

Г.О. Сіренко¹, Л.М. Солтис¹, В.П. Свідерський², Б.О. Таланкін²

Закономірності зміни мікрошорсткості спряжених поверхонь полімерний композит – метал під час механо-фізико-хімічних процесів тертя та зношування

¹*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна*

²*Хмельницький національний університет,
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29016, Україна*

Приведені результати залежності інтенсивності зношування карбопластиків на основі політетрафторетилену та карбонізованих за 1123 К вуглецевих волокон і ароматичного поліаміду та графітованих за 2673 К вуглецевих волокон, отриманих із гідратцелюлозних тканин. Показано, що розподіл висот вершин та середня кривина у вершинах мікронерівностей поверхонь зразків полімерних композитів та металевих контртіл залежать від вихідних моментів спектральної щільності та утворення на спряжених металевих поверхнях проміжних плівок. Ці розподіли змінюються у процесі тертя та зношування у залежності від шляху тертя від 0 до 1200 км, при цьому зміна розподілів носить коливальний характер, наближаючись та віддаляючись від нормального розподілу Гауса. Існують певні значення вихідних параметрів шорсткості поверхонь, які забезпечують формування проміжних плівок з розподілами висот вершин та середньої кривини у вершинах, наближених до нормального закону Гауса і виключенням випадкового коливального процесу.

Ключові слова: вуглецеві волокна, тертя, зношування, шорсткість поверхні, композиційний полімерний матеріал, спектральна щільність, металеве контртіло.

H.O. Sirenko¹, L.M. Soltys¹, V.P. Svidersky², B.O. Talankin²

Regularities of Change the Microroughness of Conjugated Surfaces the Polymer Composite – Metal in Mechano-physical-chemical Processes of Friction and Wear

¹*Vasyl Stefanyk' Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76025, Ukraine*

²*Khmelnitsky National University,
11, Instytutaska Str., Khmelnytsky, 29016, Ukraine*

The results of the intensity of wear carbon plastics based on polytetrafluoroethylene and carbonized carbon fibers at a temperature of 1123 K and aromatic polyamide and graphite carbon fibers at a temperature of 2673 K, obtained from hydrated cellulose tissues, has been resulted. It has been shown that the allocation of heights of peaks and average curvature in the peaks microirregularities surfaces of samples of polymer composites and metal counterfaces depend on the initial moments of the spectral density and the formation on the conjugated metal surfaces of the intermediate films. These allocations change in friction and wear of the friction way from 0 to 1200 km, with the change of allocations is oscillatory in nature, approaching and keeping away from the normal allocation Gauss. There are some initial parameters of roughness of surfaces, which provide formation of intermediate films with allocations of heights of peaks and average curvature in the peaks adjacent to the normal allocation Gauss and exception of random oscillatory process.

Key words: carbon fibers, friction, wear, roughness of surface, composite polymer material, spectral density, metal counterface.

Стаття постуила до редакції 11.11.2011; прийнята до друку 25.01.2012.

Вступ

Відомо [8, 9, 12, 17-21, 24-26, 29, 71-76], що процеси тертя, зношування та мащення твердих тіл визначаються параметрами механо-фізико-хімічних процесів, що супроводжуються тертям та зношуванням, питомим та нормальним навантаженням, швидкістю ковзання, температурою спряжених поверхонь, видом фрикційного контакту, шляхом тертя, наявністю, природою та кількістю мастильного середовища, вакуумом та природою зовнішнього середовища, утворенням проміжних плівок на поверхнях тертя (так званого третього тіла) тощо, а також, у значній мірі, характеристиками шорсткості спряжених поверхонь полімерного зразка та контртіла як вихідних, так і утворених під час тертя та зношування [10-15, 22, 23, 27, 30-68].

Найбільш продуктивним виявився математичний опис мікро- та наношорсткості поверхні виконаний за допомогою теорії випадкового поля [77, 78].

Для опису шорстких поверхонь використовують три моменти 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 для ізотропної поверхні та дев'ять спектральних моментів СЩ: нульового порядку m_{00} , другого порядку m_{20} , m_{02} , m_{11} і четвертого порядку m_{13} , m_{31} , m_{22} , m_{40} , m_{04} , а при $(i+j) \leq 4$ – сім їх інваріантних комбінацій для анізотропної поверхні [23, 27, 36-41, 50-53].

Завдання дослідження полягало у тому, щоби виявити закономірності змін розподілу висот вершин та середньої кривини у вершинах мікронерівностей спряжених шорстких поверхонь карбопластиків, наповнених вихідними та омідненими вуглецевими волокнами, та металічного контртіла під час тертя та зношування без мащення у вологому повітрі та в агресивних рідинах.

I. Експериментальна частина

1. Матеріали зразків.

1.1. Отримання волокнистого матеріалу. Досліджували зносостійкість композитного матеріалу – карбопластиків «флубон-15 (20)» та «графелон-20» [1-7, 16, 28] на основі політетрафторетилену (ПТФЕ), наповненого 20% карбонізованого низькомодульного (LM) вуглецевого волокна (з тканини УТМ-8), отриманого з гідратцелюлозного волокна під час термообробки у печі «Таммана» за температури 1123 К у середовищі CH_4 в присутності антипіренів $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (флубон) та ароматичного поліаміду фенілон С-2 (АПА), на основі м-фенілендіаміна і дихлорангідридів терефталевої (40%) та ізопфталевої (60%) кислот, наповненого графітованим за 2673 К у середовищі N_2 волокном з тканини

ТГН-2м (графелон) [69, 70].

1.2. Дисперсії вуглецевого волокна та композицію матеріалу отримували за ХМА-технологією [69, 70]: для попереднього подрібнення вуглецевої тканини УТМ-8 застосовували модифіковану молоткову дробарку КДУ 2,0 «Українка» з рухомими молотками, сепаруючим пристроєм у вигляді змінної ґратки з діаметром отворів 1,5–5,0 та 0,8–1,5 мм і вентилятором, який гнав повітря через ґратки. Діаметр робочих органів з молотками становив 0,48 м, число обертів 2700 за хвилину, що визначало частоту обертання 45 с^{-1} та максимальну лінійну швидкість 67 м/с. Дробарка КДУ 2,0 забезпечувала тонину помелу волокон 3–15 мм. Для більш тонкого подрібнення волокон та активаційного змішування інгредієнтів композиції використали дробарку-млинок МРП-1 з подовими ножами за 7000 обертання ножів за хвилину, діаметрі ножів 0,205 м, частоті обертання 117 с^{-1} , максимальній лінійній швидкості 75 м/с. Після здібнення волокна мали широкий розподіл за довжинами від 0 до 3500 мкм з основною фракцією 50–200 мкм за об'ємним (масовим) гамма або Вейбулла розподілом за довжинами.

1.3. У композит на основі полімерних порошків ПТФЕ або АПА вводили короткі вуглецеві волокна, що отримані за ХМА-технологією [69, 70], які мали об'ємний (масовий) розподіл за довжинами за ймовірним гамма-законом розподілу в композиції.

1.4. Для вирішення завдання лінійної аналізи вихідних дроблених волокон, отриманих за ХМА-технологією, та після змішування їх з порошком полімеру шляхом дроблення композиції, використовували автоматичний аналізатор зображень мікрооб'єктів «Морфоквант» із обчислювальною машиною ЕС-5060. Аналізатор був налагоджений на максимальну кількість кроків 512, мінімальний крок 0,2 мкм, діяпазон кроків під час сканування 512×512 та на кількість різних ступенів тонів 128. При цьому відносна похибка вимірювання лінійних розмірів волокон становила 0,2 %. Програма забезпечувала аналізу 250 частинок за одну пробу (кількість проб 20-25). Статистичну відповідність емпіричного розподілу теоретичному гамма або Вейбулла розподілу перевіряли за критеріями хі-квадрат та омега-квадрат з рівнем значущості $\alpha = 0,05$.

1.5. У результаті технологічних операцій в композиції отримали волокна, що мали об'ємний (масовий) розподіл за гамма-законом або Вейбулла за довжинами з параметрами $\lambda = 0,005 - 0,045 \text{ мкм}^{-1}$, $\theta = 1,0 - 2,55$, отриманих із вихідних вуглецевих волокон, розподілених за довжинами за тими же законами з параметрами розподілу $\lambda = 0,002 - 0,04 \text{ мкм}^{-1}$, $\theta = 0,5 - 2,5$, щільність ймовірностей розподілу в обох випадках $P_2(l) = (0,2 - 6,0) \cdot 10^{-3} \text{ мкм}^{-1}$ при наборі довжин $l = 0 - 3500 \text{ мкм}$ з основною фракцією $l = 20 - 200 \text{ мкм}$ отримані полімерні композити на основі ПТФЕ, що вибрані

із класу флубонів [1, 4, 5, 7, 16] та АПА – із класу графелонів [2, 3, 6, 28]. Унаслідок технологічних операцій та вибраної схеми контакту вуглецеві волокна були розташовані хаотично у шарі (R), який був перпендикулярний до напрямку нормального навантаження (N), як і самі волокна (N), та паралельний площині контртіла (L), як і самі волокна (L), і паралельний вектору швидкості (L), як і самі волокна (L), тобто за схемою контакту NNLLLLL.

2. Фрикційні випробування без мащення. Зносостійкість композитного матеріалу під час тертя та зношування без мащення або при мащенні рідинами: дистильованою водою, 40%-вою та 98%-вою оцтовою кислотою, досліджували на трибомері ХТІ-72 за 3-ма схемами контакту під час тертя та зношування:

- **[I-1]**, 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; тертя без мащення; контртіло було виконано порожнистим діаметром $60 \pm 0,15$ мм, висотою $35 \pm 0,2$ мм, товщиною робочої частини поверхні тертя $5 \pm 0,2$ мм або у вигляді диску діаметром $60 \pm 0,1$ мм і висотою $(10-15) \pm 0,1$ мм, яке розміщали у відповідне гніздо порожнинного тіла. Через порожнину контртіла проходила холодна вода, або розміщувався термонагрівач, завдяки яким підтримувався заданий тепловий режим поверхні тертя вуглецевої сталі 45, термообробленої до НВ $4,5 \pm 0,2$ ГПа, з вихідним середнім арифметичним відхиленням профілю поверхні (табл. 2): $Ra_0=0,085$ мкм (дослід №70); $Ra_0=0,22$ мкм (дослід №72); $Ra_0=0,49$ мкм (дослід №73); $Ra_0=0,85$ мкм (дослід №74); $Ra_0=1,42$ мкм (дослід №75); питоме навантаження на 3 зразки складало $p=3$ МПа (нормальне навантаження на 1 зразок $N_i=235,62$ Н); швидкість ковзання $v=1,1$ м/с; температура поверхні сталі $T=373 \pm 1$ К, яка була визначена термопарою ХК на відстані $1 \pm 0,05$ мм від поверхні тертя контртіла, а величини (в mV) записувались на стрічку потенціометра КСП-4, шлях тертя складав $S \leq 1000-3200$ км (сумарний час тертя $\tau = 253-808$ год.) із заміром величини зносу через $50-200$ км ($\tau_i = 12,6-50,4$ год.) (при випробуванні композиту флубон-15(20) на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого за $T = 1123$ К вуглецевого волокна УТМ-8) (рис. 1) та $p=3$ МПа, $v=1,3$ м/с; температура $T=423 \pm 1$ К (при випробуванні композиту графелон-(20) на основі АПА + 20% графітованого за $T = 2673$ К вуглецевого волокна ТГН-2м) (рис. 1).

- **[I-1]** (рис. 4а) тертя по сталі 45 (НВ 4,5 ГПа) без мащення за умов: $p=3$ МПа; $v=1,1$ м/с; $T=373 \pm 1$ К; $S_1(I_1) = 0 \dots 50$ км; $S_2(I_2) = 300-400$ км.

- **[II-2]** (рис. 2): сферична кінцівка (радіус сфери $r_c = 6,35$ мм) пальчика (діаметром $10 \pm 0,05$ мм, висотою $15 \pm 0,1$ мм) – плоске контртіло із полімерного композиту графелон-20 (НВ 0,32 ГПа) або металу:

- електролітичної міді М-1 (НВ 0,66 ГПа);
- спіжа (бронзи) Бр.ОФ 6,5-0,15 (НВ 0,86 ГПа);
- сталі 10X18H9T (НВ 1,37 ГПа);
- сталі 10X17H13M3T (НВ 1,45 ГПа);
- сталі У8 (НВ 1,80 ГПа);
- сталі 38ХМЮА (НВ 1,89 ГПа);
- сталі 45 (НВ 4,60 ГПа).

Тертя в дистильованій воді за умов: $N_i=100$ Н; $N=300$ Н; $v=0,3$ м/с; $T=313 \pm 1$ К; шлях тертя першого етапу випробувань $S_1(I_1) = 0 \dots 2$ км (надграничне навантаження); другого етапу – $S_2(I_2) = 2 \dots 18$ км (граничне навантаження).

- **[II-2]** (рис. 4б) тертя по сталі 45 (НВ 4,6 ГПа) та по спіжу (бронзі) Бр. ОФ 6,5-0,15 (НВ 0,86 ГПа) в дистильованій воді за умов: надграничне навантаження $N_i=100$ Н; $N=300$ Н; $v=0,3$ м/с; $T=313 \pm 1$ К; $S_1 = 0 \dots 2$ км.

- **[IV-6]** (рис. 3): торець втулки з флубона-15(20) (внутрішній діаметр $d_n = 28,5 \pm 0,1$ мм, зовнішній діаметр $d_s = 41 \pm 0,1$ мм, висота $h = 22 \pm 0,1$ мм) – площа:

- 1) по сталі 10X17H13M3T; $p=3$ МПа; $v=0,8$ м/с; $T=323 \pm 1$ К; $S = 12$ км; 98%-ва оцтова кислота;
- 2) по спіжу (бронзі) Бр. ОФ 6,5-0,15; $p=3$ МПа; $v=0,5$ м/с; $T=318 \pm 1$ К; $S = 12$ км; 40%-ва оцтова кислота;
- 3) по графелону-20; $p=2$ МПа; $v=0,3$ м/с; $T=318 \pm 1$ К; $S = 12$ км; дистильована вода.

Знос полімерних зразків визначали за зміною їх висоти Δh до та після кожного етапу зношування (шляху тертя), вимірюючи висоту зразка разом із гніздовою головкою, після 1 год. релаксації за кімнатної температури, на вертикальному оптиметрі з точністю $\pm 0,5$ мкм. За лінійним зносом Δh [мм] розраховували:

- лінійну інтенсивність зношування:

$$I_h = \frac{\Delta h}{S} \left[\frac{\text{мм}}{\text{мм}} \right]; \quad (1)$$

- об'ємний знос ΔV [мм³], за яким розраховували об'ємну інтенсивність зношування:

$$I_i = \frac{\Delta V_i}{S} \left[\frac{\text{мм}^3}{\text{мм}} \right], \quad (2)$$

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

$$I = \frac{\Delta V_i}{N_i \cdot S} = \frac{\Delta V}{N \cdot S} \left[\frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{мм}} \right], \quad (3)$$

де ΔV_i , ΔV – об'ємний знос [мм³] одного або трьох зразків відповідно;

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

Або вимірювали на оптичному мікроскопі з поділками 0,002 мм діаметр плями зносу, за яким розраховували об'єм зносу.

