

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, М.Б. Складанюк, А.В. Луцась

Вплив технологічних та трибологічних чинників на ефект післядії та зносостійкість полімерних композитів

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

Досліджені протизносні властивості полімерних композитів на основі політетрафторетилену з неметалізованими та металізованими карбонізованими волокнами в умовах тертя та зношування під час надграничних і граничних питомих навантажень. Вперше введено означення показників навантажувального та часового ефектів післядії, які дають кількісну оцінку впливу процесів та механізмів тертя та зношування. Встановлено, що під час протизносних випробувань зразків композитів, як під час ступінчатого надграничного питомого навантаження ($N_f = \text{var}$), так і під час сталого граничного та питомого навантаження ($N_f = \text{const}$) з високою ймовірністю проявляється часовий ефект післядії.

Ключові слова: вуглецеві волокна, полімерні композити, протизносні властивості, тертя, зношування, ефект післядії.

Стаття постуила до редакції 15.01.2015; прийнята до друку 15.03.2015.

Вступ

1. Відомі антифрикційні полімерні композиції на основі політетрафторетилену (ПТФЕ), що армовані вуглецевими волокнами (ВВ). Створення хемо-механо-активаційної (ХМА) технології [1-4] та самозмащувальних антифрикційних матеріалів на їх основі [5-25] дозволило значно підвищити зносостійкість і термін та надійність роботи ущільнювальних елементів з цих матеріалів у компресорів, реакторів, pomp та інших машин і механізмів. Шляхом багат шарового покриття поверхонь вуглецевих волокон подвійними та потрійними композиціями металів Cu^0 , Ni^0 , Pb^0 , Fe^0 та введення їх у полімерну матрицю антифрикційних матеріалів очікувано ще більш високий ефект підвищення зносостійкості.

2. Фізико-хімія та технологія міднення, ніколювання і свинцювання карбонізованих волокон (КВ) розглянуті у [2, 26-30], при цьому ретельно вивчена відома формальдегідна технологія та розроблені модифікована формальдегідна (мф) і цинкова (ц) технології міднення неграфітованих волокон, зокрема, і багат шарові покриття із застосуванням сумісно цинкової ($\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$) та модифікованої формальдегідної ($\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O} + \text{CuO}$) технологій та технології ніколювання ($\text{Ni}^0 + \text{P}$) і свинцювання (Pb^0).

3. Мета роботи полягала у тому, щоби дослідити та проаналізувати залежності між технологічними та трибологічними чинниками і зносостійкістю композитів на основі політетрафторетиленової матриці

та неметалізованих і металізованих вуглецевих волокон, підданих інтенсивній хемо-механо-активаційній обробці.

I. Експериментальна частина

1. Об'єктами дослідження були карбонізовані (УТМ-8) та графітовані (ТГН-2м) вуглецеві волокна, які отримані шляхом просочення вихідних гідратцелюлозних (віскозних) тканин антипіренами $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ і $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ з подальшим відпаленням за $723 \pm 20\text{K}$ в CH_4 та за $1123 \pm 50\text{K}$ в CH_4 (УТМ-8) і $2673 \pm 50\text{K}$ в N_2 (ТГН-2м). Отриману карбонізовану та графітовану тканину піддали порізки на шматки від 4×4 до 6×6 см і за ХМА-технологією [1] подрібненню в дробарці МРП-1 з подовими ножами за 7000 обертів за хвилину (частота обертання 117c^{-1}) протягом 5 хв. Карбонізовані волокна мали числовий та масовий (об'ємний) розподіл Вейбулла за довжинами в межах 20-1200 мкм [31].

2. Технологія одержання полімерних композицій. За ХМА-технологією [1] в порошок ПТФЕ вводили (табл. 1):

1) 6,95-37,82 об.% карбонізованого за 1123 К вуглецевого волокна УТМ-8 (без покриття металами) [композиції №1-5 (табл. 1) з однокомпонентним наповнювачем (6,95-37,82 об.%)];

2) 23,95 об.% карбонізованого за 1123 К вуглецевого волокна УТМ-8 (без покриття металами) +

Таблиця 1

Вміст інгредієнтів у композиційних матеріалах на основі ПТФЕ та вуглецевих волокон без покриття та з одношаровим чи багатшаровими покриттями металами

№ композиції	Вміст інгредієнтів, об. %				
	наповнювача в цілому	КВ (УТМ-8)	покриття на КВ $\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$ (шар)	покриття на КВ $\text{Ni}^0 + \text{P}$ (шар)	покриття на КВ (1) + (2) шари
1	6,95	6,95	–	–	–
2	13,62	13,62	–	–	–
3	20,03	20,03	–	–	–
4	26,19	26,19	–	–	–
5	37,82	37,82	–	–	–
6	26,21	23,95	1,80 ⁽¹⁾	0,46 ⁽²⁾	–
7	9,00	4,78	4,22(1)	–	4,22(1)
8	17,29	9,20	8,09(1)	–	8,09(1)
9	24,91	13,25	11,66(1)	–	11,66(1)
10	31,97	17,00	14,97(1)	–	14,97(1)
11	46,03	27,01	19,02(1)	–	19,02(1)
12	8,05	7,32	–	0,73(1)	0,73(1)
13	16,01	14,61	–	1,40(1)	1,40(1)
14	23,99	21,89	–	2,10(1)	2,10(1)
15	32,03	29,23	–	2,80(1)	2,80(1)
16	40,78	37,19	–	3,59(1)	3,59(1)
17	10,30	7,70	1,82(2)	0,78(1)	2,6(1+2)
18	18,53	15,05	2,20(2)	1,28(1)	3,48(1+2)
19	21,88	16,39	3,86(2)	1,63(1)	5,49(1+2)
20	33,39	25,00	5,90(2)	2,49(1)	8,39(1+2)
21	45,64	34,17	8,07(2)	3,40(1)	11,47(1+2)
22	9,50	7,22	1,52(1)	0,76(2)	2,28(1+2)
23	18,23	15,27	1,94(1)	1,02(2)	2,96(1+2)
24	27,95	23,41	2,96(1)	1,58(2)	4,54(1+2)
25	38,07	31,88	4,04(1)	2,15(2)	6,19(1+2)
26	49,92	34,80	11,52(1)	3,60(2)	15,12(1+2)
27	24,93	13,05	5,93(1)+5,95(2)	–	11,88(1+2)
28	25,64	13,30	6,02(1)	6,32(2) ⁽³⁾	12,34(1+2)
29	33,3 ⁽⁴⁾	8,0 ⁽⁴⁾	3,34(1) ⁽⁴⁾	9,34 ^{(4),(5)}	3,34(1) ⁽⁴⁾

(1) графітоване волокно ТГН-2м; (2) графіт колоїдний С-1; (3) Pb^0 ; (4) мас. %; (5) мідних сполук

1,80% графітованого за 2673 К вуглецевого волокна ТГН-2м (без покриття металами) + 0,46 об.% порошку графіту С-1 [композиція №6 (табл. 1) з трикомпонентним наповнювачем (26,21 об.%)];

3) 4,78-27,01 об.% волокна УТМ-8, покритого одним шаром 4,22-19,02 об.% ($\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$) [композиції №7-11 (табл. 1) з наповнювачем (9,00-46,03 об.%)];

4) 7,32-37,19 об.% волокна УТМ-8, покритого одним шаром 0,73-3,59 об.% ($\text{Ni}^0 + \text{P}$) [композиції №12-16 (табл. 1) з наповнювачем (8,05-40,78 об.%)];

5) 7,70-34,17 об.% волокна УТМ-8, покритого двома шарами: 0,78-3,40 об.% (1-й шар) ($\text{Ni}^0 + \text{P}$) +

1,82-8,07 об.% (2-й шар) ($\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$) [композиції №17-21 (табл. 1) з наповнювачем (10,30-45,64 об.%)];

6) 7,22-34,80 об.% волокна УТМ-8, покритого двома шарами: 1,52-11,52 об.% (1-й шар) ($\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$) + 0,76-3,60 об.% (2-й шар) ($\text{Ni}^0 + \text{P}$) [композиції №22-26 (табл. 1) з наповнювачем (9,50-49,92 об.%)];

7) 13,05 об.% волокна УТМ-8, покритого двома шарами: 5,93 об.% (1-й шар) ($\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$) + 5,95 об.% (2-й шар) ($\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$) [композиція №27 (табл. 1) з наповнювачем (24,93 об.%)];

8) 13,30 об.% волокна УТМ-8, покритого двома шарами: 6,02 об.% (1-й шар) ($\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$) + 6,32 об.%

(2-й шар) (Pb⁰) [композиція №28 (табл. 1) з наповнювачем (25,64 об.%)];

9) композит «флубон-907» [7] – композиція №29 такого складу (мас. %): MoS₂ (порошок) (13,32); Cu⁰ (порошок) (4,67); карбонізоване вуглецеве волокно УТМ-8 (дисперсія) (4,67); УТМ-8, покрите Cu⁰+Cu₂O (ц) (дисперсія) (6,67); B₂O₃ (1,0); Na₂B₄O₇ (0,67); (NH₄)₂HPO₄ (0,67); Cu(OH)HCO₃ (1,33); пірогенний SiO₂, модифікований бутиловим спиртом – «бутосил Б-1» (0,33). Композит «флубон-907» містить: 33,33% мас. наповнювача в цілому; 12,67% мідних сполук і мідних волокон; 2,34% антипіренів; 0,33% тиксотропної добавки («бутосил Б-1»).

