

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

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 машиння 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 машиння.

І. Експериментальна частина

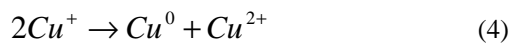
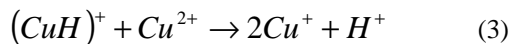
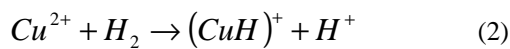
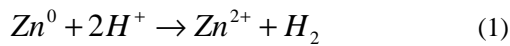
1. Матеріали зразків.

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 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 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 с^{-1} , максимальній лінійній швидкості 75 м/с. Після здрибнення 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 Cu^0 цинком за контактно-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 CuSO_4 , 0,05-0,2 г/л ZnSO_4 , 18-35 г/л H_2SO_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 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 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 Zn^{2+} перед введенням 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 512×512 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 χ^2 -квадрат та ω -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); питома 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 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:

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

- об'ємний знос ΔV [мм³], 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 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.

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. Металеве контртіло

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 припрацювання полімерних зразків металеве контртіло 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 контртіла і 10-15 базових довжин профілограм для полімерного зразка. Для ізотропної поверхні профілограму знімали під кутом $\sim 45^\circ$ до напрямку ковзання. Ділянки зйомки поверхні були рівнорозподілені за слідом тертя. Статистичні характеристики різних ділянок поверхні були однаковими в статистичному відношенні.

Профілограми оброблялися за методом МНК: знаходили середньоарифметичне відхилення 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 контртіла або зразка забезпечили рівень вмісту довгохвильових компонентів спектру, і, таким чином, показність моментів спектральної щільності. Границя дрібномасштабних мікронерівностей у ділянці малих довжин хвиль спектру була обмежена величиною, яка не перебільшувала у 2-3 рази похибку вимірювань. Параметр широкосмугастості спектру α був більше 1,8, тобто тієї величини, яка характерна для «білого шуму».

Як буде показано далі, параметр широкосмугастості спектру α 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 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 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 контртіла на початку ковзання, 300-350 км