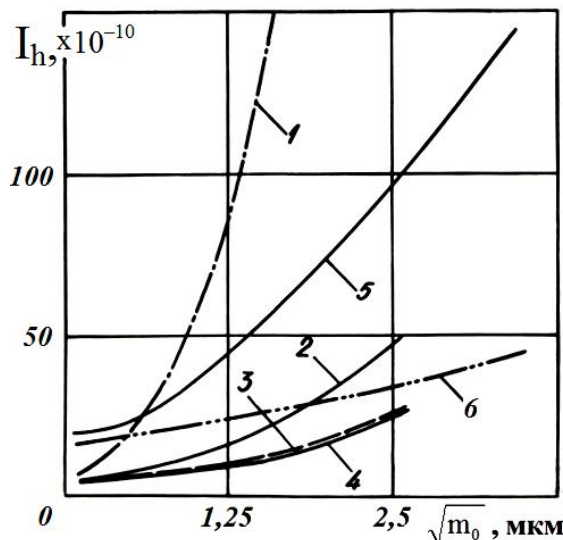


Рис. 1. Вплив вихідної шорсткоти спряженої поверхні сталі 45 (НВ 4,5 ГПа) – моменту СЩ нульового порядку (m_0), пов'язаного з висотним параметром ізотропної поверхні – на середню лінійну інтенсивність зношування без мащення (вологе повітря) композиту на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого волокна УТМ-8 [флубон-15(20)] (1-4) та композиту на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 + 20% графітованого волокна ТГН-2м (графелон-20) (5, 6) для шляху тертя (км): 1, 5 – 0...50; 2 – 50...100; 3, 6 – 100...200; 4 – 200...1100; [I-1]; $p=3$ МПа; $v=1,1$ м/с; $T=373$ К (1-4); $v=1,3$ м/с; $T=423$ К (5, 6); схема контакту [I-1].

3. Методика експериментального дослідження шорсткої поверхні тертя.

Математичний опис анізотропної та ізотропної шорсткої поверхні на основі теорії випадкового поля приведений у [23, 27, 36-41, 52-60].

Знаходили статистичні характеристики поверхні тертя за відповідними параметрами профілограм за методом [27, 51, 63]. Для цього знімали п'ять профілограм поверхні, виміряних у непаралельних довільних напрямках. Для розрахунків на ЕОМ підготовлених даних використовували методику [27, 63].

3.1. Вибіркова аналіза випадкових ізотропних поверхнь.

За Лонге-Гігінсом [77]:

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 [77]:

$$D_{zero,\theta} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}}; \quad (4)$$

$$D_{extr,\theta} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}, \quad (5)$$

де індекс « θ » вказує, що статистична характеристика відноситься до профілограми, а не

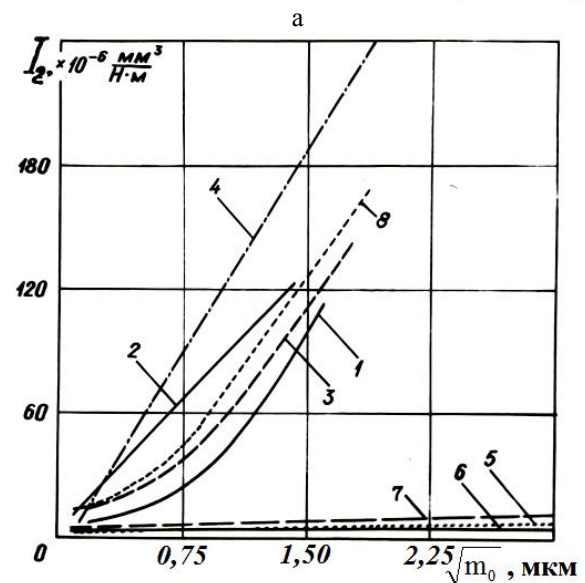
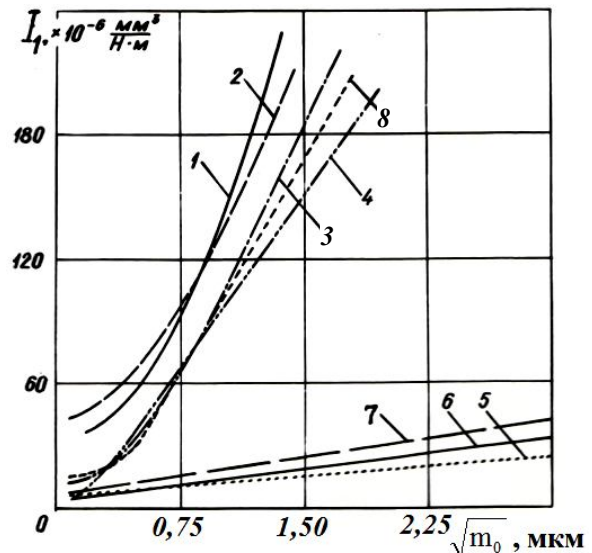


Рис. 2. Залежність питомої інтенсивності об'ємного зношування композиту на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого волокна УТМ-8 [флубон-15(20)] від моменту СЩ нульового порядку, пов'язаного з висотним параметром ізотропної поверхні під час тертя в дистильованій воді по спряжених поверхнях: 1 – сталь 10X18Н9Т; 2 – сталь 38ХМЮА; 3 – сталь У8 (НВ 1,8 ГПа); 4 – сталь 45 (НВ 4,60 ГПа); 5 – спиж (бронзда) Бр. ОФ 6,5-0,15; 6 – електролітична мідь М-1; 7 – карбопластик графелон-20; 8 – сталь 10X17Н13М3Т; схема контакту [II-2]; $N=100$ Н; $N_f=100$ Н; $v=0,3$ м/с; $T=313$ К; $S_1(J_1) = 0...2$ км у режимі надграничних (а) та $S_2(J_2) = 2...18$ км граничних (б) навантажень.

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 \mathbf{m}_2 за (4) та \mathbf{m}_4 за (5), підраховавши кількість «нулів» та «екстремумів» на одиницю базової довжини профілограми [27, 77]:

$$m_2 = \pi^2 \sigma^2 (D_{zero,\theta})^2 = \pi^2 m_0 (D_{zero,\theta})^2; \quad (6)$$

$$m_4 = \pi^4 \sigma^2 (D_{zero,\theta})^2 (D_{extr,\theta})^2 = \pi^4 m_0 (D_{zero,\theta})^2 (D_{extr,\theta})^2. \quad (7)$$

3.2. Параметр широкосмугаєности спектру α визначається за [27]:

$$\alpha = \frac{m_0 m_4}{m_2^2} = \left(\frac{D_{extr,\theta}}{D_{zero,\theta}} \right)^2, \quad 1,5 \leq \alpha < +\infty. \quad (8)$$

Оцінку середнього квадратичного значення ширини спектру зробимо за виразом:

$$\Lambda = 1 - \frac{1}{\alpha} = \frac{m_0 m_4 - m_2^2}{m_0 m_4}. \quad (9)$$

3.3. 3-за симетрії щільність піків (максимумів) профілограми дорівнює половині відповідної щільності екстремумів [27]:

$$D_{peak,\theta} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}. \quad (10)$$

За (6), (7) отримаємо:

$$D_{peak,\theta} = \frac{1}{2} D_{extr,\theta}. \quad (11)$$

3.4. Для щільности вершин шорсткої випадкової поверхні маємо вираз [27]:

$$D_{sum} = \frac{1}{6\pi\sqrt{3}} \left(\frac{m_4}{m_2} \right), \quad (12)$$

тоді, порівнюючи (10) з (12), отримаємо співвідношення між щільностями вершин поверхні \mathbf{D}_{sum} та її профілограми \mathbf{D}_{peak} :

$$D_{sum} = \frac{2\pi \cdot D_{peak}^2}{3\sqrt{3}} \approx 1,2092 D_{peak}^2 = \frac{\pi \cdot D_{extr}^2}{6\sqrt{3}} \approx 0,3023 \cdot D_{extr}^2. \quad (13)$$

Сучасні прилади дозволяють отримувати вихідний сигнал $\mathbf{m}_0, \mathbf{m}_2, \mathbf{m}_4$.

4. Вибіркова аналіза анізотропних випадкових поверхонь.

4.1. Для аналізи анізотропної поверхні необхідно визначити дев'ять моментів СЩ [27]:

нульового порядку – \mathbf{m}_{00} ;

другого порядку – $\mathbf{m}_{20}, \mathbf{m}_{02}, \mathbf{m}_{11}$;

четвертого порядку – $\mathbf{m}_{13}, \mathbf{m}_{22}, \mathbf{m}_{31}, \mathbf{m}_{04}, \mathbf{m}_{40}$.

4.2. Моменти спектральної щільности профілограми шорсткої поверхні за [27] визначаються так:

$$m_{n\theta_i} = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\theta_i}(k') (k')^n dk'. \quad (14)$$

Моменти СЩ анізотропної поверхні \mathbf{m}_{pq} та СЩ її профілограми пов'язані між собою такими залежностями [77]:

$$m_{n\theta_i} = m_{n0} \cos^n \theta_i + C_1^n m_{n-1,1} \cos^{n-1} \theta_i \sin \theta_i + C_2^n m_{n-2,2} \cos^{n-2} \theta_i \sin^2 \theta_i + \dots + m_{0n} \sin^n \theta_i, \quad (15)$$

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

4.3. З цією метою на поверхні тертя довільно вибирали нульовий напрямок, який не співпадає 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 (15):

- для моменту нульового порядку – \mathbf{n} співвідношень виду: $m_{0\theta_i} = m_{00}$, де $i = 1, \dots, n$; (16)

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

$$m_{2\theta_i} = m_{20} \cos^2 \theta_i + 2m_{11} \cos \theta_i \sin \theta_i + m_{02} \sin^2 \theta_i, \quad (17)$$

де $i = 1, \dots, n$, причому будь-які три із \mathbf{n} рівнянь (17) лінійно незалежні;

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

$$m_{4\theta_i} = m_{40} \cos^4 \theta_i + 4m_{31} \cos^3 \theta_i \times \sin \theta_i + 6m_{22} \cos^2 \theta_i \sin^2 \theta_i + 4m_{13} \times \cos \theta_i \sin^3 \theta_i + m_{04} \sin^4 \theta_i, \quad (18)$$

де $i = 1, \dots, n$, причому будь-які п'ять із \mathbf{n} рівнянь (18) лінійно незалежні.

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

$$m_{00} = \frac{1}{5} (m_{0,0^\circ} + m_{0,30^\circ} + m_{0,45^\circ} + m_{0,60^\circ} + m_{0,90^\circ}); \quad (19)$$

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

$$m_{11} = \frac{1}{10} \left[-\left(\frac{3}{2} + 2\sqrt{3}\right)m_{2,0^0} - (2 - \sqrt{3})m_{2,30^0} + (7 + 2\sqrt{3})m_{2,45^0} - (2 - \sqrt{3})m_{2,60^0} - \left(\frac{3}{2} + 2\sqrt{3}\right)m_{2,90^0} \right]; \quad (21)$$

$$m_{02} = \frac{1}{10} \left[\left(1 + \frac{4}{\sqrt{3}}\right)m_{2,0^0} - (3 + \sqrt{3})m_{2,30^0} - (1 + 2\sqrt{3})m_{2,45^0} + \left(7 + \frac{5}{\sqrt{3}}\right)m_{2,60^0} + 6m_{2,90^0} \right]; \quad (22)$$

$$m_{40} = m_{4,0^0}; \quad (23)$$

$$m_{31} = -\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)m_{4,0^0} + (1 + \sqrt{3})m_{4,30^0} - \left(\frac{3}{2} + \sqrt{3}\right)m_{4,45^0} + \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)m_{4,60^0} - \frac{1}{4}m_{4,90^0}; \quad (24)$$

$$m_{22} = \frac{4\sqrt{3} + 3}{18}m_{4,0^0} - \frac{8\sqrt{3} + 12}{9}m_{4,30^0} + \frac{8 + 4\sqrt{3}}{3}m_{4,45^0} - \frac{8\sqrt{3} + 12}{9}m_{4,60^0} + \frac{4\sqrt{3} + 3}{18}m_{4,90^0}; \quad (25)$$

$$m_{13} = -\frac{1}{4}m_{4,0^0} + (1 + \sqrt{3})m_{4,30^0} - \left(\frac{3}{2} + \sqrt{3}\right)m_{4,45^0} + (1 + \sqrt{3})m_{4,60^0} - \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{\sqrt{3}}\right)m_{4,90^0}; \quad (26)$$

$$m_{04} = m_{4,90^0}. \quad (27)$$

4.5. Використовуючи метод [27, 77] визначали моменти СЩ профілограми:

$$m_{00} = \sigma^2 = \frac{1}{n} \frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^n R_{a\theta_i}^2; \quad (28)$$

$$m_{2\theta_i} = m_{00} (\pi D_{0,\theta_i})^2; \quad (29)$$

$$m_{4\theta_i} = m_{00} (\pi^2 D_{0,\theta_i} D_{extr,\theta_i})^2, \quad (30)$$

що дозволяє розрахувати моменти СЩ поверхні.

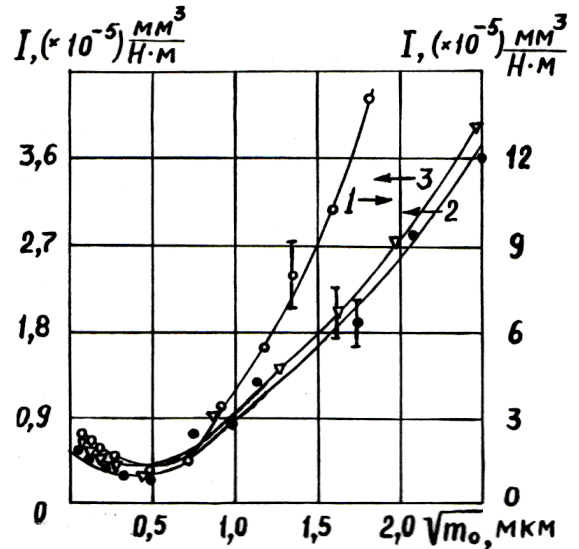


Рис. 3. Залежність питомої інтенсивності об'ємного зношування композиту на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого волокна УТМ-8 [флубон-15(20)] від моменту спектральної щільності нульового порядку при терті по сталі 10X17H13M3T ($p=3$ МПа; $v=0,8$ м/с; $T=322$ К) у 98%-вій оцтовій кислоті (1); по карбопластику графелон-20 ($p=2$ МПа; $v=0,3$ м/с; $T=318$ К) у дистильованій воді (2); по спижу (бронзді) Бр. ОФ 6,5-0,15 ($p=3$ МПа; $v=0,5$ м/с; $T=318$ К) у 40%-вій оцтовій кислоті (3); схема випробувань: [IV-6]; $S = 12$ км.

Полімерні зразки діаметром 10 мм і висотою 15 мм або із стороною квадрата 10 мм і висотою 15 мм після токарної обробки або фрезерування, послідовно припрацьовували на шліфувальній шкурці та металевому контргтілі. Металеve контргтілю шліфували, а потім обробляли на шліфувальній шкурці в одному напрямку (для того, щоб отримати анізотропну поверхню) і у випадкових напрямках (для того, щоб отримати поверхню, яка була б близькою до ізотропної поверхні). Після припрацьовання полімерних зразків металеве контргтілю знову припрацьовували на шліфувальній шкурці.

Профілограми мікросорсткості поверхонь знімали за допомогою профілометра-профілографа ВЭИ «Калибр» моделі «201» та моделі «252». Для одного напрямку знімали 50-60 базових довжин пофілограм для металевого контргтіля і 10-15 базових довжин профілограм для полімерного зразка. Для ізотропної поверхні профілограму знімали під кутом $\sim 45^0$ до напрямку ковзання, для анізотропної поверхні знімали профілограми під кутом 0^0 , 30^0 , 45^0 , 60^0 , 90^0 під час довільної орієнтації системи координат на поверхні тертя. Ділянки зйомки поверхні були рівнорозподілені за слідом тертя. Статистичні характеристики різних ділянок поверхні були однаковими в статистичному відношенні.

Профілограми оброблялися за методом МНК: знаходили середньоарифметичне відхилення профілю поверхні R_a , щільність нулів D_0 і

щільність екстремумів D_{extr} . Виміряна R_a і розрахункова за профілограмами D_0 (для моделі «252» D_0 виміряна) були статистично рівні.

Великий об'єм виборки і рівномірний розподіл її по поверхні 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. Параметер широкосмугаєстості α був більше 1,8, тобто тієї величини, яка характерна для «білого шуму».