Час змішування композицій №1-26 у млинку МРП-1 за 7000 об./хв. становив: 4-30 хв. (під час дослідження впливу цього чинника на антифрикційні властивості композитів) та 5 хв. (для решти антифрикційних досліджень та композицій).

Переробку композицій №1-29 у виробі (композит) здійснювали методом компресійного пресування за відомою технологією переробки фторопластів [32, 33].

3. Трибологічні випробування зразків композитів проведені на машині тертя ХТІ-75м [1] за схемою контакту [П-2] (сферична кінцівка циліндрів – площина металевого контргіла) в режимі надграничних та граничних навантажень. Зразки були виготовлені у вигляді циліндрів діаметром 10±0,05 мм та висотою 15±0,1 мм. Фасонним різачком на токарному верстаті одна кінцівка зразка була виконана у вигляді напівсфери радіуса 6,35 мм. Три зразка контактували з плоскою поверхнею контргіла із сталі 45 (HB 4,5±0,02ГПа), з вихідною анізотропною шорсткістю Ra₀=0,24±0,08 мкм.

Протизносні властивості досліджували під час тертя без рідинного мащення (у вологому повітрі лабораторії) за двома методами, виявляючи:

1) за методикою №1 – залежність інтенсивності об'ємного зношування I(S) зразків композиту від нормального навантаження (N_i) I(S)=f(N_i) під час ступінчатого навантаження від N_i=30Н з j-інтервалом ΔN_j=30Н, до N_i=300-450 Н,

$$\text{де } I(S) = \frac{\Delta V_i}{\Delta S_j} \left[\frac{\text{мм}^3}{\text{м}} \right]; \quad (1)$$

ΔV_i [мм³] – зміна об'єму i-го зразка композиту під час зношування (розрахунок середнього зношеного об'єму за трьома зразками);

ΔS_j [м]=1км – шлях тертя на i-му ступені навантаження; температура поверхні сталі сталевого контргіла T=373±1К; швидкість ковзання v₁=0,30 м/с та v₂=0,78 м/с;

2) за методикою №2 – залежність питомого об'ємного зносу I(N) зразків композиту від шляху тертя (S_j) I(N)=f(S) від 0 до 50 км з інтервалом ΔS_j=1-10 км під час сталого навантаження на один зразок N_i=100 Н,

$$\text{де } I(N) = \frac{\Delta V_i}{N_i} \left[\frac{\text{мм}^3}{\text{Н}} \right]; \quad (2)$$

ΔS_j [м]=1-10 км – шлях тертя між вимірюванням об'єму зносу; температура поверхні сталі

T=373±1К; швидкість ковзання v₁=0,30 м/с та v₂=0,78 м/с.

За результатами дослідження за методами (1) і (2) розраховували також питому інтенсивність об'ємного зношування (чинник зношування) [34] – енергетична інтенсивність зношування:

$$I = \frac{\Delta V_i}{N_i \Delta S_j} \left[\frac{\text{мм}^3}{\text{Н} \cdot \text{м}} \right]. \quad (3)$$

для певного N_j (ΔN_j), S_j (ΔS_j).

4. Введемо у науковий обіг означення показника ефекту післядії для 2-х методик випробувань:

1) за 1-ою методикою під час надграничних ступінчатих (N_i=var) навантажень від N_i=30 Н до N_i=300-450 Н (**навантажувальний ефект післядії**):

$$X(N) = X(p) = \frac{I_2(N_2)}{I_1(N_1)}, \quad (4)$$

де I₁(N₁) – питома інтенсивність об'ємного зношування за N_{i1} нормального навантаження на один зразок;

I₂(N₂) – питома інтенсивність об'ємного зношування за N_{i2} нормального навантаження на один зразок;

N_{i2} > N_{i1}, I₂(N₂) > I₁(N₁).

Тут підвищені значення ξ(p) свідчать про високий ефект післядії, тобто негативно характеризують протизносні властивості композиту під час зростання навантаження при терті та зношуванні.

2) за 2-ою методикою під час граничних та середніх сталих (N_i=const) навантажень для шляху тертя ΔS₁=0...10 (20) км (I₁) та ΔS₂=10...50 (20...60) км (I₂) (**часовий ефект післядії**):

$$X(t) = X(S) = \frac{I_2(S_2)}{I_1(S_1)}, \quad (5)$$

де I₁(S₁) – питома інтенсивність об'ємного зношування на шляху тертя ΔS₁=0...10 (20) км;

I₂(S₂) – питома інтенсивність об'ємного зношування на шляху тертя ΔS₂=10...50 (60) км; ΔS₁ < ΔS₂; I₁(S₁) > I₂(S₂).

Тут підвищені значення ξ(S) свідчать про високий ефект післядії, тобто негативно характеризують протизносні властивості композиту під час збільшення шляху (часу) тертя та зношування.

II. Результати та обговорення

Результати трибологічних випробувань представлені на рис. 1-8 та у табл. 2-6.

2.1. Технологічний чинник.

1. На рис. 1 приведені результати трибологічних випробувань зразків композиції №9 (табл. 1) на основі ПТФЕ, наповненої карбонізованим волокном УТМ-8, покритої Cu⁰+Cu₂O за цинковою технологією (ц), за 2-им методом випробувань.

На рис. 1 приведені криві залежності питомого об'ємного зносу I(N) зразків композиту від шляху тертя, швидкості ковзання v=0,30 м/с (а) і v=0,78 м/с (б) та часу механічної активації композиції (τ_a) під час змішування. Як видно з рис. 1, час активації композиції [до переробки її у виріб (композит)] у ме-

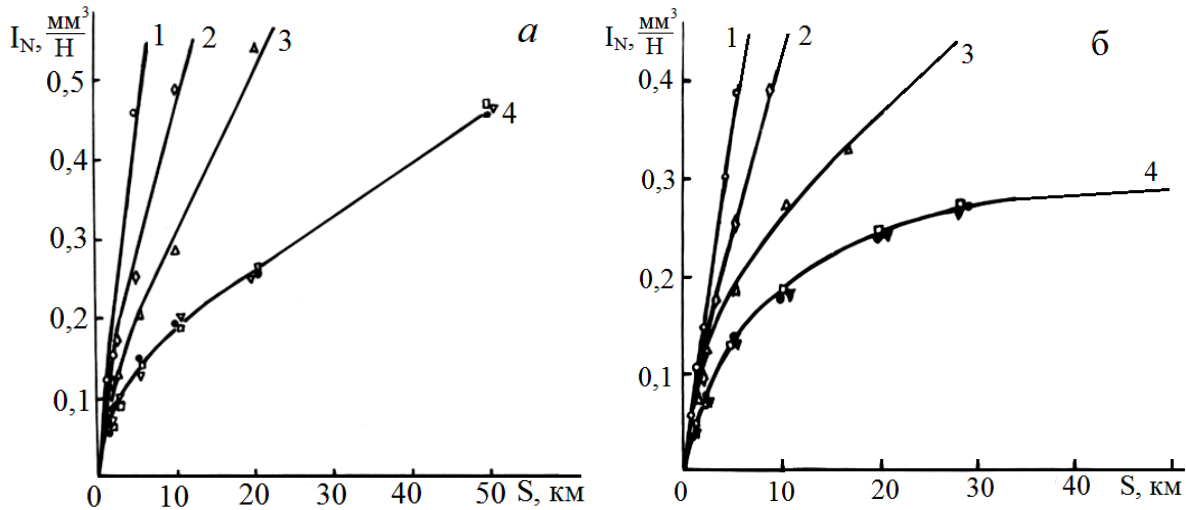


Рис. 1. Залежність питомого об’ємного зносу $I(N)$ зразків композиту №9 (ц) від шляху тертя (S), швидкості ковзання $v=0,30$ м/с (а) і $v=0,78$ м/с (б) та часу механічної активації композиції (τ_a) під час змішування інгредієнтів у млинку МРП-1 (7000 об./хв.): 1 – 4 хв.; 2 – 6 хв.; 3 – 8 хв.; 4 – 12 (□), 15 (▼), 30 (●) хв.

