') = \frac{t_T}{|t'_p|}; \xi_2(t'') = \frac{t_T}{|t''_p|}; \xi_2(t''') = \frac{t_T}{|t'''_p|}; \quad (71)$$

• **за добутком  $\sigma_r \cdot z$  ( $q=1-\alpha/2$ )**, де  $\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{n-3}} = 0,4472$  – середнє квадратичне відхилення нормального

розподілу випадкової величини перетворення Фішера ( $z$ );  $z_q = z_T(q=1-\alpha/2) = z_{0,975} = 1,96$  [82] – квантиль нормованого нормального розподілу [82], тоді добуток  $(z_T \cdot \sigma_r) = 0,8765$ , розраховуючи значення випадкової величини  $z_p$  перетворення Фішера:

$$z'_p = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+r_p}{1-r_p} \right); z''_p = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+R_p}{1-R_p} \right); z'''_p = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+\bar{R}_p}{1-\bar{R}_p} \right) \quad (72)$$

та визначаючи ступінь лінійності лінійного зв'язку за співвідношеннями:

Таблиця 6

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

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

$$\xi_1(z') = \frac{|z'_p|}{(\sigma_r \cdot z_q)}; \xi_1(z'') = \frac{|z''_p|}{(\sigma_r \cdot z_q)}; \xi_1(z''') = \frac{|z'''_p|}{(\sigma_r \cdot z_q)}, \quad (73)$$

а ступінь нелінійності – за співвідношеннями:

$$\xi_2(z') = \frac{(\sigma_r \cdot z_q)}{|z'_p|}; \xi_2(z'') = \frac{(\sigma_r \cdot z_q)}{|z''_p|}; \xi_2(z''') = \frac{(\sigma_r \cdot z_q)}{|z'''_p|}. \quad (74)$$

**3) Результати розрахунків за формулами (67)-(74) перевірки статистичних нульових гіпотез для**

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

генеральних коефіцієнтів кореляцій:      ↑ оцінка      ↑ оцінка      ↑ оцінка      зведені в табл. 7. У табл. 7  
 $r_p \neq 0$                        $R_p \neq 0$                        $\overline{R}_p \neq 0$

жирним шрифтом відмічені значущі коефіцієнти кореляцій. Як видно з табл. 6, за оцінками значущості коефіцієнтів лінійних кореляцій лінійного зв'язку I<sub>j</sub> = f(M<sub>i</sub>) спостерігаються такі нерівності за I<sub>j</sub> та шляхом тертя у мінорантному ряді впливу M<sub>i</sub> на I<sub>j</sub>:



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

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

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

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

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

**4) Результати (табл. 6) 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. 6,** 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. 7 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 контртіла, 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 вершинах 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 – інваріантні комбінації 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  $M_1, M_2, M_3$  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  $\Delta S_5'=300-400$  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  $\Delta S_4=200\dots 300$  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  $(z_T \cdot \sigma_z)$ ].

Таблиця 7

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 ( $\alpha_i$ ) СЩ та узагальненого параметра широкосмугастості СЩ цієї спряженої поверхні