Як буде показано далі, параметр широкосмугаєстості спектру α для поверхонь тертя металу і карбопластика не перевищував в основному 15-20, а максимальне викривлення поверхні профілограмою спостерігається при $\alpha = 1,5$ (при $\alpha \rightarrow \infty$ це викривлення відсутнє). Мінімальне значення α було в межах 1,69-12,52 (досліди №70, 72, 73, 75), а максимальне значення – в межах 23,79-91,77 (дослід №74). Таким чином, вивчення навіть ізотропних шорстких поверхонь тертя метал-карбопластик за допомогою параметрів профілограми або випадкових функцій неможливе.

II. Результати та обговорення

А. Ізотропна модель.

1. Вплив вихідної шорсткості поверхні контртіла за середнім квадратичним відхиленням профілю (R_{q0}) на середню лінійну інтенсивність зношування за трьома схемами контакту показано на рис. 1-3.

Як видно з рис. 1, для металополімерної пари для схеми випробувань [I-1] при терті без мащення спостерігається загальна закономірність: чим більше вихідна шорсткість поверхні металевго контртіла, тим більше зношування полімерного композиту. Для карбопластика на основі як твердого полімера ароматичного поліаміду (АПА), так і м'якої матриці ПТФЕ, із збільшенням R_{q0} від 0,025 до 3,52 мкм на початку шляху тертя (0...50 км) інтенсивність зношування сильно зростає і тим більше, чим менша твердість полімерної матриці. Із збільшенням шляху тертя до 200-1100 км інтенсивність зношування стає мало залежною від R_{q0} , при цьому інтенсивність зношування карбопластика на основі м'якої матриці ПТФЕ стає меншою від зношування карбопластика на основі твердої матриці АПА.

Як видно з рис. 2, при терті у дистильованій воді за схемою граничних навантажень [II-2] спостерігається мала залежність інтенсивності зношування композиту на основі ПТФЕ + 20% УТМ-8, по контртілах виготовлених з міді, бронзи та карбопластика графелон-20 в режимі випробувань при надграничних (рис. 2а) і граничних (рис. 2б) навантаженнях. І навпаки, для

вуглецевих і нержавіючих сталей ця залежність залишається значною для двох режимів навантажень і при даній схемі навантажень не змінюється при збільшенні шляху тертя.

Ймовірно при терті без мащення зменшення інтенсивності зношування із збільшенням шляху тертя пов'язане з формуванням переносних шарів на спряжених поверхнях, а у рідинах процеси масопереносу грають меншу роль, а більшу – процеси утворення захисних плівок металів і електрохімічні процеси, які активізуються у присутності вуглецево-волокнистого компонента композиту.

У табл. 1 приведені результати зміни шорсткості ізотропних поверхонь сталевго контртіла та спряженого з ним карбопластика на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2, наповненого дисперсією 20 об.% вуглецевих волокон після 150 км тертя та зношування без мащення за температури поверхні сталі 45 (НВ $4,52 \pm 0,14$ ГПа, вихідна шорсткість $R_{a0} = 0,2151 \pm 0,0252$ мкм) $T = 423 \pm 2$ К. Швидкість ковзання 3-х циліндричних зразків діаметром 10 мм по поверхні сталі 45 становила $v = 1,1$ м/с, питоме навантаження – $p = 3$ МПа, нормальне навантаження на 1 зразок – $N_f = 235,6$ Н, коефіцієнт взаємного перекриття поверхонь 3-х зразків та контртіла дорівнювало $KBP = 0,21$. Зразки попередньо припрацьовували (10 км) по сталі 45 ($R_{a0} = 0,05 \pm 0,01$ мкм) за питомим навантаженням $p = 0,5$ МПа та температурою 323 ± 1 К, тому отримували високу рівну (дзеркального вигляду) поверхню ($R_{a0} = 0,0355 \pm 0,0052$ мкм) перед випробуваннями. У композитний матеріал вводили вуглецеві волокна: з температурою кінцевої термообробки 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; з покриттями (ПК) графітованого волокна ТГН-2м: 12% піровуглецю (ТМП-3); 0,2-3,0% SiC (ТКК-1) або 0,8-4% ZrC (ТКЦ-1) та властивостями: низькомодульні низькоміцні (НМ-НТ); низькомодульні (LM); високомодульні (НМ), середньої (МТ) або високої міцності (НТ) та високомодульні високоміцні (НМ-НТ) тощо.

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 графіто-

ваних – 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%-им 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.

Таблиця 1

Зміна шорсткості ізотропних поверхонь: контртіла із сталі 45 (НВ $4,52 \pm 0,14$ ГПа; $Ra_0=0,2151 \pm 0,0252$ мкм) та карбопластика графелон-20 на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 + 20% об.% вуглецевого волокна ($Ra_0=0,0355 \pm 0,0052$ мкм) до ($S_0=0$ км) та після ($S_1=150$ км) тертя та зношування {схема контакту [I-1]; $p=3$ МПа; $N_f=235,6$ Н; $v=1,1$ м/с; $T=423 \pm 2$ К; КВП=0,21}

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 Δ_{2-1}	$(\sqrt{m_0})_1$ до випробування (1)	$(\sqrt{m_0})_2$ після випробування (2)	зміна шорсткості за час тертя Δ_{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
ДЕА	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

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 («Мгілон», «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.

Випробування за схемою [IV-6] (рис. 3) дозволило виявити вплив гідродинамічного ефекту на залежність $I \sim f(\sqrt{m_0})$, де m_0 – спектральний момент нульового порядку, пов'язаного з висотами нерівностей. Порівняльна аналіза результатів дослідження (рис. 3) трьох комплексів параметрів, трьох рідких середовищ та трьох контртіл дозволила зробити висновок, що гідродинамічні ефекти впливають на інтенсивність зношування карбопластика на основі ПТФЕ + 20% УТМ-8 у межах $\sqrt{m_0}=0,02-0,75$ мкм: мінімальна інтенсивність зношування спостерігається за $\sqrt{m_0}=0,17$ мкм (графелон-20), 0,25мкм (брондза),

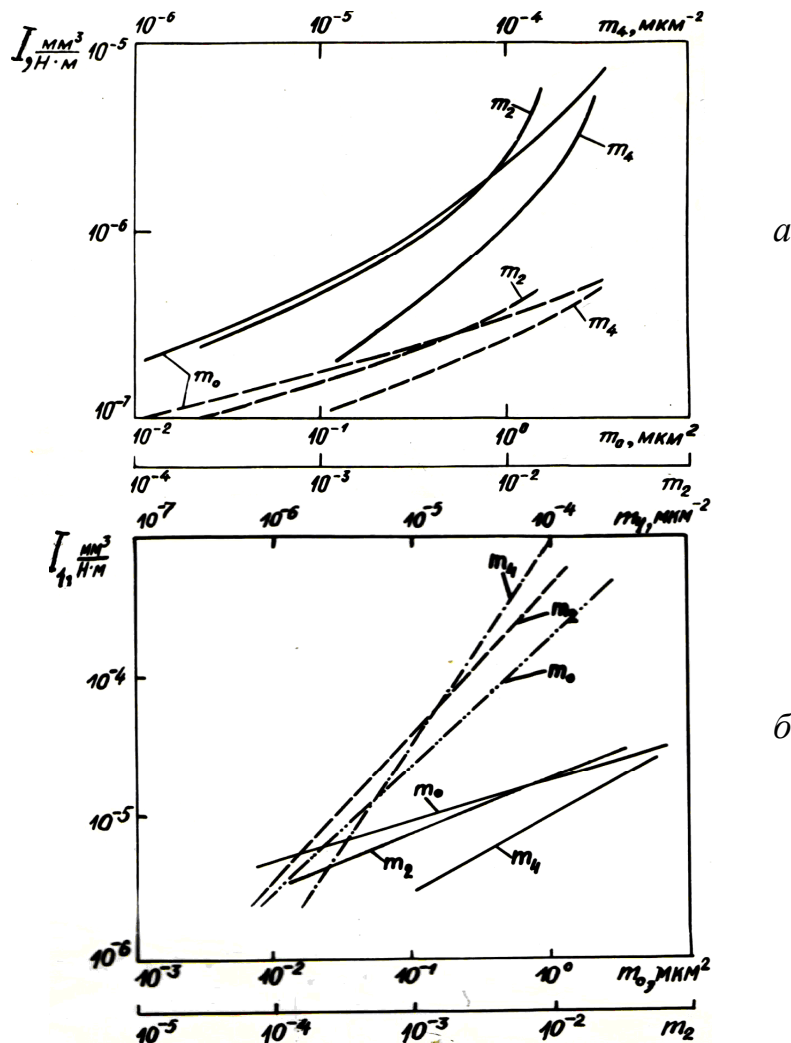


Рис. 4. Залежність інтенсивності об'ємного зношування від моментів спектральної щільності вихідної поверхні сталі 45 (НВ 4,5 ГПа) при терті без мащення (вологе повітря) карбопластика на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого волокна УТМ-8 [флубон-15(20)] на шляху тертя 0...50 км (суцільні лінії) та 300-400 км (крисковані лінії) (а) у режимі поміркованих питомих навантажень та вихідної поверхні спижа (брондзи) Бр. ОФ 6,5-0,15 (суцільні лінії) і сталі 45 (НВ 4,5 ГПа) (крисковані лінії) при терті цього ж карбопластика в дистильованій воді ($S_1 = 2$ км) у режимі надграничних питомих навантажень (б); m_0 – спектральний момент нульового порядку (висотний параметр), m_2 – спектральний момент другого порядку (параметр, що пов'язаний з градієнтом шорсткої поверхні), m_4 – спектральний момент четвертого порядку (параметр, що пов'язаний із середньою кривиною у вершині мікронерівностей).

0,33 мкм (сталь), а за $\sqrt{m_0} > 0,75$ мкм інтенсивність зношування різко зростає так, як це спостерігається за мінімальних гідродинамічних ефектів та відсутності проміжних плівок.

Як видно з рис. 4, інтенсивність зношування карбопластика на основі ПТФЕ + 20% УТМ-8 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 (рис. 4а) і залежить від природи спряженої поверхні (рис. 4б).

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.

2. Результати дослідження інтенсивності зношування (I) зразків полімерного композиту «флубон-15(20)» по контртілу із загартованої сталі 45 та моментів спектральної щільності шорсткої поверхні контртіла від шляху тертя $S = 0-1000$ км та шорсткості Ra_0 вихідної поверхні сталі 45 під час тертя без мащення зведені в табл. 2.

3. Дослідження топографії спряжених поверхонь ХМА – карбопластик – сталь

Досліджували карбопластики, які отримані за ХМА-технологією. На рис. 5-9 наведені зміни щільності ймовірності висот вершин спряжених поверхонь і середньої кривини поверхонь у вершині мікронерівностей при терті на лабораторній машині ХТІ-72 карбопластика на основі ПТФЕ + 20% КВ УТМ-8 по сталі 45 (НВ 4,5 ГПа) з вихідною шорсткістю поверхні $Ra_0 = 0,085; 0,22; 0,49; 0,85; 1,42$ мкм. Шорсткість поверхонь

сталі 45 і полімерного зразка вимірювали через 0; 50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 1000; 1200; 1400; 1600; ...; 3600 км тертя.

3.1. Для вихідних відносно рівних поверхонь сталі 45 ($Ra_0 < 0,35$ мкм) на початку ковзання розподіл висот вершин контртіла віддаляється від гавсовського, а потім наближається до нього. Цей процес коливань розподілу навколо вихідної поверхні носить хвильовий характер з періодом коливань 400-500 км для $Ra_0 = 0,085$ мкм (рис. 5а) та 1000-1200 км для $Ra_0 = 0,22$ мкм (рис. 6а).

3.2. Для зразка композиту навпаки: на початку ковзання розподіл висот вершин наближається до гавсовського, а потім віддаляється від нього (рис. 5в). Цей процес коливань розподілу навколо вихідної поверхні носить теж хвильовий характер з періодом коливань 150 км для $Ra_0 = 0,085$ (рис. 5в); 0,22 мкм (рис. 6а) контртіла на початку ковзання, 300-350 км на шляху тертя $S > 800$ км. При цьому висота хвилі зменшується із збільшенням шляху тертя.

3.3. Для вихідної поверхні сталі $Ra_0 < 0,35$ мкм на початку ковзання кривина поверхні контртіла збільшується і спектр розподілу стає вузьким, тобто містить хвилі близької довжини (рис. 5б і 6б). При подальшому ковзанні настає зменшення кривин. Таким чином, залежність розподілу кривин від шляху тертя носить також хвильовий характер навколо вихідної поверхні з періодом коливань 150-200 км на початку ковзання та 700-800 км після 200 км, при цьому висота хвилі зростає у 1,5-2 рази (рис. 5б і 6б).

Високі піки завжди мають більшу очікувану середню кривину, ніж низькі. Зі зменшенням параметра широкосмугастості проходить збільшення ймовірності появи високих піків.

Таблиця 2

Результати дослідження залежностей інтенсивності зношування (I) зразків полімерного композиту флубон-15(20) по сталі 45 та зміни параметрів шорсткості поверхні контртіла (m_0 , m_2 , m_4) від шляху тертя та вихідної шорсткості поверхні за Ra_0

S, км	$I, \times 10^7 \frac{MM^3}{H \cdot m}$	$m_0, мкм^2$	m_2	$m_4, мкм^2$	α	Λ
$Ra_0 = 0,085$ мкм (дослід №70)						
0	0	0,011301	0,0002309	0,00002147	4,550899	0,780263
50	2,14	0,017490	0,0003738	0,00003378	4,228349	0,763501
100	1,24	0,007712	0,0001702	0,00000869	2,313490	0,567753
200	2,38	0,011500	0,0002528	0,00002195	3,949828	0,746824
300	2,11	0,009625	0,0002915	0,00003063	3,469530	0,711777
400	0,97	0,006723	0,0002368	0,00005701	6,835193	0,853698
500	1,37	0,009753	0,0004727	0,00013932	6,081077	0,835555
600	1,47	0,017220	0,0005206	0,00005391	3,425265	0,708052
700	2,31	0,008728	0,0001078	0,00001236	9,283157	0,892278
800	0,70	0,013110	0,0000788	0,00000593	12,520020	0,920128
900	3,05	0,015860	0,0003121	0,00006753	10,995430	0,909053
1000	1,84	0,012060	0,0001524	0,00001404	7,290285	0,862831

