

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, М.Б. Складанюк

## Кореляційний зв'язок між ефектами післядії за шорсткістю поверхонь металевого контртіла та карбопластика

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна  
Тел. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: [orijant@gmail.com](mailto:orijant@gmail.com)

Досліджено закономірності зміни ізотропної 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 між величинами ефектів післядії за шорсткістю металевого контртіла та полімерного композиту в процесі тертя та зношування існує надійний лінійний зв'язок.

**Ключові слова:** шорсткість, інтенсивність зношування, ізотропна поверхня, тертя, композиційний полімерний матеріал, моменти спектральної щільності.

Стаття постуила до редакції 15.01.2015; прийнята до друку 15.03.2015.

### 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 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.

### І. Теоретична частина

**1.1. Автокореляційна функція анізотропної шорсткої поверхні.** Нехай анізотропна шорстка поверхня описана рівнянням  $z = z(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ , де  $\mathbf{z}$  – випадкова функція для двох змінних  $\mathbf{x}$  і  $\mathbf{y}$  (випадкове поле), а  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$  – 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  $\mathbf{z}$ , яка описує таку шорстку статистично однорідну анізотропну поверхню, має автокореляційну функцію  $\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  і допускає її спектральний розклад Фур'є  $\Phi(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y)$  на гармонічні компоненти, де  $\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y$  – компоненти хвильового вектора  $\bar{\mathbf{k}}$ , модуль якого дорівнює  $|\bar{\mathbf{k}}| = 2\pi/\lambda$  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  $\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  [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  $\Phi(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y)$  [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  $\mathbf{R}(\mathbf{0}, \mathbf{0}) = \sigma^2$ , де  $\sigma^2$  – дисперсія, а  $\sigma$  – 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  $\Phi(\mathbf{k}_x, \mathbf{k}_y)$  визначає той внесок у величину дисперсії  $\sigma^2$ , який додає різні спектральні компоненти, що відповідають хвилям з хвильовим числом  $\mathbf{k}$  і довжинами [84]:  $\lambda = 2\pi/|\mathbf{k}|$  та напрямками [62]:  $\theta = \arctg(k_x/k_y)$ . Для ізотропних поверхонь функція  $\Phi$  залежить тільки від змінної  $\mathbf{k} \equiv |\mathbf{k}|$ . 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  $\text{Re}$  – дійсна частина числа. Згідно (5) маємо:  $m_{00} = \sigma^2$ .

## II. Експериментальна частина

### 2.1. Матеріали досліджень.

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

криттями (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.

### 2.2. 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.

**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  $KBP = 0,21$ . 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. 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]:

$$D_{zero,q} = \frac{1}{p} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}; \quad (6)$$

$$D_{extr,q} = \frac{1}{p} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}, \quad (7)$$

де індекс «0» 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 (6) та  $m_4$  за (7), підраховавши кількість «нулів» та «екстремумів» на одиницю базової довжини профілограми [62, 84]:

$$m_2 = p^2 s^2 (D_{zero,q})^2 = p^2 m_0 (D_{zero,q})^2; \quad (8)$$

$$m_4 = p^4 s^2 (D_{zero,q})^2 (D_{extr,q})^2 = p^4 m_0 (D_{zero,q})^2 (D_{extr,q})^2. \quad (9)$$

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

$$\alpha = \frac{m_0 m_4}{m_2^2} = \left( \frac{D_{extr,\theta}}{D_{zero,\theta}} \right)^2, \quad 1,5 \leq \alpha < +\infty. \quad (10)$$

Оцінку середнього квадратичного значення ширини спектру зробимо за виразом:

$$\Lambda = 1 - \frac{1}{a} = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4}. \quad (11)$$

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

$$D_{peak,q} = \frac{1}{2p} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}. \quad (12)$$

За (8), (9) отримаємо:

$$D_{peak,q} = \frac{1}{2} D_{extr,q}. \quad (13)$$

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

$$D_{sum} = \frac{1}{6p\sqrt{3}} \left( \frac{m_4}{m_2} \right), \quad (14)$$

тоді, порівнюючи (12) з (14), отримаємо співвідношення між щільностями вершин поверхні  $D_{sum}$  та її профілограми  $D_{peak}$ :

$$D_{sum} = \frac{2p \cdot D_{peak}^2}{3\sqrt{3}} \approx 1,2092 D_{peak}^2 = \frac{p \cdot D_{extr}^2}{6\sqrt{3}} \approx 0,3023 \cdot D_{extr}^2. \quad (15)$$

