

Л.М. Солтис, Г.О. Сіренко

## Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя та зношування по шорсткій ізотропній металевій поверхні без мащення та в середовищі дистильованої води

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: [sirenkog@rambler.ru](mailto:sirenkog@rambler.ru)

Досліджено інтенсивність зношування полімерного композитного матеріалу на основі політетрафторетилену та вуглецевого волокна під час тертя по шорсткій ізотропній металевій поверхні без мащення та в середовищі дистильованої води. Знайдено апроксимаційні рівняння, які відбивають залежність інтенсивності зношування полімерного композиту з моментами спектральної щільності шорсткої поверхні, змодельованої ізотропним випадковим полем.

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

Стаття поступила до редакції 18.02.2011; прийнята до друку 15.03.2011.

### Вступ

Відомо [1–17], що трибоповерхневі властивості композитних полімерних матеріалів під час тертя та зношування по металевих контртілах визначаються параметрами шорсткої поверхні, величиною навантаження, швидкістю ковзання, температурою поверхонь тертя, середовищем, в якому відбувається динамічний контакт тощо.

Відомо, також [17–40], що найкращий математичний опис шорсткості поверхні виконаний за допомогою теорії випадкового поля.

Завдання дослідження: знайти за методом Брандона апроксимаційні рівняння інтенсивності зношування полімерного композиту з моментами спектральної щільності (СЩ) шорсткої ізотропної поверхні, а також проаналізувати результати та встановити мінорантні ряди впливу моментів спектральної щільності на інтенсивність зношування полімерного композиту на основі політетрафторетилену та вуглецевого волокна.

### I. Експериментальна частина

**1. Матеріали зразків.** Досліджували зносостійкість композитного матеріалу – карбопластика [41–43] на основі ПТФЕ, наповненого 20% карбонізованого низькомодульного (LM) вуглецевого волокна УТМ-8, отриманого з гідратцелюлозного волокна (при термообробці за температури 1123 К в середовищі  $\text{CN}_4$

в присутності антипіренів  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  та  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  під час тертя та зношування без мащення та в дистильованій воді на трибометрі ХТІ-72 за схемами [I-1] та [II-2] відповідно [43].

**2. Фрикційні випробування без мащення.** Зносостійкість композитного матеріалу під час тертя та зношування без мащення досліджували за схемою [I-1] [43]: торець пальчика діаметром  $10 \pm 0,05$  мм і висотою  $15 \pm 0,1$  мм – площа 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, через порожнину проходила вода, завдяки якій підтримувався заданий тепловий режим поверхні тертя; вуглецева сталь 45 термооброблена (НВ 4,6 ГПа) з начальним середнім арифметичним відхиленням профілю поверхні  $Ra_0 = 0,22 \pm 0,02$  мкм; питоме навантаження  $p = 3$  МПа ( $N_f = 235,62$  Н); швидкість ковзання  $v = 1,1$  м/с; температура  $T = 373 \pm 2$  К, що була визначена термopарою ХК на відстані  $1 \pm 0,05$  мм від поверхні сталі 45, а величини (в mV) записувались на стрічку потенціометра КСП-4.

Знос полімерних зразків визначали за зміною їх висоти  $\Delta h$  до і після кожного етапу зношування, вимірюючи висоту зразка разом із гніздовою головкою після 1 год. релаксації при кімнатній температурі на вертикальному оптиметрі з точністю  $\pm 0,5$  мкм. За лінійним зносом  $\Delta h$  [мм] розраховували об'ємний знос  $\Delta V$  [мм<sup>3</sup>], за яким розраховували об'ємну інтенсивність зношування:

$$J_i = \frac{\Delta V_i}{S} \left[ \frac{\text{мм}^3}{\text{м}} \right],$$

де  $S$  – шлях тертя [м], а потім об'ємну питому інтенсивність зношування:

$$J = \frac{\Delta V_i}{N_i \cdot S} = \frac{\Delta V}{N \cdot S} \left[ \frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{м}} \right],$$

де  $\Delta V_i$ ,  $\Delta V$  – об'ємний знос [мм<sup>3</sup>] одного або трьох зразків відповідно;

$N_i$ ,  $N$  – нормальне навантаження [Н] на один ( $N_i$ ) або три ( $N$ ) зразки відповідно.

**3. Фрикційні випробування в середовищі дистильованої води.** Зносостійкість композитного матеріалу під час тертя та зношування в дистильованій воді досліджували за схемою [П-2] [43]: сферична кінцівка (радіусом 6,35 мм) пальчика діаметром  $10 \pm 0,05$  мм і висотою  $15 \pm 0,1$  мм ковзала по площині металевого контртіла; при нормальному навантаженні на один зразок  $N_i=100$  Н та  $N_\Sigma=300$  Н на три зразка; швидкість ковзання  $v=0,3$  м/с; температура металевих поверхонь  $T=313 \pm 1$  К; металеві контртіла з вуглецевої сталі 45 (НВ 4,6 ГПа;  $Ra_0=0,23$  мкм); вуглецевої сталі У-8 (НВ 1,8 ГПа;  $Ra_0=0,25$  мкм); міді електролітичної М-1 (НВ 0,66 ГПа;  $Ra_0=0,30$  мкм) та бронзи Бр. ОФ 6,5-0,15 (НВ 0,86 ГПа;  $Ra_0=0,28$  мкм); контртіла були виконані у вигляді суцільного тіла діаметром  $60 \pm 0,15$  мм і товщиною  $10 \pm 0,15$  мм, які були покладені в гніздо порожнистого тіла діаметром  $60 \pm 0,15$  мм, висотою  $35 \pm 0,20$  мм, через яке пропускали технічну воду; металеве контртіло знаходилося в чашці, через яку пропускалася протічна дистильована вода; дослід проводився в 2 етапи: в режимі надграничного навантаження ( $p \approx \text{НВ}_y$ ), шлях тертя  $S_1=0-2$  км, інтенсивність об'ємного зношування ( $J_1$  [мм<sup>3</sup>/Н·м]) та в режимі граничного навантаження, коли питома навантаження приблизно дорівнювало міцності при стиску,  $S_2=2-18$  км ( $J_2$  [мм<sup>3</sup>/Н·м]); сталий тепловий режим поверхні тертя підтримували протічною технічною та робочою дистильованою водою.