Ra ₀ =0,22 мкм (дослід №72)						
0	0	0,053360	0,0003492	0,00001198	5,242328	0,809245
50	3,60	0,012178	0,0001126	0,00000417	4,005302	0,750331
100	2,07	0,061022	0,0004435	0,00001498	4,647410	0,784826
200	2,73	0,057614	0,0003605	0,00001114	4,938587	0,797513
300	3,83	0,061716	0,0004616	0,00001101	3,188992	0,686421
400	1,63	0,074445	0,0014758	0,00009749	3,332273	0,699905
500	1,70	0,059589	0,0001444	0,00000194	5,544130	0,819629
600	1,83	0,036553	0,0002337	0,00000458	3,065287	0,673766
700	1,63	0,044434	0,0002070	0,00000567	5,879735	0,829924
800	1,07	0,045120	0,0001390	0,00000295	6,889084	0,854843
900	1,63	0,046281	0,0001268	0,00000329	9,470221	0,894406
1000	2,17	0,044685	0,0001576	0,00000668	12,017823	0,916790
Ra ₀ =0,49 мкм (дослід №73)						
0	0	0,373363	0,0037697	0,00009350	2,456571	0,592929
50	8,53	0,181631	0,0009309	0,00001285	2,693314	0,628710
100	3,00	0,272209	0,0009657	0,00001437	4,194448	0,761590
200	1,83	0,296093	0,0010464	0,00001226	3,315302	0,698368
300	3,36	0,215600	0,0004321	0,00000282	3,256337	0,692906
400	2,50	0,093830	0,0004773	0,00000749	3,084897	0,675840
500	3,12	0,059555	0,0003875	0,00001332	5,282981	0,810713
600	2,64	0,058638	0,0003944	0,00001248	4,704570	0,787441
700	1,95	0,049754	0,0002573	0,00000967	7,267330	0,862398
800	2,74	0,068332	0,0003258	0,00000879	5,658624	0,823279
900	2,15	0,055481	0,0003112	0,00001085	6,215769	0,839119
1000	1,98	0,061226	0,0002504	0,00000965	9,423116	0,893878
Ra ₀ =0,85 мкм (дослід №74)						
0	0	0,688124	0,0094013	0,0030556	23,789613	0,957965
50	21,4	0,441975	0,0091864	0,0049251	25,794199	0,961232
100	3,60	0,453603	0,0049997	0,0018954	34,394492	0,970926
200	4,03	0,277977	0,0022508	0,0005449	29,898669	0,966554
300	4,27	0,271635	0,0019342	0,0005616	40,776512	0,975476
400	5,13	0,201744	0,0014471	0,0003060	29,479829	0,966079
500	2,93	0,220691	0,0015783	0,0003146	27,871749	0,964121
600	3,53	0,095866	0,0004918	0,0001009	39,992516	0,974995
700	2,60	0,113902	0,0002131	0,0000233	58,441368	0,982889
800	2,24	0,129203	0,0002578	0,0000326	63,375934	0,984221
900	2,15	0,109305	0,0002475	0,0000445	79,405326	0,987406
1000	2,43	0,098982	0,0002656	0,0000654	91,765161	0,989103
Ra ₀ =1,42 мкм (дослід №75)						
0	0	3,189049	0,0137365	0,0001935	3,270318	0,694219
50	49,93	1,336082	0,0023406	0,00000693	1,690098	0,408318
100	7,67	0,986542	0,0012404	0,00000536	3,436821	0,709033
200	2,47	0,235362	0,0008864	0,00001089	3,262156	0,693454
300	5,00	0,312807	0,0012212	0,00002005	4,205496	0,762216
400	2,80	0,362825	0,0003567	0,00000217	6,188006	0,838397
500	3,20	0,510053	0,0005029	0,00000259	5,223382	0,808553
600	2,27	0,785134	0,0011900	0,00000465	2,578118	0,612120
700	2,27	0,430828	0,0007116	0,00000373	3,173517	0,684892
800	3,02	0,475262	0,0006761	0,00000452	4,699478	0,787210
900	2,42	0,449981	0,0005867	0,00000316	4,130942	0,757924
1000	2,11	0,505112	0,0006315	0,00000405	5,129748	0,805059

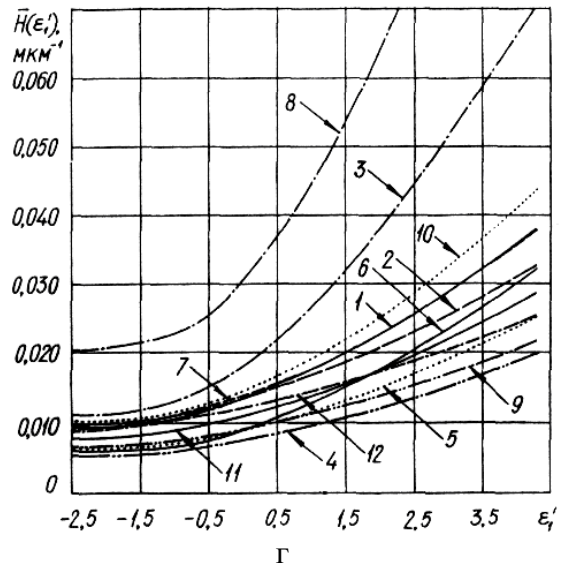
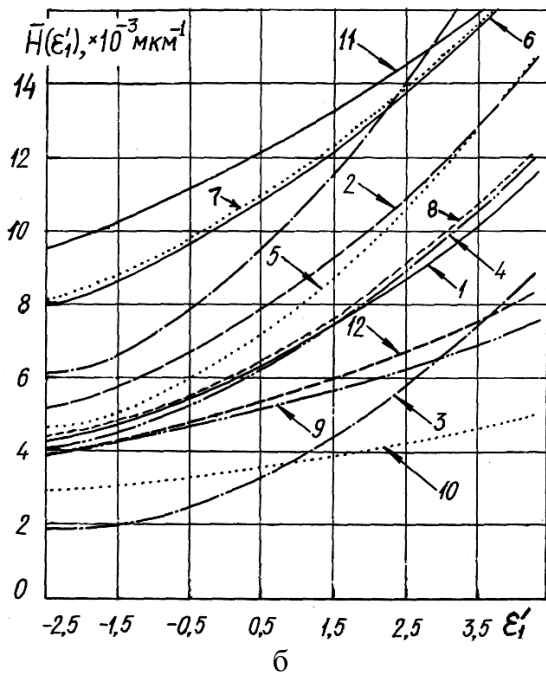
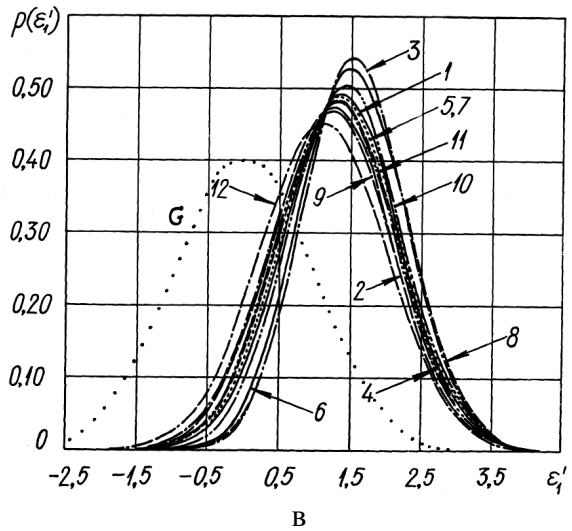
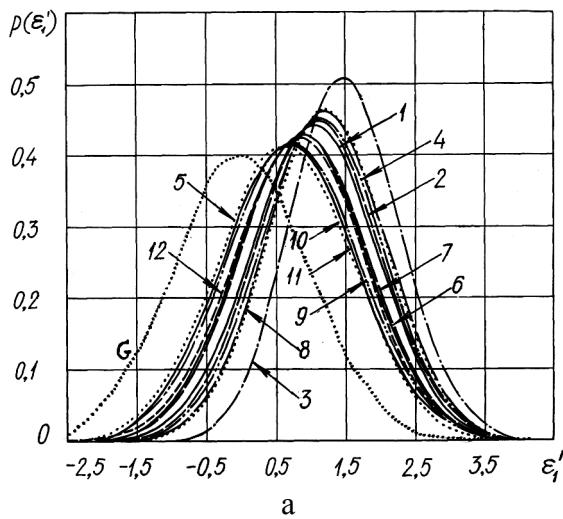


Рис. 5. Щільність ймовірностей висот вершин поверхні сталі 45 (вихідне $Ra_0=0,085$ мкм) (а) і зразка композиту на основі ПТФЕ + 20% КВ УТМ-8 (в) та середня кривина поверхні у вершині мікронерівностей сталі 45 (б) та зразка (г) після шляху тертя (км): 1 – 0; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; 6 – 400; 7 – 500; 8 – 600; 9 – 700; 10 – 800; 11 – 1000; 12 – 1200; G – розподіл Гауса.

3.4. Для зразків карбопластиків на початку тертя по сталі 45 ($Ra_0 < 0,35$ мкм) кривини зменшуються, амплітуда коливань розподілу кривин навколо вихідної поверхні має період 150-200 км до $S \leq 200$ км, 300-400 км за $S > 200$ км та 800-1000 км за $S > 800$ км (рис. 5г).

3.5. Для сильно нерівних вихідних поверхонь сталі 45 ($Ra_0 > 0,4$ мкм) при терті на шляху тертя до 600-800 км розподіл висот вершин поверхні контртіла поступово наближається до гавсеського, параметр широкосмугаєстості зростає і спектр містить значний діапазон довжин хвиль, кривина поверхні значно зменшується. Після цього спостерігається коливання розподілу

висот вершин (рис. 7а, 8а, 9а) і кривин (рис. 7б, 8б, 9б) поверхні навколо поверхні, яка утворилася після 600-800 км тертя. Тобто, після утворення достатньо товстої проміжної плівки на поверхні контртіла і заповнення нею впадин мікронерівностей, спостерігаються закономірності зміни розподілу висот вершин і кривин контртіла, які виявлені для рівних поверхонь. Для зразків спостерігаються закономірності зміни розподілу висот вершин (рис. 7в та рис. 9в) та кривин (рис. 7г та рис. 9г) для всього шляху тертя, які виявлені у разі контакту зразків карбопластиків з рівними поверхнями контртіла.

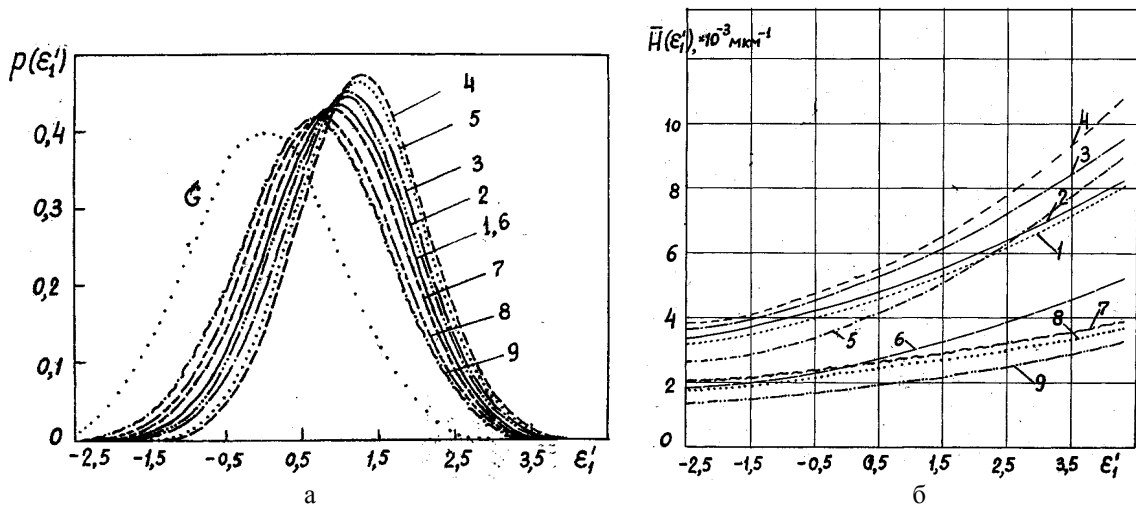


Рис. 6. Щільність ймовірностей висот вершин поверхні сталі 45 (вихідне $Ra_0=0,22$ мкм) (а) та середня кривина поверхні у вершині мікронерівностей сталі 45 (б) після шляху тертя (км): 1 – 0; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; 6 – 400; 7 – 500; 8 – 600; 9 – 700; G – розподіл Гауса.

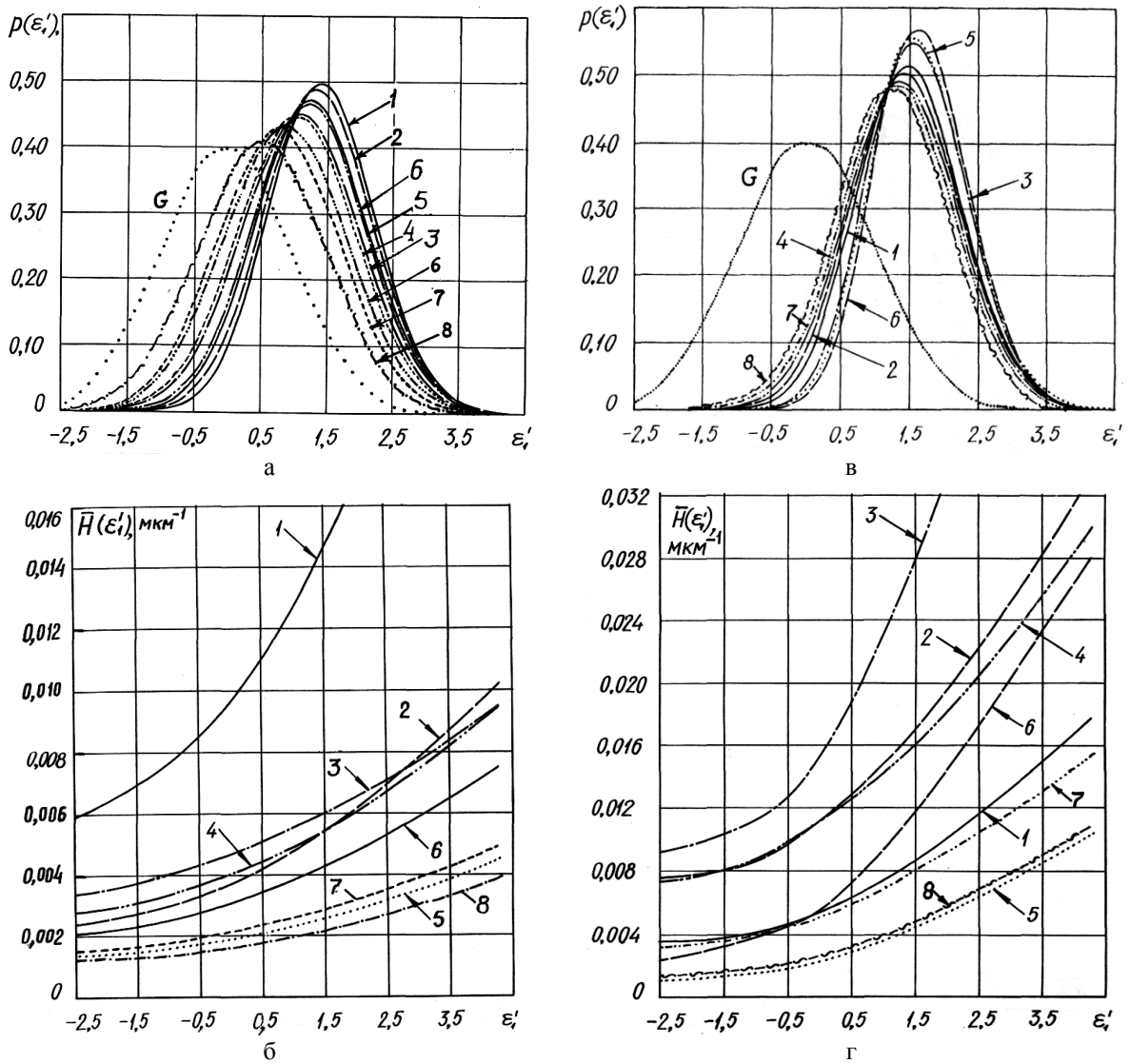


Рис. 7. Щільність ймовірностей висот вершин поверхні сталі 45 (вихідне $Ra_0=0,49$ мкм) (а) і зразка композиту на основі ПТФЕ + 20% КВ УТМ-8 (в) та середня кривина поверхні у вершині мікронерівностей сталі 45 (б) та зразка (г) після шляху тертя (км): 1 – 0; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; 6 – 400; 7 – 500; 8 – 600; G – розподіл Гауса.