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:

$$m_{nq_i} = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{q_i}(k') (k')^n dk'. \quad (16)$$

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

$$m_{nq_i} = m_{n0} \cos^n q_i + C_1^n m_{n-1,1} \cos^{n-1} q_i \sin q_i + C_2^n m_{n-2,2} \cos^{n-2} q_i \sin^2 q_i + \dots + m_{0n} \sin^n q_i, \quad (17)$$

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

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  $\mathbf{n}$  співвідношень (17):

• для моменту нульового порядку –  $\mathbf{n}$  співвідношень виду:

$$m_{0q_i} = m_{00}, \quad \text{де } i = 1, \dots, n; \quad (18)$$

• для моментів другого порядку –  $\mathbf{n}$  співвідношень виду:

$$m_{2q_i} = m_{20} \cos^2 q_i + 2m_{11} \cos q_i \sin q_i + m_{02} \sin^2 q_i, \quad (19)$$

де  $i = 1, \dots, n$ , причому будь-які три із  $\mathbf{n}$  рівнянь (19) лінійно незалежні;

• для моментів четвертого порядку –  $\mathbf{n}$  співвідношень виду:

$$m_{4q_i} = m_{40} \cos^4 q_i + 4m_{31} \cos^3 q_i \sin q_i + 6m_{22} \cos^2 q_i \sin^2 q_i + 4m_{13} \cos q_i \sin^3 q_i + m_{04} \sin^4 q_i, \quad (20)$$

де  $i = 1, \dots, n$ , причому будь-які п'ять із  $\mathbf{n}$  рівнянь (20) 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  $m_{0q_i}, m_{2q_i}, m_{4q_i}$  і, застосовуючи метод найменших квадратів (МНК) для обробки інформації, отримуємо формулу:

$$m_{00} = \frac{1}{5} (m_{0,0^\circ} + m_{0,30^\circ} + m_{0,45^\circ} + m_{0,60^\circ} + m_{0,90^\circ}). \quad (21)$$

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

$$m_{00} = s^2 = \frac{1}{n} \frac{p}{2} \sum_{i=1}^n R_{aq_i}^2; \quad (22)$$

$$m_{2q_i} = m_{00} (p D_{0,q_i})^2; \quad (23)$$

$$m_{4q_i} = m_{00} (p^2 D_{0,q_i} D_{extr,q_i})^2, \quad (24)$$

що дозволяє розрахувати моменти СЩ поверхні.

**4. 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.

**5. Профілограми мікросорсткості 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  $Ra$ , щільність нулів  $D_0$  і щільність екстремумів  $D_{extr}$ . Виміряна  $Ra$  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 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

#### 1. 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  $CH_4$ , 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  $N_2$ , 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

Таблиця 1

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	сталі 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

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

2. 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 ( $\sqrt{m_0})_в$  та поверхнею, що утворилася внаслідок процесів тертя та зношування ( $\sqrt{m_0})_т$ , 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  $\xi_2(r) = r_{кр}/|r_{3,4}| = 0,640$ ;

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  $[(\Delta\sqrt{m_0})_в-(\Delta\sqrt{m_0})_Т]_{п_к}$  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  $\xi_2(r)=0,912$ .

3. За результатами табл. 1 розраховані величини ефектів післядії за шорсткістю поверхонь для контртіла та карбопластика для ізотропної моделі:

$$x_j(\sqrt{m_0}, S) = \frac{(\sqrt{m_0})_S}{(\sqrt{m_0})_0}, \quad (25)$$

де  $j=1$  (контртіло),  $2$  (карбопластик);  $m_0$  – спектральний момент шорсткості поверхні нульового порядку для вихідної поверхні до тертя та зношування  $S=0$  км (0) та після  $S=150$  км тертя та зношування (S).

Результати розрахунків зведені в табл. 2. Між ефектами післядії за шорсткістю поверхонь контртіла  $\xi_1(x_i)$  та карбопластика  $\xi_2(y_i)$  для  $N=21$  типу волокна

спостерігається надійний лінійний кореляційний зв'язок з рівнем значущості  $\alpha_1=0,05$  та  $\alpha_2=0,01$ : вибірковий коефіцієнт кореляції [82] дорівнює  $r_p=-0,7986$ , де знак мінус свідчить про те, що із зростанням величини ефекту післядії для поверхні металевого контртіла за шорсткістю ефект післядії суміжної з ним поверхні карбопластика під час тертя та зношування зменшується.