Величину об'ємного зносу  $i$ , відповідно, об'ємну питому інтенсивність зношування, розраховували за діаметрами (мм) плями зносу, виміряного на зразках (без розбирання головки) на оптичному мікроскопі з поділками.

**4. Металеві контртіла та полімерні зразки** шліфували на наждачній шкурці у довільних напрямках, далі припрацьовували зразки до  $\sim 100\%$  контакту та знову металеві поверхні шліфували.

Профілограми знімали за допомогою профілометра-профілографа ВЭИ «Калибр». Знімали 50-60 базових довжин профілограми під кутом  $45^\circ$  до напрямку ковзання поверхні сталі 45.

Шорсткість поверхні оцінювали за методикою [44, 45] за моментами спектральної щільності (СПЩ): нульового порядку  $m_0$ , пов'язаного з висотним параметром; другого порядку  $m_2$ , пов'язаного з градієнтом поверхні; четвертого порядку  $m_4$ , пов'язаного з кривиною висот вершин ізотропної поверхні. Розрахункові формули для параметрів шорсткості поверхонь взяті з [19, 23, 24, 38-40].

## II. Результати та обговорення

**II. 1. Властивості карбопластика під час тертя та зношування по шорсткій ізотропній поверхні сталі 45 без мащення при відносно середніх нормальних навантаженнях.**

**1. Дано оцінку внеску моментів СПЩ поверхні вуглецевої сталі 45 термообробленої (НВ 4,6 ГПа) в інтенсивність зношування карбопластика, пов'язавши рівнянням ці величини за методом Брандона [46] за процедурою [47-50].**

Рівняння регресії  $k$ -го порядку мало вигляд [47]:

$$y = a_0 f_1(x_1) f_2(x_2) \dots f_j(x_j) \dots f_k(x_k), \quad (1)$$

де  $f_j(x_j)$  – будь-яка функція величини  $x_j$ .

Точність обробки результатів експерименту залежала від місця  $x_j$  (функції  $f_j(x_j)$ ) у виразі (1): чим більший вплив  $x_j$  вносить в  $y$ , тим менший повинен бути порядковий номер індексу  $j$  [47].

Процедура розрахунків коефіцієнта  $a_0$  та коефіцієнтів функцій  $f_j(x_j)$  в рівнянні (1) виконана за методом Брандона [46, 47].

Вид функції  $f_j(x_j)$  визначали шляхом побудови емпіричних ліній регресії. Спочатку за експериментальними точками виборки величин  $y$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ , ...,  $x_j$ , ...,  $x_k$  будували поле кореляцій та емпіричну лінію регресії  $y \sim x_1$ . Таким чином визначали вигляд залежності:

$$\hat{y}_{x_1} = f_1(x_1) \quad (2)$$

та методом найменших квадратів (МНК) за [47-52] розраховували коефіцієнти цього рівняння.

Потім складали виборку нової величини:

$$y_1 = \frac{y}{f_1(x_1)}. \quad (3)$$

Нова величина  $y_1$  вже не залежала від  $x_1$ , а визначалася параметрами  $x_2, x_3, \dots, x_j, \dots, x_k$ , тому можна було записати рівняння:

$$\hat{y}_1 = a_0 f_2(x_2) f_3(x_3) \dots f_j(x_j) \dots f_k(x_k). \quad (4)$$

За точками нової виборки величин  $y_1$ ,  $x_2$  будували поле кореляцій та визначали вигляд залежності:

$$\hat{y}_{x_2} = f_2(x_2). \quad (5)$$

Далі розраховували коефіцієнти (5) та складали виборку нової величини:

$$y_2 = \frac{y_1}{f_2(x_2)} = \frac{y}{f_1(x_1) \cdot f_2(x_2)}. \quad (6)$$

Величина  $y_2$  вже не залежала від  $x_1$  та  $x_2$ , а визначалася параметрами  $x_3, x_4, \dots, x_j, \dots, x_k$ , тому можна було записати рівняння:

$$\hat{y}_2 = a_0 f_3(x_3) f_4(x_4) \dots f_j(x_j) \dots f_k(x_k). \quad (7)$$

Така процедура визначення функції  $f_3(x_3)$ ,  $f_4(x_4)$ , ...,  $f_j(x_j)$ , ...,  $f_k(x_k)$  продовжували до отримання виборки величини  $y_k$ :

$$y_k = \frac{y_{k-1}}{f_k(x_k)} = \frac{y}{f_1(x_1) f_2(x_2) \dots f_j(x_j) \dots f_k(x_k)}. \quad (8)$$

Величина  $y_k$  вже не залежала від  $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_k$  і визначала коефіцієнт  $a_0$  рівняння (1):

$$\hat{y}_k = a_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{ki}, \quad (9)$$

де  $N$  – обсяг виборки.

Місце моментів СЩ  $m_0, m_2, m_4$  в апроксимаційних рівняннях визначали за коефіцієнтами кореляцій між  $J_i$  та  $m_j$  [46, 47].

**2. Рівняння регресії 4-го порядку** для отриманих результатів має вигляд:

$$J = a_0 f_0(m_0) \cdot f_2(m_2) \cdot f_4(m_4). \quad (10)$$

Наприклад, для шляху тертя без мащення  $S_1=0\dots 50$  км за результатами експерименту процедура (1) ... (9) полягала в наступному:

**2.1. Будували поле кореляцій** залежності інтенсивності зношування  $J$  від нульового моменту спектральної щільності (СЩ) ( $m_0$ ).

