

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

## Фізико-хімічні процеси міднення карбонізованих волокон на основі гідратцелюлози та вплив їх на зміну мікрошорсткості спряжених поверхонь полімерний композит – метал під час тертя та зношування

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

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 від шляху тертя від 0 до 1200 км, при цьому зміна розподілів носить коливальний характер, наближаючись та віддаляючись від нормального розподілу Гауса. Покриття поверхні карбонових волокон міддю за цинковою технологією значно впливає на процеси утворення плівок на поверхні металевого контртіла та змінює розподіл висот вершин та середніх кривин у вершині мікронерівностей як контртіла, так і полімерного зразка.

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

*Стаття постуила до редакції 10.11.2011; прийнята до друку 15.03.2012.*

### Вступ

Відомо [1-18], що процеси тертя, зношування та машення твердих тіл визначаються параметрами цих процесів: 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 [3, 19-66].

Найбільш продуктивним виявився математичний опис мікро- та нанощорсткості поверхні виконаний за допомогою теорії випадкового поля [67, 68].

Для опису шорстких поверхонь використовують 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 ізотропної поверхні [26, 27, 34-39, 48-51].

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 мідненими вуглецевими волокнами, та металічного контртіла під час тертя та зношування без машення.

### І. Експериментальна частина

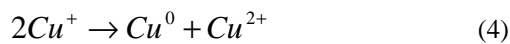
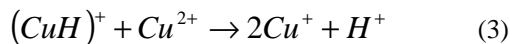
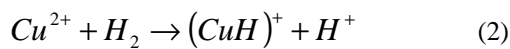
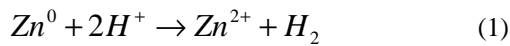
#### 1. Матеріали зразків.

**1.1. Отримання волокнистого матеріалу.** Досліджували зносостійкість композитного матеріалу – карбопластику «флубон-15 (20)» [21, 69-73] 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  $\text{CH}_4$  у 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) [74, 75].

**1.2. Дисперсії вуглецевого волокна** та композицію матеріалу отримували за ХМА-технологією [74, 75]: 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  $45 \text{ с}^{-1}$  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 при 7000 обертання ножів за хвилину, діаметрі ножів 0,205 м, частоті обертання  $117 \text{ с}^{-1}$ , максимальній лінійній швидкості 75 м/с. Після здрібнення волокна мали широкий розподіл за довжинами від 0 до 3500 мкм з основною фракцією 50-200 мкм.

**1.3. Оміднення вуглецевого волокна.** Відновлення йонів міді проводили цинковим порошком у сірчанокиислому розчині [76]. Ефект досягався за рахунок відновлення  $\text{Cu}^0$  цинком за контактнo-хімічним твердофазним механізмом в об'ємі розчину на міжфазній поверхні газ – рідина – тверде тіло за рахунок швидкого виділення активного водню та інтенсивним барботуванням його через весь шар суспензії [76]. Схему хімічних рівнянь за цинковою технологією можна представити таким чином:



Рівняння (1)–(4) вказують на багатостадійність механізму міднення за цинковою технологією, що веде до зниження енергії активації процесу і, відповідно, до зниження оптимальної температури міднення.

Розроблена технологія [59, 76-78] полягає в тому, що карбонові волокна (КВ) обробляють у розчині, який містить 20-40 г/л  $\text{CuSO}_4$ , 0,05-0,2 г/л  $\text{ZnSO}_4$ , 18-35 г/л  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (конц.), потім при перемішуванні КВ з розчином у співвідношенні 20 г:1 л за 293 К періодично додають частками по 1-2 г порошку  $\text{Zn}^0$  на протязі 0,5-1 год. до вмісту його у розчині 15-46 г/л, після чого продовжують обробку КВ за 293К, суспензію мідненого КВ фільтрують, промивають на фільтрі водою до рН=7, потім ацетоном і висушують на повітрі. За рахунок введення  $\text{ZnSO}_4$  досягається пришвидшення осадження міді, що обумовлено електролітичним механізмом процесу: необхідність створення в розчині міднення окисно-відновленої напівпари  $\text{Zn}^0/\text{Zn}^{2+}$ , що досягається за рахунок створення мінімальної вихідної концентрації йонів  $\text{Zn}^{2+}$  перед введенням  $\text{Zn}^0$ .

**1.4. У композит на основі полімерних порошків** ПТФЕ вводили короткі вуглецеві волокна, що отримані за ХМА-технологією [74, 75], які мали об'ємний (масовий) розподіл за довжинами за ймовірним гамма-законом розподілу в композиції.

**1.5. Для вирішення завдання лінійного аналізу** вихідних дроблених волокон, отриманих за ХМА-технологією, та після змішування їх з порошком полімеру шляхом дроблення, 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, діапазон кроків під час сканування  $512 \times 512$  та на кількість різних ступенів тонів 128. При цьому відносна похибка вимірювання лінійних розмірів волокон становила 0,2 %. Програма забезпечувала аналіз 250 частинок за одну пробу (кількість проб 20-25). Статистичну відповідність емпіричному розподілу теоретичному гамма-розподілу перевіряли за критеріями хі-квадрат та омега-квадрат з рівнем значущості  $\alpha = 0,05$ .