Таблиця 2

Вплив часу механічної активації композиції №9 (ц) під час змішування у млинку МРП-1 (7000 об./хв.) на питому інтенсивність об’ємного зношення (I) зразків композиту під час тертя по сталі на шляху тертя $\Delta S_1=0\dots 10$ км та $\Delta S_2=10\dots 50$ км та швидкості ковзання $v_1=0,30$ м/с та $v_2=0,78$ м/с за сталого нормального навантаження $N_1=100$ Н

Час хемо-механічної активації композиції, хв.	$I, \times 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$					
	$v_1=0,30$ м/с			$v_2=0,78$ м/с		
	I ділянка: $\Delta S_1=0\dots 10$ км (I_1)	II ділянка: $\Delta S_2=10\dots 50$ км (I_2)	$\xi(S)$	I ділянка: $\Delta S_1=0\dots 10$ км (I_1)	II ділянка: $\Delta S_2=10\dots 50$ км (I_2)	$\xi(S)$
4	77,5	72,6	0,937	71,6	68,2	0,953
6	48,2	36,5	0,757	44,0	35,0	0,796
8	31,5	20,3	0,644	27,5	9,9	0,360
12	18,6	6,8	0,366	18,2	3,7	0,203
15	19,4	6,6	0,340	18,0	3,6	0,200
30	19,8	6,5	0,328	17,9	3,5	0,196

жах 4-30 хв. суттєво впливає на питомий знос зразків до $\tau_a=12$ хв., подальше збільшення часу активації від 12 до 30 хв. мало впливає на зносостійкість композиту, що видно із величини навантажувального ефекту післядії $\xi(N)$. Як видно з рис. 1, можна виділити дві характерні ділянки на кривих $I(N)=f(S)$: I – ділянку нелінійної залежності питомого об’ємного зносу від шляху тертя: $\Delta S=0\dots 10$ км (ділянка надграничних та граничних питомих навантажень); II – ділянку лінійної залежності $I(N)=f(S)$: $\Delta S=10\dots 50$ км (ділянка від граничних питомих навантажень до середніх таких, які композитний матеріал спроможний витримувати з малим зносом).

Результати розрахунків питомої об’ємної інтенсивності зношення для цих двох ділянок зведені в табл. 2. Як видно з табл. 2, час механічної активації композиції суттєво впливає на показник зносостійкості зразків композиту: із збільшенням часу активації зменшується інтенсивність питомого об’ємного зношення для обох ділянок зношення, при цьому максимальний ефект досягається за $\tau_a=12-30$ хв.

активації, при цьому виявляється більший ефект від часу активації за швидкістю ковзання $v_2=0,78$ м/с, ніж за $v_1=0,30$ м/с, що видно із залежності $\xi(N)=f(\tau_a)$.

Результати, що наведені на рис. 1 та у табл. 2, свідчать про те, що під час тертя та зношення зразків композитів, отриманих із композиції на основі ПТФЕ, наповненого карбонізованими волокнами з покриттям $\text{Cu}^0+\text{Cu}_2\text{O}$, та підданих ХМА-технології, по сталевим поверхням з анізотропною шорсткістю, низьке зношення за сталого навантаження забезпечується за двома механізмами різними за своєю природою процесів:

1) переносом активованого ПТФЕ на спряжену поверхню металу та утворення на ній висококристалічної проміжної плівки;

2) вибіркового переносу високодисперсної активної міді з покриття на карбонізованому вуглецевому волокні, її оксидації до Cu_2O та відновлення до Cu^0 , що відбувається на позитивній зміні показника ефекту післядії.

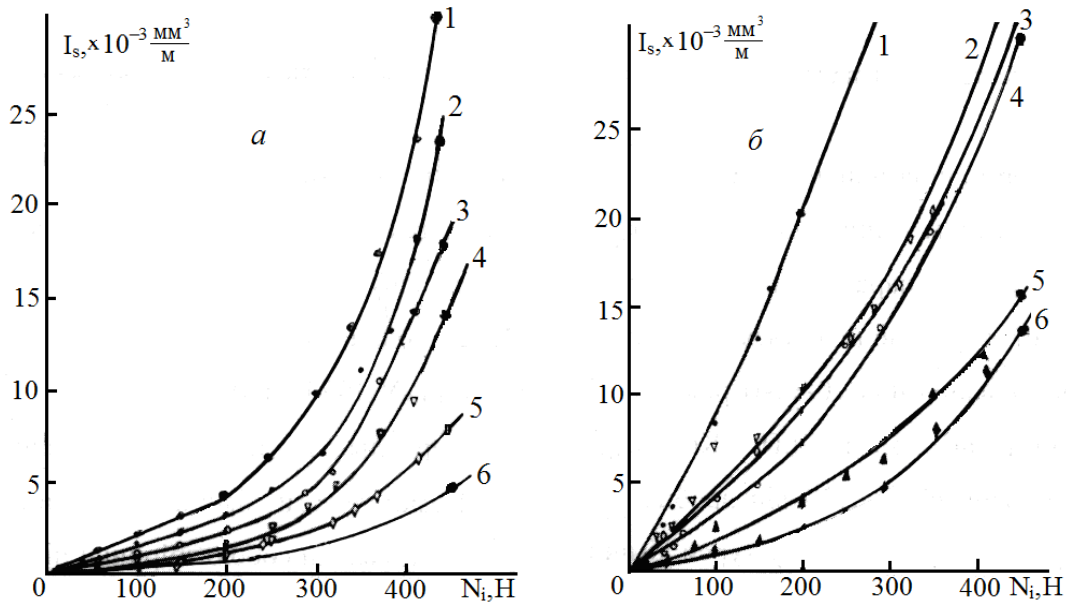


Рис. 2. Залежність інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту на основі ПТФЕ + карбонізоване волокно УТМ-8 без [композиція №4] (а) та з [(композиція №9 (ц) мідним покриттям $\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$ від нормального навантаження на один зразок (N_i) та часу активації композиції (τ_a) під час змішування композиції в МРП-1 (7000 об./хв.): 1 – 4 хв.; 2 – 6 хв.; 3 – 8 хв.; 4 – 12 хв.; 5 – 15 хв.; 6 – 30 хв. Швидкість ковзання під час фрикційних випробувань: $v=0,30$ м/с.

Таблиця 3

Результати дослідження впливу часу активації композицій №4 та №9 (ц) в МРП-1 (7000 об./хв.) на питому інтенсивність об'ємного зношування (I) зразків композиту під час тертя та зношування по сталі під час ступінчатого навантаження від $N_{i1}=30$ Н до $N_{i2}=450$ Н (надграничні навантаження) та швидкості ковзання $v_1=0,30$ м/с при нормальному навантаженні $N_i=200$ Н та $N_i=450$ Н

Час хемо-механічної активації композиції, хв.	$I, \times 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$					
	композиція №4			композиція №9 (ц)		
	$N_{i1}=200$ Н (I_1)	$N_{i2}=450$ Н (I_2)	$\xi(N)$	$N_{i1}=200$ Н (I_1)	$N_{i2}=450$ Н (I_2)	$\xi(N)$
4	21,9	67,8	3,096	101,8	181,8	1,786
6	15,8	52,2	3,304	56,4	80,8	1,433
8	12,3	39,8	3,236	47,3	71,9	1,520
12	8,8	30,4	3,455	35,5	67,9	1,913
15	5,3	17,2	3,245	19,1	36,4	1,906
30	3,5	10,9	3,114	12,7	30,7	2,417

Як видно з табл. 2, для швидкості ковзання $v_1=0,30$ м/с величина ефекту післядії швидко спадає від 0,937 до 0,366 до часу активації композиції №9 $\tau_a=12$ хв. і далі повільно теж спадає до $\tau_a=30$ хв. від 0,366 до 0,328 за рахунок швидкого зменшення питомої інтенсивності об'ємного зношування (I_2) на II ділянці шляху тертя $\Delta S_2=10...50$ км та повільного зменшення I_1 на I ділянці $\Delta S_1=0...10$ км. Для швидкості ковзання $v_2=0,78$ м/с спостерігається аналогічна закономірність: показник ефекту післядії швидко спадає від 0,953 до 0,203 під час зміни часу активації композиції від $\tau_a=4$ хв. до $\tau_a=12$ хв. і далі повільно спадає від 0,203 до 0,196 під час зміни τ_a від 12 до 30 хв. з таким же, як і при $v_1=0,30$ м/с, механізмом формування його величини.

2. На рис. 2 приведені результати дослідження залежності інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$

від нормального навантаження на один зразок (N_i) композитів без [композиція №4 (табл. 1)] (а) та з [композиція №9 (табл. 1)] (б) мідним покриттям ($\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$) за цинковою технологією (ц) та часу механічної активації композиції від 4 до 30 хв. під час ступінчатого неперервного навантаження на один зразок від $N_i=30$ Н до $N_i=450$ Н (шлях тертя на одному навантаженні $\Delta S_i=1-10$ км).