Емпірична лінія регресії показала, що функцію  $f_0(m_0)$  доцільно шукати у вигляді параболи 2-го порядку:

$$f_0(m_0) = b_0 + b_1 m_0^{(0)} + b_{11} m_0^{(0)2}. \quad (11)$$

**2.2. Після визначення коефіцієнтів  $b_0, b_1, b_{11}$**  за МНК [47–52], отримали:

$$f_0(m_0) = 1,232 + 29,740 m_0^{(0)} + 4,533 b_{11} m_0^{(0)2}. \quad (12)$$

**2.3. Далі за (3)** розраховували виборку нової величини  $y_1$  та побудували поле кореляцій та емпіричну лінію регресії  $y_1 \sim m_2$ , для якої добрим наближенням є лінійна лінія регресії:

$$f_2(m_2) = b'_0 + b'_1 m_2^{(0)}. \quad (13)$$

**2.4. Після визначення коефіцієнтів  $b_0, b_1'$**  за МНК [47–52], отримали:

$$f_2(m_2) = 1,194 - 18,170 m_2^{(0)}. \quad (14)$$

**2.5. Аналогічно отримали:**

$$f_4(m_4) = 0,994 + 53,893 m_4^{(0)} \quad (15)$$

та коефіцієнт  $a_0 = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ .

У підсумку отримали рівняння (16).

**3. Рівняння зв'язку інтенсивності** зношування карбопластика під час тертя без мащення з моментами СЩ  $m_0, m_2, m_4$  вихідної поверхні сталі має такий вигляд (адекватність рівнянь визначали за критерієм Фішера з рівнем значущості 0,05):

**3.1. На шляху тертя  $S_1=0\dots 50$  км:**

$$J_1 = (1,232 + 29,74 m_0^{(0)} - 4,533 m_0^{(0)2}) \times (1,194 - 18,17 m_2^{(0)}) (0,994 + 53,893 m_4^{(0)}) \cdot 10^{-7} \quad (16)$$

$$(r_0 = 0,981; r_2 = 0,958; r_4 = 0,546).$$

За (16) розраховане значення інтенсивності зношування зразка карбопластика на шляху тертя  $S_1=0\dots 50$  км та вихідних значень моментів СЩ (для  $S_0=0$  км):  $m_0=5,336 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}^2$ ;  $m_2=3,492 \cdot 10^{-4}$ ;  $m_4=1,198 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}^2$ , становило:  $\hat{J}_1=3,3144 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ , а експериментальне –  $J_{1\text{екс.}}=3,60 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  [абсолютна похибка розрахунків за моделлю (16)  $\Delta_a=|J_{1\text{екс.}}-\hat{J}_1|=0,2856 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ; відносна похибка  $\Delta_\delta=|(J_{1\text{екс.}}-\hat{J}_1)/J_{1\text{екс.}}|=0,0793$  (або 7,93%)].

**3.2. На шляху тертя  $S_2=50\dots 100$  км:**

$$J_2 = (1,571 + 3,495 m_0^{(0)} - 0,497 m_0^{(0)2}) \times (0,996 + 0,203 m_2^{(0)}) (1,012 - 94,692 m_4^{(0)}) \cdot 10^{-7} \quad (17)$$

$$(r_0 = 0,983; r_2 = 0,930; r_4 = 0,578)$$

За (17) розраховане значення інтенсивності зношування зразка карбопластика на шляху тертя  $S_2=50\dots 100$  км та вихідних значень моментів СЩ (для  $S_0=0$  км) суміжної металевої поверхні:  $m_0=5,336 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}^2$ ;  $m_2=3,492 \cdot 10^{-4}$ ;  $m_4=1,198 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}^2$ , становило:  $\hat{J}_2=1,7682 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ , а експериментальне –  $J_{2\text{екс.}}=2,07 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  [ $\Delta_a=0,3018 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $\Delta_\delta=0,1458$  (або 14,58%)].

**3.3. На шляху тертя  $S_4=200\dots 300$  км:**

$$J_4 = (2,913 + 1,244 \cdot 10^2 m_2^{(0)} + 2,012 \cdot 10^3 m_2^{(0)2}) (0,999 + 1,121 \cdot 10^{-3} m_0^{(0)}) \times (1,007 - 58,403 m_4^{(0)}) \cdot 10^{-7} \quad (18)$$

$$(r_0 = 0,755; r_2 = 0,829; r_4 = 0,656).$$

За (18) розраховане значення інтенсивності зношування зразка карбопластика на шляху тертя  $S_4=200\dots 300$  км та вихідних значень моментів СЩ (для  $S_0=0$  км) суміжної металевої поверхні:  $m_0=5,336 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}^2$ ;  $m_2=3,492 \cdot 10^{-4}$ ;  $m_4=1,198 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}^2$ , становило:  $\hat{J}_4=2,9725 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ , а експериментальне –  $J_{4\text{екс.}}=3,83 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  [ $\Delta_a=0,8575 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $\Delta_\delta=0,2239$  (або 22,39%)].

**3.4. На шляху тертя  $S_5=300\dots 400$  км:**

$$J_4 = (1,33 + 4,945 \cdot 10^3 m_4^{(0)} + 2,343 \cdot 10^7 m_4^{(0)2}) (1,017 - 3,178 m_2^{(0)}) \times (1,021 - 2,42 m_0^{(0)}) \cdot 10^{-7} \quad (19)$$

$$(r_0 = 0,267; r_2 = 0,673; r_4 = 0,955).$$

За (19) розраховане значення інтенсивності зношування зразка карбопластика на шляху тертя  $S_5=300\dots 400$  км та вихідних значень моментів СЩ (для  $S_0=0$  км) суміжної металевої поверхні:  $m_0=5,336 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}^2$ ;  $m_2=3,492 \cdot 10^{-4}$ ;  $m_4=1,198 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}^2$ , становило:  $\hat{J}_5=1,2600 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ , а експериментальне –  $J_{5\text{екс.}}=1,63 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  [ $\Delta_a=0,3700 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $\Delta_\delta=0,2270$  (або 22,70%)].

У (16) – (19)  $J_1, J_2, J_4, J_5$  – інтенсивності зношування композиту на шляху тертя 0...50, 50...100, 200...300 та 300...400 км відповідно в  $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $m_0$  ( $\text{мкм}^2$ ),  $m_2$  (безрозмірна величина),  $m_4$  ( $\text{мкм}^2$ ) – моменти спектральної щільності вихідної поверхні сталі 45;  $r_0, r_2, r_4$  – коефіцієнти кореляцій інтенсивностей зношування композиту та моментів нульового, другого та четвертого порядків СЩ вихідної поверхні сталі відповідно.