Величина	Ступінь лінійності ( $\xi_1$ ) та ступінь нелінійності ( $\xi_2$ ) 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 ( $I_5'$ )	
	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_1$	$\xi_2$
А. За критичним коефіцієнтом кореляції ( $r_{кр}$ )								
$M_1$	<b>1,334</b>	0,749	<b>1,002</b>	0,998	0,357	2,804	<b>1,060</b>	0,944
$M_2$	<b>1,247</b>	0,802	<b>1,167</b>	0,857	0,944	1,060	<b>1,291</b>	0,775
$M_3$	<b>1,180</b>	0,847	<b>1,111</b>	0,900	0,880	1,136	<b>1,264</b>	0,791
$M_4$	0,866	1,155	0,826	1,210	<b>1,293</b>	0,773	0,860	1,162
$M_5$	0,955	1,047	0,879	1,138	<b>1,128</b>	0,887	0,901	1,109
$M_6$	0,722	1,386	0,751	1,331	<b>1,211</b>	0,826	0,777	1,287
$M_7$	0,824	1,214	0,691	1,448	<b>1,176</b>	0,850	0,736	1,359
$\alpha_1$	<b>1,052</b>	0,950	0,860	1,163	0,733	1,365	0,775	1,291
$\alpha_2$	<b>1,161</b>	0,862	0,914	1,094	0,639	1,566	0,812	1,232
$\alpha_3$	0,877	1,141	0,782	1,279	0,686	1,457	0,700	1,429
$\alpha_4$	<b>1,001</b>	0,999	0,718	1,392	0,666	1,501	0,663	1,509
$\alpha_5$	<b>1,174</b>	0,852	0,950	1,053	0,842	1,187	0,808	1,237
$\alpha_6$	<b>1,295</b>	0,772	<b>1,010</b>	0,991	0,735	1,361	0,847	1,181
$\alpha_7$	0,978	1,022	0,863	1,158	0,789	1,267	0,730	1,371
$\alpha_8$	<b>1,116</b>	0,896	0,793	1,260	0,766	1,306	0,691	1,447
$\alpha_Q$	<b>1,096</b>	0,913	0,870	1,149	0,737	1,356	0,758	1,319
$\alpha_q$	<b>1,089</b>	0,919	0,866	1,155	0,735	1,361	0,756	1,323
$\alpha_a$	<b>1,082</b>	0,924	0,861	1,161	0,732	1,366	0,753	1,328
$\alpha_g$	<b>1,075</b>	0,931	0,857	1,168	0,729	1,371	0,750	1,333
$\alpha_h$	<b>1,068</b>	0,937	0,852	1,174	0,727	1,376	0,748	1,337
Б. За критерієм Стьюдента ( $t_T$ )								
$M_1$	<b>2,837</b>	0,353	<b>1,004</b>	0,997	0,261	3,836	<b>1,132</b>	0,884
$M_2$	<b>1,864</b>	0,537	<b>1,461</b>	0,684	0,896	1,116	<b>2,226</b>	0,449
$M_3$	<b>1,513</b>	0,661	<b>1,269</b>	0,788	0,795	1,258	<b>1,986</b>	0,504
$M_4$	0,775	1,291	0,720	1,389	<b>2,255</b>	0,443	0,767	1,305
$M_5$	0,916	1,092	0,793	1,261	<b>1,321</b>	0,757	0,827	1,209
$M_6$	0,594	1,685	0,627	1,594	<b>1,658</b>	0,603	0,658	1,521
$M_7$	0,716	1,396	0,560	1,787	<b>1,495</b>	0,669	0,609	1,641
$\alpha_1$	<b>1,113</b>	0,898	0,766	1,306	0,606	1,651	0,655	1,527
$\alpha_2$	<b>1,435</b>	0,697	0,847	1,180	0,506	1,975	0,701	1,427
$\alpha_3$	0,790	1,266	0,663	1,508	0,555	1,802	0,569	1,756
$\alpha_4$	<b>1,001</b>	0,999	0,590	1,696	0,534	1,873	0,531	1,885
$\alpha_5$	<b>1,488</b>	0,672	0,906	1,104	0,742	1,348	0,696	1,436
$\alpha_6$	<b>2,272</b>	0,440	<b>1,019</b>	0,981	0,608	1,645	0,748	1,338
$\alpha_7$	0,958	1,044	0,771	1,297	0,672	1,487	0,602	1,660
$\alpha_8$	<b>1,286</b>	0,778	0,678	1,475	0,644	1,552	0,560	1,785
$\alpha_Q$	<b>1,225</b>	0,816	0,781	1,281	0,611	1,636	0,635	1,574

