

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис

## **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, 76018, Україна*

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.

H.O. Sirenko, L.M. Soltys

## **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, 76018, Ukraine*

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.

*Стаття поступила до редакції 18.04.2013; прийнята до друку 27.05.2013.*

### **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  $\text{CH}_4$  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; питома навантаження  $p = 3$  МПа ( $N_i = 235,62$  Н); швидкість ковзання  $v = 1,1$  м/с; температура  $T = 373 \pm 2$  К, що була визначена термпарою 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 [II-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 електrolітичної 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 ( $p \approx HB_y$ ), 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]); сталій 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, вимірюного 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 (СЩ): 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. Дамо оцінку внеску моментів СЩ 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  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_j, \dots, x_k$  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  $x_2$  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 функцій  $f_3(x_3), f_4(x_4), \dots, f_j(x_j), \dots, f_k(x_k)$  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  $S_1=0..50$  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 будували 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:

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

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:

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

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

За (16) розрахункове 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  $\Delta_e=|(J_{1\text{екс.}}-\hat{J}_1)/J_{1\text{екс.}}|=0,0793$  (або 7,93%)].

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

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

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

За (17) розрахункове 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 –  $J_{2\text{екс.}}=2,07 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  [ $\Delta_a=0,3018 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $\Delta_e=0,1458$  (або 14,58%)].

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

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

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

За (18) розрахункове 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 –  $J_{4\text{екс.}}=3,83 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  [ $\Delta_a=0,8575 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $\Delta_e=0,2239$  (або 22,39%)].

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

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

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

За (19) розрахункове 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 –  $J_{5\text{екс.}}=1,63 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$  [ $\Delta_a=0,3700 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ ;  $\Delta_e=0,2270$  (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 контртіла 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 машення 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 ( $r_2^{(4)} = 0,937$ ;  $r_0^{(4)} = 0,771$ ;  $r_4^{(4)} = 0,644$ ):

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

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

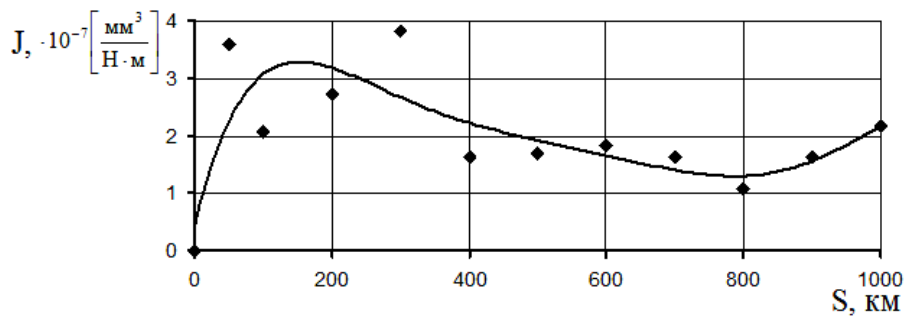
**3.7. Дійсно, рівняння зв'язку інтенсивності зношування** ( $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ) на шляху тертя  $S_{11}=900-1000$  км з моментами  $m_0^{(10)}$ ,  $m_2^{(10)}$ ,  $m_4^{(10)}$  СЩ поверхні контртіла із сталі 45, яка утворилася після 900 км ковзання композиту, має такий вигляд ( $r_4^{(10)}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

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

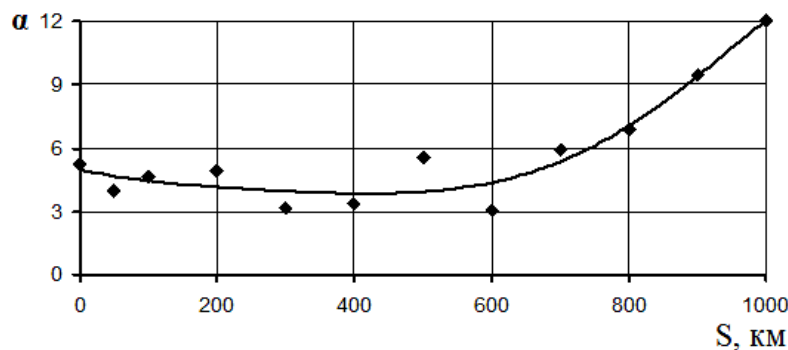
За (25) розраховане значення інтенсивності зношування зразка карбопластика на шляху тертя  $S_{11}=900\dots 1000$  км та значень моментів СЩ металевої поверхні, яка утворилася після 900 км ковзання:  $m_0^{(10)}=4,628 \cdot 10^{-2}$  мкм<sup>2</sup>;  $m_2^{(10)}=1,268 \cdot 10^{-4}$ ;  $m_4^{(10)}=0,329x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