Ці результати показують, що при збільшенні шляху тертя від 0 до 400 км, зростає від 7,93 до 22,70% відносна похибка розрахунків інтенсивності зношування  $J_i$  від вихідних моментів СЩ.

**3.5. Як видно з величин коефіцієнтів** рівнянь регресії (16–19), інтенсивність зношування карбопластика суттєво залежить від моментів СЩ вихідної поверхні контргіла із сталі 45, при цьому за силою

внеску моментів СЩ в інтенсивність зношування їх можна поставити у такі мінорантні ряди (оцінка за абсолютними величинами коефіцієнтів кореляцій):

для шляху тертя

$$0 \dots 50 \text{ км} \quad E(m_0) > E(m_2) \gg E(m_4); \quad (20)$$

$$50 \dots 100 \text{ км} \quad E(m_0) > E(m_2) \gg E(m_4); \quad (21)$$

$$200 \dots 300 \text{ км} \quad E(m_2) > E(m_0) \gg E(m_4); \quad (22)$$

$$300 \dots 400 \text{ км} \quad E(m_4) \gg E(m_2) \gg E(m_0). \quad (23)$$

Як видно із цього порівняння, на шляху тертя від  $S_0=0$  км до  $S_i=100-150$  км привалює момент  $m_0$  – параметр, що пов’язаний з висотою мікронерівностей, при  $S_i > 150$  км до  $S_4=300$  км –  $m_2$  – параметр, що пов’язаний з градієнтом вихідної поверхні сталі, а при  $S_4 > 300$  км –  $m_4$  – параметр, що пов’язаний з кривинами вихідної поверхні сталі. Таким чином, можна стверджувати, що при терті без мащення та середнього питомого навантаження та шорсткості вихідної поверхні  $Ra_0=0,22$  мкм на формування проміжних шарів впливають в першу чергу кривини, а потім градієнт вихідної поверхні контртіла.

**3.6. Рівняння зв’язку інтенсивності зношування** ( $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ) на шляху тертя  $S_5=300-400$  км з моментами  $m_0^{(4)}$ ,  $m_2^{(4)}$ ,  $m_4^{(4)}$  СЩ поверхні контртіла із сталі 45, яка утворилася після 300 км ковзання композиту, має такий вигляд ( $r_2^{(4)} = 0,937$ ;  $r_0^{(4)} = 0,771$ ;  $r_4^{(4)} = 0,644$ ):

$$J_5 = 1,004(1,348 + 4,44 \cdot 10^2 m_2^{(4)} + 7,632 \cdot 10^5 m_2^{(4)2})(0,808 + 1,107 m_0^{(4)}) \times (1,188 - 7,892 \cdot 10^3 m_4^{(4)}) \cdot 10^{-7}. \quad (24)$$

За (24) розраховане значення інтенсивності зношування зразка карбопластика на шляху тертя  $S_5=300 \dots 400$  км та значень моментів СЩ металевої поверхні, яка утворилася після 300 км ковзання:

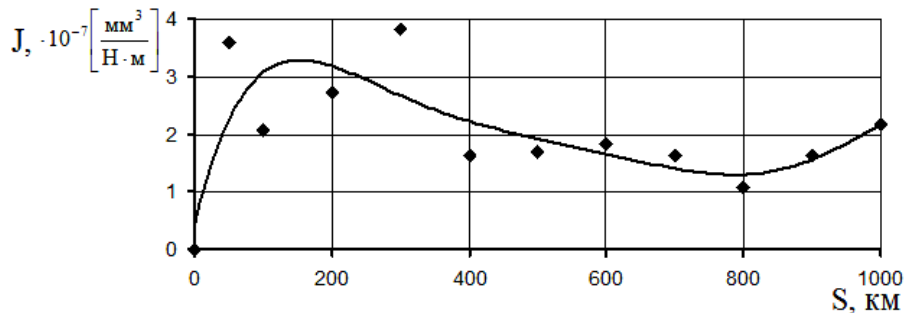
$m_0^{(4)}=6,1716 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}^2$ ;  $m_2^{(4)}=4,616 \cdot 10^{-4}$ ;  $m_4^{(4)}=1,101 \times 10^{-5} \text{ мкм}^{-2}$ , становило:  $\hat{J}_5=1,6620 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ , а експериментальне –  $J_{5\text{екс}}=1,63 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$  [ $\Delta_a=0,032 \times 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ ;  $\Delta_e=0,0196$  (або 1,96%)].

Як видно із величин коефіцієнтів рівняння регресії (24), інтенсивність зношування суттєво залежить від моментів СЩ металевої поверхні контртіла із сталі 45, що утворилася в процесі тертя, при цьому, судячи з (22), (23), (24) та рис. 1 (в, г, г), ця залежність підпорядкована моментам СЩ фактично хвилястої плавучої поверхні контртіла у такій послідовності ефектів від  $m_i$ :  $E(m_2) > E(m_0) > E(m_4)$ . Через 500-600 км тертя інтенсивність зношування знову, як і (19), (23), залежить від моментів СЩ металевої поверхні, що утворилася після 500-600 км ковзання, так:  $E(m_4^i) \gg E(m_2^i) > E(m_0^i)$ .