**1.6. У результаті технологічних операцій** у композиції отримали волокна, що мали об'ємний (масовий) розподіл за гамма-законом 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 тим же законом 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 [69-73].

## 2. Фрикційні випробування без мащення.

Зносостійкість композитного матеріалу під час тертя та зношування без мащення досліджували на трибометрі ХТІ-72 за схемою контакту [І-1], де І – вид контакту, 1 – форма зразка: торець пальчика діаметром  $10 \pm 0,05 \text{ мм}$  і висотою  $15 \pm 0,1 \text{ мм}$  ковзав по площині металевого контртіла; контртіло було виконано порожнистим діаметром  $60 \pm 0,15 \text{ мм}$ , висотою  $35 \pm 0,2 \text{ мм}$ , товщиною робочої частини поверхні тертя  $5 \pm 0,2 \text{ мм}$  або у вигляді диску діаметром  $60 \pm 0,1 \text{ мм}$  і висотою  $(10 - 15) \pm 0,1 \text{ мм}$ , яке розміщали у відповідне гніздо порожнинного тіла. Через порожнину контртіла проходила холодна вода, або розміщувався термоагрівач, завдяки яким підтримувався заданий тепловий режим поверхні тертя вуглецевої сталі 45, термообробленої до НВ  $4,5 \pm 0,2 \text{ ГПа}$ , з вихідним середнім арифметичним відхиленням профілю поверхні  $Ra_0 = 0,085 \pm 0,005 \text{ мкм}$  (для композиту з неметалізованим волокном) та  $Ra_0 = 0,090 \pm 0,004 \text{ мкм}$  (для композиту з мідненим волокном); питоме навантаження на 3 зразки складало  $p = 3 \text{ МПа}$  (нормальне навантаження на 1 зразок  $N_i = 235,62 \text{ Н}$ ); швидкість ковзання  $v = 1,1 \text{ м/с}$ ; температура поверхні сталі  $T = 373 \pm 1 \text{ К}$ , яка була визначена термопарою ХК на відстані  $1 \pm 0,05 \text{ мм}$  від поверхні тертя контртіла, а величини (в mV) записувались на стрічку потенціометра КСП-4, шлях тертя складав  $S \leq 1000 - 3200 \text{ км}$  (сумарний час тертя  $\tau = 253 - 808 \text{ год.}$ ) із заміром величини зносу через 50-200 км ( $\tau_i = 12,6 - 50,4 \text{ год.}$ ) (при випробуванні композиту флубон-15(20) на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого за  $T = 1123 \text{ К}$  вуглецевого волокна УТМ-8).

Знос полімерних зразків визначали за зміною їх висоти  $\Delta h$  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  $\Delta h$  [мм] розраховували:

- лінійну інтенсивність зношування:

$$J = \frac{\Delta h}{S} \left[ \frac{\text{мм}}{\text{мм}} \right]; \quad (5)$$

- об'ємний знос  $\Delta V$  [мм<sup>3</sup>], за яким розраховували об'ємну інтенсивність зношування:

$$J_i = \frac{\Delta V_i}{S} \left[ \frac{\text{мм}^3}{\text{мм}} \right], \quad (6)$$

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

$$J = \frac{\Delta V_i}{N_i \cdot S} = \frac{\Delta V}{N \cdot S} \left[ \frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{м}} \right], \quad (7)$$

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

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

### 3. Методика експериментального дослідження шорсткої поверхні тертя.

Математичний опис анізотропної та ізотропної шорсткої поверхні на основі теорії випадкового поля, приведений у [26, 27, 34-39, 50-58].

Знаходили статистичні характеристики поверхні тертя за відповідними параметрами профілограм за методом [27, 49, 61]. Для цього знімали п'ять профілограм поверхні, виміряних у непаралельних напрямках. Для розрахунків на ЕОМ підготовлених даних використовували методику [27, 61].

Для статистичної характеристики анізотропної поверхні використовували дев'ять моментів  $m_{pq}$  спектральної щільності (СЩ): нульового порядку  $m_{00}$ ; другого порядку  $m_{20}$ ,  $m_{02}$ ,  $m_{11}$ ; четвертого порядку  $m_{13}$ ,  $m_{31}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{40}$ ,  $m_{04}$ .

Для статистичної характеристики ізотропної поверхні використовували три моменти спектральної щільності (СЩ): нульового порядку  $m_{00} = m_0$ ; другого порядку  $m_{11} = m_{20} = m_{02} = m_2$ ; четвертого порядку  $m_{13} = m_{31} = m_{22} = m_{40} = m_{04} = m_4$ . Для ізотропної поверхні знайдено параметр, який характеризує широкосмугастість спектру [27]:

$$a = \frac{m_0 m_4}{m_2^2}, \quad a = 1,5; \dots; \infty. \quad (8)$$

Оцінку середнього квадратичного значення ширини спектру зроблено за виразом:

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

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 контртілі. Металеve контртілі

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 припрацьовування полімерних зразків металеве контртілі знову припрацьовували на шліфувальній шкурці.