За даними табл. 1, загальний вміст наповнювача УТМ-8 або УТМ-8 з мідним покриттям $\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$ приблизно рівний за об'ємом: 26,19% [композиція №4] та 24,91% [композиція №9]. Під час аналізу та порівняння протизносних властивостей цих двох композитів необхідно врахувати різне об'ємне наповнення їх карбонізованим вуглецевим волокном: 26,19% [композиція № 4] та 13,25% [композиція № 9].

Як видно з рис. 2, для 2-ої методики, як і для 1-ої методики випробувань, на кривих залежностей $I(S)=f(N_i)$ спостерігається дві ділянки зношування у надкритичних умовах питомих навантажень: I – від $N_i=30\text{Н}$ до $N_i=200\text{Н}$ (лінійна залежність); II – від $N_i=200\text{Н}$ до $N_i=450\text{Н}$ (нелінійна залежність).

Як видно з рис. 2, час активації композиції впливає на зношування зразків композитів у більшій степені за ступінчастим навантаженням, ніж як під час сталого навантаження, при цьому для композиту з мідним карбонізованим волокном вплив більший, ніж для композиту з вихідним карбонізованим волокном (табл. 3).

За результатами рис. 2 розрахована питома інтенсивність об'ємного зношування для $N_i=200\text{ Н}$ та $N_i=450\text{ Н}$ (табл. 3).

Як видно з результатів табл. 3, питома інтенсивність об'ємного зношування зменшується від $21,9$ до $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ (при $N_i=200\text{ Н}$) і від $67,8$ до $10,9 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ (при $N_i=450\text{ Н}$) для композиції №4, яка наповнена немідним карбонізованим волокном, та від $101,8$ до $12,7 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ (при $N_i=200\text{ Н}$) і від $181,8$ до $30,7 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$ (при $N_i=450\text{ Н}$) для композиції №9, під час зміни часу активації композиції від 4 до 30 хв. Так як під час антифрикційних випробувань зразків композитів, як під час ступінчастого надграничного питомого навантаження $N_i=\text{var}$ (методика №1), так і під час сталого граничного та помірного питомого навантаження $N_i=\text{const}$ (методика №2), то з високою ймовірністю проявляється чинник післядії – вплив процесів зношування і-моменту на j-момент часу, і- N_i -навантаження та j- N_j -навантаження.

Як видно з табл. 3, ефект післядії значно впливає на зношування зразків композитів під час ступінчастого змінного навантаження (методика №1) (табл. 3), ніж під час сталого навантаження (методика №2) (табл. 2), і тим сильніше, чим більша величина N_i . При цьому, композити, що містять міднені карбонізовані волокна, більш чутливі до чинника післядії у режимі ступінчастого навантаження, ніж волокна без покриття: у 4,65-3,63 разів ($N_i=200\text{ Н}$) та 2,68-2,82 рази ($N_i=450\text{ Н}$) при зміні часу активації композиції від 4 до 30 хв. відповідно (табл. 3), тобто вибірковий механізм переносу міді більше залежить від чинника післядії, ніж механізм переносу ПТФЕ на спряжені поверхні.

Дійсно, показник ефекту післядії $\xi(N)$ під час збільшення часу активації композиції від 4 до 12 хв. зростає від 3,096 до 3,455, а далі зменшується до 3,114 за $\tau_a=30\text{ хв.}$ для композиції №4, яка наповнена немідним карбонізованим волокном, у той час як $\xi(N)$ зростає від 1,433 до 2,417 під час зміни τ_a від 6 до 30 хв.

2.2. Вплив вмісту наповнювача.

1. На рис. 3, 4, 6-8 приведені криві залежностей інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ композитів на основі ПТФЕ та карбонізованого вуглецевого волокна УТМ-8: без металізації поверхні (рис. 3); з одношаровим покриттям $\text{Cu}^0+\text{Cu}_2\text{O}$ за цинковою та модифікованою формальдегідною технологіями (рис. 4); з одношаровим покриттям Ni^0+P (рис. 6); з двошаровим покриттям $(\text{Cu}^0+\text{Cu}_2\text{O})$ (1-й шар) +

(Ni^0+P) (2-й шар) (рис. 8); з двошаровим покриттям (Ni^0+P) (1-й шар) + $(\text{Cu}^0+\text{Cu}_2\text{O})$ (2-й шар) (рис. 7), від нормального навантаження на один зразок (N_i) та об'ємного вмісту наповнювача в цілому і, відповідно, об'ємного вмісту КВ та металу покриття.

На рис. 4 для порівняння приведені залежності $I(S)=f(N_i)$ для композиту, наповненого КВ з (Ni^0+P) -покриттям та композиту «флубон-907» [7], що містив мідь у різній формі (композиція №29).

За результатами рис. 3 розраховували питому інтенсивність об'ємного зношування (I) для нормального навантаження на один зразок $N_i=200\text{ Н}$ та $N_i=450\text{ Н}$ від вмісту неметалізованого карбонізованого волокна УТМ-8 (композиції №3-6 табл. 4).

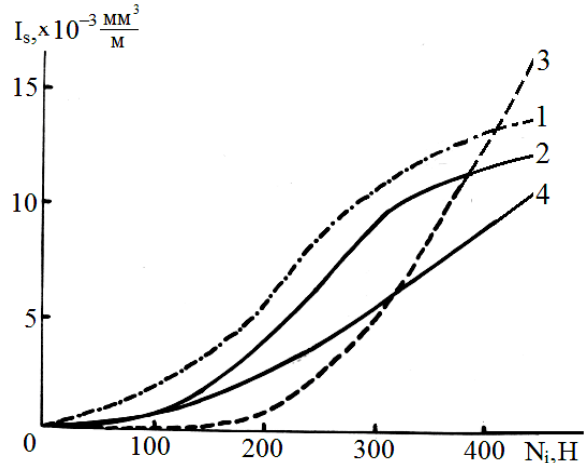


Рис. 3. Залежність інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту на основі ПТФЕ + карбонізоване волокно УТМ-8 (без металопокриття) від нормального навантаження на один зразок (N_i) для композицій: 1 – №3; 2 – №4; 3 – №6; 4 – №5. Швидкість ковзання $v_1=0,30\text{ м/с}$.

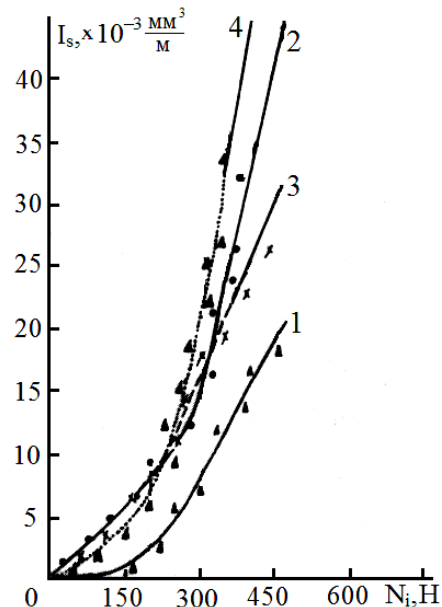


Рис. 4. Залежність інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту на основі ПТФЕ + карбонізоване волокно УТМ-8 [з металопокриттям $\text{Cu}^0+\text{Cu}_2\text{O}$ (1), (2), (4) та Ni^0+P (3)] від нормального навантаження на один зразок (N_i) для композицій: 1 – №29; 2 – №10 (ц); 3 – №15; 4 – №10 (мф). Швидкість ковзання $v_1=0,30\text{ м/с}$.

Залежність питомої інтенсивності об'ємного зношування під час ступінчатого навантаження від 30 до 450 Н (надграничні навантаження) від вмісту інгредієнтів та металізації КВ у композиті за методом випробування №1

№ композиту	Вміст інгредієнтів, об.%				I, $\times 10^{-6}$ мм ³ /(Н·м)		$\xi(N)$
	наповнювача в цілому	КВ (УТМ-8)	покриття на КВ		N _i =200 Н (I ₁)	N _i =450 Н (I ₂)	
			Cu ⁰ +Cu ₂ O	Ni ⁰ +P			
3	20,03	20,03	–	–	29,0	32,1	1,107
4	26,19	26,19	–	–	21,2	28,3	1,335
5	37,82	37,82	–	–	12,7	23,9	1,882
6	26,21	23,95	1,8 ¹	0,46 ²	3,3	36,5	11,061
10	31,97	17,00	14,97	–	41,1	100,2	2,438
10	32,85	17,65	15,20	–	34,5	140,2	4,064
15	32,03	29,23	–	2,80	42,4	64,8	1,528
29	33,33 ³	8,0 ³	3,34 ³	9,34 ^{3,4}	13,3	44,8	3,368

¹графітоване за 2673 К вуглецеве волокно ТГН-2м; ²графіт колоїдний С-1; ³мас. %; ⁴мідних сполук.