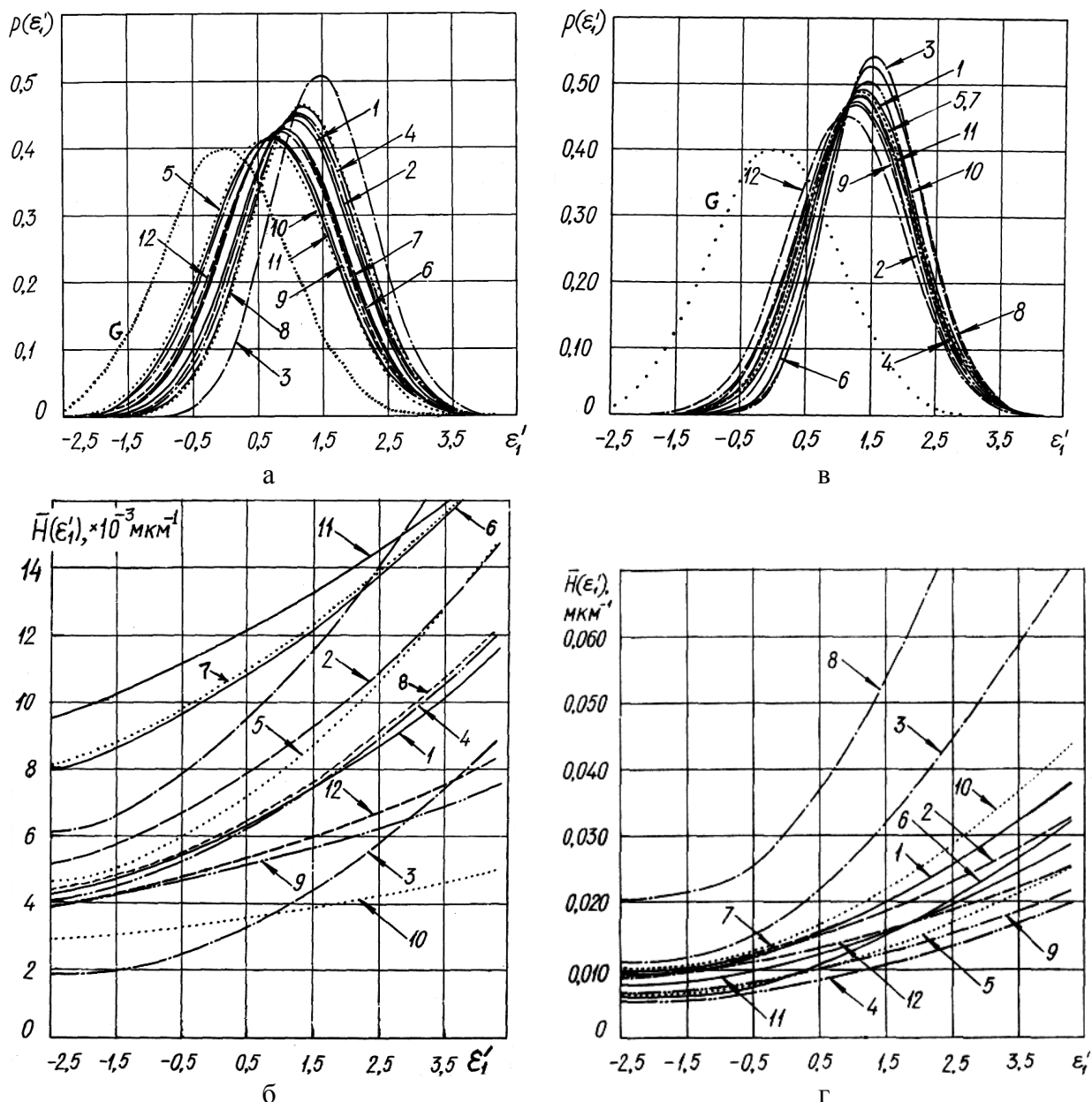


Рис. 1. Щільність ймовірностей висот вершин поверхні сталі 45 (вихідне $Ra_0 = 0,085$ мкм) (а) і зразка композиту на основі ПТФЕ + 20% ВВ УТМ-8 (в) та середня кривина поверхні у вершині мікронерівностей сталі 45 (б) та зразка (г) після шляху тертя (км): 1 – 0; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; 6 – 400; 7 – 500; 8 – 600; 9 – 700; 10 – 800; 11 – 900; 12 – 1200; G – розподіл Гауса.

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

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. 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 α 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 $S > 200$ км, 800-1000 км при $S > 800$ км (рис. 1 г).

При контакті рівної поверхні сталі 45 ($Ra_0 = 0,090$ 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