Профілограми мікросороткості поверхонь знімали за допомогою профілометра-профілографа ВЭИ «Калибр» моделі «201» та моделі «252». Для одного напрямку знімали 50-60 базових довжин профілограм для металевого контртілі і 10-15 базових довжин профілограм для полімерного зразка. Для ізотропної поверхні профілограму знімали під кутом  $\sim 45^\circ$  до напрямку ковзання. Ділянки зйомки поверхні були рівнорозподілені за слідом тертя. Статистичні характеристики різних ділянок поверхні були однаковими в статистичному відношенні.

Профілограми оброблялися за методом МНК: знаходили середньоарифметичне відхилення профіля поверхні  $Ra$ , щільність нулів  $D_0$  і щільність екстремумів  $D_{extr}$ . Виміряна  $Ra$  і розрахована за профілограмами  $D_0$  (для моделі «252»  $D_0$  виміряна) були статистично рівні.

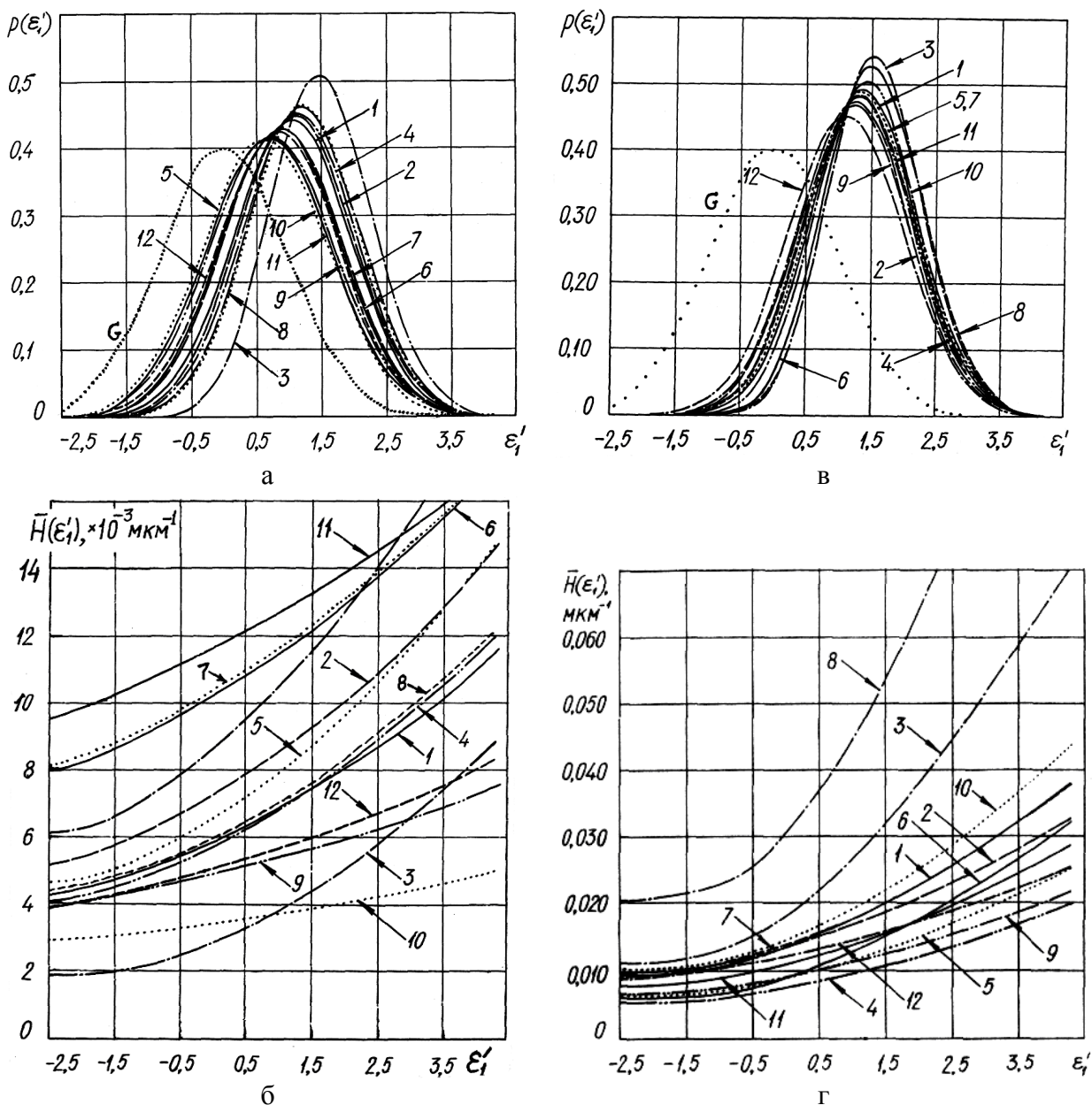
Великий об'єм виборки і рівномірний розподіл її по поверхні контртілі або зразка забезпечили рівень вмісту довгохвильових компонентів спектру, і, таким чином, показність моментів спектральної щільності. Границя дрібномасштабних мікронерівностей у ділянці малих довжин хвиль спектру була обмежена величиною, яка не перебільшувала у 2-3 рази похибку вимірювань. Параметр широкосмугастості спектру  $\alpha$  був більше 1,8, тобто тієї величини, яка характерна для «білого шуму».