2. Як видно з табл. 4, збільшення вмісту карбонізованого волокна від 20,03 до 37,82 об.% зменшує інтенсивність зношування від 29,0 до $12,7 \cdot 10^{-6}$ мм³/(Н·м) N_i=200 Н та від 32,1 до $23,9 \times 10^{-6}$ мм³/(Н·м) N_i=450 Н. Введення у ПТФЕ комплексного наповнювача (композиція №6), який містить 23,95 об.% карбонізованого волокна УТМ-8 + 1,8 об.% графітованого волокна ТГН-2м + 0,46 об.% колоїдного графіту приводить до зниження інтенсивності зношування зразків композиту до $3,3 \times 10^{-6}$ мм³/(Н·м) (при N_i=200 Н), але за високих надграничних навантажень цей ефект не проявляється (порівнюючи композиції № 3-5 з № 6), при цьому показник ефекту післядії $\xi(N)$ для композицій №3-5 знаходиться в межах 1,107-1,882 (високий позитивний результат), то для композиції №6 досягає значення 11,061 (дуже низький результат), тобто для композитів з однокомпонентним неметалізованим наповнювачем попередні і-ті процеси та механізми тертя та зношування мало впливають на наступні j-ті процеси та механізми тертя та зношування, то для композиту з багатокомпонентним наповнювачем цей вплив у 5,88-9,99 разів більший.

3. Порівняння цинкової (ц) та модифікованої формальдегідної (мф) технологій міднення карбонізованого волокна УТМ-8 привели до висновків, що у режимі питомих надвисоких навантажень зразки композиції №10, які містять міднені волокна, технологія (мф) переважає технологію (ц) при N_i=200Н, а при N_i=450 Н – ефект має зворотній характер, тобто для таких композитів чинник післядії залежить від навантаження, а введення у композит волокон, покритих Ni⁰+P, зайвий раз підтверджує ці висновки. Введення у композицію №29 [7] комплексного наповнювача, який містить сполуки міді у різній формі (порошок Cu⁰, покриття КВ Cu⁰+Cu₂O, Cu(OH)HCO₃) та низку бор- та фосфорвмісних антипренів і тиксотропну добавку – бутосил, знижує інтенсивність зношування зразків композиту в 2,59-3,19 раз при

N_i=200 Н та у 1,45-3,13 рази при N_i=450 Н порівняно з композитами з одношаровими покриттями Cu⁰+Cu₂O (№10) і Ni⁰+P (№15).

4. Порівняння протизносних властивостей композитів за $\xi(N)$, наповнених неметалізованими та металізованими (табл. 4) волокнами, показує на перевагу неметалізованих волокон у режимі надграничних навантажень [$\xi(N)$ =1,107-1,882 (значний позитивний результат) для неметалізованих волокон та $\xi(N)$ =1,528-2,438 (менший позитивний результат) для металізованих волокон] (табл. 4), але за табл. 3 спостерігається зворотня закономірність: навантажувальний ефект післядії в межах 450/200 Н для композиту з неметалізованими волокнами становить 3,096-3,455 (композиція №4), а з металізованими волокнами – 1,433-2,417, тобто все залежить суттєво від технології активації композиції та навантаження. Так, у режимі граничних та середніх навантажень (N_i=100 Н) спостерігається низька інтенсивність зношування: I(S₁)=(12,3-19,9)·10⁻⁶ мм³/(Н·м) на шляху тертя S₁=0-20 км та I(S₂)=(0,8-9,5)·10⁻⁶ мм³/(Н·м) на шляху тертя S₂=20-60 км (композиції №7-11) під час зміни вмісту КВ від 4,78 до 27,01 об.% і покриття Cu⁰+Cu₂O на ньому – від 4,22 до 19,02 об.%, а $\xi(S)$ при цьому досягає величин 0,065-0,477 (високий позитивний результат) (рис. 5, табл. 5), при цьому, для міднених волокон існує оптимальна концентрація за вмістом карбонізованого волокна та (Cu⁰+Cu₂O)-покриття (об.%) на ньому:

- наповнювача в цілому – 24,91;
- карбонізованого волокна – 13,25;
- покриття Cu⁰+Cu₂O на волокні – 11,66.

5. У граничних умовах сталого навантаження (N_i=100 Н=const) ефект від чинника післядії $\xi(S)$ зростає у залежності від вмісту в композиті волокна та (Cu⁰+Cu₂O)-покриття: від 0,477 до 0,065 (високий позитивний результат) під час зміни вмісту наповнювача – від 9,0 до 24,91 об.%; вуглецевого волокна

Таблиця 5

Вплив вмісту мідненого карбонізованого волокна УТМ-8 на питому інтенсивність об'ємного зношування зразків композиту на основі ПТФЕ за методом випробування № 2 ($N_i=100$ Н)

№ композиту	Вміст інгредієнтів, об.%			$I, \times 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$		$\xi(S)$
	наповнювача в цілому	КВ (УТМ-8)	покриття на КВ $\text{Cu}^0+\text{Cu}_2\text{O}$	$S_1=0\dots 20$ км (I_1)	$S_2=20\dots 60$ км (I_2)	
7	9,00	4,78	4,22	19,9	9,5	0,477
8	17,29	9,20	8,09	15,8	3,0	0,190
9	24,91	13,25	11,66	12,3	0,8	0,065
10	31,97	17,00	14,97	13,9	3,2	0,230
11	46,03	27,01	19,02	15,9	5,1	0,321

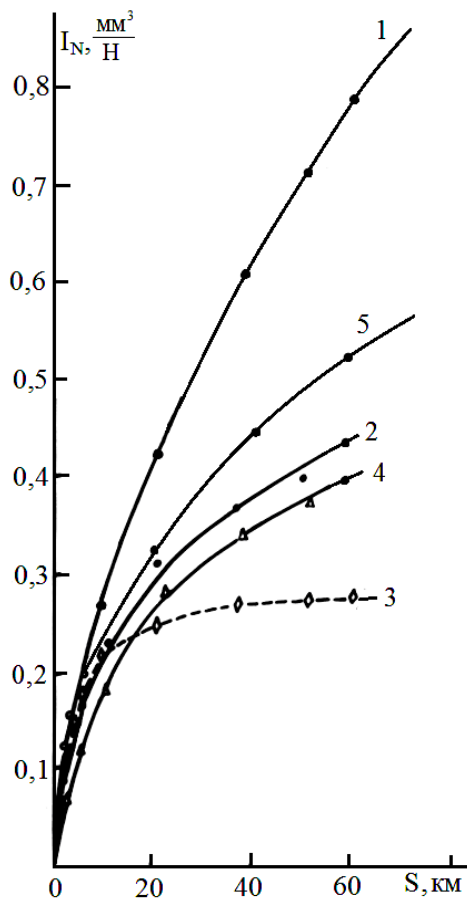


Рис. 5. Залежність питомого об'ємного зносу $I(N)$ зразків композиту на основі ПТФЕ + карбонізоване волокно УТМ-8, покритого одним шаром $\text{Cu}^0 + \text{Cu}_2\text{O}$ (ц), від шляху тертя (S) для композицій: 1 – №7; 2 – №8; 3 – №9; 4 – №10; 5 – №11. Швидкість ковзання $v_1=0,30$ м/с, $N_i=100$ Н.

– від 4,78 до 13,25 об.%, та мідного покриття – від 4,22 до 11,66 об.%, потім спадає до 0,321 при збільшенні вмісту наповнювача до 46,03 об.%; вуглецевого волокна – до 27,01 об.%; мідного покриття на КВ – до 19,02 об.%, (табл. 5). Мінімальна питома інтенсивність об'ємного зношування $I_1(S_1)=12,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ для шляху тертя $S_1=0-20$ км та $I_2(S_2)=0,8 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ для $S_2=20-60$ км та максимальний

позитивний ефект післядії $\xi(S)=0,065$ (високий позитивний результат) настає для оптимального вмісту інгредієнтів, що доводить для цих композитів малий вплив і-попередніх процесів та механізмів тертя та зношування на j -наступні під час сталих граничних та середніх навантажень у часі (на шляху тертя та зношування).

6. На рис. 6 приведені криві залежностей інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту на основі ПТФЕ та карбонізованого вуглецевого волокна УТМ-8, покритого одним шаром (Ni^0+P) від нормального навантаження на один зразок під час ступінчатого навантаження у режимі питомих надграничних навантажень (1-ша методика).