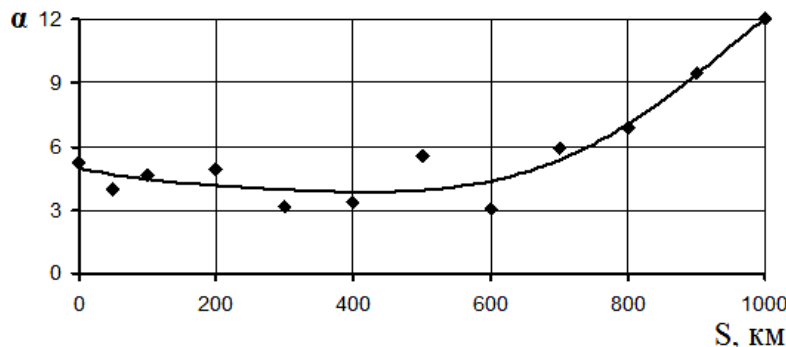
**3.7. Дійсно, рівняння зв’язку інтенсивності зношування** ( $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ) на шляху тертя  $S_{11}=900-1000$  км з моментами  $m_0^{(10)}$ ,  $m_2^{(10)}$ ,  $m_4^{(10)}$  СЩ поверхні контртіла із сталі 45, яка утворилася після 900 км ковзання композиту, має такий вигляд ( $r_4^{(10)} = 0,969$ ;  $r_2^{(10)} = 0,752$ ;  $r_0^{(10)} = 0,564$ ):

$$J_{11} = 1,005(1,381 + 5,654 \cdot 10^4 m_4^{(10)} + 3,434 \cdot 10^8 m_4^{(10)2})(1,236 - 8,998 m_2^{(10)}) \times (1,222 - 2,122 m_0^{(10)}) \cdot 10^{-7}. \quad (25)$$

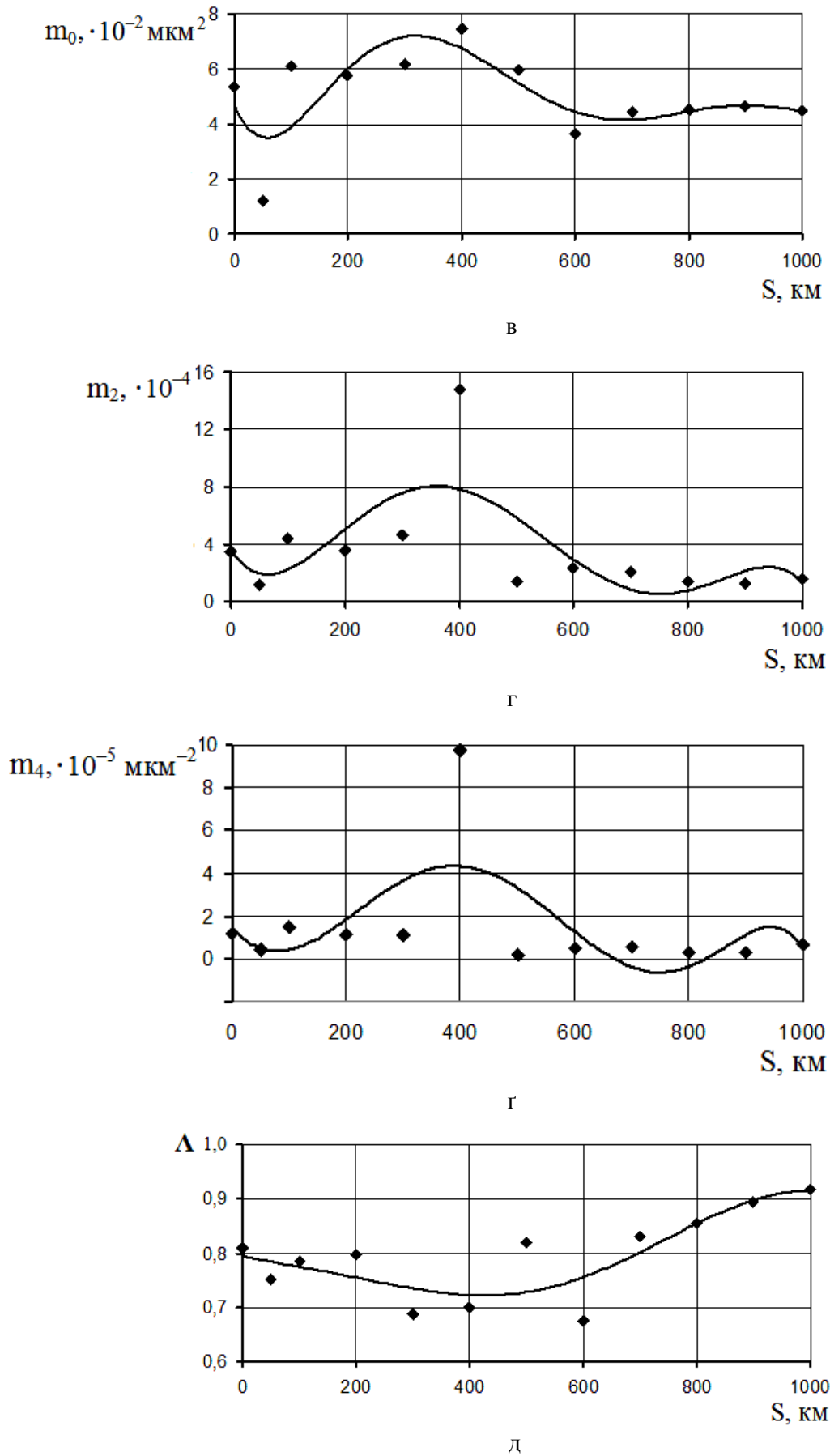
За (25) розраховане значення інтенсивності зношування зразка карбопластика на шляху тертя  $S_{11}=900 \dots 1000$  км та значень моментів СЩ металевої поверхні, яка утворилася після 900 км ковзання:  $m_0^{(10)}=4,628 \cdot 10^{-2} \text{ мкм}^2$ ;  $m_2^{(10)}=1,268 \cdot 10^{-4}$ ;  $m_4^{(10)}=0,329 \times 10^{-5} \text{ мкм}^{-2}$ , становило:  $\hat{J}_{11}=2,1926 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ , а експериментальне –  $J_{11\text{екс}}=2,17 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$  [ $\Delta_a=0,0226 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ ;  $\Delta_e=0,0104$  (або 1,04%)].



а



б



**Рис. 1.** Графіки залежностей від шляху тертя: інтенсивностей зношування  $J$  (а), параметрів широкосмугаості  $\alpha$  (б) та ширини  $\Lambda$  спектра СЦ (д), моментів СЦ нульового  $m_0$  (в), другого  $m_2$  (г) та четвертого  $m_4$  (г) порядків.