$\alpha_q$	<b>1,206</b>	0,829	0,774	1,291	0,608	1,644	0,632	1,582
$\alpha_a$	<b>1,187</b>	0,842	0,768	1,302	0,605	1,653	0,629	1,589
$\alpha_g$	<b>1,169</b>	0,856	0,761	1,314	0,602	1,661	0,626	1,597
$\alpha_h$	<b>1,150</b>	0,869	0,755	1,325	0,599	1,669	0,623	1,605
В. За перетворенням Фішера та добутком ( $z_T \cdot \sigma_z$ )								
$M_1$	<b>2,013</b>	0,497	<b>1,008</b>	0,993	0,294	3,403	<b>1,107</b>	0,903
$M_2$	<b>1,575</b>	0,635	<b>1,337</b>	0,748	0,919	1,088	<b>1,756</b>	0,569
$M_3$	<b>1,370</b>	0,730	<b>1,207</b>	0,828	0,831	1,204	<b>1,639</b>	0,610
$M_4$	0,813	1,231	0,763	1,311	<b>1,770</b>	0,565	0,805	1,242
$M_5$	0,935	1,069	0,829	1,206	<b>1,244</b>	0,804	0,859	1,164
$M_6$	0,642	1,558	0,675	1,482	<b>1,458</b>	0,686	0,704	1,421
$M_7$	0,759	1,317	0,609	1,643	<b>1,359</b>	0,736	0,658	1,521
$\alpha_1$	<b>1,094</b>	0,915	0,804	1,243	0,654	1,529	0,701	1,426
$\alpha_2$	<b>1,320</b>	0,758	0,877	1,141	0,555	1,802	0,745	1,343
$\alpha_3$	0,826	1,210	0,709	1,410	0,604	1,656	0,618	1,618
$\alpha_4$	<b>1,006</b>	0,995	0,638	1,567	0,583	1,715	0,580	1,726
$\alpha_5$	<b>1,354</b>	0,738	0,927	1,079	0,783	1,278	0,741	1,350
$\alpha_6$	<b>1,778</b>	0,563	<b>1,020</b>	0,980	0,656	1,524	0,788	1,269
$\alpha_7$	0,971	1,030	0,809	1,236	0,718	1,393	0,651	1,537
$\alpha_8$	<b>1,219</b>	0,820	0,723	1,383	0,691	1,446	0,609	1,642
$\alpha_Q$	<b>1,176</b>	0,850	0,818	1,222	0,659	1,517	0,683	1,465
$\alpha_q$	<b>1,162</b>	0,860	0,812	1,231	0,656	1,524	0,680	1,471
$\alpha_a$	<b>1,149</b>	0,870	0,806	1,240	0,653	1,531	0,677	1,478
$\alpha_g$	<b>1,135</b>	0,881	0,800	1,250	0,650	1,538	0,674	1,484
$\alpha_h$	<b>1,122</b>	0,892	0,794	1,259	0,647	1,545	0,671	1,491

При оцінці (табл. 7) щільності кореляційних зв'язків між інтенсивністю зношування композиту ( $I_j$ ) та частинними параметрами широкосмугаєстості спектрів ( $\alpha_k$ ) 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  $\alpha$  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  $\alpha$  [необхідність розрахунку  $\alpha$  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. 7**, 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. Знайдено, що зміни моменту нульового порядку СЩ** шорстких поверхонь пари сталь – карбопластик на основі ароматичного поліаміду та вуглецевих волокон у процесі динамічного контакту залежать від типу та властивостей вуглецевих волокон, а саме від природи вихідного органічного волокнистого матеріалу, його температури кінцевої термообробки, від міцності та модуля пружності вуглецевого волокна, типу покриття поверхні вуглецевого волокна тощо.

**4. 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 поверхні 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 фактором у визначенні величини зносу карбопластиків не тільки на початку тертя (тобто пов'язане з параметрами вихідної поверхні), але і в процесі тертя, коли спряжена поверхня твориться самим композитом.

**5. Кореляційний аналіз залежностей інтенсивності зношування** полімерного композиту флубон-15(20) від моментів СЩ нульового, другого і четвертого порядків ізотропної спряженої металевої поверхні дозволив виявити такі закономірності: 1) із збільшенням тривалості динамічного контакту домінування вихідного моменту нульового порядку змінюється на вихідні моменти другого, а потім четвертого порядку, тобто кривини визначають зношування полімерних композитів під час довготривалого динамічного контакту; 2) для моментів, що визначені перед певним етапом випробувань, моменти нульового порядку з часом контактування поступають почергово змінюючому лідерству другого та четвертого порядків; 3) післядія параметрів шорсткості поверхонь, що утворилася після динамічного контакту 0, 50, 100, ..., 900 км на інтенсивність зношування за 900-1000 км виражена почергово через моменти СЩ (частіше) четвертого, ніж другого чи (ще менше) нульового порядків, а самі процеси тертя та зношування визначають величину моментів СЩ нульового порядку на початку динамічного контакту і четвертого порядку під час довготривалого контакту.