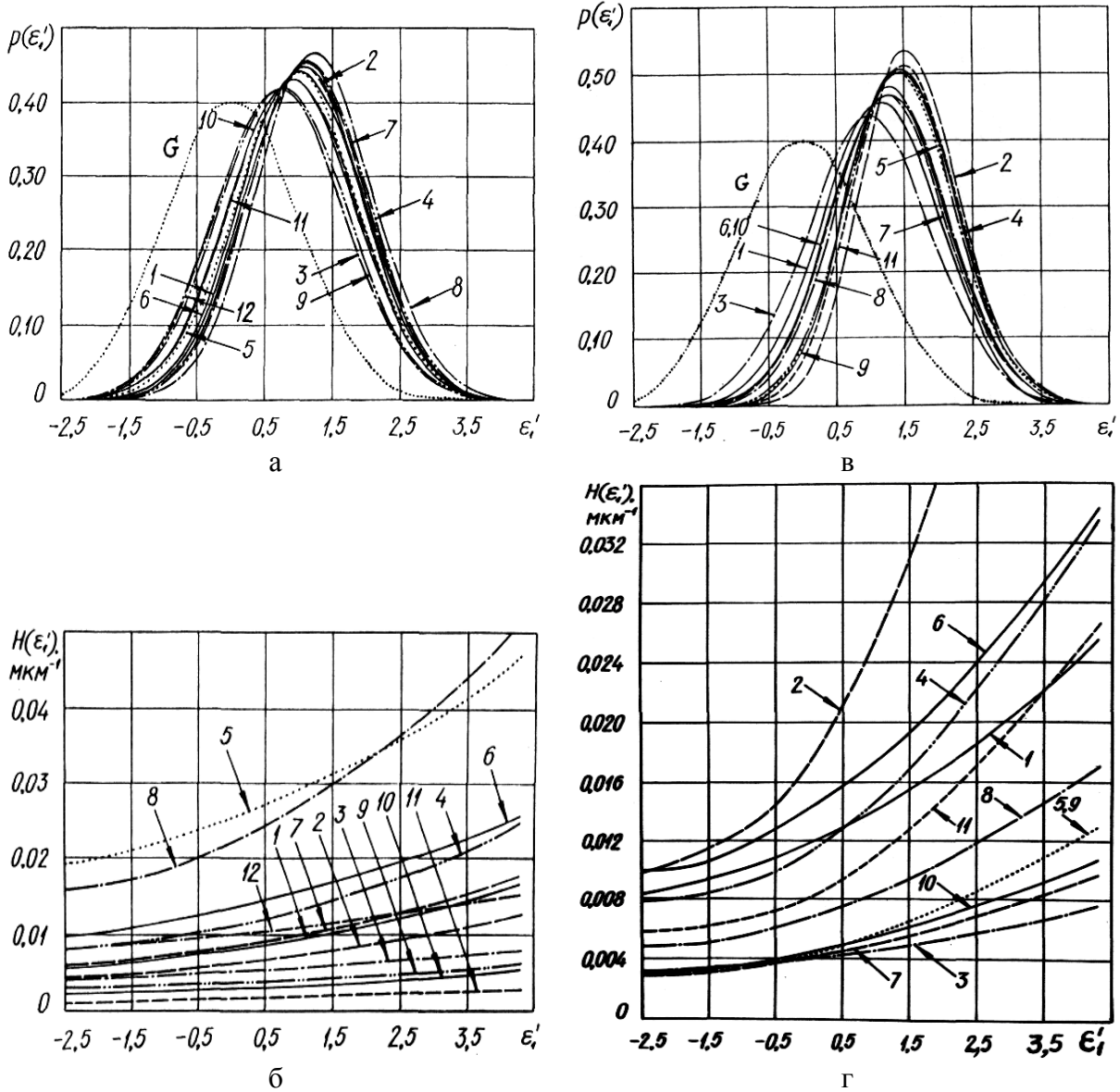


Рис. 2. Щільність ймовірностей висот вершин поверхні сталі 45 (вихідне $Ra_0 = 0,09$ мкм) (а) і зразка композиту на основі ПТФЕ + 40% омідненого ВВ УТМ-8 (50% Cu) (в) та середня кривина поверхні у вершині мікронерівностей сталі 45 (б) та зразка (г) після шляху тертя (км): 1 – 0; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 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] Г.М. Бартнев, В.В. Лаврентьев. *Трение и износ полимеров*. Химия, Ленинград. 240 с. (1972).
- [2] Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. *Трение и смазка твердых тел* / Пер. с англ. Н.М. Михина, А.А. Силина. Машиностроение, Москва. 544 с. (1968).
- [3] Д.Н. Гаркунов. *Триботехника*. Машиностроение, Москва. 424 с. (1985).
- [4] Б.И. Костецкий. *Трение, смазка и износ в машинах*. Техніка, К. 396 с. (1970).
- [5] И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. *Основы расчетов на трение и износ*. Машиностроение, Москва. 526 с. (1977).
- [6] И.В. Крагельский. *Трение и износ*. Машиностроение, Москва. 480 с. (1968).
- [7] И.В. Крагельский. Трение покоя двух шероховатых поверхностей // *Известия АН СССР*, ОТН, 10, С. 1621 (1978).
- [8] И.В. Крагельский. Фрикционные взаимодействие твердых тел // *Трение и износ*, 1 (1), сс. 12-29 (1980).
- [9] И.М. Любарский, Л.С. Палатник. *Металлофизика трения*: Серия «Успехи современного материаловедения». Металлургия, Москва. 176 с. (1976).
- [10] Н.М. Михин. *Внешнее трение твердых тел*. Наука, Москва. 222 с. (1977).
- [11] Д. Мур. *Трения и смазка эластомеров* / Пер. с англ. Г.И. Бродского. Химия, Москва. 264 с. (1977).
- [12] Г. Польцер, Ф. Майсснер. *Основы трения и изнашивание* / Пер. с нем. О.Н. Озерского, В.Н. Пальянова. Машиностроение, Москва. 264 с. (1984).
- [13] М.М. Тененбаум. *Сопротивление абразивному изнашиванию*. Машиностроение, Москва. 271 с. (1976).
- [14] *Трение и износ в вакууме* / И.В. Крагельский, И.М. Любарский, А.А. Гусяков, Г.И. Трояновская. Машиностроение, Москва. 216 с. (1973).
- [15] *Трение и износ полимеров* / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. Наука и техника, Минск. 432 с. (1976).
- [16] *Трение, изнашивание и смазки*: Справочник в 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. Машиностроение, Москва. Кн. 1. 400 с. (1978); Кн. 2. 358 с. (1979).