1) Ступінь лінійності зв'язку за критичним коефіцієнтом кореляції:

а) для рівня значущості  $\alpha=0,05$  за критичним коефіцієнтом кореляції:

$r_{кр}\{q=1-(\alpha/2)=0,975; f=N-2=19\}=0,4329$  [80], (26) де  $f$  – число ступенів вільностей, дорівнює:

$$\xi_2(r) = \frac{|r_p|}{r_{кр}} = 1,845 \quad (27)$$

із залишками нелінійності кореляційного зв'язку за ступенем:

$$\xi_1(r) = \frac{r_{кр}}{|r_p|} = 0,542; \quad (28)$$

б) для рівня значущості  $\alpha=0,01$  за критичним коефіцієнтом кореляції:

$r_{кр}\{q=1-(\alpha/2)=0,995; f=N-2=19\}=0,5487$  [80], (29) дорівнює:

$$\xi_2(r) = \frac{|r_p|}{r_{кр}} = 1,455 \quad (30)$$

із залишками нелінійності кореляційного зв'язку за ступенем:

$$\xi_1(r) = \frac{r_{кр}}{|r_p|} = 0,687. \quad (31)$$

2) Ступінь лінійності кореляційного зв'язку за критерієм Стьюдента та статистикою [82]:

$$|t_p| = \frac{r_p \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r_p^2}} = 5,7838; \quad (32)$$

а) для рівня значущості  $\alpha=0,05$  за теоретичним значенням критерію Стьюдента:

$t_T\{q=1-(\alpha/2)=0,975; f=N-2=19\}=2,093$  [80], (33) дорівнює:

$$\xi_2(t) = \frac{|t_p|}{t_T} = 2,763 \quad (34)$$

із залишками нелінійності кореляційного зв'язку за ступенем:

$$\xi_1(t) = \frac{t_T}{|t_p|} = 0,362; \quad (35)$$

б) для рівня значущості  $\alpha=0,01$  за теоретичним значенням критерію Стьюдента:

$t_T\{q=1-(\alpha/2)=0,995; f=N-2=19\}=2,861$  [80], (36) дорівнює:

$$\xi_2(t) = \frac{|t_p|}{t_T} = 2,022 \quad (37)$$

із залишками нелінійності кореляційного зв'язку за

Таблиця 2

Ефекти післядії за ізотропною шорсткістю поверхні (спектральний момент нульового порядку) контртіла із сталі 45 та карбопластика графелон-20 на основі ароматичного поліаміду та вуглецевих волокон

Вуглецеве волокно				Ефект післядії	
марка	вихідне органічне волокно	T <sub>к</sub> , К	тип вуглецевого волокна	контртіло сталь 45	карбопластик
				$x_1(\sqrt{m_0}, S)(x_i)$	$x_2(\sqrt{m_0}, S)(y_i)$
УТ-4	ГЦ	723	LM	0,550	4,087
УТМ-8	ГЦ	1123	LM	0,958	2,222
ТГН-2м	ГЦ	2673	LM	1,294	3,632
ТМП-3 (Пк: 12% піровуглецю)	ГЦ	2673	LM	0,580	4,605
ТКК-1 (Пк: 0,2-3,0% SiC)	ГЦ	2673	LM	0,528	4,381
ТКЦ-1 (Пк: 0,8-4,0% ZrC)	ГЦ	2673	LM	0,514	4,250
ТГН-Т850	ГЦ	1123	LM	1,134	3,897
ТГН-Т1200	ГЦ	1473	LM	1,083	3,409
ТГН-Т1350	ГЦ	1623	LM	0,798	2,500
ТГН-Т1600	ГЦ	1873	LM	0,772	1,956
ТГН-Т2000	ГЦ	2273	LM	1,225	3,125
ТГН-Т2300	ГЦ	2573	LM	1,304	3,846
ТГН-Т2400	ГЦ	2673	LM	1,290	3,825
«Мтілон»	ПАН+ГЦ	2873	LM-LT	0,644	5,479
«ГПП»	ПАН	2873	LM-LT	0,591	5,122
ЛУ-2	ПАН	2673	НТ	0,167	20,896
ВМН-4	ПАН	2673	НМ	0,203	19,313
ВМН-4Ф (Пк: 10% F)	ПАН	2673	НМ	0,175	19,468
DEA	ПАН	2073	НТ	0,212	17,686
«Евлан»	ПАН	2673	МТ	0,183	20,894
«Сатурн»	ПАН	2673	НМ-НТ	0,162	20,792