Як видно з рис. 6, криві $I(S)=f(N_i)$ за зносостійкістю зразків композитів можна розташувати у такі мажорантні ряди за композиціями:

$$(\text{№}16) < (\text{№}12) < (\text{№}15) < (\text{№}13) < (\text{№}14) \text{ для } N_i=150 \text{ та } 250 \text{ Н;}$$

$$(\text{№}12) < (\text{№}16) < (\text{№}15) < (\text{№}13) < (\text{№}14) \text{ для } N_i=350,$$

тобто під час збільшення сумарного вмісту наповнювачів від 8,05 до 40,78 об.%, вмісту карбонізованого волокна від 7,32 до 37,19 об.%, та вмісту покриття (Ni^0+P) від 0,73 до 3,59 об.%, питома інтенсивність об'ємного зношування зразків композитів у режимі питомих надграничних навантажень змінюється від 40,5 до 80,0 ($N_i=150$ Н), від 92,4 до 110,4 ($N_i=250$ Н) та від 180,0 до 152,6 ($N_i=350$ Н) $\times 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ (табл. 6), проходячи через мінімум 18,0 ($N_i=150$ Н), 36,0 ($N_i=250$ Н) та 67,8 ($N_i=350$ Н) $\times 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ (табл. 6), що відповідає композиції №14: сумарного вмісту наповнювача 23,99 об.%, вмісту карбонізованого волокна 21,85 об.%, та покритті (Ni^0+P) на ньому 2,1 об.%, (табл. 1).

За рис. 6 розраховано питому інтенсивність об'ємного зношування за $N_i=150$ Н (I_1), 250 Н (I_2), 350 Н (I_3) та показники ефекту післядії $\xi(N)$ за співвідношеннями:

$$\xi'(N) = \frac{I_2}{I_1}; \quad \xi''(N) = \frac{I_3}{I_2}; \quad \xi'''(N) = \frac{I_3}{I_1} \quad (6)$$

для $N_i = 150, 250, 350$ Н відповідно. Ці результати занесені в табл. 6.

Таблиця 6

Антифрикційні властивості ($v=0,30$ м/с) композитів на основі ПТФЕ та карбонізованого вуглецевого волокна УТМ-8, покритого одним або двома шарами металевих матеріалів

№ композиції	$I, \times 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$			$\xi(N)$		
	150 Н (I_1)	250 Н (I_2)	350 Н (I_3)	$\xi'(N)=I_2/I_1$	$\xi''(N)=I_3/I_2$	$\xi'''(N)=I_3/I_1$
12	40,5	92,4	180,0	2,28	1,95	4,44
13	30,0	48,0	68,6	1,60	1,43	2,29
14	18,0	36,0	67,8	2,00	1,88	3,77
15	32,0	52,8	89,1	1,65	1,69	2,78
16	80,0	110,4	152,6	1,38	1,38	1,91
17	31,3	58,6	109,4	1,87	1,87	3,50
18	23,4	43,8	77,0	1,87	1,76	3,29
19	11,7	27,3	42,4	2,33	1,55	3,62
20	16,9	33,6	51,3	1,99	1,53	3,04
21	57,3	97,7	146,2	1,71	1,50	2,55
22	219,4	280,3	315,0	1,28	1,12	1,44
23	192,3	247,8	280,0	1,29	1,13	1,46
24	131,1	155,6	170,4	1,19	1,10	1,30
25	139,6	161,5	176,3	1,16	1,09	1,26
26	159,5	209,0	233,0	1,31	1,11	1,46
27	24,8	50,0	94,8	2,02	1,90	3,82
28	30,5	62,0	116,5	2,03	1,88	3,82

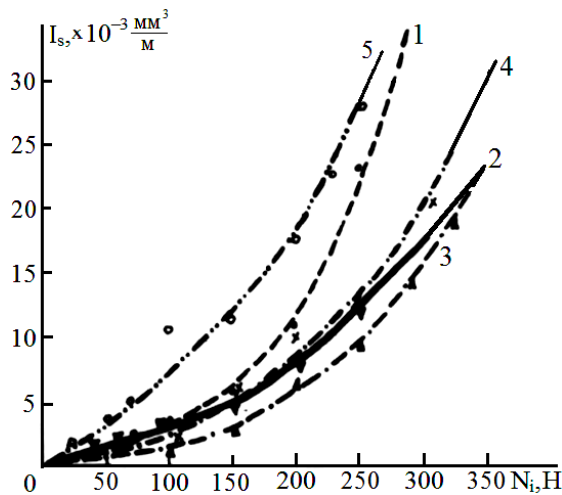


Рис. 6. Залежність інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту на основі ПТФЕ + карбонізоване волокно УТМ-8, покритого одним шаром Ni^0+P , від нормального навантаження на один зразок (N_i) для композицій: 1 – №12; 2 – №13; 3 – №14; 4 – №15; 5 – №16. Швидкість ковзання $v_1=0,30$ м/с.

Як видно з табл. 6, $\xi'(N)$ змінюється в межах 1,38...2,28 (для оптимального складу за зносостійкістю $\xi'(N)=2,00$), $\xi''(N)$ – 1,38...1,95 (для оптимуму – 1,88) та $\xi'''(N)$ – 1,91...4,44 (для оптимуму – 3,77),

тобто спостерігається загальна тенденція $\xi'(N)$, $\xi''(N)$ і $\xi'''(N)$ – зменшуватися під час збільшення вмісту наповнювача в цілому, КВ УТМ-8 та вмісту покриття (Ni^0+P) на поверхні КВ.

Для відносно близьких навантажень (250 і 150 Н; 350 і 250 Н) показники ефектів післядії мають менші величини (більш високий позитивний результат), ніж для віддалених навантажень (350 і 150 Н) (більш низький позитивний результат). Ця різниця складає ~1,5-2 рази.

2.3. Двошарові металеві покриття на вуглецевих волокнах.

1. На рис. 7 приведені криві залежностей інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту на основі ПТФЕ та карбонізованого вуглецевого волокна УТМ-8, покритого двома шарами: 1-й шар (Ni^0+P); 2-й шар (Cu^0+Cu_2O), від нормального навантаження на один зразок під час ступінчатого навантаження у режимі надграничних питомих навантажень (1-ша методика).

Як видно з рис. 7, криві $I(S)=f(N_i)$ за зносостійкістю зразків композитів можна розташувати у такий мажорантний ряд за композиціями:

$$(№21) < (№17) < (№18) < (№20) < (№19),$$

тобто під час збільшення сумарного вмісту наповнювачів від 10,30 до 45,64 об.%, вмісту карбонізованого волокна від 7,70 до 34,17 об.%, вмісту (Ni^0+P) у 1-му шарі покриття від 0,78 до 3,40 об.% та (Cu^0+Cu_2O) у

2-му шарі покриття від 1,82 до 8,07 об.%, питома інтенсивність об'ємного зношування зразків композитів №17-21 у режимі надграничних питомих навантажень змінюється від 31,3 до 57,3 ($N_i=150$ Н), від 58,6 до 97,7 ($N_i=250$ Н) та від 109,4 до 146,2 ($N_i=350$ Н) $\times 10^{-6}$ мм³/(Н·м), проходячи через мінімум 11,7 ($N_i=150$ Н), 27,3 ($N_i=250$ Н) та 42,4 ($N_i=350$ Н) $\times 10^{-6}$ мм³/(Н·м) (табл. 6), що відповідає композиції №19: сумарного вмісту наповнювача 21,88 об.%, вмісту карбонізованого волокна 16,39 об.%, та 1,63 об.% покриття (Ni^0+P) (1-ий шар) і 3,86 об.% покриття (Cu^0+Cu_2O) (2-ий шар) на ньому (табл. 1).

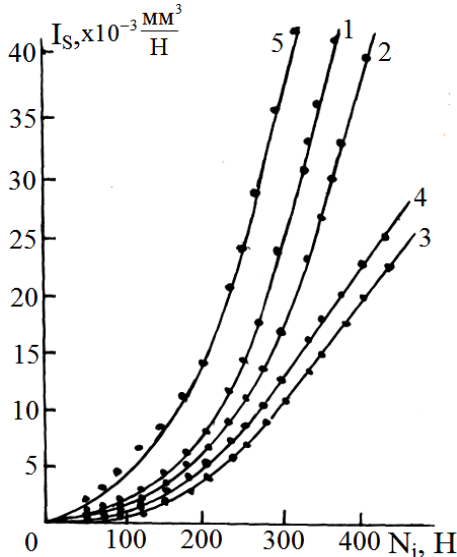


Рис. 7. Залежність інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту на основі ПТФЕ та карбонізованого вуглецевого волокна УТМ-8, покритого двома шарами: Ni^0+P (1-й шар) + Cu^0+Cu_2O (2-й шар), від нормального навантаження на один зразок (N_i) для композицій: 1 – №17; 2 – №18; 3 – №19; 4 – №20; 5 – №21. Швидкість ковзання $v_1=0,30$ м/с.