Як видно з величин лінійних коефіцієнтів рівняння регресії (25), на шляху тертя  $S_{11}=900\dots 1000$  км інтенсивність зношування суттєво залежить від моментів СЩ поверхні металевго контргіла, що утворилася після 900 км ковзання за ефектами від  $m_j$ :  $E(m_4) \gg E(m_2) > E(m_0)$ .

**4. На рис. 1 приведені графіки залежностей:** інтенсивності зношування зразків композиту  $J$  від шляху тертя  $S$  (а); параметру широкосмугастості спектру  $\alpha$  від шляху тертя  $S$  (б); моментів спектральної щільності (СЩ): нульового порядку  $m_0$ , пов'язаного з висотним параметром (в); другого порядку  $m_2$ , пов'язаного з градієнтом поверхні (г); четвертого порядку  $m_4$ , пов'язаного з кривиною висот вершин ізотропної поверхні (г), від шляху тертя  $S$ ; параметру, що характеризує середнє квадратичне значення ширини ізотропного спектру  $\Lambda$ , від шляху тертя  $S$  (д).

Як видно з рис. 1, окрім  $\alpha=f(S)$  та  $\Lambda=f(S)$ , решта залежностей  $m_0=f(S)$ ,  $m_2=f(S)$ ,  $m_4=f(S)$  носять хвилястий характер.

## II. 2. Властивості карбопластика під час тертя по шорсткій ізотропній металевій поверхні в дистильованій воді при надграничних та граничних нормальних навантаженнях.

Дамо оцінку внеску моментів СЩ металеві поверхні в інтенсивність зношування карбопластика, пов'язавши рівнянням ці величини за методом Брандона (місце моментів  $m_0$ ,  $m_2$ ,  $m_4$  в апроксимативних рівняннях визначали за коефіцієнтами кореляцій між  $J_j$  та  $m_j$ ).

Під час тертя та зношування у дистильованій воді при надграничних ( $J_1$ ) та граничних ( $J_2$ ) навантаженнях на полімерний зразок для інтенсивності зношування карбопластика отримані такі рівняння регресії:

### • сталь 45 (НВ 4,6 ГПа):

$$J_1 = (11,309 + 1,615 \cdot 10^2 m_0 - 41,856 m_0^2)(0,849 + 23,29 m_2)(0,988 + 5,103 \cdot 10^2 m_4) \cdot 10^{-7} \quad (26)$$

$(r_0 = 0,784; r_2 = 0,618; r_4 = 0,472);$

$$J_2 = (32,267 + 1,033 \cdot 10^2 m_0 - 18,872 m_0^2)(0,954 + 5,348 m_2)(1,034 - 1,464 \cdot 10^3 m_4) \cdot 10^{-7} \quad (27)$$

$(r_0 = 0,740; r_2 = 0,639; r_4 = 0,497);$

### • сталь У-8 (НВ 1,8 ГПа):

$$J_1 = 0,9965(7,805 + 1,981 \cdot 10^2 m_0 - 90,663 m_0^2) \times (1,598 - 2,535 \cdot 10^2 m_2)(1,145 - 4,103 \cdot 10^3 m_4) \cdot 10^{-7} \quad (28)$$

$(r_0 = 0,805; r_2 = 0,718; r_4 = 0,272);$

$$J_2 = 0,9907(22,319 + 60,438 m_0 - 17,794 m_0^2)(1,311 - 1,666 \cdot 10^2 m_2)(1,199 - 5,967 \cdot 10^3 m_4) \cdot 10^{-7} \quad (29)$$

$(r_0 = 0,517; r_2 = 0,338; r_4 = -0,127);$

### • мідь електролітична М-1 (НВ 0,66 ГПа):

$$J_1 = 0,9999(4,569 - 15,943 m_2 + 7,57 \cdot 10^4 m_2^2)(1,022 - 1,09 \cdot 10^{-2} m_0)(0,819 + 1,195 \cdot 10^3 m_4) \cdot 10^{-7} \quad (30)$$

$(r_0 = 0,742; r_2 = 0,932; r_4 = 0,408);$

$$J_2 = (3,869 - 7,01 \cdot 10^3 m_4 + 7,843 \cdot 10^6 m_4^2)(0,952 + 2,564 \cdot 10^{-2} m_0)(0,91 + 11,556 m_2) \cdot 10^{-7} \quad (31)$$

$(r_0 = 0,187; r_2 = 0,151; r_4 = -0,249);$

### • бронза Бр. ОФ 6,5-0,15 (НВ 0,86 ГПа):

$$J_1 = (8,321 + 1,599 \cdot 10^2 m_2 + 1,577 \cdot 10^4 m_2^2)(1,037 - 2,779 \cdot 10^{-2} m_0)(0,966 + 1,573 \cdot 10^2 m_4) \cdot 10^{-7} \quad (32)$$

$(r_0 = 0,690; r_2 = 0,824; r_4 = 0,545);$

$$J_2 = (3,448 + 9,99 \cdot 10^2 m_4 + 7,172 \cdot 10^6 m_4^2)(1,077 - 5,806 \cdot 10^{-2} m_0)(1,003 - 0,242 m_2) \cdot 10^{-7} \quad (33)$$

$(r_0 = -0,178; r_2 = 0,117; r_4 = 0,470);$

де  $J_1, J_2$  – інтенсивності зношування ( $\text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ ) на шляху тертя 0...2 км (надграничні навантаження) та 2...18 км (граничні навантаження) відповідно;  $m_0, m_2, m_4$  – моменти спектральної щільності металеві вихідної поверхні;

$r_0, r_2, r_4$  – коефіцієнти кореляцій між інтенсивностями зношування і відповідними моментами СЩ вихідної поверхні металевго контргіла.