Як буде показано далі, параметр широкосмугастості спектру  $\alpha$  для поверхонь тертя металу і карбопластика не перевищував 15-20, а максимальне викривлення поверхні профілограмою спостерігається при  $\alpha = 1,5$  (при  $\alpha \rightarrow \infty$  це викривлення відсутнє). Таким чином, вивчення навіть ізотропних шорстких поверхонь тертя метал-карбопластик за допомогою параметрів профілограми або випадкових функцій неможливе.

## II. Результати та обговорення

Для вихідних відносно рівних поверхонь сталі 45 ( $Ra_0 < 0,35$  мкм) на початку ковзання розподіл висот вершин контртілі 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 та 1000-1200 км для  $Ra_0 = 0,22$  мкм (рис. 1 а).

Для зразка композиту навпаки: на початку ковзання розподіл висот вершин наближається до гавсовського, а потім віддаляється від нього (рис. 1 в). Цей процес коливань розподілу навколо вихідної поверхні носить теж хвильовий характер з періодом коливань 150 км для  $Ra_0 = 0,085$ ; 0,09; 0,22 мкм контртілі на початку ковзання, 300-350 км



**Рис. 1.** Щільність ймовірностей висот вершин поверхні сталі 45 (вихідне  $Ra_0 = 0,085 \text{ мкм}$ ) (а) і зразка композиту на основі ПТФЕ + 20% ВВ 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 – 900; 12 – 1200; G – розподіл Гауса.

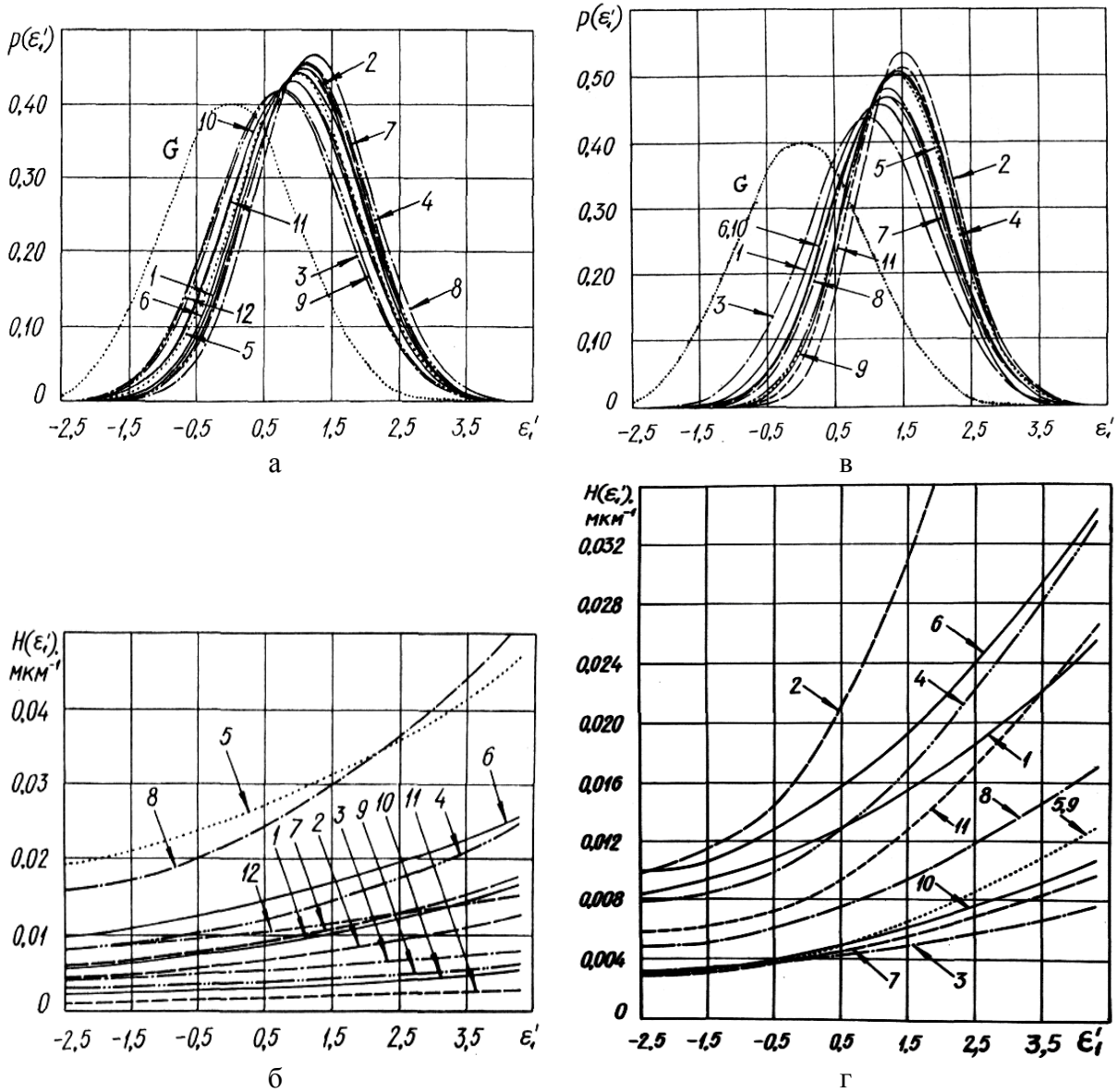
на шляху тертя  $S > 800 \text{ км}$ . При цьому висота хвилі зменшується із збільшенням шляху тертя.