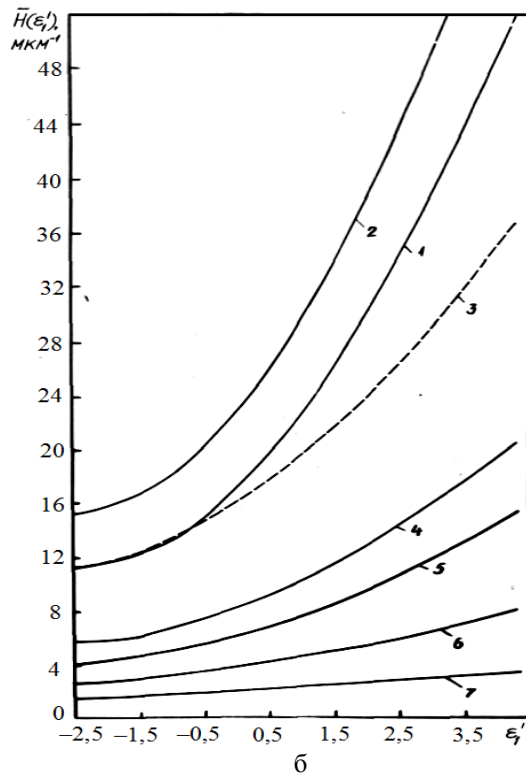
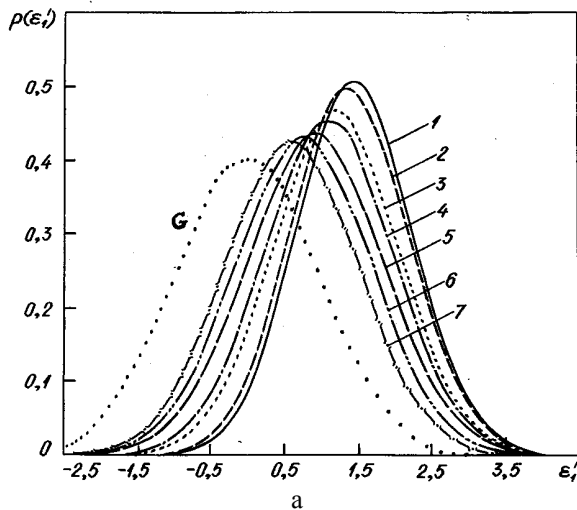


Рис. 8. Щільність ймовірностей висот вершин поверхні сталі 45 (вихідне $Ra_0=0,85$ мкм) (а) та середня кривина поверхні у вершині мікронерівностей сталі 45 (б) після шляху тертя (км): 1 – 0; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; 6 – 400; 7 – 500; G – розподіл Гауса.

3.6. Для всіх випробувань з вихідною поверхнею контргтіла із сталі 45 $Ra_0=0,085; 0,22; 0,49; 1,42$ мкм параметр широкосмугаості спектру α змінюється в межах 1,690-12,521 (лише для вихідної поверхні контргтіла із сталі 45 з $Ra_0=0,85$ мкм – 23,79-91,765) для контргтіла та 1,85-5,2 для полімерних зразків. Аналогічно для всіх випробувань з вихідною поверхнею контргтіла із сталі 45 $Ra_0=0,085; 0,22; 0,49; 1,42$ мкм середнє квадратичне значення ширини спектру Λ змінюється в межах 0,408-0,920 (лише для вихідної поверхні контргтіла із сталі 45 з $Ra_0=0,85$ мкм – 0,958-0,989).

4. Результати дослідження інтенсивності зношування (I) зразків полімерного композиту флубон-15(20) по контргтілу із загартованої сталі 45 та моментів спектральної щільності шорсткої поверхні контргтіла від шляху тертя $S=0-1000$ км та шорсткості Ra_0 вихідної поверхні сталі 45 зведені в табл. 2.

4.1. 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 контргтіла:

$r_{1,2}=0,0253 < r_{кр}$ $\{q=1-\alpha/2=0,975$ ($\alpha=0,05$); $f=N-2=19\}=0,4329$ [78], тобто між величинами шорсткості поверхонь вихідної та після тертя існує надійний ($p=0,95$) нелінійний зв'язок зі ступенем нелінійності $\xi_2(r) = \frac{r_{кр}}{|r_{1,2}|} = 17,11$ та за-

лишками ступеня лінійності $\xi_1(r) = \frac{|r_{1,2}|}{r_{кр}} = 0,058$;

• для полімерного композиту:

$r_{3,4}=0,6762 > r_{кр}$ $\{q=0,975$; $f=19\}=0,4329$ [78], тобто між величинами шорсткості поверхонь вихідної та після тертя існує надійний ($p=0,95$) лінійний зв'язок зі ступенем лінійності $\xi_1(r) = \frac{|r_{3,4}|}{r_{кр}} = 1,562$ та залишками ступеня

нелінійності $\xi_2(r) = \frac{r_{кр}}{|r_{3,4}|} = 0,640$;

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 – металево контргтіло у наслідок тертя та зношування існує кореляційний зв'язок:

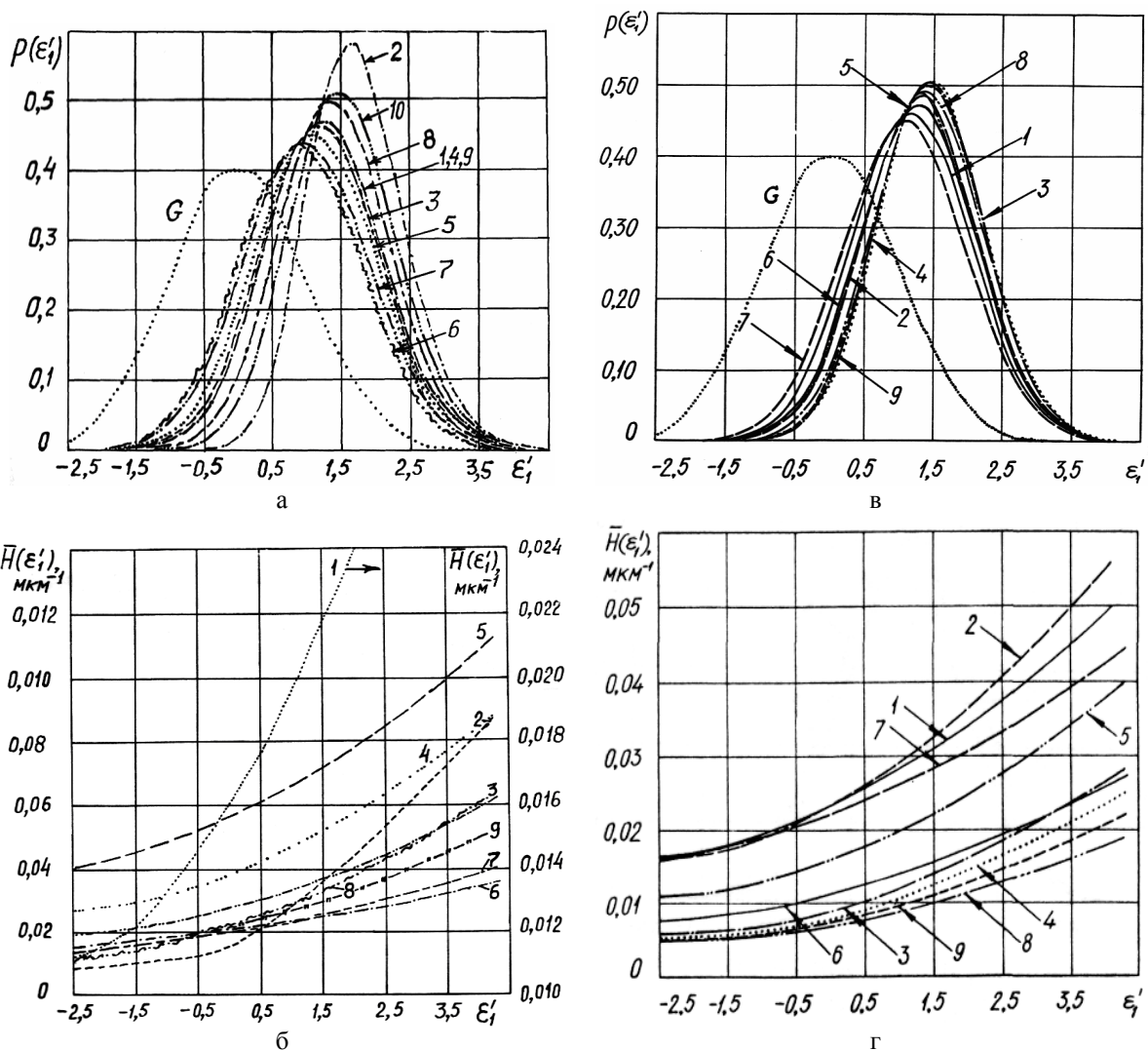


Рис. 9. Щільність ймовірностей висот вершин поверхні сталі 45 (вихідне $Ra_0=1,42$ мкм) (а) і зразка композиту на основі ПТФЕ + 20% КВ УТМ-8 (в) та середня кривина поверхні у вершині мікронерівностей сталі 45 (б) та зразка (г) після шляху тертя (км): 1 – 0; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; 6 – 400; 7 – 500; 8 – 600; 9 – 700; 10 – 800; G – розподіл Гавса.

• для металевго контртіла:

$r_{5,6}=0,4942 < r_{кр} \{q=0,975; f=N-2=5\}=0,7545$ [78], 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 $\xi_1(r)=0,655$;

• для полімерного композиту:

$r_{5,6}=0,1490 < r_{кр} \{q=0,975; f=5\}=0,7545$ [78], 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 $\xi_1(r)=0,197$;

3) для полімерних композицій, наповнених вуглецевими волокнами, представленими у табл. 1, між змінами шорсткості поверхні металевго

контртіла $[(\Delta\sqrt{m_0})_в - (\Delta\sqrt{m_0})_Г]_{Me}$ та полімерного композиту $[(\Delta\sqrt{m_0})_в - (\Delta\sqrt{m_0})_Г]_{Пк}$ в 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 $\xi_2(r)=0,912$.

4.2. Встановимо лінійний кореляційний

зв'язок і, відповідно, за абсолютною величиною коефіцієнта кореляції, складемо мінорантні ряди за силою впливу спектральних моментів СЩ на питому інтенсивність об'ємного зношування за такими співвідношеннями:

1) сили впливу величин вихідних ($S=0$ км) моментів СЩ (m_0, m_2, m_4) ізотропної шорсткої поверхні контртіла зі сталі 45 на питому інтенсивність об'ємного зношування (I_j) полімерного композиту флубон-15(20) на шляху тертя ΔS_j , де $j=1, 2, \dots, 11$ (табл. 3);

2) сили впливу величин моментів СЩ (m_0', m_2', m_4') ізотропної шорсткої поверхні контртіла зі сталі 45, визначених перед j -етапом випробувань ($\Delta S_j' = S_{j+1}' - S_j'$) на питому інтенсивність об'ємного зношування (I_{j+1}') полімерного композиту на $\Delta S_j'$ етапі тертя (табл. 4);

3) сили впливу післядії процесів тертя та зношування полімерного композиту на інтервалі шляху тертя ΔS_j за оцінкою величини моментів СЩ шорсткої ізотропної поверхні контртіла зі сталі 45 на шляху тертя S_j , де $j=0, 1, 2, \dots, 10$, на питому інтенсивність об'ємного зношування полімерного композиту на інтервалі шляху тертя $\Delta S_{11} = 900-1000$ (табл. 5);

4) сили впливу процесів тертя та зношування за оцінкою питомої інтенсивності об'ємного зношування (I_j') полімерного композиту на інтервалі шляху тертя $\Delta S_j'$ на шорсткість ізотропної поверхні за спектральними моментами m_0', m_2', m_4' поверхні контртіла зі сталі 45, визначених після j -етапу шляху тертя (табл. 6).

Як видно з табл. 3, вихідні параметри шорсткості поверхні сталі 45 – спектральні

моменти СЩ нульового порядку m_0 , пов'язаного з висотою мікронерівностей, другого порядку m_2 , пов'язаного з градієнтом поверхні та четвертого порядку m_4 , пов'язаного з кривиною у вершині мікронерівностей, впливають (за коефіцієнтом кореляції) на питому інтенсивність об'ємного зношування полімерного композиту за такими співвідношеннями у залежності від шляху тертя таким чином: 1) на початкову шляху тертя $S=0-100$ км привалює висотний параметер (m_0), потім градієнт поверхні (m_2) та кривина (m_4); 2) далі на шляху тертя 200-600 км привалюють (періодично через 200 км тертя) градієнт поверхні (m_2), потім висотний параметер (m_0) та кривина (m_4), змінюючи на параметер кривини (m_4), який перевищує за впливом параметер градієнта поверхні (m_2) та висотний параметер (m_0); 3) далі на шляху тертя $S_j \geq 600$ км найбільш впливовим параметером є кривина (m_4), друге місце посідає параметер або градієнта поверхні (m_2), або висотний (m_0). Ці зміни наймовірніше пов'язані з формуванням на поверхнях тертя проміжної плівки.

Таблиця 3

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

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

Як видно з табл. 4, аналогічний вплив на I_j полімерного композиту виявлений для параметрів ізотропної шорсткоти поверхні зі сталі 45, значення яких безпосередньо виявлені перед j -етапом тертя: 1) на етапі тертя від 0 до 100 км привалює висотний параметер (m_0), потім параметер градієнта поверхні (m_2) та параметер кривини поверхні (m_4); 2) в межах шляху тертя від 100 до 600 км співвідношення параметерів через 100 км періодично змінюється від $m_0' > m_2' > m_4'$ до $m_2' > m_4' > m_0'$; 3) в межах шляху тертя $S_j \geq 600$ км співвідношення параметерів $m_2' > m_4' > m_0'$ через 100 км змінюється на співвідношення $m_4' > m_2' > m_0'$, чи $m_4' > m_0' > m_2'$, при цьому після $S_j \geq 800$ км впливи параметрів m_0 , m_2 , m_4 на I_j полімерного композиту значно послаблюються, ймовірно, що на стан проміжної плівки починають діяти інші чинники.

Як видно з табл. 5, віддалений вплив (післядія) параметерів j -го етапу шляху тертя, де $j=0, 1, 2, \dots, 10$, на інтенсивність зношування полімерного композиту (I_{j+1}) на $j=11$ етапі шляху тертя привалюють два параметери СЩ: 1) m_4 , m_2 в межах $S_j=0-500$ км; 2) в межах $S_j=600-800$ км – m_4 , m_0 ; 3) за $S_{10} \geq 900$ км впливи m_0 , m_2 , m_4 значно послаблюються, бо на перше місце виступають інші чинники.

Як видно з табл. 6, вплив процесів тертя та зношування (за оцінками I_j полімерного композиту) на формування шорсткоти поверхні контртіла зі сталі 45 після j -етапу шляху тертя, пов'язаний з одним параметером СЩ: 1) в межах шляху тертя 0-100 км – m_0 ; 2) 200-500 км – чергуються через 100 км m_4 з m_0 ; 3) в межах 600-1000 км – переважно m_4 .

Б. Анізотропна модель.

Аналогічно були отримані рівняння під час дослідження анізотропної поверхні контртіла із сталі 45 (НВ $4,50 \pm 0,02$ ГПа) та композиту на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого волокна УТМ-8.

Коефіцієнти кореляцій між питомими інтенсивностями об'ємного зношування композиту та інваріантами моментів спектральної щільності (СЩ) нульового порядку M_1 (мкм^2), пов'язаного з висотами вершин мікро- та нанонерівностей, інваріантами моментів СЩ другого порядку M_2 і M_3 (безрозмірні величини), які пов'язані з градієнтом поверхні та інваріантами моментів СЩ четвертого порядку M_4 (мкм^{-2}), M_5 і M_6 (мкм^{-4}), M_7 (мкм^{-6}), які пов'язані з кривиною у вершині мікро- та нанонерівностей вихідної поверхні або поверхні, що утворилася в процесі тертя та зношування в кінці шляху 300 км M_1' , M_2' , M_3' , M_4' , M_5' , M_6' , M_7' , наведені у табл. 7.