За силою внеску моментів СЩ в інтенсивність зношування зразків карбопластика в умовах, коли утворення проміжної плівки на контргілі утруднено, знайдені такі співвідношення за ефектами від  $m_j$  металеві поверхні:

• для твердої поверхні вуглецевої сталі 45 (НВ 4,6 ГПа):

$$E(m_0) > E(m_2) > E(m_4) \quad (\text{для } I_1 \text{ і } I_2); \quad (34)$$

• для м'якої поверхні вуглецевої сталі У-8 (НВ 1,8 ГПа):

$$E(m_0) > E(m_2) \gg E(m_4) \quad (\text{для } I_1 \text{ і } I_2); \quad (35)$$

• для міді електролітичної М-1 (НВ 0,66 ГПа) та олово-фосфористої бронзи Бр. ОФ 6,5-0,15 (НВ 0,86 ГПа):

$$E(m_2) > E(m_0) > E(m_4) \quad (\text{для } I_1); \quad (36)$$

$$E(m_4) > E(m_0) > E(m_2) \quad (\text{для } I_2). \quad (37)$$

Для контргіл з міді та бронзи лінійний зв'язок  $J \sim m_j$  статистично малозначущий для граничних навантажень (2-ий етап випробувань).

## Висновки

1. Інтенсивність зношування карбопластика збільшується із зростанням  $m_0, m_2, m_4$  вихідної поверхні. На шляху тертя без мащення 0-50 км це збільшення відбувається інтенсивніше, ніж на шляху 300-400 км і залежить від природи спряженої поверхні.

2. 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.

3. Кривини у вершинах вихідної шорсткої ізотропної поверхні вуглецевої сталі 45 визначають

формування поверхонь пари тертя та зносостійкість полімерного композиту на основі політетрафторетилену та карбонізованого вуглецевого волокна при умовах тертя без мащення, коли утворюється проміжна плівка на суміжних поверхнях.

4. Для твердої та м'якої сталей висотний параметр у більшій мірі, а потім градієнт поверхні та набагато менше кривини у вершинах вихідної шорсткої поверхні сталей визначають інтенсивність зношування в обох режимах навантаження, для м'яких стопів на основі міді градієнт поверхні у більшій мірі, потім висота нерівностей і менше кривина вершин

визначають інтенсивність зношування  $J_1$  полімерного композиту в режимі надграничних навантажень, а в режимі граничних навантажень кривини у більшій мірі визначають інтенсивність зношування  $J_2$ , ніж висота нерівностей та ще менше градієнт поверхні в умовах, коли утруднено формування проміжних шарів на металевих поверхнях у дистильованій воді.

**Солтис Л.М.** – аспірант кафедри неорганічної та фізичної хімії;

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

- [1] С.Б. Айнбіндер, Н.Г. Андреева, Э.Л. Тюнина. Параметры шероховатости контртела, определяющие износостойкость полиэтилена // *Трение и износ*, **11** (1), сс. 12-21 (1981).
- [2] А.С. Ахматов. *Молекулярная физика граничного трения*. Физматиздат, Москва. 472 с. (1963).
- [3] Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев. *Трение и износ полимеров*. Химия, Ленинград. 240 с. (1972).
- [4] В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. *Трение полимеров*. Наука, Москва. 204 с. (1972).
- [5] Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. *Трение и смазка твердых тел* / Пер. с англ. Н.М. Михина, А.А. Силина. Машиностроение, Москва. 544 с. (1968).
- [6] Д.Н. Гаркунов. *Триботехника*. Машиностроение, Москва. 424 с. (1985).
- [7] Н.Б. Демкин. *Контактирование шероховатых поверхностей*. Наука, Москва. 227 с. (1970).
- [8] В.С. Комбалов. *Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ*. Наука, Москва. 112 с. (1974).
- [9] Б.И. Костецкий. *Трение, смазка и износ в машинах*. Техніка, Киев. 396 с. (1970).
- [10] И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. *Основы расчетов на трение и износ*. Машиностроение, Москва. 526 с. (1977).
- [11] И.В. Крагельский. *Трение и износ*. Машиностроение, Москва. 480 с. (1968).
- [12] Н.М. Михин. *Внешнее трение твердых тел*. Наука, Москва. 222 с. (1977).
- [13] Д. Мур. *Трения и смазка эластомеров* / Пер. с англ. Г.И. Бродского. Химия, Москва. 264 с. (1977).
- [14] Г. Польцер, Ф. Майсснер. *Основы трения и изнашивание* / Пер. с нем. О.Н. Озерского, В.Н. Пальянова. Машиностроение, Москва. 264 с. (1984).
- [15] *Трение, изнашивание и смазки: Справочник в 2-х кн.* / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. Машиностроение, Москва. Кн. 1: 400 с. (1978), Кн. 2: 358 с. (1979).
- [16] М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, П.І. Пашенко, Є.В. Корбут. *Трибологія: Підручник*. НАУ-друк, Київ. 392 с. (2009).
- [17] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Моделі нанометричної та мікрометричної шорсткості поверхні твердих тіл (Огляд) // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (2), сс. 423-446 (2010).
- [18] М.С. Лонге-Хиггинс. Статистическая геометрия случайных поверхностей // *Гидродинамическая неустойчивость*. Мир, Москва. сс. 124-167 (1964).
- [19] П.Р. Найяк. Применение модели случайного поля для исследования шероховатых поверхностей // *Проблемы трения и смазки*, **93** (Ser. F, 3), сс. 85-95 (1971).
- [20] Я.А. Рудзит, Ю.Я. Кризберг. Расчет вероятностных характеристик микрофотографических параметров шероховатых поверхностей, используемых в задачах трения и износа // *Трение и износ*, **3** (6), сс. 1048-1057 (1982).
- [21] Н.Ф. Семенюк. Исследования топографии поверхностей методом случайного поля и разработка расчетных методов оценки фактической площади контакта при трении твердых тел: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. – Якутск: Ин-т физико-техн. проблем Севера СО ЯФ АН СССР. 149 с. (1983).
- [22] Н.Ф. Семенюк, Г.С. Калда, Е.С. Соколан. Использование метода случайных полей при расчете параметров шероховатости, влияющих на тепловые процессы в трущихся телах // *Проблемы трибологии*, (1), (1996).
- [23] Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля: 1. Распределение высот вершин, средняя кривизна в вершинах, градиент поверхности // *Трение и износ*, **1** (3), сс. 465-471 (1980).
- [24] Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля: 2. Полная кривизна, главные кривизны и отношение главных кривизн в вершинах микронеровностей, удельная площадь гауссовской поверхности и удельный объем зазора // *Трение и износ*, **1** (5), сс. 815-823 (1980).
- [25] Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко. Топография и контактные явления анизотропных шероховатых поверхностей трения // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конфер. «Трибоника и антифрикционное материаловедение». – Новочеркасск. 27-29.05.1980. Изд-во Новочеркас. политех. ин-та, Новочеркасск. С. 22 (1980).