Для вихідної поверхні сталі  $Ra_0 < 0,35 \text{ мкм}$  на початку ковзання кривина поверхні контртіла збільшується і спектр розподілу стає вузьким, тобто містить хвилі близької довжини (рис. 1 б). При подальшому ковзанні настає зменшення кривин. Таким чином, залежність розподілу кривин від шляху тертя носить також хвилювий 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. 1 б).

Високі піки завжди мають більшу очікувану середню кривину у вершинах мікронерівностей, ніж низькі. Зменшення значення параметра широкосму-гастості  $\alpha$  приводить до зростання ймовірності появи високих піків.

Для зразків карбопластиків на початку тертя кривини зменшуються, амплітуда коливань розподілу кривин навколо вихідної поверхні має період 150-200 км, 300-400 км при  $S > 200 \text{ км}$ , 800-1000 км при  $S > 800 \text{ км}$  (рис. 1 г).

При контакті рівної поверхні сталі 45 ( $Ra_0 = 0,090 \text{ мкм}$ ) з карбопластиком на основі ПТФЕ + ВВ УТМ-8, яке покрито міддю, для металевого контртіла спостерігається зміна періоду коливань висот вершин від 150, 250, 400 до 800-1000 км (рис. 2 а). На початку тертя (150-200 км) кривини поверхонь контртіла зменшуються (рис. 2 б), а зразка збільшуються (рис. 2 г). Розподіл висот вершин контртіла наближається (рис. 2 а), а зразка віддаляється (рис. 2 в) від гавсовського на початку ковзання, потім на шляху тертя 200-700 км відбувається зростання кривини поверхні контртіла і



**Рис. 2.** Щільність ймовірностей висот вершин поверхні сталі 45 (вихідне  $Ra_0 = 0,09$  мкм) (а) і зразка композиту на основі ПТФЕ + 40% омідненого ВВ УТМ-8 (50% Cu) (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 – 900; 12 – 1200; G – розподіл Гаусса.

віддалення розподілу висот вершин від гавсовського. При подальшому терті середня кривина поверхонь контртіла і зразка значно зменшується, кривини стають майже однакові для всіх висот вершин, а розподіл висот вершин наближається до гавсовського.

## Висновки

1. Досліджено залежність зношування карбопластиків від шорсткості спряжених поверхонь, змодельованих анізотропним випадковим полем. За результатами експерименту знайдено, що шорсткі поверхні, які утворені внаслідок технологічної обробки або в процесі тертя карбопластиків, суттєво анізотропні ( $\alpha = 10-15$ ), анізотропна модель випадкового поля найбільш повно її характеризує.

2. Знайдено, що в процесі тертя кривини поверхонь зразків карбопластиків і спряжених поверхонь зменшуються, а розподіл висот вершин

прагне до гавсовського розподілу, але навіть в процесі довготривалого ковзання його не досягає ( $\alpha < 15$ ). Відповідно і інтенсивність зношування в реальних умовах не набуває сталої величини.

3. Показано, що фактично динамічний контакт «карбопластик-метал» відбувається на хвильовій плавучій поверхні з коливанням розподілу висот вершин і кривин навколо вихідної поверхні (для відносно рівних вихідних поверхонь) або такої, яка утворилася після 600-800 км тертя (для сильно нерівних вихідних поверхонь), що обумовлює умови утворення проміжних плівок на поверхні металевго контртіла.

**Сіренко Г.О.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії;  
**Солтис Л.М.** – провідний інженер кафедри неорганічної та фізичної хімії;  
**Складанюк М.Б.** – старший лаборант кафедри неорганічної та фізичної хімії.