Таблиця 4

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

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

Таблиця 5

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

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

Таблиця 6

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

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

За принципом аналогії однакових за природою та механізмом явищ із означеннями інваріантних комбінацій M_i 9-ти спектральних моментів, які за Лонге-Гігінсом [23] описують анізотропну випадкову поверхню (нульового порядку – m_{00} ; другого

порядку – m_{20} , m_{02} , m_{11} ; четвертого порядку – m_{13} , m_{31} , m_{22} , m_{40} , m_{04}), та введеними нами [57] у науковий обіг 8-ми параметрів широкосмугастости спектральної щільності розподілу нерівностей анізотропної поверхні α_i :

$$\alpha_1 = \frac{M_0 M_4}{M_2^2} = \frac{m_{00}(m_{40} + 2m_{22} + m_{04})}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (31)$$

$$\alpha_2 = \frac{M_0 M_5}{M_2^2} = \frac{m_{00}(m_{40}m_{04} - 4m_{13}m_{31} + 3m_{22}^2)}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (32)$$

$$\alpha_3 = \frac{M_0 M_6}{M_2^2} = \frac{m_{00}[(m_{40} + m_{22})(m_{22} + m_{04}) - (m_{31} + m_{13})^2]}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (33)$$

$$\alpha_4 = \frac{M_0 M_7}{M_2^2} = \frac{m_{00}[m_{40}(m_{22}m_{04} - m_{13}^2) - m_{31}(m_{31}m_{04} - m_{13}m_{22}) + m_{22}(m_{31}m_{13} - m_{22}^2)]}{(m_{02} + m_{20})^2}; \quad (34)$$

$$\alpha_5 = \frac{M_0 M_4}{M_3^2} = \frac{m_{00}(m_{40} + 2m_{22} + m_{04})}{(m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2}; \quad (35)$$

$$\alpha_6 = \frac{M_0 M_5}{M_3^2} = \frac{m_{00}(m_{40}m_{04} - 4m_{13}m_{31} + 3m_{22}^2)}{(m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2}; \quad (36)$$

$$\alpha_7 = \frac{M_0 M_6}{M_3^2} = \frac{m_{00}[(m_{40} + m_{22})(m_{22} + m_{04}) - (m_{31} + m_{13})^2]}{(m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2}; \quad (37)$$

$$\alpha_8 = \frac{M_0 M_7}{M_3^2} = \frac{m_{00}[m_{40}(m_{22}m_{04} - m_{13}^2) - m_{31}(m_{31}m_{04} - m_{13}m_{22}) + m_{22}(m_{31}m_{13} - m_{22}^2)]}{(m_{20}m_{02} - m_{11}^2)^2}; \quad (38)$$

розрахуємо частинні інваріантні комбінації коефіцієнтів кореляцій (R_i) лінійного зв'язку питомої інтенсивності об'ємного зношування (I_j) з інваріантними комбінаціями (α_i) спектральних моментів (M_i):

$$\alpha_1 = \frac{M_1 M_4}{M_2^2} [-] \Rightarrow R_1 = \frac{r_1 r_4}{r_2^2}; \quad (39)$$

$$\alpha_2 = \frac{M_1 M_5}{M_2^2} [\text{МКМ}^{-2}] \Rightarrow R_2 = \frac{r_1 r_5}{r_2^2}; \quad (40)$$

$$\alpha_3 = \frac{M_1 M_6}{M_2^2} [\text{МКМ}^{-2}] \Rightarrow R_3 = \frac{r_1 r_6}{r_2^2}; \quad (41)$$

$$\alpha_4 = \frac{M_1 M_7}{M_2^2} [\text{МКМ}^{-4}] \Rightarrow R_4 = \frac{r_1 r_7}{r_2^2}; \quad (42)$$

$$\alpha_5 = \frac{M_1 M_4}{M_3^2} [-] \Rightarrow R_5 = \frac{r_1 r_4}{r_3^2}; \quad (43)$$

$$\alpha_6 = \frac{M_1 M_5}{M_3^2} [\text{МКМ}^{-2}] \Rightarrow R_6 = \frac{r_1 r_5}{r_3^2}; \quad (44)$$

$$\alpha_7 = \frac{M_1 M_6}{M_3^2} [\text{МКМ}^{-2}] \Rightarrow R_7 = \frac{r_1 r_6}{r_3^2}; \quad (45)$$

$$\alpha_8 = \frac{M_1 M_7}{M_3^2} [\text{МКМ}^{-4}] \Rightarrow R_8 = \frac{r_1 r_7}{r_3^2}. \quad (46)$$

Результати розрахунків R_i занесені в табл. 7. Введемо у науковий обіг узагальнений параметер широкосмугастости (α_k , де $k \equiv Q, q, a, g, h$ – вид середньої) СЦ анізотропної поверхні i , відповідно, за принципом аналогії, узагальнений коефіцієнт кореляцій лінійного зв'язку \bar{R}_k між питомою інтенсивністю об'ємного зношування I_j та α_k , розраховавши:

- середню кубічну:

$$\alpha_Q = \sqrt[3]{\left(\sum_{i=1}^{n=8} \alpha_i^3\right)/n} \Rightarrow \bar{R}_Q = \sqrt[3]{\left(\sum_{i=1}^{n=8} R_i^3\right)/n}; \quad (47)$$

- середню квадратичну:

$$\alpha_q = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n=8} \alpha_i^2\right)/n} \Rightarrow \bar{R}_q = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n=8} R_i^2\right)/n}; \quad (48)$$

- середню арифметичну:

$$\alpha_a = \left(\sum_{i=1}^{n=8} \alpha_i\right)/n \Rightarrow \bar{R}_a = \left(\sum_{i=1}^{n=8} R_i\right)/n; \quad (49)$$

- середню геометричну:

$$\alpha_g = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n=8} \alpha_i} \Rightarrow \bar{R}_g = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n=8} R_i}; \quad (50)$$

- середню гармонійну:

$$\alpha_h = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^{n=8} \left(\frac{1}{\alpha_i}\right)\right]/n} \Rightarrow \bar{R}_h = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^{n=8} \left(\frac{1}{R_i}\right)\right]/n}. \quad (51)$$

Результати розрахунків \bar{R}_Q , \bar{R}_q , \bar{R}_a , \bar{R}_g ,

\bar{R}_h занесені у табл. 7.

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

• **за критичним коефіцієнтом кореляцій $r_{кр}\{q=1-(\alpha/2); f=n-2\}$ [78, 79], де $\alpha=0,05$ – рівень значущості, f – число вільностей, а $n=8$ – кількість варіантів, тоді за [78] $r_{кр}\{q=0,975; f=6\}=0,7067$, при цьому ступінь лінійності лінійного зв'язку визначали за співвідношеннями:**

$$\xi_1(r) = \frac{|r_p|}{r_{кр}}; \quad \xi_1(R) = \frac{|R_p|}{r_{кр}}; \quad \xi_1(\bar{R}) = \frac{|\bar{R}_p|}{r_{кр}}, \quad (52)$$

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

$$\xi_2(r) = \frac{r_{кр}}{|r_p|}; \quad \xi_2(R) = \frac{r_{кр}}{|R_p|}; \quad \xi_2(\bar{R}) = \frac{r_{кр}}{|\bar{R}_p|}; \quad (53)$$

• **за теоретичним (табличним) значенням критерію Стьюдента [78] $t_T\{q=1-(\alpha/2); f=n-2\}=$**

$t_T\{q=0,975; f=6\}=2,447$ (для $\alpha=0,05$), порівнюючи його з розрахованою t -статистикою t_p [79]:

$$|t'_p| = \frac{r_p}{\sqrt{1-r_p^2}} \sqrt{n-2}; \quad (54)$$

$$|t''_p| = \frac{R_p}{\sqrt{1-R_p^2}} \sqrt{n-2}; \quad (55)$$

$$|t'''_p| = \frac{\bar{R}_p}{\sqrt{1-\bar{R}_p^2}} \sqrt{n-2}, \quad (56)$$

визначаючи ступінь лінійності лінійного зв'язку за співвідношеннями:

$$\xi_1(t') = \frac{|t'_p|}{t_T}; \quad \xi_1(t'') = \frac{|t''_p|}{t_T}; \quad \xi_1(t''') = \frac{|t'''_p|}{t_T}, \quad (57)$$

а ступінь нелінійності – за співвідношеннями:

$$\xi_2(t') = \frac{t_T}{|t'_p|}; \quad \xi_2(t'') = \frac{t_T}{|t''_p|}; \quad \xi_2(t''') = \frac{t_T}{|t'''_p|}; \quad (58)$$

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

відхилення нормального розподілу випадкової величини перетворення Фішера (z); $z_q=z_T$ ($q=1-\alpha/2$)= $z_{0,975}=1,96$ [79] – квантиль нормованого нормального розподілу [79], тоді добуток ($z_T \cdot \sigma_z$)= $0,8765$, розраховуючи значення випадкової величини z_p перетворення Фішера:

$$z'_p = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+r_p}{1-r_p} \right); \quad (59)$$

$$z''_p = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+R_p}{1-R_p} \right); \quad (60)$$

$$z'''_p = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+\bar{R}_p}{1-\bar{R}_p} \right); \quad (61)$$

та визначаючи ступінь лінійності лінійного зв'язку за співвідношеннями:

$$\xi_1(z') = \frac{|z'_p|}{(\sigma_r \cdot z_q)}; \quad \xi_1(z'') = \frac{|z''_p|}{(\sigma_r \cdot z_q)}; \quad (62)$$

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

а ступінь нелінійності – за співвідношеннями:

Таблиця 7

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

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

$$\xi_2(Z') = \frac{(\sigma_r \cdot Z_q)}{|Z'_p|}; \quad \xi_2(Z'') = \frac{(\sigma_r \cdot Z_q)}{|Z''_p|};$$

$$\xi_2(Z''') = \frac{(\sigma_r \cdot Z_q)}{|Z'''_p|} \quad (63)$$

Результати розрахунків за (39) – (63) перевірки статистичних нульових гіпотез для генеральних коефіцієнтів кореляцій:

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

$$\begin{matrix} \uparrow \text{оцінка} & \uparrow \text{оцінка} & \uparrow \text{оцінка} \\ r_p \neq 0 & R_p \neq 0 & \bar{R}_p \neq 0 \end{matrix} \quad (64)$$

зведені в табл. 8.

Як видно з табл. 7, за оцінками значущості коефіцієнтів лінійних кореляцій лінійного зв'язку I_j = f(M_i) спостерігаються такі нерівності за I_i та шляхом тертя у мінорантному ряді впливу M_i на I_i:

$$S_1=0...50 \text{ км (I}_1\text{)}: \quad [(M_1) > (M_2, M_3)] > (M_4, M_5, M_6, M_7); \quad (65)$$

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

$$[(M_2, M_3) > (M_1)] > (M_4, M_5, M_6, M_7); \quad (66)$$

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

$$[(M_4, M_5, M_6, M_7)] > (M_2, M_3) > (M_1); \quad (67)$$

$$S_5'=300-400 \text{ км } (I_5'):$$

$$[(M_2, M_3) > (M_1)] > (M_4, M_5, M_6, M_7). \quad (68)$$

Таким чином, закономірності, що виявлені для ізотропних поверхонь, аналогічно проявляються і для анізотропних поверхонь за (65)-(68).

Результати (табл. 7) дозволили скласти мінорантні ряди за величиною щільності кореляційних зв'язків $I_j = f(\alpha_i)$ за частинними інваріантними комбінаціями коефіцієнтів лінійних кореляцій (R_i) для певних шляхів тертя S_j :

$$S_1=0\dots 50 \text{ км } (I_1):$$

$$[\alpha_6 > \alpha_5 > \alpha_2 > \alpha_8 > \alpha_1 > \alpha_4] > \alpha_7 > \alpha_3; \quad (69)$$

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

$$[\alpha_6] > \alpha_5 > \alpha_2 > \alpha_7 > \alpha_1 > \alpha_8 > \alpha_3 > \alpha_4; \quad (70)$$

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

$$\alpha_5 > \alpha_7 > \alpha_8 > \alpha_6 > \alpha_1 > \alpha_3 > \alpha_4 > \alpha_2; \quad (71)$$

$$S_5'=300-400 \text{ км } (I_5'):$$

$$\alpha_6' > \alpha_2' > \alpha_5' > \alpha_1' > \alpha_7' > \alpha_3' > \alpha_8' > \alpha_4'. \quad (72)$$

Як видно з табл. 7, величини узагальненого параметра широкосмугаєності СЩ анізотропної поверхні і його впливу на I_j для всіх шляхів тертя можна розташувати у мінорантний ряд:

$$\alpha_Q > \alpha_q > \alpha_a > \alpha_g > \alpha_h, \quad (73)$$

при цьому для шляху тертя $\Delta S_j=0\dots 50$ км цей ряд відповідає значущим коефіцієнтам кореляцій.

Як видно з табл. 8 та вище наведеної аналізи, всі 3 методи перевірки нульової гіпотези та значущості вибірових коефіцієнтів кореляцій привели до однакових якісних результатів:

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

- **на шляху тертя 200-300 км провідну роль** відіграє градієнт поверхні – інваріантні комбінації M_2, M_3 , які пов'язані з моментами другого порядку [ступінь лінійності кореляційного зв'язку $\xi_1=1,111-1,167$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,269-1,461$ за t_T ; $\xi_1=1,207-$

$1,337$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$], а потім висота нерівностей – інваріантна комбінація M_1 , яка пов'язана з нульовим моментом СЩ [$\xi_1=1,002$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,004$ за t_T ; $\xi_1=1,008$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$], а потім нелінійно I_4 залежить від M_4, M_5, M_6, M_7 , які пов'язані із моментами СЩ четвертого порядку – кривиною поверхні [ступінь нелінійності кореляційного зв'язку $\xi_2=1,138-1,448$ за $r_{кр}$; $\xi_2=1,261-1,787$ за t_T ; $\xi_2=1,206-1,643$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$ для M_4-M_7];

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

- **якщо при $\Delta S_5'=300-400$ км давати оцінку** сили зв'язку $I_5'=f(M_1')$, де M_1' – інваріантні комбінації моментів СЩ не вихідної поверхні, а тієї, що утворилася у процесі тертя та зношування на момент $S=300$ км, то ми повертаємося до оцінок (більш значущих кількісно) кореляційних зв'язків $I_5'=f(M_1')$, що відповідають зв'язку $I_4=f(M_i)$ на шляху тертя $\Delta S_4=200\dots 300$ км: інтенсивність зношування композиту лінійно залежить, в першу чергу, від інваріантних комбінацій M_2, M_3 , що пов'язані з моментами СЩ другого порядку шорсткої поверхні на початковий момент шляху тертя $S=300$ км [ступінь лінійності кореляційного зв'язку $I_5'=f(M_2', M_3')$ становить $\xi_1=1,264-1,291$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,986-2,226$ за t_T ; $\xi_1=1,639-1,756$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$], а потім лінійно залежить від інваріантної комбінації M_1 , що пов'язана з моментом нульового порядку – висотою нерівностей шорсткої поверхні на початку тертя $S=300$ км [ступінь лінійності кореляційного зв'язку $I_5'=f(M_1')$ становить $\xi_1=1,060$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,132$ за t_T ; $\xi_1=1,107$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$]. При цьому I_5' нелінійно залежить від інваріантних комбінацій M_4, M_5, M_6, M_7 , які пов'язані з моментами СЩ четвертого порядку шорсткої поверхні на момент шляху тертя $S=300$ км – кривиною поверхні [ступінь нелінійності кореляційного зв'язку $I_5'=f(M_4, M_5, M_6, M_7)$ становить $\xi_2=1,109-1,359$ за $r_{кр}$; $\xi_2=1,209-1,641$ за t_T ; $\xi_2=1,164-1,521$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$].