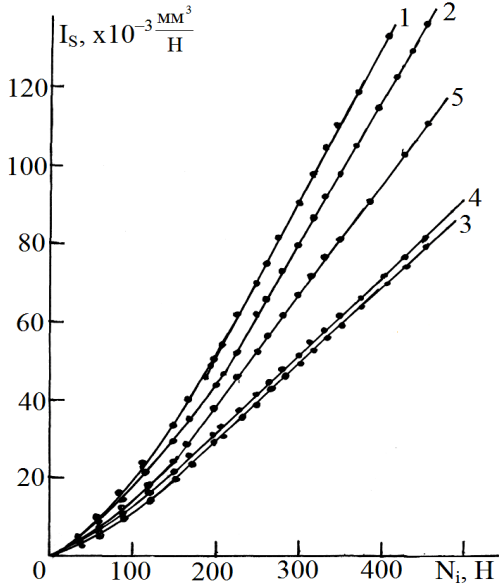


Рис. 8. Залежність інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту на основі ПТФЕ та карбонізованого вуглецевого волокна УТМ-8, покритого двома шарами: Cu^0+Cu_2O (1-й шар) + Ni^0+P (2-й шар), від нормального навантаження на один зразок (N_i) для композицій: 1 – №22; 2 – №23; 3 – №24; 4 – №25; 5 – №26. Швидкість ковзання $v_1=0,30$ м/с.

За рис. 7 розраховано питому інтенсивність об'ємного зношування за $N_i=150$ Н (I_1), 250 Н (I_2), 350 Н (I_3) та показники навантажувального ефекту післядії $\xi(N)$ за співвідношеннями $\xi'(N)$, $\xi''(N)$ і $\xi'''(N)$ (6) та занесені ці результати в табл. 6.

Як видно з табл. 6, $\xi'(N)$ змінюється в межах 1,71...2,33 [для оптимального складу за зносостійкістю $\xi'(N)=2,33$ (max)], $\xi''(N)$ – 1,50...1,87 [для оптимуму – 1,55] та $\xi'''(N)$ – 2,55...3,62 [для оптимуму – 3,62 (max)] для навантаження 150, 250, 350 Н відповідно.

Для відносно близьких навантажень (250 і 150 Н; 350 і 250 Н) показники ефектів післядії мають менші величини, ніж для віддалених навантажень (350 і 150 Н). Ця різниця складає ~1,7-2 рази.

2. На рис. 8 приведені криві залежностей інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту на основі ПТФЕ та карбонізованого вуглецевого волокна УТМ-8, покритого двома шарами: 1-й шар (Cu^0+Cu_2O); 2-й шар (Ni^0+P), від нормального навантаження на один зразок під час ступінчатого навантаження у режимі питомих надграничних навантажень (1-ша методика).

Як видно з рис. 8, криві $I(S)=f(N_i)$ за зносостійкістю зразків композитів можна розташувати у такий мажорантний ряд за композиціями:

$$(№22) < (№23) < (№26) < (№25) < (№24),$$

тобто під час збільшення сумарного вмісту наповнювачів від 9,50 до 49,92 об.%, вмісту карбонізованого волокна від 7,22 до 34,80 об.%, вмісту (Cu^0+Cu_2O) у 1-му шарі покриття від 1,52 до 11,52 об.% та (Ni^0+P) у 2-му шарі покриття від 0,76 до 3,60 об.%, питома інтенсивність об'ємного зношування зразків композитів №22-26 у режимі надграничних питомих навантажень змінюється від 219,4 до 159,5 ($N_i=150$ Н), від 280,3 до 209,0 ($N_i=250$ Н) та від 315,0 до 233,0 ($N_i=350$ Н) $\times 10^{-6}$ мм³/(Н·м), проходячи через мінімум 131,1 ($N_i=150$ Н), 155,6 ($N_i=250$ Н) та 170,4 ($N_i=350$ Н) $\times 10^{-6}$ мм³/(Н·м) (табл. 6), що відповідає композиції №24: сумарного вмісту наповнювача 27,95 об.%, вмісту карбонізованого волокна 23,41 об.%, та 2,96 об.% покриття (Cu^0+Cu_2O) (1-ий шар) і 1,58 об.% покриття (Ni^0+P) (2-ий шар) на ньому (табл. 1).

За рис. 8 розраховано питому інтенсивність об'ємного зношування за $N_i=150$ Н (I_1), 250 Н (I_2), 350 Н (I_3) та показники навантажувального ефекту післядії $\xi(N)$ за співвідношеннями $\xi'(N)$, $\xi''(N)$ і $\xi'''(N)$ (6) та занесено ці результати в табл. 6.

Як видно з табл. 6, $\xi'(N)$ змінюється в межах 1,16...1,31 (для оптимального складу за зносостійкістю $\xi'(N)=1,19$), $\xi''(N)$ – 1,09...1,13 (для оптимуму – 1,10) та $\xi'''(N)$ – 1,26...1,46 (для оптимуму – 1,30).

Для відносно близьких навантажень (250 і 150 Н; 350 і 250 Н) показники ефектів післядії мають менші величини, ніж для віддалених навантажень (350 і 150 Н). Ця різниця складає 1,1-1,2 рази.

Порівнюючи антифрикційні властивості композицій №17-21 з КВ, покритих (Ni^0+P) 1-м шаром та (Cu^0+Cu_2O) 2-м шаром, з композиціями №22-26 з КВ, покритих (Cu^0+Cu_2O) 1-м шаром та (Ni^0+P) 2-м ша-

ром, знаходимо, що порядок розташування металевих шарів на поверхні карбонізованих волокон суттєво впливає на зносостійкість композитів: при переході від композицій №17-21 до композицій №22-26 цей показник зменшується у 11,14 (мін значення показника) – 3,84 (макс значення показника) раз ($N_i=150$ Н), у 5,69 (мін) – 2,86 (макс) раз ($N_i=250$ Н) та у 4,02 (мін) – 2,16 (макс) раз ($N_i=350$ Н). Це підтверджує зміцнюючу роль нікола для мідного покриття під час тертя та зношування. При цьому вплив ефекту післядії на процеси та механізми тертя та зношування для цих двох типів композитів суттєво різний: для композицій №17-21 показник ефекту післядії $\xi'(N)$ знаходиться в межах 1,71...2,33 ($N_i=150$ Н), а для композицій №22-26 – 1,16...1,31 ($N_i=150$ Н); для $\xi''(N)$ – в межах 1,50...1,87 ($N_i=250$ Н) для композицій №17-21, а для композицій №22-26 – 1,09...1,13 ($N_i=250$ Н); $\xi'''(N)$ – у межах 2,55...3,62 ($N_i=350$ Н) для композицій №17-21, а для композицій №22-26 – 1,26...1,46 ($N_i=350$ Н). Це підтверджує роль нікола (2-го шару) як екрана мідного (1-го шару) покриття на поверхні КВ, який гальмує зміну процесів і механізмів тертя та зношування, які впливають за механізмом післядії на наступні процеси та механізми.

Порівняння вищенаведених результатів для композиції №19 з двошаровим покриттям на волокні (Ni^0+P) (1-й шар) + (Cu^0+Cu_2O) (2-й шар) з композицією №27 з двошаровим покриттям на волокні (Cu^0+Cu_2O) (1-й шар) + (Cu^0+Cu_2O) (2-й шар) та композиції №28 з двошаровим покриттям на волокні (Cu^0+Cu_2O) (1-й шар) + Pb^0 (2-й шар) з приблизно однаковим вмістом наповнювачів, зокрема й однаковим вмістом карбонізованого волокна, показало на перевагу першої композиції №19, зносостійкість якої більше, ніж у 2 рази за зносостійкість композиції №27 та №28 для всіх досліджених навантажень (табл. 6), при цьому показник ефекту післядії $\xi''(N)$ та $\xi'''(N)$ має позитивну високу величину: $\xi''(N)=1,55$ проти 1,88-1,90 та $\xi'''(N)=3,62$ проти 3,82 для матеріалів порівняння (табл. 6).

Зміцнююча роль першого шару (Ni^0+P) у двошаровому покритті КВ підтверджує результати дослідження протизносних властивостей композиту з одношаровим покриттям (Ni^0+P) на поверхні КВ (табл. 6).

Висновки

1. Досліджені протизносні властивості полімерних композитів на основі ПТФЕ з неметалізованими та металізованими карбонізованими волокнами в умовах тертя та зношування під час надграничних і граничних питомих навантажень за 2-ма методами, виявляючи:

1) залежність інтенсивності об'ємного зношування $I(S)$ зразків композиту від нормального навантаження $N_i=30$ Н під час ступінчатого навантаження з j -інтервалом $\Delta N_j=30$ Н та шляхом тертя $\Delta S_j=1$ км на кожний ступінь навантаження ($N_i=var$) до $N_i=300$ -450 Н, за температури поверхні сталюого контртіла

$T=373\pm 1$ К і швидкості ковзання $v_1=0,30$ м/с та $v_2=0,78$ м/с;

2) залежність питомого об'ємного зносу $I(N)$ зразків композиту від шляху тертя під час сталого навантаження на один зразок $N_i=100$ Н= $const$, за температури поверхні сталюого контртіла $T=373\pm 1$ К і швидкості ковзання $v_1=0,30$ м/с та $v_2=0,78$ м/с.