- [1] G.M. Bartenev, V.V. Lavrent'ev. Trenie i iznos polimerov (Himija, Leningrad, 1972).
- [2] F.P. Bouden, D. Tejbor. Trenie i smazka tverdyh tel / Per. s angl. N.M. Mihina, A.A. Silina. (Mashinostroenie, Moskva, 1968).
- [3] D.N. Garkunov. Tribotecnika (Mashinostroenie, Moskva, 1985).
- [4] B.I. Kosteckij. Trenie, smazka i iznos v mashinah (Tecnika, Kiev, 1970).
- [5] I.V. Kragel's'kij, M.N. Dobychin, V.S. Kombalov. Osnovy raschetov na trenie i iznos (Mashinostroenie, Moskva, 1977).
- [6] I.V. Kragel's'kij. Trenie i iznos (Mashinostroenie, Moskva, 1968).
- [7] I.V. Kragel's'kij. Trenie pokoja dvuh sherohovatyh poverhnostej (Izvestija AN SSSR, OTN, 10, 1978).
- [8] I.V. Kragel's'kij. Trenie i iznos 1 (1), 12 (1980).
- [9] I.M. Ljubarskij, L.S. Palatnik. Metallofizika trenija: Serija «Uspеhi sovremennogo materialovedenija» (Metallurgija, Moskva, 1976).
- [10] N.M. Mihin. Vneshnee trenie tverdyh tel (Nauka, Moskva, 1977).
- [11] D. Mur. Trenija i smazka jelastomerov / Per. s angl. G.I. Brodskogo (Himija, Moskva, 1977).
- [12] G. Pol'cer, F. Majssner. Osnovy trenija i iznashivanie / Per. s nem. O.N. Ozerskogo, V.N. Pal'janova (Mashinostroenie, Moskva, 1984).
- [13] M.M. Tenenenbaum. Soprotivlenie abrazivnomu iznashivaniju (Mashinostroenie, Moskva, 1976).
- [14] Trenie i iznos v vakuume / I.V. Kragel's'kij, I.M. Ljubarskij, A.A. Gusljakov, G.I. Trojanovskaja. (Mashinostroenie, Moskva, 1973).
- [15] Trenie i iznos polimerov / V.A. Belyj, A.I. Sviridenok, M.I. Petrokovec, V.G. Savkin (Nauka i tehnika, Minsk, 1976).
- [16] Trenie, iznashivanie i smazki: Spravochnik v 2-h kn. / Pod red. I.V. Kragel's'kogo, V.V. Alisina. (Mashinostroenie, Moskva, 1978, 1979).
- [17] Trenie polimerov / V.A. Belyj, A.I. Sviridenok, M.I. Petrokovec, V.G. Savkin (Nauka, Moskva, 1972).
- [18] Tribologija / M.V. Kindrachuk, V.F. Labunec', M.I. Pashechko, Є.V. Korbut (NAU-druk, Kiiv, ISBN 978-966-598-609-6 (2009)
- [19] A.V. Bush, R.D. Gibson, G.P. Kio. Problemy trenija i smazki 101(F,1), 16 (1979).
- [20] N.A. Bushe, V.V. Kopyt'ko. Sovmestimost' trushhihsja poverhnostej (Nauka, Moskva, 1981).
- [21] Kompozicija dlja poluchenija antifrikcionnogo materiala flubon – DM: A.s. 181484 (SSSR), MKI F16C33/12/ G.A.Sirenko, I.I. Novikov, V.P. Zaharenko, V.G. Morozov, A.K. Pugachev, S.A. Nazarov. – №3014392. – Zajavl. 20.03.81. – Zareestr. v Gosreestre izobr. SSSR 2.12.82.
- [22] P.K. Gupta, N.H. Kuk. Problemy trenija i smazki 94(1), 14 (1972).
- [23] N.B. Demkin. Kontaktirovanie sherohovatyh poverhnostej (Nauka, Moskva, 1970).
- [24] V.D. Evdokimov. Reversivnost' trenie i kachestvo mashin (Tecnika, Kiiv, 1977).
- [25] O.V. Kuzishin, O.G. Sirenko, L.Ja. Midak, G.O. Sirenko. Fizika i himija tverdogo tila 9(2), 407 (2008).
- [26] M.S. Longe-Higgins. Statisticheskaja geometrija sluchajnyh poverhnostej (Gidrodinamicheskaja neustojchivost', Mir, Moskva, 1964).
- [27] P.R. Najjak. Problemy trenija i smazki 93(F,3), 85 (1971).
- [28] N.F. Semenjuk, N.K. Bachinskaja. Problemy tribologii (3), 103 (1998).
- [29] N.F. Semenjuk. Issledovanija topografii poverhnostej metodom sluchajnogo polja i razrabotka raschetnyh metodov ocenki fakticheskoj ploshhadi kontakta pri trenii tverdyh tel: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.04. – Jakutsk: In-t fiziko-tehn. problem Severa SO JaF AN SSSR. 149 s. (1983).
- [30] N.F. Semenjuk, G.S. Kalda, E.S. Sokolan. Problemy tribologii (1), (1996).
- [31] N.F. Semenjuk, T.F. Kalmykova. Trenie i iznos 4(3), 467 (1983).
- [32] N.F. Semenjuk, O.V. Romanishina. Problemy tribologii (4), 90 (1997).
- [33] N.F. Semenjuk, O.V. Romanishina. Problemy tribologii (2), 52 (1997).
- [34] M.F. Semenjuk, G.O. Sirenko, L.M. Soltis. Fizika i himija tverdogo tila 12(1), 200 (2011).
- [35] M.F. Semenjuk, G.O. Sirenko, L.M. Soltis. Fizika i himija tverdogo tila 12(3), 795 (2011).
- [36] M.F. Semenjuk, G.O. Sirenko, L.M. Soltis. Visnik Prikarp. nac. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (IH), 62 (2010).
- [37] N.F. Semenjuk, G.A. Sirenko. Trenie i iznos 1(3), 465 (1980).
- [38] N.F. Semenjuk, G.A. Sirenko. Trenie i iznos 1(5), 815 (1980).
- [39] N.F. Semenjuk, G.A. Sirenko. Trenie i iznos 1(6), 1010 (1980).
- [40] N.F. Semenjuk, G.A. Sirenko. Tez. dokl. Vsesojuz. nauch.-tehn. konfer. «Tribonika i antifrikcionnoe materialovedenie» (Novocherkasskij politehnicheskij institut, Novocherkassk, 1980).
- [41] N.F. Semenjuk, K.S. Sokolan. Problemy tribologii (2), (2000).