**6. 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).

### Література

1. Ю.В. Ашкерев, Ю.В. Заикин, А.Ю. Паплев, Трение и износ, 5 (1), 651 (1984).
2. Н.В. Балабанова, С.А. Чижик, З. Римуза, Трение и износ, 27 (5), 514 (2006).
3. Н.К. Бачинская, Исследования контактных характеристик шероховатых, сильно анизотропных поверхностей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 (Хмельницкий, 1994).
4. А. Бенгтссон, А. Ренберг, Трение и износ, 7 (1), 27 (1986).
5. Э.А. Буланов, Трение и износ, 27 (2), 132 (2006).
6. А.И. Буря, А.Д. Деркач, В.И. Шемавнев, Трение и износ, 27 (1), 98 (2006).
7. В.А. Валетов, Труды ЛКИ «Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении» (Ленинград), 19 (1978).
8. Н.Б. Демкин, Трение и износ, 3 (4), 586 (1982).
9. Н.Б. Демкин, С.В. Удалов, В.А. Алексеев, В.В. Измайлов, А.Н. Болотов, Трение и износ, 29 (3), 231 (2008).
10. М.Н. Добычин, Трение и износ, 1 (2), 341 (1980).
11. И.В. Крагельский, В.В. Алексин, В.С. Колбанов и др., Характеристики взаимодействия в микрогеометрии, определяющие контактное взаимодействие шероховатых поверхностей (ИМАШ, Москва, 1973).
12. И.В. Крагельский, Трение и износ, 1 (1), 12 (1980).
13. И.И. Кудиш, Трение и износ, 12 (2), 197 (1991).
14. В.Б. Лемберский, Трение и износ, 4 (2), 301 (1983).
15. Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец, С.А. Чижик, В.В. Кончиц, А.И. Свириденко, Трение и износ, 4 (5), 845 (1983).
16. Л.Ю. Пружанский, Трение и износ, 4 (5), 801 (1983).
17. А.И. Свириденко, Т.Ф. Калмыкова, Трение и износ, 1 (5), 898 (1980).
18. И.О. Сивак, В.В. Савуляк, С.И. Сухоруков, Е.И. Сивак, The Bulletin of Politechnic Institute of Jassi. XLVIII (LI), 3-4, 165 (2002).