- [17] *Трение полимеров* / В.А. Белый, А.И. Свириденко, М.И. Петроковец, В.Г. Савкин. Наука, Москва. 204 с. (1972).
- [18] *Трибология* / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – НАУ-друк, Київ. 392 с. ISBN 978-966-598-609-6 (2009)
- [19] А.В. Буш, Р.Д. Гибсон, Г.П. Кио. Шероховатые поверхности с сильной анизотропией // *Проблемы трения и смазки*, 101 (F, 1), С. 16 (1979).
- [20] Н.А. Буше, В.В. Копытко. Совместимость трущихся поверхностей. Наука, Москва. 127 с. (1981).
- [21] *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.
- [22] П.К. Гупта, Н.Х. Кук. Статистический анализ механического взаимодействия шероховатых поверхностей // *Проблемы трения и смазки*, 94 (1), С. 14 (1972).
- [23] Н.Б. Демкин. *Контактирование шероховатых поверхностей*. Наука, Москва. 227 с. (1970).
- [24] В.Д. Евдокимов. *Реверсивность трение и качество машин*. Техніка, Київ. 148 с. (1977).
- [25] О.В. Кузишин, О.Г. Сіренко, Л.Я. Мідак, Г.О. Сіренко. Критерії оцінки розподілу мікронерівностей на поверхні твердого тіла // *Фізика і хімія твердого тіла*, 9 (2), сс. 407-414 (2008).
- [26] М.С. Лонге-Хиггинс. Статистическая геометрия случайных поверхностей // *Гидродинамическая неустойчивость*. Мир, Москва. сс. 124-167 (1964).
- [27] П.Р. Найяк. Применение модели случайного поля для исследования шероховатых поверхностей // *Проблемы трения и смазки*, 93 (F, 3), сс. 85-95 (1971).
- [28] Н.Ф. Семенюк, Н.К. Бачинская. Слияние пятен контакта при нагружении шероховатых, сильно анизотропных поверхностей // *Проблемы трибологии*, (3), сс. 103-107 (1998).
- [29] Н.Ф. Семенюк. Исследования топографии поверхностей методом случайного поля и разработка расчетных методов оценки фактической площади контакта при трении твердых тел: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04. – Якутск: Ин-т физико-техн. проблем Севера СО ЯФ АН СССР. 149 с. (1983).
- [30] Н.Ф. Семенюк, Г.С. Калда, Е.С. Соколан. Использование метода случайных полей при расчете параметров шероховатости, влияющих на тепловые процессы в трущихся телах // *Проблемы трибологии*, (1), (1996).
- [31] Н.Ф. Семенюк, Т.Ф. Калмыкова. Фактическая площадь упругого контакта анизотропной шероховатой поверхности с гладкой // *Трение и износ*, 4 (3), сс. 467-475 (1983).
- [32] Н.Ф. Семенюк, О.В. Романишина. Предварительное смещение шероховатых изотропных поверхностей. I. // *Проблемы трибологии*, (4), сс. 90-101 (1997).

- [33] Н.Ф. Семенюк, О.В. Романишина. Рассеяние энергии на единичном контакте в режиме предварительного смещения // *Проблемы трибологии*, (2), сс. 52-56 (1997).
- [34] М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Градієнт анізотропної нано- та мікрошорсткої поверхні твердого тіла, змодельованої випадковим полем // *Фізика і хімія твердого тіла*, **12** (1), сс. 200-207 (2011).
- [35] М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Контактні явища на гавсовських анізотропних та ізотропних шорстких поверхнях, змодельованих випадковим полем // *Фізика і хімія твердого тіла*, **12** (3), сс. 795-808 (2011).
- [36] М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Означення ізотропності нано- та мікрошорстких поверхонь твердих тіл під час математичного опису контактних явищ // *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаніка. Сер. Хімія*, (IX), сс. 62-70 (2010).
- [37] Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля: 1. Распределение высот вершин, средняя кривизна в вершинах, градиент поверхности // *Трение и износ*, **1** (3), сс. 465-471 (1980).
- [38] Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко. Описание топографии анизотропных шероховатых поверхностей трения с помощью модели случайного поля: 2. Полная кривизна, главные кривизны и отношение главных кривизн в вершинах микронеровностей, удельная площадь гауссовской поверхности и удельный объем зазора // *Трение и износ*, **1** (5), сс. 815-823 (1980).
- [39] Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко. 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*, **1** (6), сс. 1010-1019 (1980).
- [40] Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко. Топография и контактные явления анизотропных шероховатых поверхностей трения // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конфер. «Трибоника и антифрикционное материаловедение». – Новочеркасск. 27-29.05.1980. Изд-во Новочеркас. политех. ин-та, Новочеркасск. С. 22 (1980).
- [41] Н.Ф. Семенюк, К.С. Соколан. Кривизна в вершинах виступів поверхонь тертя поршневих ущільнень // *Проблеми трибології*, (2), (2000).
- [42] Н.Ф. Семенюк, Е.С. Соколан. Основное уравнение контактирования элементов бессмазочных поршневых уплотнений // *Проблемы трибологии*, (1), (2002).
- [43] Н.Ф. Семенюк. Средние значения полной и средней кривизны в вершинах, высоты неровностей анизотропной шероховатой поверхности // *Трение и износ*, **7** (5), сс. 830-840 (1986).
- [44] Н.Ф. Семенюк. Средняя высота выступов шероховатой поверхности и плотность пятен контакта при контактировании шероховатой поверхности с гладкой // *Трение и износ*, **7** (1), сс. 85-90 (1986).
- [45] Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая. Моделирование шероховатых изотропных поверхностей. Сообщение I // *Проблемы трибологии*, (1), сс. 83-89 (1998).
- [46] Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая. Моделирование шероховатых изотропных поверхностей. Сообщение II // *Проблемы трибологии*, (1), сс. 90-97 (1998).
- [47] Г. Сіренко, М. Кедик. Вплив анізотропної шорсткості поверхонь, змодельованих випадковим полем, на контактні явища // *Вісник Прикарп. ун-ту ім. В. Стефаніка. Сер. Хімія*, (IV), сс. 50-53 (2004).
- [48] Г. Сіренко, М. Семенюк. Адгезія з деформацією в зоні контакту анізотропних шорстких поверхонь, змодельованих випадковим полем // *Вісник Прикарп. ун-ту ім. В. Стефаніка. Сер. Хімія*, (I), сс. 66-85 (2001).
- [49] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис. Методика експериментального дослідження нано- та мікрошорсткості поверхні за допомогою моделі випадкового поля // *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаніка. Сер. Хімія*, (X), сс. 123-140 (2010).
- [50] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис. Розподіл кривин у вершинах мікро- та нанонерівностей шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (4), сс. 914-927 (2010).
- [51] Г.О. Сіренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис. Щільність ймовірностей розподілу висот вершин шорстких поверхонь твердих тіл, змодельованих випадковим полем // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (3), сс. 768-779 (2010).
- [52] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. 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. ІнтерГрафіка, Полтава, **5**, сс. 81-84 (2010).
- [53] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. 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, сс. 102-103 (2010).
- [54] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, Л.В. Базюк. 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. – сс. 261-264 (2009).
- [55] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Моделі нанометричної та мікрометричної шорсткості поверхні твердих тіл (Огляд) // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11** (2), сс. 423-446 (2010).