ступенем:

$$\xi_1(t) = \frac{t_T}{|t_p|} = 0,495. \quad (38)$$

**3) Ступінь лінійності кореляційного зв'язку за z-перетворенням Фішера [82]:**

$$z_p = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r_p}{1-r_p} = 1,0947: \quad (39)$$

а) для рівня значущості  $\alpha=0,05$  за добутком  $(\sigma_z \cdot z_T)=0,4620$ ,

де 
$$s_z = \frac{1}{\sqrt{N-3}} = 0,2357 \quad (40)$$

– середнє квадратичне відхилення z [82],  
 $z_T$  ( $q=1-\alpha/2=0,975$ )=1,96 [80] – квантиль нормованого нормального розподілу Гавса,  
**дорівнює:**

$$\xi_2(z) = \frac{|z_p|}{(s_z \cdot z_T)} = 2,370 \quad (41)$$

із залишками нелінійності кореляційного зв'язку за ступенем:

$$\xi_1(z) = \frac{(S_z \cdot z_T)}{|z_p|} = 0,422; \quad (42)$$

б) для рівня значущості  $\alpha=0,01$  за добутокком  $(\sigma_z \cdot z_T)=0,6081$  (де  $\sigma_z=0,2357$ ;  $z_T=2,58$  [80]), дорівнює:

$$\xi_2(z) = \frac{|z_p|}{(S_z \cdot z_T)} = 1,800 \quad (43)$$

із залишками нелінійності кореляційного зв'язку за ступенем:

$$\xi_1(z) = \frac{(S_z \cdot z_T)}{|z_p|} = 0,556. \quad (44)$$

## Висновки

**1. 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, операції видалення з поверхні волокна продуктів піролізу та залишків антипиренів, що не прореагували з карбоном вуглецевого волокна тощо.

**2. Між ефектами післядії за шорсткістю** поверхні металевого контртіла та суміжної із нею поверхні полімерного композиту на основі ароматичного поліаміду та вуглецевих волокон існує надійний кореляційний лінійний зв'язок, при цьому із зростанням величини ефекту післядії для контртіла величина ефекту післядії суміжної з ним поверхні полімерного композиту зменшується під час тертя та зношування.

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

**Солтис Л.М.** – член-кореспондент АТНУ, кандидат хімічних наук, викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії;

**Складанюк М.Б.** – провідний інженер кафедри неорганічної та фізичної хімії.

- [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. Колебанов 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 (ВНИИкомпрес-сормаш, 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. Stopura, 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. Сіренко, *Трение и износ*, 1(3), 465 (1980).
- [45] Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сіренко, *Трение и износ*, 1(5), 815 (1980).
- [46] М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, *Фізика і хімія твердого тіла*, 12 (1), 200 (2011).
- [47] М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, 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. Сіренко, О.В. Кузишин, Л.Я. Мідак, Четверта міжнародна науково-практична конференція «Розвиток наукових досліджень 2008» (ІнтерГрафіка, Полтава, 2008), с. 38.
- [54] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, I Міжнарод. симпозіум “Фізико-хімічна механіка композиційних матеріалів” (Івано-Франківськ, 1993), с. 53.
- [55] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис, *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія*, (X), 123 (2010).
- [56] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис, *Фізика і хімія твердого тіла*, 11(4), 914 (2010).
- [57] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис, *Фізика і хімія твердого тіла*, 11(3), 768 (2010).
- [58] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, *Фізика і хімія твердого тіла*, 11(2), 423 (2010).
- [59] Г.О. Сіренко, 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. Сіренко, 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. Сіренко, *Антифрикционные карбопластики* (Техніка, Киев, 1985).
- [76] Г.А. Сіренко, В.П. Свицерский, 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).

H.O. Sirenko, L.M. Soltys, M.B. Skladanyuk

## **Correlation Between Aftereffects for Roughness of Surfaces of Metal Counterface and Carbon-Plastics**

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,  
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine  
Tel. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: [orijant@gmail.com](mailto:orijant@gmail.com)*

Regularities of change of isotropic 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 between aftereffects values for roughness of metal counterface and polymer composite in friction and wear exists reliable linear relationship.

**Keywords:** roughness, intensity of wear, isotropic surface, friction, composite polymer material, moments of spectral density.