Таблиця 8

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

Величина	Ступінь лінійності (ξ_1) та ступінь нелінійності (ξ_2) кореляційних зв'язків $I_j = f(M_i)$, $I_j = f(\alpha_i)$, $I_j = f(\alpha)$ на шляху тертя							
	0...50км (I_1)		200...300км (I_4)		300...400км (I_5)		300-400км (I_5')	
	ξ_1	ξ_2	ξ_1	ξ_2	ξ_1	ξ_2	ξ_1	ξ_2
А. За критичним коефіцієнтом кореляцій ($r_{кр}$)								
M_1	1,334	0,749	1,002	0,998	0,357	2,804	1,060	0,944
M_2	1,247	0,802	1,167	0,857	0,944	1,060	1,291	0,775
M_3	1,180	0,847	1,111	0,900	0,880	1,136	1,264	0,791
M_4	0,866	1,155	0,826	1,210	1,293	0,773	0,860	1,162
M_5	0,955	1,047	0,879	1,138	1,128	0,887	0,901	1,109
M_6	0,722	1,386	0,751	1,331	1,211	0,826	0,777	1,287
M_7	0,824	1,214	0,691	1,448	1,176	0,850	0,736	1,359
α_1	1,052	0,950	0,860	1,163	0,733	1,365	0,775	1,291
α_2	1,161	0,862	0,914	1,094	0,639	1,566	0,812	1,232
α_3	0,877	1,141	0,782	1,279	0,686	1,457	0,700	1,429
α_4	1,001	0,999	0,718	1,392	0,666	1,501	0,663	1,509
α_5	1,174	0,852	0,950	1,053	0,842	1,187	0,808	1,237
α_6	1,295	0,772	1,010	0,991	0,735	1,361	0,847	1,181
α_7	0,978	1,022	0,863	1,158	0,789	1,267	0,730	1,371
α_8	1,116	0,896	0,793	1,260	0,766	1,306	0,691	1,447
α_Q	1,096	0,913	0,870	1,149	0,737	1,356	0,758	1,319
α_q	1,089	0,919	0,866	1,155	0,735	1,361	0,756	1,323
α_a	1,082	0,924	0,861	1,161	0,732	1,366	0,753	1,328
α_g	1,075	0,931	0,857	1,168	0,729	1,371	0,750	1,333
α_h	1,068	0,937	0,852	1,174	0,727	1,376	0,748	1,337
Б. За критерієм Стьюдента (t_T)								
M_1	2,837	0,353	1,004	0,997	0,261	3,836	1,132	0,884
M_2	1,864	0,537	1,461	0,684	0,896	1,116	2,226	0,449
M_3	1,513	0,661	1,269	0,788	0,795	1,258	1,986	0,504
M_4	0,775	1,291	0,720	1,389	2,255	0,443	0,767	1,305
M_5	0,916	1,092	0,793	1,261	1,321	0,757	0,827	1,209
M_6	0,594	1,685	0,627	1,594	1,658	0,603	0,658	1,521

M ₇	0,716	1,396	0,560	1,787	1,495	0,669	0,609	1,641
α ₁	1,113	0,898	0,766	1,306	0,606	1,651	0,655	1,527
α ₂	1,435	0,697	0,847	1,180	0,506	1,975	0,701	1,427
α ₃	0,790	1,266	0,663	1,508	0,555	1,802	0,569	1,756
α ₄	1,001	0,999	0,590	1,696	0,534	1,873	0,531	1,885
α ₅	1,488	0,672	0,906	1,104	0,742	1,348	0,696	1,436
α ₆	2,272	0,440	1,019	0,981	0,608	1,645	0,748	1,338
α ₇	0,958	1,044	0,771	1,297	0,672	1,487	0,602	1,660
α ₈	1,286	0,778	0,678	1,475	0,644	1,552	0,560	1,785
α _Q	1,225	0,816	0,781	1,281	0,611	1,636	0,635	1,574
α _q	1,206	0,829	0,774	1,291	0,608	1,644	0,632	1,582
α _a	1,187	0,842	0,768	1,302	0,605	1,653	0,629	1,589
α _g	1,169	0,856	0,761	1,314	0,602	1,661	0,626	1,597
α _h	1,150	0,869	0,755	1,325	0,599	1,669	0,623	1,605
В. За перетворенням Фішера та добутком (z _T ·σ _z)								
M ₁	2,013	0,497	1,008	0,993	0,294	3,403	1,107	0,903
M ₂	1,575	0,635	1,337	0,748	0,919	1,088	1,756	0,569
M ₃	1,370	0,730	1,207	0,828	0,831	1,204	1,639	0,610
M ₄	0,813	1,231	0,763	1,311	1,770	0,565	0,805	1,242
M ₅	0,935	1,069	0,829	1,206	1,244	0,804	0,859	1,164
M ₆	0,642	1,558	0,675	1,482	1,458	0,686	0,704	1,421
M ₇	0,759	1,317	0,609	1,643	1,359	0,736	0,658	1,521
α ₁	1,094	0,915	0,804	1,243	0,654	1,529	0,701	1,426
α ₂	1,320	0,758	0,877	1,141	0,555	1,802	0,745	1,343
α ₃	0,826	1,210	0,709	1,410	0,604	1,656	0,618	1,618
α ₄	1,006	0,995	0,638	1,567	0,583	1,715	0,580	1,726
α ₅	1,354	0,738	0,927	1,079	0,783	1,278	0,741	1,350
α ₆	1,778	0,563	1,020	0,980	0,656	1,524	0,788	1,269
α ₇	0,971	1,030	0,809	1,236	0,718	1,393	0,651	1,537
α ₈	1,219	0,820	0,723	1,383	0,691	1,446	0,609	1,642
α _Q	1,176	0,850	0,818	1,222	0,659	1,517	0,683	1,465
α _q	1,162	0,860	0,812	1,231	0,656	1,524	0,680	1,471
α _a	1,149	0,870	0,806	1,240	0,653	1,531	0,677	1,478
α _g	1,135	0,881	0,800	1,250	0,650	1,538	0,674	1,484
α _h	1,122	0,892	0,794	1,259	0,647	1,545	0,671	1,491

У табл. 8 жирним шрифтом відмічені значущі коефіцієнти кореляцій.

При оцінці (табл. 8) щільності кореляційних зв'язків між інтенсивністю зношування композиту (I_j) та частинними параметрами широко-смугастості спектрів (α_i) анізотропної поверхні контртіла, які пов'язані з інваріантними комбінаціями (M_i), знайдено, що для I_j лише з $\alpha_1=f(M_1, M_2, M_4)$, $\alpha_2=f(M_1, M_5, M_6)$, $\alpha_4=f(M_1, M_2, M_7)$, $\alpha_5=f(M_1, M_3, M_4)$, $\alpha_6=f(M_1, M_3, M_5)$, $\alpha_8=f(M_1, M_3, M_7)$ вихідної поверхні на шляху тертя $\Delta S_1=0\dots 50$ км та з $\alpha_6=f(M_1, M_3, M_5)$ вихідної поверхні на шляху тертя $\Delta S_2=200\dots 300$ км існує надійний лінійний зв'язок зі ступенем лінійності $\xi_1=1,001-1,295$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,001-2,272$ за t_T ; $\xi_1=1,006-1,778$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$. Для решти випадків – кореляційні зв'язки нелінійні зі ступенями нелінійності $\xi_2=1,022-1,566$ за $r_{кр}$; $\xi_2=1,044-1,975$ за t_T ; $\xi_2=1,030-1,802$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$.

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

Як видно з табл. 8, спостерігається лінійна залежність $I_j=f(\alpha_k)$ (для всіх k) лише для початкового шляху тертя $\Delta S_j=0\dots 50$ км зі ступенями лінійності $\xi_1=1,068-1,096$ за $r_{кр}$; $\xi_1=1,150-1,225$ за t_T ; $\xi_1=1,122-1,176$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$. Для решти шляхів тертя та всіх k спостерігається нелінійна кореляція для залежностей $I_j=f(\alpha_k)$ зі ступенями нелінійності $\xi_2=1,149-1,376$ за $r_{кр}$; $\xi_2=1,281-1,669$ за t_T ; $\xi_2=1,222-1,545$ за $(z_T \cdot \sigma_z)$.

Висновки

1. Показано, що інтенсивність зношування полімерних композитів на основі відносно м'якої матриці – політетрафторетилену (ПТФЕ) і карбонізованого вуглецевого волокна та на основі жорстколанцюгової, твердої матриці – ароматичного поліаміду (АПА) і графітованого вуглецевого волокна під час динамічного контакту з металевими та полімернокомпозитними поверхнями в режимі помірних питомих навантажень та надграничних і граничних навантажень у середовищі вологого повітря, дистильованій воді, 40%-вій та 98%-вій оцтовій кислоті сильно залежить від вихідного моменту нульового порядку спектральної щільності спряженої шорсткої поверхні лише на початку тертя та зношування, при цьому ця залежність: 1) зростає у 4,7-43,6 рази із збільшенням моменту нульового порядку від 0,014 до 6,25 кмк²

(зокрема, збільшення моменту нульового порядку у 434 рази приводить до зростання інтенсивності зношування лише у 9,2 рази); 2) зменшується у 1,8-15,3 рази під час зростання шляху (часу) випробувань від $\Delta S=0\dots 50$ км до 200...1100 км для композиту на основі ПТФЕ та у 1,3-2,6 рази – від $\Delta S=0\dots 50$ км до $\Delta S=100\dots 200$ км для композиту на основі АПА; 3) малочутлива до виду контакту та коефіцієнта взаємного перекриття площина зразка – контртіло від мінімального до максимального (КВП=1,0); 4) максимальна – для м'яких (У8) та твердих (45) вуглецевих сталей, слабка (38ХМЮ) та сильна (10Х18Н9Т, 10Х17Н13М3Т) і мінімальна – для міді М1, мідних стопів та полімерного композиту графелон-20 на основі АПА. Такі результати вимагають ретельного дослідження залежностей інтенсивностей зношування від моментів СЩ не лише нульового, зв'язаного з висотним параметром, а й другого, зв'язаного з градієнтом поверхні та четвертого, зв'язаного з кривинами мікронерівностей у вершині, порядків.

2. Знайдено, що зміни моменту нульового порядку СЩ шорстких поверхонь пари сталь – карбопластик на основі ароматичного поліаміду та вуглецевих волокон у процесі динамічного контакту залежать від типу та властивостей вуглецевих волокон, а саме від природи вихідного органічного волокнистого матеріалу, його температури кінцевої термообробки, від міцності та модуля пружності вуглецевого волокна, типу покриття поверхні вуглецевого волокна тощо.

3. Питома інтенсивність об'ємного зношування карбопластика на основі ПТФЕ та карбонізованих волокон під час динамічного контакту з поверхнею контртіла сталі 45 залежить від вихідних моментів СЩ нульового, другого та четвертого порядків поверхні контртіла у більшій степені на початку шляху тертя та зношування $\Delta S=0\dots 50$ км, ніж $\Delta S=300-400$ км під час випробувань у вологому повітрі в режимі поміркованих питомих навантажень, тобто топографія поверхні спряженого металу є домінуючим фактором у визначенні величини зносу карбопластиків не тільки на початку тертя (тобто пов'язане з параметрами вихідної поверхні), але і в процесі тертя, коли спряжена поверхня твориться самим композитом.

4. Питома інтенсивність об'ємного зношування карбопластика на основі ПТФЕ та карбонізованих волокон під час динамічного контакту з поверхнею контртіла залежить від вихідних моментів СЩ нульового, другого та четвертого порядків поверхні контртіла зі сплава Бр. ОФ 6,5-0,15 у меншій степені, ніж для сталі 45 під час випробувань у дистильованій воді в режимі надграничних навантажень, тобто інтенсивність зношування карбопластиків у більшій степені залежить від параметрів шорсткості спряжених сталевих поверхонь, ніж для мідних стопів під час динамічного контакту у рідких середовищах у режимі високих навантажень.

5. За ізотропною моделлю у процесі динамічного контакту зразка полімерного композиту флубон-15(20) – сталі 45 від 0 до 1200 км розподіл висот вершин мікрошорсткості сталі прагне до нормального розподілу Гауса, не досягаючи його, а після певної тривалості контакту відбувається коливання розподілу біля визначеної кривої розподілу, а кривини на початку контакту збільшуються, а потім зменшуються і амплітуда цього коливального процесу залежить від вихідних параметрів шорсткості, а для характеристик шорсткості поверхонь зразків полімерного композиту спостерігаються аналогічні зміни, але з меншою амплітудою коливань.

6. Кореляційна аналіза залежностей інтенсивності зношування полімерного композиту флубон-15(20) від моментів СЩ нульового, другого і четвертого порядків ізотропної спряженої металевої поверхні дозволила виявити такі закономірності: 1) із збільшенням тривалості динамічного контакту домінування вихідного моменту нульового порядку змінюється на вихідні моменти другого, а потім четвертого порядку, тобто кривини визначають зношування полімерних композитів під час довготривалого динамічного контакту; 2) для моментів, що визначені перед певним етапом випробувань, моменти нульового порядку з часом контактування поступаються по чергово змінюючому лідерству другого та четвертого порядків; 3) післядія параметрів шорсткості поверхонь, що утворилася після динамічного контакту 0, 50, 100, ..., 900 км на інтенсивність зношування за 900-1000 км вираже-

на по чергово через моменти СЩ (частіше) четвертого, ніж другого чи (ще менше) нульового порядків, а самі процеси тертя та зношування визначають величину моментів СЩ нульового порядку на початку динамічного контакту і четвертого порядку під час довготривалого контакту.

7. У науковий обіг уперше введено означення частинних та узагальненого параметрів широко-смугаєстості СЩ анізотропної шорсткої поверхні та, за принципом аналогії, частинні та узагальнені коефіцієнти кореляцій, використовуючи які встановлено, що на початку динамічного контакту $\Delta S=0...50$ км інваріантні комбінації металевого контргтіла, що зв'язані з нульовим моментом (з висотним параметром), у більшій степені лінійно впливають на інтенсивність зношування карбопластика, ніж інваріантні комбінації, що пов'язані із спектральними моментами другого порядку (градієнтом поверхні), а вплив інваріантних комбінацій, що пов'язані з моментами четвертого порядку, впливають нелінійно:

- під час динамічного контакту ($\Delta S=200-300$ км) цей вплив аналогічний, лише різниця полягає у тому, що лідером стають інваріанти, що пов'язані з градієнтом поверхні (лінійно), потім з висотою нерівностей (лінійно) і нелінійно із кривиною;

- під час більш довгого динамічного контакту $\Delta S>300$ км лідером стають інваріанти, що пов'язані з кривиною (лінійно), потім градієнтом поверхні (нелінійно) та значно менше висотою мікронерівностей (нелінійно).

Література

1. **Антифрикционная композиция:** А.с. 1078907 (СССР), МКИ С08L27/18; С 08J5/16/ Г.А. Сиренко, С.А. Назаров, В.Ф. Денисенков, В.П. Захаренко, И.И. Новиков, А.Ф. Будник. - №3494190. – Заявл. 25.06.82. – Зареєстр. в Госреєстре СССР 8.11.83. – Опубл. 1984. – Бюл. №9.
2. **Антифрикционная композиция:** А.с. 1400040 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L77/08/ Г.А. Сиренко, Г.М. Сорокин, С.Н. Тараненко. - №4050632. – Заявл. 7.04.86. – Зареєстр. в Госреєстре изобр. СССР 1.02.88. – Бюл. №20.
3. **Антифрикционная композиция графелон – 47:** А.с. 1322664 (СССР), МКИ С08L77/10/ Г.А. Сиренко, Г.М. Сорокин, В.Ф. Вельбой, С.Н. Тараненко, С.С. Кононюк. - №3972560. – Заявл. 25.10.85. – Зареєстр. в Госреєстре изобр. СССР 8.03.87. – Бюл. №25.
4. **Антифрикционная композиция флубон – 15:** А.с. 1244933 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ Г.А. Сиренко, Н.И. Кретов, В.П. Сви́дєрський, Б.О. Таланкин, С.С. Кононюк. - №3697338. – Заявл. 30.11.83. – Зареєстр. в Госреєстре изобр. СССР 15.03.86. – Бюл. №26.
5. **Антифрикционная композиция флубон – ПУ:** А.с. 194601 (СССР), МКИ F16C33/12/ Г.А. Сиренко, В.Г. Морозов, А.Ф. Будник, С.А. Назаров, В.Ф. Денисенков. - №3047698. – Заявл. 2.08.82. – Зареєстр. в Госреєстре изобр. СССР 1.11.83.
6. **Антифрикционная самосмазывающаяся композиция “Графелон – 4ДПТ”:** А. с. 526252 (СССР), МКИ С08L77/00; С08D5/16/ Г.А. Сиренко, И.И. Новиков, В.Д. Герасимов, В.П. Сви́дєрський, Н.Д. Журавлєв, Д.С. Фондаминский. – №2106074. – Заявл. 18.02.75. – Зареєстр. в Госреєстре изобр. СССР 28.04.76.
7. **Антифрикционный самосмазывающийся материал:** А. с. 110292 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ Г.А.Сиренко. – №2211791. – Заявл. 18.11.76. – Зареєстр. в Госреєстре изобр. СССР 3.11.77.
8. **Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В.** Трение и износ полимеров. – Ленинград: Химия, 1972. – 240 с.
9. **Боуден Ф.П., Тейбор Д.** Трение и смазка твердых тел / Пер. с англ. Н.М. Михина, А.А. Силина. – Москва: Машиностроение, 1968. – 544 с.
10. **Буш А.В., Гибсон Р.Д., Кио Г.П.** Шероховатые поверхности с сильной анизотропией // Проблемы трения и смазки. – 1979. – Т. 101. – Сер. F. – №1. – С. 16.

11. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. – Москва: Наука, 1981. – 127 с.
12. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – Москва: Машиностроение, 1985. – 424 с.
13. Гупта П.К., Кук Н.Х. Статистический анализ механического взаимодействия шероховатых поверхностей // Проблемы трения и смазки. – 1972. – Т. 94, № 1. – С. 14.
14. Демкин Н.Б. Контактное трение шероховатых поверхностей. – Москва: Наука, 1970. – 227 с.
15. Евдокимов В.Д. Реверсивность трение и качество машин. – Київ: Техніка, 1977. – 148 с.
16. Композиция для получения антифрикционного материала флубон – ДМ: А.с. 181484 (СССР), МКИ F16C33/12/ Г.А.Сиренко, И.И. Новиков, В.П. Захаренко, В.Г. Морозов, А.К. Пугачев, С.А. Назаров. – №3014392. – Заявл. 20.03.81. – Зареестр. в Госреестре изобр. СССР 2.12.82.
17. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. – Киев: Техніка, 1970. – 396 с.
18. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – Москва: Машиностроение, 1977. – 526 с.
19. Крагельский И.В. Трение и износ. – Москва: Машиностроение, 1968. – 480 с.
20. Крагельский И.В. Трение покоя двух шероховатых поверхностей // Известия АН СССР, ОТН. – 1948. – № 10. – С. 1621.
21. Крагельский И.В. Фрикционные взаимодействия твердых тел // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 1. – С. 12-29.
22. Кузишин О.В., Сиренко О.Г., Мідак Л.Я., Сиренко Г.О. Критерії оцінки розподілу мікронерівностей на поверхні твердого тіла // Фізика і хімія твердого тіла. – 2008. – Т. 9, № 2. – С. 407-414.
23. Лонге-Хиггинс М.С. Статистическая геометрия случайных поверхностей // Гидродинамическая неустойчивость. – Москва: Мир, 1964. – С. 124-167.
24. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения: Серия «Успехи современного материаловедения». – Москва: Металлургия, 1976. – 176 с.
25. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел. – Москва: Наука, 1977. – 222 с.
26. Мур Д. Трение и смазка эластомеров / Пер. с англ. Г.И. Бродского. – Москва: Химия, 1977. – 264 с.
27. Найяк П.Р. Применение модели случайного поля для исследования шероховатых поверхностей // Проблемы трения и смазки. – 1971. – Т. 93. – Сер. F. – № 3. – С. 85-95.
28. Полимерная композиция: А. с. 558518 (СССР), МКИ C08L77/06/ Г.А.Сиренко, В.Д. Герасимов, И.И. Новиков, В.П. Свидерский, Н.Д. Журавлёв, Л.Б. Соколов, В.Г. Морозов, Н.М. Черненко, В.П. Захаренко, А.Т. Каверов, Г.Н. Багров. – №2037112. – Заявл. 17.06.74. – Зареестр. в Госреестре изобр. СССР 21.01.77.
29. Польцер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивание / Пер. с нем. О.Н. Озерского, В.Н. Пальянова. – Москва: Машиностроение, 1984. – 264 с.
30. Семенюк Н.Ф., Бачинская Н.К. Слияние пятен контакта при нагружении шероховатых, сильно анизотропных поверхностей // Проблемы трибологии. – 1998. – № 3. – С. 103-107.
31. Семенюк Н.Ф. Исследования топографии поверхности 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 СРСР, 1983 – 149 с.
32. Семенюк Н.Ф., Калда Г.С., Соколан Е.С. Использование метода случайных полей при расчете параметров шероховатости, влияющих на тепловые процессы в трущихся телах // Проблемы трибологии. – 1996. – № 1.
33. Семенюк Н.Ф., Калмыкова Т.Ф. Фактическая площадь упругого контакта анизотропной шероховатой поверхности с гладкой // Трение и износ. – 1983. – Т. 4, № 3. – С. 467-475.
34. Семенюк Н.Ф., Романишина О.В. Предварительное смещение шероховатых изотропных поверхностей. I. // Проблемы трибологии. – 1997. – № 4. – С. 90-101.
35. Семенюк Н.Ф., Романишина О.В. Рассеяние энергии на единичном контакте в режиме предварительного смещения // Проблемы трибологии. – 1997. – № 2. – С. 52-56.
36. Семенюк М.Ф., Сиренко Г.О., Солтис Л.М. Градієнт анізотропної нано- та мікрошорсткої поверхні твердого тіла, змодельованої випадковим полем // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12, № 1. – С. 200-207.
37. Семенюк М.Ф., Сиренко Г.О., Солтис Л.М. Контактні явища на гавсовських анізотропних та ізотропних шорстких поверхнях, змодельованих випадковим полем // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12, № 3. – С. 795-808.
38. Семенюк М.Ф., Сиренко Г.О., Солтис Л.М. Означення ізотропності нано- та мікрошорстких поверхонь твердих тіл під час математичного опису контактних явищ // Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. Василя Стефаника. Серія Хімія. – Івано-Франківськ: 2010. – Вип. IX. – С. 62-70.
39. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля: 1. Распределение высот вершин, средняя кривизна в вершинах, градиент поверхности // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 3. – С. 465-471.
40. Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А. 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. – 1980. – Т. 1, № 5. – С. 815-823.
41. **Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А.** Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля: 3. Фактическая площадь контакта, коэффициент трения, термическое сопротивление, адгезионное взаимодействие с учетом деформации в зоне контакта // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 6. – С. 1010-1019.
 42. **Семенюк Н.Ф., Сиренко Г.А.** Топография и контактные явления анизотропных шероховатых поверхностей трения // 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.
 43. **Семенюк Н.Ф., Соколан К.С.** Кривизна в вершинах выступів поверхонь тертя поршневих ушільнень // Проблеми трибології. – 2000. – № 2.
 44. **Семенюк Н.Ф., Соколан Е.С.** Основное уравнение контактирования элементов бессмазочных поршневых уплотнений // Проблеми трибології. – 2002. – № 1.
 45. **Семенюк Н.Ф.** Средние значения полной и средней кривизны в вершинах, высоты неровностей анизотропной шероховатой поверхности // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 5. – С. 830-840.
 46. **Семенюк Н.Ф.** Средняя высота выступов шероховатой поверхности и плотность пятен контакта при контактировании шероховатой поверхности с гладкой // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 1. – С. 85-90.
 47. **Семенюк Н.Ф., Терлецкая Е.В.** Моделирование шероховатых изотропных поверхностей. Сообщение I // Проблеми трибології. – 1998. – № 1. – С. 83-89.
 48. **Семенюк Н.Ф., Терлецкая Е.В.** Моделирование шероховатых изотропных поверхностей. Сообщение II // Проблеми трибології. – 1998. – № 1. – С. 90-97.
 49. **Сиренко Г., Кедик М.** Вплив анізотропної шорсткості поверхонь, змодельованих випадковим полем, на контактні явища // Вісник Прикарп. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія. – 2004. – Вип. IV. – С. 50-53.
 50. **Сиренко Г., Семенюк М.** Адгезія з деформацією в зоні контакту анізотропних шорстких поверхонь, змодельованих випадковим полем // Вісник Прикарп. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія. – 2001. – Вип. I. – С. 66-85.
 51. **Сиренко Г.О., Семенюк М.Ф., Солтис Л.М.** Методика експериментального дослідження нано- та мікрошорсткості поверхні за допомогою моделі випадкового поля // Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. Василя Стефаника. Серія Хімія. – Івано-Франківськ: 2010. – Вип. X. – С. 123-140.
 52. **Сиренко Г.О., Семенюк М.Ф., Солтис Л.М.** Розподіл кривин у вершинах мікро- та нанонерівностей шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем // Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – Т. 11, № 4. – С. 914-927.
 53. **Сиренко Г.О., Семенюк М.Ф., Солтис Л.М.** Щільність ймовірностей розподілу висот вершин шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем // Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – Т. 11, № 3. – С. 768-779.
 54. **Сиренко Г.О., Солтис Л.М.** Антифрикційні властивості карбопластика під час тертя по шорсткій ізотропній металевій поверхні в дистильованій воді // Матеріали Шостої Міжнародної науково-практичної конференції «Наукові дослідження – теорія та експеримент 2010» – м. Полтава, 17-19 травня 2010 р. – Полтава: ІнтерГрафіка, 2010. – Т. 5. – С. 81-84.
 55. **Сиренко Г.О., Солтис Л.М.** Антифрикційні властивості карбопластика під час тертя по шорсткій ізотропній поверхні сталі 45 без мащення // Матеріали V Міжнародної науково-технічної Web-конференції «Композиційні матеріали» – м. Київ, травень 2010 р. – Київ, 2010. – С. 102-103.
 56. **Сиренко Г.О., Солтис Л.М., Базюк Л.В.** Утворення та властивості поверхневих плівок під час фрикційного контакту пари полімерний композит – метал // Матеріали XII Міжнародної конференції «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем». – 18-23 травня 2009 року, м. Івано-Франківськ, Україна – Івано-Франківськ: Прикарп. нац. ун-т ім. В. Стефаника, 2009. – Т. II. – С. 261-264.
 57. **Сиренко Г.О., Солтис Л.М.** Моделі нанометричної та мікрометричної шорсткості поверхні твердих тіл (огляд) // Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – Т. 11, № 2. – С. 423-446.
 58. **Сиренко Г.О., Солтис Л.М., Семенюк М.Ф.** Питома площа гавсовської анізотропної та ізотропної шорстких поверхонь // Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. Василя Стефаника. Серія Хімія. – Івано-Франківськ: 2011. – Вип. XII. – С. 133-151.
 59. **Сиренко Г.О., Солтис Л.М.** Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя по шорсткій ізотропній металевій поверхні в дистильованій воді // Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія. – 2009. – Вип. VIII. – С. 99-101.
 60. **Сиренко Г.О., Солтис Л.М.** Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя по шорсткій ізотропній поверхні сталі 45 без мащення // Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія. – 2009. – Вип. VII. – С. 104-106.

61. **Сиренко Г.О.** Створення антифрикційних матеріалів на основі порошків термостійких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. на здобуття наук. ступеня докт. технічних наук: спец. 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали, 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).
62. **Сиренко Г.А.** Осложнение контактных явлений поверхности уплотнительных материалов анизотропной микрошероховатости // Тез. докл. 3-го Всесою. совещания по уплотнительной технике. – Сумы: ВНИИкомпрессормаш, 1982. – С. 44-45.
63. **Сиренко Г.А., Семенюк Н.Ф.** Методика определения моментов спектральной плотности шероховатых поверхностей уплотнительной пары // Тез. докл. 3-го Всесою. совещания по уплотнительной технике. – Сумы: ВНИИкомпрессормаш, 1982. – С. 46-47.
64. **Солтис Л.М., Сиренко Г.О.** Контактні явища на нано- та мікросорстких поверхнях твердих тіл, змодельованих випадковим полем // Матеріали V Міжнародної конференції «Сучасні проблеми фізичної хімії». – Донецьк, 5-8 вересня 2011 р. – Донецьк: Дон. нац. ун-т, 2011. – С. 216-217.
65. **Солтис Л.М., Сиренко Г.О., Мідак Л.Я.** Вплив орієнтації волокнистих наповнювачів полімерного композиту на зношування та параметри мікросорсткості поверхонь тертя // Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. Василя Стефаника. Серія Хімія. – Івано-Франківськ: 2011. – Вип. XI. – С. 95-104.
66. **Солтис Л.М., Сиренко Г.О.** Означення ізотропності нано- та мікросорстких поверхонь твердих тіл // Матеріали Шостої Міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток наукових досліджень 2010» – м. Полтава, 22-24 листопада 2010 р. – Полтава: ІнтерГрафіка, 2010. – Т. 6. – С. 92-93.
67. **Солтис Л.М., Сиренко Г.О.** Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя та зношування по шорсткій ізотропній металевій поверхні без мащення та в середовищі дистильованої води // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12, № 2. – С. 508-516.
68. **Солтис Л.М., Складанюк М.Б.** Вплив металізації вуглецевих волокон на параметри шорсткості поверхні полімерного композиту та спряженого металу // Тези доп. X Всеукр. конф. студентів та аспірантів «Сучасні проблеми хімії». – Київ, 19-22 травня 2009 р. – Київ. – С. 207.
69. **Способ «бусико»** изготовления антифрикционного материала: А.с. 1723084 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ А.Ф. Будник, Г.А.Сиренко, С.И. Колесников. - №4779289. – Заявл. 9.01.90. – Опубл. 30.03.92. – Бюл. №12. – С. 123.
70. **Способ получения** антифрикционной композиции “флубон”: А.с. 1736171 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ Г.А. Сиренко, А.Ф. Будник. - №4741996. – Заявл. 03.10.89. – Зареестр. в Госреестре изобр. СССР 22.01.92.
71. **Тененбаум М.М.** Сопроотивление абразивному изнашиванию. – Москва: Машиностроение, 1976. – 271 с.
72. **Трение и износ в вакууме** / И.В. Крагельский, И.М. Любарский, А.А. Гусяков, Г.И. Трояновская. – Москва: Машиностроение, 1973. – 216 с.
73. **Трение и износ полимеров** / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. – Минск: Наука и техника, 1976. – 432 с.
74. **Трение, изнашивание и смазки:** Справочник в 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. – Москва: Машиностроение. – Кн. 1. – 1978. – 400 с. – Кн. 2. – 1979. – 358 с.
75. **Трение полимеров** / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. – Москва: Наука, 1972. – 204 с.
76. **Трибология** / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – Київ: НАУ-друк, 2009. – 392 с. – ISBN 978-966-598-609-6.
77. **Longuet-Higgins M.S.** The Statistical Analysis of a Random Moving Surface // Philos. Trans. of the Royal Soc. – London, 1957. – Vol.249. – Ser. A. – P. 321-387.
78. **Мюллер П., Нойман П., Шторм Р.** Таблицы по математической статистике / Пер. с нем. и предисловие В.М. Ивановой. – Москва: Финансы и статистика, 1982. – 272 с.
79. **Степнов М.Н.** Статистическая обработка результатов механических испытаний. – Москва: Машиностроение, 1972. – 232 с.

Сиренко Геннадій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хемії.

Солтис Любов Михайлівна – провідний інженер кафедри неорганічної та фізичної хемії.

Свідерський Владислав Петрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри зносостійкості та надійності машин.

Таланкін Борис Олегович – старший науковий співробітник.

Рецензент

Мідак Л.Я. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри неорганічної та фізичної хемії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.