- [42]N.F. Semenjuk, E.S. Sokolan. Problemy tribologii (1), (2002).
- [43]N.F. Semenjuk. Trenie i iznos 7(5), 830 (1986).
- [44]N.F. Semenjuk. Trenie i iznos 7(1), 85 (1986).
- [45]N.F. Semenjuk, E.V. Terleckaja. Problemy tribologii (1), 83 (1998).
- [46]N.F. Semenjuk, E.V. Terleckaja. Problemy tribologii (1), 90 (1998).
- [47]G. Sirenko, M. Kedik. Visnik Prikar. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (IV), 50 (2004).
- [48]G. Sirenko, M. Semenjuk. Visnik Prikar. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (I), 66 (2001).
- [49]G.O. Sirenko, M.F. Semenjuk, L.M. Soltis. Visnik Prikar. nac. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (H), 123 (2010).
- [50]G.O. Sirenko, M.F. Semenjuk, L.M. Soltis. Fizika i himija tverdogo tila 11(4), 914 (2010).
- [51]G.O. Sirenko, M.F. Semenjuk, L.M. Soltis. Fizika i himija tverdogo tila 11(3), 768 (2010).
- [52]G.O. Sirenko, L.M. Soltis. Materiali Shostoï Mizhnarodnoï naukovopraktichnoï konferencii «Naukovi doslidzhennja – teorija ta eksperiment 2010» (InterGrafika, Poltava, 2010).
- [53]G.O. Sirenko, L.M. Soltis. Materiali V Mizhnarodnoï naukovotekhnichnoï Web-konferencii «Kompozicijni materialy» – m. Kiïv, traven' 2010 r. Kiïv.
- [54]G.O. Sirenko, L.M. Soltis, L.V. Bazjuk. Materiali III Mizhnarodnoï konferencii «Fizika i tehnologija tonkih plivok ta nanosistem» (Ivano-Frankivs'k, Ukraïna, Prikar. nac. un-t im. V.Stefanika, 2009).
- [55]G.O. Sirenko, L.M. Soltis. Fizika i himija tverdogo tila 11(2), 423 (2010).
- [56]G.O. Sirenko, L.M. Soltis, M.F. Semenjuk. Visnik Prikar. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (HII), 133 (2011).
- [57]G.O. Sirenko, L.M. Soltis. Visnik Prikar. nac. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (VIII), 99 (2009).
- [58]G.O. Sirenko, L.M. Soltis. Visnik Prikar. nac. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (VII), 104 (2009).
- [59]G.O. Sirenko. Stvorennja antifrikcijnih materialiv na osnovi poroshkiv termotrivkikh polimeriv ta vuglecevih volokon: Dis. ... dokt. tehn. nauk: spec. 05.16.06 – poroshkova metalurgija ta kompozicijni materialy (Hmel'nic'kij tehnologichnij institut, Institut problem materialoznavstva im. I.M. Francevicha NANU, Kiev, 1997).
- [60]G.A. Sirenko. Oslozhenie kontaktnyh javlenij poverhnosti uplotnitel'nyh materialov anizotropnoj mikrosherohovatosti // Tez. dokl. 3-go Vsesoju. soveshhanija po uplotnitel'noj tehnike. VNIikompressormash, Sumy, ss. 44-45 (1982).
- [61]G.A. Sirenko, N.F. Semenjuk. Tez. dokl. 3-go Vsesoju. soveshhanija po uplotnitel'noj tehnike (VNIikompressormash, Sumy, 1982).
- [62]L.M. Soltis, G.O. Sirenko. Materialy V Mizhnarodnoï konferencii «Suchasni problemi fizichnoï himii» (Doneckij nacional'nij universitet, Donec'k, 2011).
- [63]L.M. Soltis, G.O. Sirenko, L.Ja. Midak. Visnik Prikar. nac. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (HI), 95 (2011).
- [64]L.M. Soltis, G.O. Sirenko. Materialy Shostoï Mizhnarodnoï naukovopraktichnoï konferencii «Rozvitok naukovih doslidzen' 2010» (InterGrafika, Poltava, 2010).
- [65]L.M. Soltis, G.O. Sirenko. Fizika i himija tverdogo tila 12(2), 508-516 (2011).
- [66]L.M. Soltis, M.B. Sкладанюк. Tezi dop. H Vseukr. konf. studentiv ta aspirantiv «Suchasni problemi himii» (Kiïv, 2009).
- [67]A.P. Husu, Ju.R. Vittenberg, V.A. Pal'mov. Sherohovatos' poverhnostej. Teoretiko-verojatnostnyj podhod (Nauka, Moskva, 1975).
- [68]M.I. Jadrenko. Spektral'naja teorija sluchajnyh polej (Vishha shkola, Kiev, 1980).
- [69]Antifrikcionnaja kompozicija: A.s. 1078907 (SSSR), MKI S08L27/18; S 08J5/16/ G.A. Sirenko, S.A. Nazarov, V.F. Denisenkov, V.P. Zaharenko, I.I. Novikov, A.F. Budnik. – №3494190. – Zajavl. 25.06.82. – Zareestr. v Gosreestre SSSR 8.11.83. – Opubl. 1984. – Bjul. № 9.
- [70]Antifrikcionnaja kompozicija flubon – 15: A.s. 1244933 (SSSR), MKI S08J5/16; S08L27/18/ G.A. Sirenko, N.I. Kretov, V.P. Sviders'kij, B.O. Talankin, S.S. Kononjuk. – №3697338. – Zajavl. 30.11.83. – Zareestr. v Gosreestre izobr. SSSR 15.03.86. – Bjul. №26.
- [71]Antifrikcionnaja kompozicija flubon – PU: A.s. 194601 (SSSR), MKI F16C33/12/ G.A. Sirenko, V.G. Morozov, A.F. Budnik, S.A. Nazarov, V.F. Denisenkov. – №3047698. – Zajavl. 2.08.82. – Zareestr. v Gosreestre izobr. SSSR 1.11.83.
- [72]Antifrikcionnij samosmazyvajushhij material: A. s. 110292 (SSSR), MKI S08J5/16; S08L27/18/ G.A.Sirenko. – №2211791. – Zajavl. 18.11.76. – Zareestr. v Gosreestre izobr. SSSR 3.11.77.
- [73]Polimernaja kompozicija: A. s. 558518 (SSSR), MKI S08L77/06/ G.A.Sirenko, V.D. Gerasimov, I.I. Novikov, V.P. Sviderskij, N.D. Zhuravl'jov, L.B. Sokolov, V.G. Morozov, N.M. Chernenko, V.P. Zaharenko, A.T. Kaverov, G.N. Bagrov. – №2037112. – Zajavl. 17.06.74. – Zareestr. v Gosreestre izobr. SSSR 21.01.77.
- [74]Sposob «busiko» izgotovlenija antifrikcionnogo materiala: A.s. 1723084 (SSSR), MKI C08J5/16; C08L27/18/ A.F. Budnik, G.A.Sirenko, S.I. Kolesnikov. – №4779289. – Zajavl. 9.01.90. – Opubl. 30.03.92. – Bjul. №12. – S. 123.