За результатами дослідження за методами (1) і (2) розраховували також питому інтенсивність об'ємного зношування.

2. У науковий обіг вперше введено означення показників навантажувального та часового ефектів післядії, які дають кількісну оцінку впливу процесів та механізмів тертя та зношування i -етапу на j -етап при певних співвідношеннях питомих інтенсивностей об'ємного зношування, визначених у процесі експерименту для двох нормальних навантажень на зразок під час $N_i=var$ та (або) для двох шляхів (часу) тертя та зношування під час $N_i=const$.

3. Показано, що час активації композиції впливає на зношування композитів у більшій степені за ступінчатим навантаженням, ніж як під час сталого навантаження, при цьому для композиту з мідним карбонізованим волокном вплив більший, ніж для композиту з вихідним неметалізованим карбонізованим волокном.

4. Встановлено, що під час протизносних випробувань зразків композитів як під час ступінчатого надграничного питомого навантаження $N_i=var$, так і під час сталого граничного та помірного питомого навантаження ($N_i=const$) з високою ймовірністю проявляється часовий ефект післядії – вплив процесів зношування i -моменту на j -момент часу, при цьому часовий ефект післядії значно впливає на зношування зразків композитів під час ступінчатого змінного навантаження, ніж під час сталого навантаження, і тим сильніше, чим більше навантаження, при цьому, композити, що містять міднені карбонізовані волокна, більш чутливі до часового ефекту післядії у режимі ступінчатого навантаження, ніж волокна без покриття при зміні часу активації композиції від 4 до 30 хв., тобто вибірковий механізм переносу міді більше залежить від часового ефекту післядії, ніж механізм переносу ПТФЕ на спряжені поверхні.

5. Порівняння цинкової та модифікованої формальдегідної технології міднення карбонізованого волокна показало, що у режимі надвисоких змінних навантажень зразки композитів, які містять міднені (Cu^0+Cu_2O) волокна, отриманих за модифікованою формальдегідною технологією переважає цинкову технологію при $N_i=200$ Н, а при $N_i=450$ Н – ефект має зворотній характер, тобто для таких композитів часовий ефект післядії залежить від навантаження, а введення у композит волокон, покритих Ni^0+P , підтверджує ці висновки.

6. У граничних умовах сталого навантаження ($N_i=100$ Н= $const$) ефект від чинника післядії зростає у залежності від вмісту в композиті волокна та (Cu^0+Cu_2O)-покриття, при цьому максимальний позитивний ефект післядії настає для оптимального вмісту інгредієнтів, що доводить для цих композитів малий вплив i -попередніх процесів та механізмів

тертя та зношування на j -наступні на шляху (часу) випробувань.

7. Під час порівняння протизносних властивостей у режимі надграничних навантажень ($N_i = \text{var}$) композитів (1) на основі ПТФЕ з карбонізованими волокнами, покритих першим шаром складу ($Ni^0 + P$) та другим шаром складу ($Cu^0 + Cu_2O$) з композитами (2) на основі ПТФЕ з карбонізованими волокнами, покритих першим шаром складу ($Cu^0 + Cu_2O$) та другим шаром складу ($Ni^0 + P$), знайдено, що порядок розташування металічних шарів на поверхні карбонізованих волокон суттєво впливає на зносостійкість композитів: зносостійкість суттєво зменшується під час переходу від першого (1) до другого (2) композиту у 2,16...11,14 рази, що підтверджує зміцнюючу роль нікола для мідного покриття під час тертя та зношування. При цьому вплив ефекту післядії на процеси та механізми тертя та зношування для цих двох типів композитів суттєво різний: для першого

(1) композиту показник ефекту післядії дорівнює 1,50-3,62, а для другого (2) композиту – 1,09-1,46, що засвідчує роль нікола (2-го шару) як екрана мідного (1-го шару) покриття на поверхні КВ, який гальмує зміну процесів і механізмів тертя та зношування, які впливають за механізмом післядії на наступні процеси та механізми.

Сіренко Г.О. – академік АТНУ, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії;

Солтис Л.М. – член-кореспондент АТНУ, кандидат хімічних наук, викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії;

Складанюк М.Б. – аспірант кафедри неорганічної та фізичної хімії;

Луцась А.В. – кандидат хімічних наук, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії.

- [1] Г.О. Сіренко, Створення антифрикційних матеріалів на основі порошків термостійких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. ... докт. техн. наук (Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ, Київ, 1997).
- [2] А.с. 1604862 (СРСР), МКИ С23С18/38; С23С18/54/ (1990).
- [3] А.с. 1736171 (СРСР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ (1992).
- [4] А.с. 1723084 (СРСР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ (1992).
- [5] А.с. 110292 (СРСР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ (1977).
- [6] А.с. 181484 (СРСР), МКИ F16C33/12/ (1982).
- [7] А.с. 1078907 (СРСР), МКИ С08L27/18; С 08J5/16/ (1984).
- [8] А.с. 194601 (СРСР), МКИ F16C33/12/ (1983).
- [9] А.с. 1239134 (СРСР), МКИ С08J5/16; С08J5/06/ (1986).
- [10] А.с. 1165048 (СРСР), МКИ С08L27/18; С08K3/04/ (1985).
- [11] А.с. 1244933 (СРСР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ (1986).
- [12] А.с. 223896 (СРСР), МКИ С08L77/10/ (1985).
- [13] А.с. 1635523 (СРСР), МКИ С08J5/16; С08L27/18/ (1990).
- [14] А.с. 1584365 (СРСР), МКИ С08L77/10/ (1990).
- [15] П.р. №4539382/05/01619 (1992).
- [16] Пат. 1806147 (СРСР), МКИ С08J9/26; В01D39/16/ (1993).
- [17] А.с. 1590778 (СРСР), МКИ F16J15/20/(1990).
- [18] А.с. 1587300 (СРСР), МКИ F16J15/00; F16J15/22/ (1990).
- [19] А.с. 1545584 (СРСР), МКИ С08L77/02; С08K13/02/ (1990).
- [20] А.с. 1467893 (СРСР), МКИ В32В3/12; D04C5/00; F16C33/12/ (1989).
- [21] А.с. 1460492 (СРСР), МКИ F16J15/00/ (1989).
- [22] А.с. 1400040 (СРСР), МКИ С08J5/16; С08L77/08/ (1988).
- [23] А.с. 1322664 (СРСР), МКИ С08L77/10/ (1987).
- [24] А.с. 558518 (СРСР), МКИ С08L77/06/ (1977).
- [25] А.с. 526252 (СРСР), МКИ С08L77/00; С08D5/16/ (1976).
- [26] Г.О. Сіренко, М.Б. Квич, В.І. Кириченко, Фізика і хімія твердого тіла, 7 (3), 544 (2006).
- [27] Г.О. Сіренко, М.Б. Квич, В.І. Кириченко, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В.Стефаніка. Сер. Хімія, V, 84 (2008).
- [28] В.І. Кириченко, Г.А. Сіренко, Л.М. Кириченко, Вопросы химии и химической технологии, 94, 113 (1991).
- [29] Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, В.І. Кириченко, В.П. Свідерський, М.Б. Складанюк, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. Василя Стефаніка. Сер. Хімія, XIV, 50 (2012).
- [30] Г.О. Сіренко, М.Б. Складанюк, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 16 (1) (2015).
- [31] Г.О. Сіренко, О.В. Шийчук, Композиційні полімерні матеріали, 25 (1), 49 (2003).
- [32] А.В. Горяинова, Г.К. Божков, М.С. Тихонова, Фторопласты в машиностроении (Машиностроение, Москва, 1971).
- [33] Д.Д. Чегодаев, З.К. Наумова, Ц.С. Дунаевская, Фторопласты (Госхимиздат, Ленинград, 1960).
- [34] Д. Мур, Основы и применение трибоники (Машиностроение, Москва, 1968).

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, М.Б. Складанюк, А.В. Луцась

H.O. Sirenko, L.M. Soltys, M.B. Skladanyuk, A.V. Lutsas

The Influence of Technological and Tribological Factors on the Aftereffect and Wear Resistance of Polymer Composites

*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*

The anti-wear properties of polymer composites based on polytetrafluoroethylene with not metallized and metallized carbon fibers in conditions of friction and wear in over limit and limit of specific loads have been researched. The definitions of loading and time indicators the aftereffect which give the quantitative assessment of influence processes and mechanism of friction and wear have been introduced first. It is established that in anti-wear tests of composites samples as in stepped over limit specific load ($N_i = \text{var}$) as in constant limit and specific load ($N_i = \text{const}$) with high probability appears time aftereffect.

Key words: carbon fibers, polymer composites, anti-wear properties, friction, wear, aftereffect.