- [56] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, М.Ф. Семенюк. Питома площа гавсовської анізотропної та ізотропної шорстких поверхонь // *Вісник Прикарп. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія*, (XII), сс. 133-151 (2011).
- [57] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя по шорсткій ізотропній металевій поверхні в дистильованій воді // *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія*, (VIII), сс. 99-101 (2009).
- [58] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис. Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя по шорсткій ізотропній поверхні сталі 45 без мащення // *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія*, (VII), сс. 104-106 (2009).
- [59] Г.О. Сіренко. Створення антифрикційних матеріалів на основі порошків термотривких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. ... докт. техн. наук: спец. 05.16.06 – порошкова металургія та композиційні матеріали, Хмельницький технологічний ін-т. – Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ; К., 537 с. (1997): іл., табл. – Бібліогр.: с. 432-451 (275 назв).
- [60] Г.А. Сиренко. Осложнение контактных явлений поверхности уплотнительных материалов анизотропной микрошероховатости // *Тез. докл. 3-го Всесою. совещания по уплотнительной технике*. ВНИИкомпрессормаш, Сумы, сс. 44-45 (1982).
- [61] Г.А. Сиренко, Н.Ф. Семенюк. Методика определения моментов спектральной плотности шероховатых поверхностей уплотнительной пары // *Тез. докл. 3-го Всесою. совещания по уплотнительной технике*. ВНИИкомпрессормаш, Сумы, сс. 46-47 (1982).
- [62] Л.М. Солтис, Г.О. Сіренко. Контактні явища на нано- та мікрошорстких 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. сс. 216-217 (2011).
- [63] Л.М. Солтис, Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак. Вплив орієнтації волокнистих наповнювачів полімерного композиту на зношування та параметри мікрошорсткості поверхонь тертя // *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія*, (XI), сс. 95-104 (2011).
- [64] Л.М. Солтис, Г.О. Сіренко. Означення ізотропності нано- та мікрошорстких поверхонь твердих тіл // *Матеріали Шостої Міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток наукових досліджень 2010»* – м. Полтава, 22-24 листопада 2010 р. ІнтерГрафіка, Полтава, 6, сс. 92-93 (2010).
- [65] Л.М. Солтис, Г.О. Сіренко. Трибоповерхневі властивості карбопластика під час тертя та зношування по шорсткій ізотропній металевій поверхні без мащення та в середовищі дистильованої води // *Фізика і хімія твердого тіла*, **12** (2), сс. 508-516 (2011).
- [66] Л.М. Солтис, М.Б. Складанюк. 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, сс. 207 (2009).
- [67] А.П. Хусу, Ю.Р. Витгенберг, В.А. Пальмов. *Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход*. Наука, Москва. 344 с. (1975).
- [68] М.И. Ядренко. *Спектральная теория случайных полей*. Вища шк., Киев. 208 с. (1980).
- [69] *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. – Зареестр. в Госреестре СССР 8.11.83. – Оpubл. 1984. – Бюл. №9.
- [70] *Антифрикционная композиция флубон – 15*: А.с. 1244933 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ Г.А. Сиренко, Н.И. Кретов, В.П. Сви́дерський, Б.О. Таланкин, С.С. Кононюк. – №3697338. – Заявл. 30.11.83. – Зареестр. в Госреестре изобр. СССР 15.03.86. – Бюл. №26.
- [71] *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. – Зареестр. в Госреестре изобр. СССР 1.11.83.
- [72] *Антифрикционный самосмазывающийся материал*: А. с. 110292 (СССР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ Г.А.Сиренко. – №2211791. – Заявл. 18.11.76. – Зареестр. в Госреестре изобр. СССР 3.11.77.
- [73] *Полимерная композиция*: А. с. 558518 (СССР), МКИ С08L77/06/ Г.А.Сиренко, В.Д. Герасимов, И.И. Новиков, В.П. Сви́дерський, Н.Д. Журавлѐв, 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.
- [74] *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. – Оpubл. 30.03.92. – Бюл. №12. – С. 123.
- [75] *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.

- [76] *Способ химического меднения углеродных материалов*: А.с. №1604862 (СССР) / В.Н. Кириченко, Г.А. Сіренко, Л.М. Кириченко. Заяв. №4465219 від 16.05.88. Опуб. 7.11.90.
- [77] В.И. Кириченко, Г.А. Сіренко, Л.М. Кириченко Получение и работоспособность антифрикционных материалов с медненным наполнителем // *Вопросы химии и химической технологии*, 94, сс. 113-118 (1991).
- [78] В.І. Кириченко, Г.О. Сіренко, Л.М. Кириченко. Трибоактивація хімічних процесів у нових високоефективних композитних матеріалах // Тези допов. наук.-практ. конф. «Науково-місткі технології подвійного призначення». Київ, с. 76 (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*

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.

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