[75]Sposob poluchenija antifrikcionnoj kompozicii "flubon": A.s. 1736171 (SSSR), MKI C08J5/16; C08L27/18/ G.A. Sirenko, A.F. Budnik. - №4741996. – Zajavl. 03.10.89. – Zareestr. v Gosreestre izobr. SSSR 22.01.92.

[76]Sposob himicheskogo mednenija uglerodnyh materialov: A.s. №1604862 (SSSR) / V.N. Kirichenko, G.A. Sirenko, L.M. Kirichenko. Zajav. №4465219 vid 16.05.88. Opub. 7.11.90.

[77]V.I. Kirichenko, G.A. Sirenko, L.M. Kirichenko Voprosy himii i himicheskoy tehnologii 94, 113 (1991).

V.I. Kirichenko, G.O. Sirenko, L.M. Kirichenko. Tezi dopov. nauk.-prakt. konf. «Naukovo-mistki tehnologii podvijного pryznachennja» (Kiïv, 1994).

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

## **Physical and Chemical Copper Plating Processes of Carbon Fibers based on Hydrate Cellulose and Influence them on Change the Microroughness of Conjugated Surfaces the Polymer Composite – Metal in Friction and Wear**

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

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. Coatings of carbon fibers by copper by zinc technology significantly affects on the processes of formation of films on the surface of metal counterface and changes the allocation of heights of peaks and average curvatures in the peak of microirregularities as counterface well as polymer sample.

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