19. Г.А. Сиренко, Н.Ф. Семенюк, 3 Всесою. совещания по уплотнительной технике (ВНИИкомпрессормаш, Сумы, 1982), с. 46.
20. В.Т.Фонотов, И.А. Вяткин, Ю.В. Волков, Проблемы трения и изнашивания, (4), 66 (1973).
21. Я. Цуан, С.А. Чижик, Ю.М. Плескачевский, А.Л. Зайцев, Трение и износ, 28 (1), 77 (2007).
22. И.Х. Чеповецкий, В.И. Левитас, С.А. Ющенко, Трение и износ, 7 (5), 841 (1986).
23. И.Х. Чеповецкий, В.Л. Стрижаков, Трение и износ, 2 (5), 928 (1981).
24. А.А. Чернов, БСЭ, (13), 435 (1973).
25. В.М. Шавелин, А.С. Щеглов, Трение и износ, 7 (1), 148 (1986).
26. И.Б. Шендеров, А.С. Духанин, В.А. Калинов, Трение и износ, 10 (2), 313 (1989).
27. В.Г. Щербинский, Трение и износ, 12 (6), 1133 (1991).
28. М.О. Якобсон, Качество поверхности деталей машин, (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. Н.Ф. Семенюк, Н.К. Бачинская, Проблемы трибологии, (3), 103 (1998).
43. Н.Ф. Семенюк, Трение и износ, 7 (6), 1017 (1986).
44. Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко, Трение и износ, 1(3), 465 (1980).
45. Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко, Трение и износ, 1(5), 815 (1980).
46. М.Ф. Семенюк, Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 12 (1), 200 (2011).
47. М.Ф. Семенюк, Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (IX), 62 (2010).
48. Н.Ф. Семенюк, К.С. Соколан, Проблеми трибології, 2 (2000).
49. Н.Ф. Семенюк, Трение и износ, 7(5), 830 (1986).
50. Н.Ф. Семенюк, Трение и износ, 7(1), 85 (1986).
51. Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая, Проблемы трибологии, (1), 83 (1998).
52. Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая, Проблемы трибологии, (1), 90 (1998).
53. Г.О. Сиренко, О.В. Кузишин, Л.Я. Мідак, Четверта міжнародна науково-практична конференція «Розвиток наукових досліджень 2008» (ІнтерГрафіка, Полтава, 2008), с. 38.
54. Г.О. Сиренко, М.Ф. Семенюк, I Міжнарод. симпозиум “Фізико-хімічна механіка композиційних матеріалів” (Івано-Франківськ, 1993), с. 53.
55. Г.О. Сиренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (X), 123 (2010).
56. Г.О. Сиренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 11(4), 914 (2010).
57. Г.О. Сиренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 11(3), 768 (2010).
58. Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 11(2), 423 (2010).
59. Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (VII), 104 (2009).
60. А.П. Хусу, Ю.Р. Виттенберг, В.А. Пальмов, Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход (Наука, Москва, 1975).
61. М.И. Ядренко, Спектральная теория случайных полей (Вища шк., Киев, 1980).
62. П.Р. Найяк, Проблемы трения и смазки, 93 (Ser. F, 3), 85 (1971).
63. И.Я. Штаерман, Контактная задача теории упругости (Гостехиздат, Москва-Ленинград, 1949).
64. M.G. Cooper, B.V. 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. С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина, Введение в теорию трения полимеров (Зинатне, Рига, 1978).
69. С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина, Механика полимеров, (2), 241 (1977).
70. С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина, Механика полимеров, (4), 651 (1977).
71. Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 14 (3), 636 (2013).
72. Н.Ф. Семенюк, Т.Ф. Калмыкова, Трение и износ, 4 (3), 467 (1983).
73. М.С. Лонге-Хиггинс, Статистическая геометрия случайных поверхностей (Мир, Москва, 1964).

74. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы. Изд. 4-е (Наука, Москва, 1978).
75. Г.А. Сиренко, Антифрикционные карбопластики (Техніка, Киев, 1985).
76. Г.А. Сиренко, В.П. Свидерский, В.Д. Герасимов, В.З. Никинов, Антифрикционные термостойкие полимеры (Техніка, Киев, 1978).
77. Г.О. Сіренко, Створення антифрикційних матеріалів на основі порошків термотривких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. ... докт. техн. наук (Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ, Київ, 1997).
78. Л.Б. Соколов, В.Д. Герасимов, В.М. Савинов, В.К. Беляков, Термостойкие ароматические полиамиды (Химия, Москва, 1975).
79. Ю.А. Паншин, С.Г. Малкевич, Ц.С. Дунаевская, Фторопласты (Химия, Ленинград, 1978).
80. П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм, Таблицы по математической статистике (Финансы и статистика, Москва, 1982).
81. Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, М.Ф. Семенюк, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (XII), 133 (2011).
82. М.Н. Степнов, Статистическая обработка результатов механических испытаний (Машиностроение, Москва, 1972).
83. Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (VIII), 99 (2009).
84. M.S. Longuet-Higgins, Philos. Trans. of the Royal Soc., 249 (A), 321 (1957).
85. М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 12 (3), 795 (2011).
86. М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (IX), 62 (2010).
87. Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко, Трение и износ, 1(6), 1010 (1980).

**Сіренко Геннадій Олександрович** – доктор технічних наук, професор, академік Академії технологічних наук України, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії.

**Солтис Любов Михайлівна** – кандидат хімічних наук, член-кореспондент Академії технологічних наук України, викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії.