

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис

## Трибоповерхневі властивості полімерного композиту під час тертя та зношування по ізотропній шорсткій поверхні сталі 45

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76025, Україна, e-mail: orijant@gmail.com*

Досліджено закономірності зміни шорсткості поверхонь сталі 45 під час тертя та зношування у парі з полімерним композитом. Встановлено мінорантні ряди впливу моментів спектральної щільності на інтенсивність зношування полімерного композиту на основі ароматичного поліаміду та політетрафторетилену і вуглецевих волокон.

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

*Стаття постуила до редакції 29.03.2013; прийнята до друку 15.06.2013.*

### Вступ

Відомо [1 - 17], що трибоповерхневі властивості композитних полімерних матеріалів під час тертя та зношування по металевих контртілах визначаються параметрами шорсткої поверхні, величиною навантаження, швидкістю ковзання, температурою поверхонь тертя, середовищем, в якому відбувається динамічний контакт, тощо. Відомо, також [17-40], що адекватні математичні моделі шорсткості поверхні створені за допомогою теорії випадкового поля.

**Завдання дослідження:** знайти закономірності зміни шорсткості поверхонь сталі 45 під час тертя та зношування у парі з полімерним композитом, а також проаналізувати результати та встановити мінорантні ряди впливу моментів спектральної щільності на інтенсивність зношування полімерного композиту на основі ароматичного поліаміду та політетрафторетилену і вуглецевих волокон.

### I. Експериментальна частина

#### 1.1. Матеріали.

Досліджували зносостійкість композиційних матеріалів – карбопластиків графелон-20 і флубон-15(20) [41-43] на основі:

1. Ароматичного поліаміду (АП) [44], наповненого вуглецевими волокнами УТ-4, УТМ-8, ТГН-2м, ТМП-3 (Пк: 12% піровуглецю), ТКК-1 (Пк: 0,2-3,0% SiC), ТКЦ-1 (Пк: 0,8-4,0% ZrC), ТГН-Т850, ТГН-Т1200, ТГН-Т1350, ТГН-Т1600, ТГН-Т2000, ТГН-Т2300, ТГН-Т2400, «Мтілон», «ГПП», ЛУ-2, ВМН-4, ВМН-4Ф (Пк: 10% F), ДЕА, «Евлан», «Сатурн» під

час тертя та зношування графелону-20 по сталі 45.

У композитний матеріал вводили вуглецеві волокна: з температурою кінцевої термообробки  $T_k=723, 1123, 1473, 1623, 1823, 2073, 2273, 2573, 2673, 2873$  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; без та 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.

2. Політетрафторетилену (ПТФЕ) [45], наповненого 20% карбонізованого низькомодульного (LM) вуглецевого волокна УТМ-8, отриманого з гідратцелюлозного волокна (при термообробці за температури 1123 К в середовищі  $CH_4$  в присутності антипіренів  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  та  $(NH_4)_2HPO_4$ ) під час тертя та зношування без мащення флубону-15(20) по сталі 45.

#### 1.2. Методи випробування.

1. Тертя та зношування даних матеріалів без мащення вивчали на трибометрі ХТІ-72М за схемою [I-1] [43].

2. Зміни шорсткості ізотропних поверхонь сталевого контртіла та спряженого з ним карбопластика графелон-20 на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 вивчали після 150 км тертя та зношування без мащення за температури поверхні сталі 45 ( $HV 4,52 \pm 0,14$  ГПа, вихідна шорсткість  $Ra_0=0,2151 \pm 0,0252$  мкм)  $T=423 \pm 2$  К. Швидкість ковзання 3-х циліндричних зразків діаметром 10 мм плоскими торцями 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  $323\pm 1$  К, тому отримували високу рівну (дзеркального вигляду) поверхню ( $R_{a0}=0,0355\pm 0,0052$  мкм) перед основними випробуваннями.

3. Зміни шорсткості ізотропних поверхонь сталевого контртіла та спряженого з ним карбопластика флубон-15(20) на основі ПТФЕ вивчали під час тертя та зношування без мащення по сталі 45 (НВ  $4,50\pm 0,12$  ГПа) з вихідною шорсткістю поверхні  $R_{a0}=0,085; 0,22; 0,49; 0,85; 1,42$  мкм. Шорсткість поверхонь сталі 45 і полімерного зразка вимірювали через 0; 50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 1000 км шляху тертя, температура поверхні сталі  $373\pm 1$  К. Швидкість ковзання 3-х циліндричних зразків діаметром 10 мм плоскими торцями по поверхні сталі 45 становила  $v=1,1$  м/с, питома навантаження –  $p=3$  МПа, нормальне навантаження на 1 зразок –  $N_f=235,6$  Н, коефіцієнт взаємного перекриття поверхонь 3-х зразків та контртіла дорівнювало  $KBP=0,21$ .

Полімерні зразки послідовно припрацьовували на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості, що знаходилися на масивному плоскому металевому тілі. Металево контртіло шліфували, а потім оброблювали на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості у випадкових напрямках (для того, щоб отримати поверхню, яка була б близькою до ізотропної поверхні). Далі полімерні зразки припрацьовували на металевому контртілі при робочих трибопараметрах випробувань до досягнення приблизно 100% дзеркальної поверхні. Після припрацювання полімерних зразків металеве контртіло знову припрацьовували на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості, що знаходилися на масивному плоскому металевому тілі.

4. Профілограми мікрошорсткості поверхонь знімали за допомогою профілометра-профілографа ВЭИ «Калибр» моделі «201» та моделі «252». Для одного напрямку знімали 50-60 базових довжин пофілограм 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 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. Параметр широкосмугастості спектру  $\alpha$  був більше 1,8, тобто тієї величини, яка характерна для «білого шуму».

За результатами обробки профілограм визначали моменти нульового  $m_0$ , другого  $m_2$  та четвертого  $m_4$  порядків спектральної щільності (СЩ) розподілу висот вершин нерівностей, кривин у вершинах нерівностей та градієнтів шорсткої поверхні.

## II. Результати та обговорення

2.1. Дослідження полімерного композиту графелон-20.

У табл. 1 приведені результати зміни шорсткості ізотропних поверхонь сталевого контртіла та спряженого з ним карбопластика на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2, наповненого дисперсією 20 об.% вуглецевих волокон – графелон-20.

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 графітованих – 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% 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,

Зміна шорсткості ізотропних поверхонь: контртіла із сталі 45 та карбопластика графелон-20 на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 + 20% об. вуглецевого волокна до ( $S_0=0$  км) та після ( $S_1=150$  км) тертя та зношування

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 $\Delta_{2-1}$	$(\sqrt{m_0})_1$ до випробування (1)	$(\sqrt{m_0})_2$ після випробування (2)	зміна шорсткості за час тертя $\Delta_{2-1}$
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
DEA	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 поверхні сталі 45 зменшується на 0,201-0,250 мкм.

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 поверхнево-

го 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 («Мтілон», «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.

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.

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  $(\sqrt{m_0})_г$ , дорівнював:

• для металевого контртіла:

$r_{1,2}=0,0253 < r_{кр}\{q=1-\alpha/2=0,975$  ( $\alpha=0,05$ );  $f=N-2=19\}=0,4329$  [46], тобто між величинами шорсткості поверхонь вихідної та після тертя існує надійний ( $p=0,95$ ) нелінійний зв'язок зі ступенем нелінійності  $\xi_2(r)=r_{кр}/|r_{1,2}|=17,11$  та залишками ступеня лінійності у нелінійному зв'язку  $\xi_1(r)=|r_{1,2}|/r_{кр}=0,058$ ;

• для полімерного композиту:

$r_{3,4}=0,6762 > r_{кр}\{q=0,975$ ;  $f=19\}=0,4329$  [46], тобто між величинами шорсткості поверхонь вихідної та після тертя існує надійний ( $p=0,95$ ) лінійний зв'язок зі ступенем лінійності  $\xi_1(r)=|r_{3,4}|/r_{кр}=1,562$  та залишками ступеня нелінійності у лінійному зв'язку  $\xi_2(r)=r_{кр}/|r_{3,4}|=0,640$ ;

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 – металеве контртіло у наслідок тертя та зношування існує кореляційний зв'язок:

• для металевого контртіла:

$r_{5,6}=0,4942 < r_{кр}\{q=0,975$ ;  $f=N-2=5\}=0,7545$  [46], 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 у нелінійному зв'язку  $\xi_1(r)=0,655$ ;

• для полімерного композиту:

$r_{5,6}=0,1490 < r_{кр}\{q=0,975$ ;  $f=5\}=0,7545$  [46], 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 у нелінійному зв'язку  $\xi_1(r)=0,197$ ;

3) для полімерних композицій, наповнених вуглецевими волокнами, представленими у табл. 1, між змінами шорсткості поверхні металевого контртіла  $[(\Delta\sqrt{m_0})_в-(\Delta\sqrt{m_0})_г]_{м_е}$  та полімерного композиту  $[(\Delta\sqrt{m_0})_в-(\Delta\sqrt{m_0})_г]_{п_к}$  у 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 у лінійному зв'язку  $\xi_2(r)=0,912$ .

2.2. Дослідження полімерного композиту флубон-15(20).

Встановимо лінійний кореляційний зв'язок результатів, приведених у [47], і, відповідно, за абсолютною величиною коефіцієнта кореляції, складемо мінорантні ряди за силою впливу спектральних моментів СЦ на питому інтенсивність об'ємного зношування за такими співвідношеннями:

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

2) сили впливу величин моментів СЦ ( $m_0', m_2', m_4'$ ) 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. 3);

3) сили впливу післядії процесів тертя та зношування полімерного композиту на інтервалі шляху тертя  $\Delta S_j$  за оцінкою величини моментів СЦ 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. 4);

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. 5).

Як видно з табл. 2, вихідні параметри шорсткості поверхні сталі 45 – спектральні моменти СЦ 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 приваляє висотний параметр ( $m_0$ ), потім градієнт поверхні ( $m_2$ ) та кривина ( $m_4$ );

Таблиця 2

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  $\Delta S_j$  (де  $j=1, 2, \dots, 11$ )

Шлях тертя, на якому визначені $m_0, m_2, m_4$	Шлях тертя $\Delta S_j$ (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	$m_4 > m_2 \gg m_0$

Таблиця 3

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 $I_{j+1}'$
		$r_0'$	$r_2'$	$r_4'$	
$S_0=0$ 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	$m_2' > m_4' > m_0'$

2) далі на шляху тертя 200-600 км привалюють (періодично через 200 км тертя) градієнт поверхні ( $m_2$ ), потім висотний параметр ( $m_0$ ) та кривина ( $m_4$ ), змінюючи на параметр кривини ( $m_4$ ), який перевищує за впливом параметр градієнта поверхні ( $m_2$ ) та висотний параметр ( $m_0$ );

3) далі на шляху тертя  $S_j \geq 600$  км найбільш впли-

вовим параметром є кривина ( $m_4$ ), друге місце посідає параметр або градієнта поверхні ( $m_2$ ), або висотний ( $m_0$ ). Ці зміни наймовірніше пов'язані з формуванням на поверхнях тертя проміжної плівки.

Як видно з табл. 3, аналогічний вплив на  $I_j$  полімерного композиту виявлений для параметрів ізотропної шорсткості поверхні зі сталі 45, значення

Таблиця 4

Вплив післядії процесів тертя та зношування полімерного композиту на шляху тертя  $\Delta S_j$  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 сталевого 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 5

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

Шлях тертя $\Delta S_j$ (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	$m_4' \gg m_2' \geq m_0'$

яких безпосередньо виявлені перед  $j$ -етапом тертя:

1) на етапі тертя від 0 до 100 км привалює висотний параметр ( $m_0$ ), потім параметр градієнта поверхні ( $m_2$ ) та параметр кривини поверхні ( $m_4$ );

2) у межах шляху тертя від 100 до 600 км співвідношення параметрів через 100 км періодично зміню-

ється від  $m_0' > m_2' > m_4'$  до  $m_2' > m_4' > m_0'$ ;

3) у межах шляху тертя  $S_j \geq 600$  км співвідношення параметрів  $m_2' > m_4' > m_0'$  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. 4, віддалений вплив (післядія) параметрів  $j$ -го етапу шляху тертя, де  $j = 0, 1, 2, \dots, 10$ , на інтенсивність зношування полімерного композиту ( $I_{11}$ ) на  $j = 11$  етапі шляху тертя привалюють два параметри 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. 5, вплив процесів тертя та зношування (за оцінками  $I_j$  полімерного композиту) на формування шорсткості поверхні контртіла зі сталі 45 після  $j$ -етапу шляху тертя, пов'язаний з одним параметром 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  $m_4$ .

## Висновки

1. 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.

2. 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.

3. Кореляційний аналіз залежностей інтенсивності зношування полімерного композиту флубон-15(20) від моментів СЩ нульового, другого і четвертого порядків ізотропної спряженої металевої поверхні дозволив 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 почергово 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 виражена почергово 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.

**Сіренко Г.О.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії;  
**Солтис Л.М.** – кандидат хімічних наук, провідний інженер кафедри неорганічної та фізичної хімії.

- [1] S.B. Ajnbinder, N.G. Andreeva, Je.L. Tjunina, *Trenie i iznos* 11(1), 12 (1981).
- [2] A.S. Ahmatov, *Molekuljarnaja fizika granichnogo trenija* (Fizmatizdat, Moskva, 1963).
- [3] G.M. Bartenev, V.V. Lavrent'ev, *Trenie i iznos polimerov* (Himija, Leningrad, 1972).
- [4] V.A. Belyj, A.I. Sviridenok, M.I. Petrokovec, V.G. Savkin, *Trenie polimerov* (Nauka, Moskva, 1972).
- [5] F.P. Bouden, D. Tejbor, *Trenie i smazka tverdyh tel / Per. s angl.* N.M. Mihina, A.A. Silina (Mashinostroenie, Moskva, 1968).
- [6] D.N. Garkunov, *Tribotekhnika* (Mashinostroenie, Moskva, 1985).
- [7] N.B. Demkin, *Kontaktirovanie sherohovatyh poverhnostej* (Nauka, Moskva, 1970).
- [8] V.S. Kombatov, *Vlijanie sherohovatosti tverdyh tel na trenie i iznos* (Nauka, Moskva, 1974).
- [9] B.I. Kosteckij, *Trenie, smazka i iznos v mashinah* (Tekhnika, Kiev, 1970).
- [10] I.V. Kragel'skij, M.N. Dobychin, V.S. Kombatov, *Osnovy raschetov na trenie i iznos* (Mashinostroenie, Moskva, 1977).
- [11] I.V. Kragel'skij, *Trenie i iznos* (Mashinostroenie, Moskva, 1968).
- [12] N.M. Mihin, *Vneshnee trenie tverdyh tel* (Nauka, Moskva, 1977).
- [13] D. Mur, *Trenija i smazka jelastomerov / Per. s angl.* G.I. Brodskogo (Himija, Moskva, 1977).
- [14] G. Pol'cer, F. Majssner, *Osnovy trenija i iznashivanie / Per. s nem.* O.N. Ozerskogo, V.N. Pal'janova (Mashinostroenie, Moskva, 1984).
- [15] *Trenie, iznashivanie i smazki: Spravochnik v 2-h kn. / Pod red. I.V. Kragel'skogo, V.V. Alisina* (Mashinostroenie, Moskva, Kn. 1., 1978, Kn. 2, 1979).

- [16] M.V. Kindrachuk, V.F. Labunec', P.I. Pashenko, Є.V. Korbut, Tribologija: Pidručnik (NAU-druk, Kіiv, 2009).
- [17] G.O. Sirenko, L.M. Soltis, Fizika i himija tverdogo tila 11(2), 423 (2010).
- [18] M.S. Longe-Higgins, Gidrodinamicheskaja neustojchivost' (Mir, Moskva, 124 (1964).
- [19] P.R. Najjak, Problemy trenija i smazki, 93(Ser. F, 3), 85 (1971).
- [20] Ja.A. Rudzit, Ju.Ja. Krizberg, Trenie i iznos, 3(6), 1048 (1982).
- [21] N.F. Semenjuk, Issledovanija topografii poverhnostej metodom sluchajnogo polja i razrabotka raschetnyh metodov ocenki fakticheskoj ploshhadi kontakta pri trenii tverdych tel: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.04. – Jakutsk: In-t fiziko-tehn. problem Severa SO JaF AN SSSR. 149 s. (1983).
- [22] N.F. Semenjuk, G.S. Kalda, E.S. Sokolan, Problemy tribologii (1), (1996).
- [23] N.F. Semenjuk, G.A. Sirenko, Trenie i iznos 1(3), 465 (1980).
- [24] N.F. Semenjuk, G.A. Sirenko, Trenie i iznos 1(5), 815 (1980).
- [25] N.F. Semenjuk, G.A. Sirenko, Tez. dokl. Vsesojuz. nauch.-tehn. konfer. «Tribonika i antifrikcionnoe materialovedenie». – Novoчерkassk. 27-29.05.1980. Izd-vo Novoчерkas. politeh. in-ta, Novoчерkassk. S. 22 (1980).
- [26] N.F. Semenjuk, K.S. Sokolan, Problemi tribologii (2), (2000).
- [27] N.F. Semenjuk, Trenie i iznos 7(5), 830 (1986).
- [28] N.F. Semenjuk, Trenie i iznos 7(1), 85 (1986).
- [29] N.F. Semenjuk, E.V. Terleckaja, Problemy tribologii (1), 83 (1998).
- [30] N.F. Semenjuk, E.V. Terleckaja, Problemy tribologii (1), 90 (1998).
- [31] A.P. Husu, Ju.R. Vittenberg, V.A. Pal'mov, Sherohovatost' poverhnostej. Teoretiko-verojatnostnyj podhod (Nauka, Moskva, 1975).
- [32] M.S. Longuet-Higgins, Proc. Cambridge Philos. Soc. London (52), 234 (1956).
- [33] M.S. Longuet-Higgins, Philos. Trans. of the Royal Soc. London, 250(A), 157 (1957).
- [34] M.S. Longuet-Higgins, Philos. Trans. of the Royal Soc. London 249(A), 321 (1957).
- [35] M.S. Longuet-Higgins, Proc. Cambridge Philos. Soc. London (54), 439 (1958).
- [36] N.F. Semenjuk, Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder: Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau - Zittau, 160 s. (1991).
- [37] G. Sirenko, M. Semenyuk, Abstracts, information and participants Ukrainian-French Symposium "Condensed Matter: Science and Industry". (Lviv, 20-27 February 1993. IPhCS NANU, Lviv, 1993).
- [38] G.O. Sirenko, M.F. Semenjuk, L.M. Soltis, Fizika i himija tverdogo tila 11(3), 768 (2010).
- [39] G.O. Sirenko, M.F. Semenjuk, L.M. Soltis, Fizika i himija tverdogo tila 11(4), 914 (2010).
- [40] M.F. Semenjuk, G.O. Sirenko, L.M. Soltis, Fizika i himija tverdogo tila 12(1), 200 (2011).
- [41] G.A. Sirenko, Antifrikcionnye karboplastiki (Tehnika, Kiev, 1985).
- [42] G.A. Sirenko, V.P. Sviderskij, V.D. Gerasimov, V.Z. Nikinov, Antifrikcionnye termostojkie polimery (Tehnika, Kiev, 1978).
- [43] G.O. Sirenko, Stvorennja antifrikcijnih materialiv na osnovi poroshkiv termotrivkiv polimeriv ta vuglecevih volokon: Dis. ... dokt. tehn. nauk: spec. 05.16.06 – poroshkova metalurgija ta kompozicijni materiali, Hmel'nic'kij tehnologichnij in-t, In-t problem materialoznavstva im. I.M. Francevicha NANU (Kіiv, 1997).
- [44] L.B. Sokolov, V.D. Gerasimov, V.M. Savinov, V.K. Beljakov, Termostojkie aromaticschie poli-amidy (Himija, Moskva, 1975).
- [45] Ju.A. Panshin, S.G. Malkevich, C.S. Dunaevskaja, Ftoroplasty (Himija, Leningrad, 1978).
- [46] P. Mjuller, P. Nojman, R. Shtorm, Tablicy po matematicheskoj statistike / Per. s nem. i predislovie V.M. Ivanovoj (Finansy i statistika, Moskva, 1982).
- [47] G.O. Sirenko, L.M. Soltis, M.F. Semenjuk, Visnik Priкарp. nac. un-tu im. V. Stefanika. Ser. Himija (HII), 133 (2011).



H.O. Sirenko, L.M. Soltys

## **Tribosurface Properties of Polymer Composite in Friction and Wear on Isotropic Rough Surface of Steel 45**

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

Regularities of change of roughness surfaces of steel 45 in friction and wear in a pair with polymer composite has been researched. The minorant rows of influence of spectral density moments on the intensity of wear of polymer composite based on aromatic polyamide and polytetrafluoroethylene and carbon fibers has been defined.

**Keywords:** roughness, intensity of wear, isotropic surface, friction, composite polymer material, moments of spectral density, minorant rows.