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 металевого контртіла, що утворилася після 900 км ковзання за ефектами від  $m_j$ :  $E(m_4) \gg E(m_2) > E(m_0)$ .

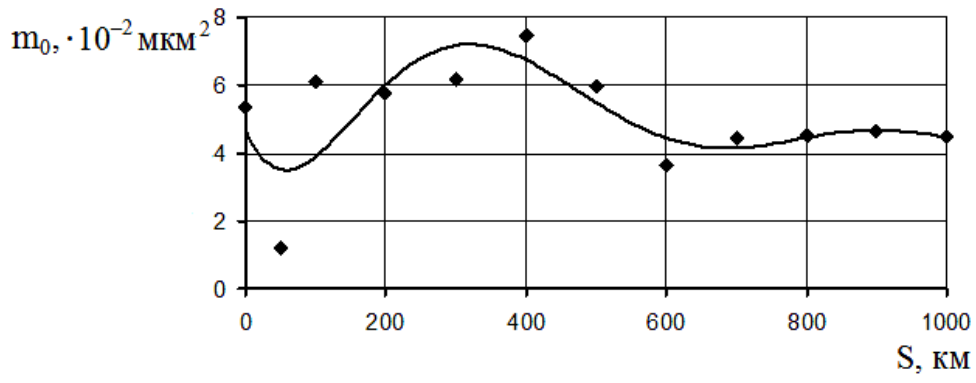
**4. На рис. 1** приведені графіки залежностей: інтенсивності зношування зразків композиту  $J$  від шляху тертя  $S$  (а); параметру ширококосмугастості спектру  $\alpha$  від шляху тертя  $S$  (б); моментів спектральної щільності



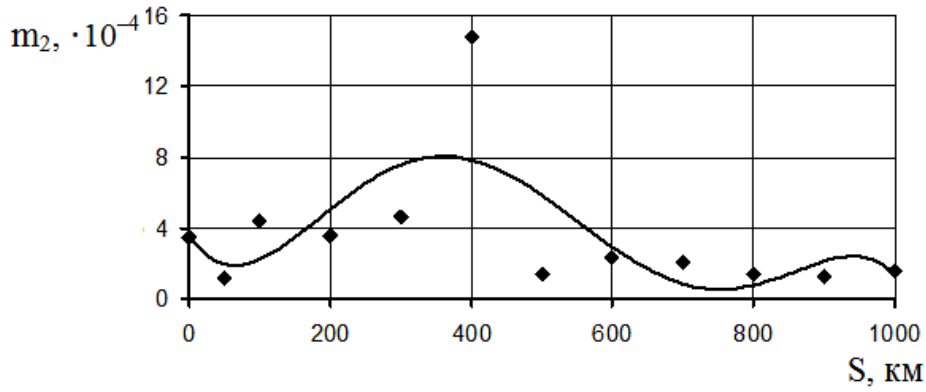
а



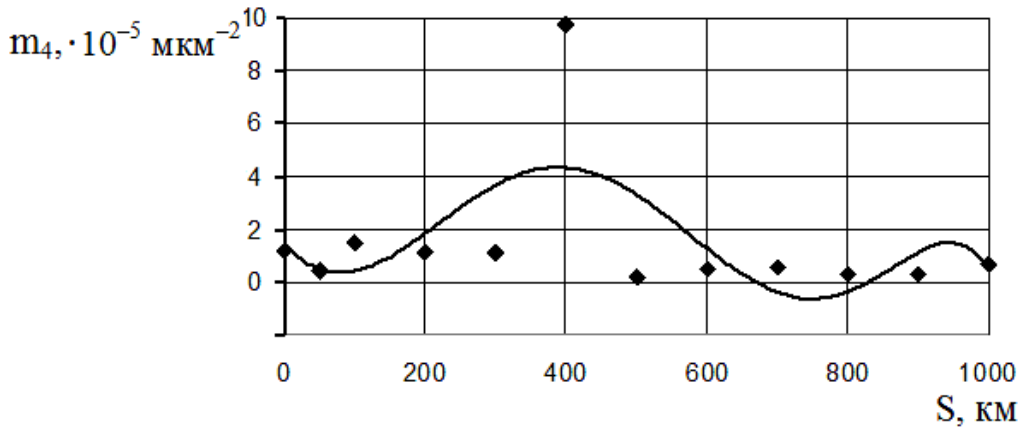
б



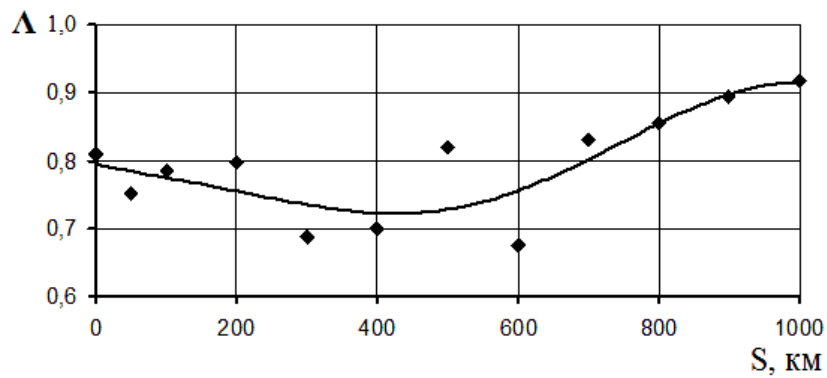
В



Г



Г



Д

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

(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 апроксимаційних рівняннях визначали за коефіцієнтами кореляцій між  $J_i$  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):

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

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

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

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

### • 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 (мм<sup>3</sup>/Н·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 металевого контртіла.

За силою внеску моментів СЩ в інтенсивність зношування зразків карбопластика в умовах, коли утворення проміжної плівки на контртілі 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 контртіл 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.

## Література

1. **Айнбіндер С.Б.** Параметри шероховатости контртела, определяющие износостойкость полиэтилена / С.Б. Айнбіндер, Н.Г. Андреева, Э.Л. Тюнина // Трение и износ. – 1981. – Т. 11, № 1. – С. 12-21.
2. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиздат, 1963. – 472 с.
3. **Бартенев Г.М.** Трение и износ полимеров / Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев. – Л.: Химия, 1972. – 240 с.
4. **Трение полимеров** / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. – М.: Наука, 1972. – 204 с.
5. **Боуден Ф.П.** Трение и смазка твердых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор / Пер. с англ. Н.М. Михина, А.А. Силина. – М.: Машиностроение, 1968. – 544 с.
6. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
7. **Демкин Н.Б.** Контактное шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 227 с.
8. **Комбалов В.С.** Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ / В.С. Комбалов. – М.: Наука, 1974. – 112 с.
9. **Костецкий Б.И.** Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – К.: Техніка, 1970. – 396 с.
10. **Крагельський И.В.** Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельський, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
11. **Крагельський И.В.** Трение и износ / И.В. Крагельський. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
12. **Михин Н.М.** Внешнее трение твердых тел / Н.М. Михин. – М.: Наука, 1977. – 222 с.
13. **Мур Д.** Трения и смазка эластомеров / Д. Мур // Пер. с англ. Г.И. Бродского. – М.: Химия, 1977. – 264 с.
14. **Польцер Г.** Основы трения и изнашивание / Г. Польцер, Ф. Майсснер / Пер. с нем. О.Н. Озерского, В.Н. Пальянова. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
15. **Трение, изнашивание и смазки:** Справочник в 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алинина. – М.: Машиностроение. – Кн. 1. – 1978. – 400 с. – Кн. 2. – 1979. – 358 с.
16. **Трибология: Підручник** / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, П.І. Пашенко, Є.В. Корбут. – К.: НАУ-друк, 2009. – 392 с.
17. **Сіренко Г.О.** Моделі нанометричної та мікрометричної шорсткості поверхні твердих тіл (огляд) / Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис // Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – Т. 11, № 2. – С. 423-446.
18. **Лонге-Хиггинс М.С.** Статистическая геометрия случайных поверхностей / М.С. Лонге-Хиггинс // Гидродинамическая неустойчивость. – М.: Мир, 1964. – С. 124-167.
19. **Найяк П.Р.** Применение модели случайного поля для исследования шероховатых поверхностей / П.Р. Найяк // Проблемы трения и смазки. – 1971. – Т. 93. – Сер. F. – № 3. – С. 85-95.
20. **Рудзит Я.А.** Расчет вероятностных характеристик микротопографических параметров шероховатых поверхностей, используемых в задачах трения и износа / Я.А. Рудзит, Ю.Я. Кризберг // Трение и износ. – 1982. – Т. 3, № 6. – С. 1048-1057.
21. **Семенюк Н.Ф.** 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 / Н.Ф. Семенюк. – Якутск: Ин-т физико-техн. проблем Севера СО ЯФ АН СРСР, 1983 – 149 с.
22. **Семенюк Н.Ф.** Использование метода случайных полей при расчете параметров шероховатости, влияющих на тепловые процессы в трущихся телах / Н.Ф. Семенюк, Г.С. Калда, Е.С. Соколан // Проблемы трибологии. – 1996. – № 1.



23. **Семенюк Н.Ф.** Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля: 1. Распределение высот вершин, средняя кривизна в вершинах, градиент поверхности / Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 3. – С. 465-471.
24. **Семенюк Н.Ф.** 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 / Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 5. – С. 815-823.
25. **Семенюк Н.Ф.** Топография и контактные явления анизотропных шероховатых поверхностей трения / Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конфер. «Трибоника и антифрикционное материаловедение». – Новочеркасск. 27-29.05.1980. – Новочеркасск: Изд-во Новочеркас. политех. ин-та, 1980. – С. 22-23.
26. **Семенюк Н.Ф.** Кривизна в вершинах виступів поверхонь тертя поршневих ущільнень / Н.Ф. Семенюк, К.С. Соколан // Проблеми трибології. – 2000. – № 2.
27. **Семенюк Н.Ф.** Средние значения полной и средней кривизны в вершинах, высоты неровностей анизотропной шероховатой поверхности / Н.Ф. Семенюк // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 5. – С. 830-840.
28. **Семенюк Н.Ф.** Средняя высота выступов шероховатой поверхности и плотность пятен контакта при контактировании шероховатой поверхности с гладкой / Н.Ф. Семенюк // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 1. – С. 85-90.
29. **Семенюк Н.Ф.** Моделирование шероховатых изотропных поверхностей. Сообщение I / Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая // Проблемы трибологии. – 1998. – № 1. – С. 83-89.
30. **Семенюк Н.Ф.** Моделирование шероховатых изотропных поверхностей. Сообщение II / Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая // Проблемы трибологии. – 1998. – № 1. – С. 90-97.
31. **Хусу А.П.** Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный поход / А.П. Хусу, Ю.Р. Виттенберг, В.А. Пальмов. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
32. **Longuet-Higgins M.S.** Statistical Properties of a moving waveform / M.S. Longuet-Higgins // Proc. Cambridge Philos. Soc. – London, 1956. – N 52. – P. 234.
33. **Longuet-Higgins M.S.** Statistical Properties of an isotropic random surface / M.S. Longuet-Higgins // Philos. Trans. of the Royal Soc. – London, 1957. – Vol. 250. – Ser. A. – P. 157-174.
34. **Longuet-Higgins M.S.** The Statistical Analysis of a Random Moving Surface / M.S. Longuet-Higgins // Philos. Trans. of the Royal Soc. – London, 1957. – Vol. 249. – Ser. A. – P. 321-387.
35. **Longuet-Higgins M.S.** The Statistical distribution of the curvature of a random Gaussian surface / M.S. Longuet-Higgins // Proc. Cambridge Philos. Soc. – London, 1958. – N 54. – P. 439.
36. **Semenjuk N.F.** Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs und Verschlei.theorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder: Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau / N.F. Semenjuk. –Zittau, 1991. – 160 s.
37. **Sirenko G.** Surface Phenomena on Rough Mating Surfaces Modelled by an Anisotropic Random Fields / G. Sirenko, M. Semenyuk // Abstracts, information and participants Ukrainian-French Symposium “Condensed Matter: Science and Industry”. – Lviv, 20-27 February 1993. – Lviv: IPhCS NANU, 1993. – P. 60.
38. **Сіренко Г.О.** Щільність ймовірностей розподілу висот вершин шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем / Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис // Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – Т. 11, № 3. – С. 768-779.
39. **Сіренко Г.О.** Розподіл кривин у вершинах мікро- та нанонерівностей шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем / Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис // Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – Т. 11, № 4. – С. 914-927.
40. **Семенюк М.Ф.** Градієнт анізотропної нано- та мікрошорсткої поверхні твердого тіла, змодельованої випадковим полем / М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12, № 1. – С. 208-214.
41. **Сиренко Г.А.** Антифрикционные карбопластики / Г.А. Сиренко. – К.: Техніка, 1985. – 195 с.
42. **Антифрикционные термостойкие полимеры** / Г.А. Сиренко, В.П. Свицерский, В.Д. Герасимов, В.З. Никинов. – К.: Техніка, 1978. – 246 с.
43. **Сіренко Г.О.** Створення антифрикційних матеріалів на основі порошків термотривких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. на здобуття наук. ступеня докт. технічних наук: спец. 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали / Геннадій Олександрович Сіренко. – Хмельницький технологічний ін-т. – Захищ. 8.12.1997 в Ін-ті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ. – Київ, 1997. – 537 с.: іл., табл. – Бібліогр.: с. 432-451 (275 назв).
44. **Сиренко Г.А.** Методика определения моментов спектральной плотности шероховатых поверхностей уплотнительной пары / Г.А. Сиренко, Н.Ф. Семенюк // Тез. докл. 3-го Всесою. совещания по уплотнительной технике. – Сумы: ВНИИкомпрессормаш, 1982. – С. 46-47.
45. **Сіренко Г.О.** Методика експериментального дослідження нано- та мікрошорсткості поверхні за допомогою моделі випадкового поля / Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис // Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. Василя Стефаника. Серія Хімія. – Івано-Франківськ: 2010. – Вип. X. – С. 123-140.
46. **Brandon D.B.** // I.S.A. Journal. – V. 6, № 7. – 1959.
47. **Ахназарова С.Л.** Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Химия, 1978. – 476 с.

48. **Кафаров В.В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – М.-Л.: Химия, 1971.
49. **Ахназарова С.Л.** Статистические методы планирования и обработки экспериментов / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М.: Изд-во МХТИ, 1972.
50. **Налимов В.В.** Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 310 с.
51. **Тихомиров В.Б.** Планирование и анализ эксперимента / В.Б. Тихомиров. – М.: Легкая индустрия, 1974. – 264 с.
52. **Степнов М.Н.** Статистическая обработка результатов механических испытаний / Михаил Никитович Степнов. – М.: Машиностроение, 1972. – 232 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 229-230 (36 назв.).

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

*Солтис Л.М.* – кандидат хімічних наук, провідний інженер кафедри неорганічної та фізичної хімії.

**Рецензенти:**

*Будзуляк І.М.* – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри матеріалознавства та новітніх технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

*Галій П.В.* – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики напівпровідників Львівського національного університету імені Івана Франка.