- [26] Н.Ф. Семенюк, К.С. Соколан. Кривизна в вершинах выступів поверхонь тертя поршневого ущільнення // *Проблеми трибології*, (2), (2000).
- [27] Н.Ф. Семенюк. Средние значения полной и средней кривизны в вершинах, высоты неровностей анизотропной шероховатой поверхности // *Трение и износ*, **7** (5), сс. 830-840 (1986).
- [28] Н.Ф. Семенюк. Средняя высота выступов шероховатой поверхности и плотность пятен контакта при контактировании шероховатой поверхности с гладкой // *Трение и износ*, **7** (1), сс. 85-90 (1986).
- [29] Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая. Моделирование шероховатых изотропных поверхностей. Сообщение I // *Проблемы трибологии*, (1), сс. 83-89 (1998).
- [30] Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая. Моделирование шероховатых изотропных поверхностей. Сообщение II // *Проблемы трибологии*, (1), сс. 90-97 (1998).
- [31] А.П. Хусу, Ю.Р. Виттенберг, В.А. Пальмов. *Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход*. Наука, Москва. 344 с. (1975).
- [32] M.S. Longuet-Higgins. Statistical Properties of a moving waveform // *Proc. Cambridge Philos. Soc. London*, (52), P. 234 (1956).
- [33] M.S. Longuet-Higgins. Statistical Properties of an isotropic random surface // *Philos. Trans. of the Royal Soc. London*, **250** (A), pp. 157-174 (1957).
- [34] M.S. Longuet-Higgins. The Statistical Analysis of a Random Moving Surface // *Philos. Trans. of the Royal Soc. London*, **249** (A), pp. 321-387 (1957).
- [35] M.S. Longuet-Higgins. The Statistical distribution of the curvature of a random Gaussian surface // *Proc. Cambridge Philos. Soc. London*, (54), P. 439 (1958).
- [36] N.F. Semenjuk. Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder: Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau - Zittau, 160 s. (1991).
- [37] G. Sirenko, M. Semenyuk. Surface Phenomena on Rough Mating Surfaces Modelled by an Anisotropic Random Fields // Abstracts, information and participants Ukrainian-French Symposium "Condensed Matter: Science and Industry". – Lviv, 20-27 February 1993. IPhCS NANU, Lviv. P. 60 (1993).
- [38] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис. Щільність ймовірностей розподілу висот вершин шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (3), сс. 768-779 (2010).
- [39] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис. Розподіл кривин у вершинах мікро- та нанонерівностей шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (4), сс. 914-927 (2010).
- [40] М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Градієнт анізотропної нано- та мікрошорсткої поверхні твердого тіла, змодельованої випадковим полем // *Фізика і хімія твердого тіла*, **12** (1), сс. 200-207 (2011).
- [41] Г.А. Сиренко. *Антифрикционные карбопластики*. Техніка, Киев. 195 с. (1985).
- [42] Г.А. Сиренко, В.П. Сви́дєрський, В.Д. Герасимов, В.З. Никинов. *Антифрикционные термостойкие полимеры*. Техніка, Киев. 246 с. (1978).
- [43] Г.О. Сіренко. Створення антифрикційних матеріалів на основі порошків термотривких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали, Хмельницький технологічний ін-т. – Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ; Київ, 537 с. (1997): іл., табл. – Бібліогр.: с. 432-451 (275 назв).
- [44] Г.А. Сиренко, Н.Ф. Семенюк. Методика определения моментов спектральной плотности шероховатых поверхностей уплотнительной пары // *Тез. докл. 3-го Всесою. совещания по уплотнительной технике*. ВНИИкомпрессормаш, Сумы, сс. 46-47 (1982).
- [45] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис. Методика експериментального дослідження нано- та мікрошорсткості поверхні за допомогою моделі випадкового поля // *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія*, (X), сс. 123-140 (2010).
- [46] D.V. Brandon // *I.S.A. Journal*. **6** (7) (1959).
- [47] С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. *Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии*. Химия, Москва. 476 с. (1978).
- [48] В.В. Кафаров. *Методы кибернетики в химии и химической технологии*. Химия, Москва-Ленинград (1971).
- [49] С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. *Статистические методы планирования и обработки экспериментов*. Изд-во МХТИ, Москва (1972).
- [50] В.В. Налимова, Н.А. Чернова. *Статистические методы планирования экстремальных экспериментов*. Наука, Москва. 310 с. (1965).
- [51] В.Б. Тихомиров. *Планирование и анализ эксперимента*. Легкая индустрия, Москва. 264 с. (1974).
- [52] М.Н. Степнов. *Статистическая обработка результатов механических испытаний*. Машиностроение, Москва. 232 с. (1972).



Л.М. Солтис, Г.О. Сіренко

L.M. Soltys, H.O. Sirenko

## **Tribosurface Properties of Carbonplastic in Friction and Wear on Rough Isotropic Metal Surface without Lubrication and in Distilled Water**

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

The intensity of wear of polymer composite material based on polytetrafluoroethylene and carbon fiber in friction on rough isotropic metal surface without lubrication and in distilled water have been researched. Approximating equations of intensity of wear of polymer composite with moments of spectral density of rough surface modeled by isotropic random field has been found.

**Key words:** roughness, intensity of wear, isotropic surface, friction, composite polymer material, moments of spectral density, metal counterface.