

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

Вплив природи та твердості поверхонь металевих контртіл на зношування карбоволокниту

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна
Тел. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: orijant@gmail.com

Досліджено кореляційні зв'язки між температурою поверхні тертя, твердістю суміжних поверхонь із криць, кольорових металів і металевих стопів та інтенсивністю об'ємного зношування і коефіцієнтом тертя полімерного композиту, наповненого односпрямованими вуглецевими волокнами. Показано, що між дослідженими величинами переважно існують нелінійні кореляційні зв'язки.

Ключові слова: полімерний композит, карбоволокнит, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, контртіло, поверхня тертя, твердість, температура тертя, схема армування, шаруватий композит.

Стаття постуила до редакції 15.08.2015; прийнята до друку 15.09.2015.

Вступ

Встановлено [1-10], що інтенсивність зношування карбопластиків та карбоволокнитів суттєво залежить від орієнтації волокон, їх шарів і шарів тканини та їх текстильних складових відносно поверхні тертя і вектора швидкості ковзання. Анізотропія властивостей однонаправлених волокнитів і текстолітів має місце для всіх схем досліджень. Для більшості з них зберігається орієнтаційне співвідношення за величинами коефіцієнтів тертя і інтенсивностей зношування. Але для певної частини досліджень зміна схеми фрикційних випробувань карбопластиків приводить до зміни орієнтаційних співвідношень, при цьому важливу роль грає кількість волокна в композиті і в контактних шарах матеріалу [1, 2]. У цих дослідженнях не врахована орієнтація волокон основи і підткання тканини або стрічки відносно поверхні тертя і вектора швидкості ковзання, відсутні дані, які дозволяють вибрати оптимальну схему армування.

Єдиного погляду на вплив кута орієнтації волокон, часу (шляху), навантаження і вектора швидкості ковзання на орієнтаційне співвідношення за зносостійкістю та коефіцієнтом тертя не виявлено [3]. Так, за даними [4] анізотропія структури карбопастика найбільш різко виявляється у початковому періоді ковзання. І, навпаки, за даними [5] із збільшенням шляху тертя анізотропія армування проявляється більш суттєво.

Під час дослідження антифрикційних властивостей односпрямованих карбопластиків вибрані відносно невеликі нормальні навантаження на зразок (від 1,5 до 20 Н), що не дозволяє зробити повний

аналіз впливу навантаження на зносостійкість [4]. Вплив навантаження на інтенсивність зношування при постійному і змінному русі більш суттєвий, ніж на коефіцієнт тертя [4]. Анізотропія розташування волокон у композиті виявляється при малих питомих навантаженнях [4], а за даними [6] збільшення навантаження веде до різкого зносу і суттєвого збільшення орієнтаційних ефектів за зносостійкістю. За даними [4] зміна величини навантаження не приводить до порушення орієнтаційних співвідношень.

Малочисельні публікації стосуються впливу природи та твердості спряжених з однонаправленими карбоволокнитами та карботекстолітами.

Суттєвим недоліком багатьох проведених досліджень є недотримання постійного теплового поля у процесі тертя та зношування. Підвищення температури в зоні контакту за рахунок тепла тертя приводить до неможливості порівняння результатів експериментів. Температура вносила суттєві зміни у величини зносу і коефіцієнта тертя карбопластиків. Різниця цих результатів також пов'язана з різними схемами і умовами дослідження.

Мета даних досліджень полягала у пошуці кореляційних зв'язків між твердістю суміжних металевих поверхонь із інтенсивністю зношування та коефіцієнтом тертя карбоволокнитів за двома схемами контакту та орієнтації вуглецевих волокон.

I. Матеріали та методи випробувань

1.1. Матеріали. Карбоволокнит НВМ-55 був виготовлений із 55% графітованої стрічки ЛУ-2 [(НТ);

$T_k=2673$ К; $\sigma_b=2,25$ ГПа; $E_b=320$ ГПа] та зв'язуючого на основі епоксидної діанової смоли ЕД-20 та феноло-формальдегідної смоли РФН-60 (композит НВМ-55).

1.2. Методи випробувань. Дослідження трибологічних властивостей карбопластика НВМ-55 були виконані у суміжній парі з такими твердими тілами: алюмінієвий стоп Д1, технічний цинк, електролітична мідь М-1, мідні спижи (брондзи) [Бр. КМц 3-1 (силіційна); Бр. ОФ 6,5-0,15 (цино-фосфорна); Бр. ОС 12-2 (цино-оливна); Бр. БНТ 2,5-1 (берилієва, тверда)]; чавун СЧ-20; криці [10Х18Н9Т; 30Х13; У8 (відпалена, м'яка) і тверда; 45 (відпалена, м'яка) і тверда; 38ХМЮА; 40Х (тверда)]; стопи вольфрамо-силіцієві ВК 11 і ВК 6 (табл. 1). Ці дослідження проводили на трибометрі ХТІ-82 за схемою 3-х полімерних зразків – контртіло «площина-площина» за питомим навантаженням $p=2$ МПа, температури оточуючого середовища $T=303$ К, нормального навантаження на один зразок $N_f=200$ Н, швидкості ковзання $v = 0,54$ м/с.

Для односпрямованих шаруватих композитів, які виготовляють із стрічок, введемо такі схеми армування [6,7, 9, 10]:

LLT – шари волокон стрічки спрямовані рівнобіжно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L), а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (L) і прямовисно вектору швидкості (T);

NLNN – шари волокон стрічки спрямовані прямо-висно поверхні тертя (N) і рівнобіжно вектору швидкості (L), а самі волокна – прямо-висно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N).

1.3. Кореляційний аналіз. Пошук кореляції між випадковими величинами X і Y проводили за вибірко-вим коефіцієнтом кореляції $r_{x,y} = r_p$, перевіряючи нульову гіпотезу $H_0: \rho = 0$. Прийняття або відкидання нульової гіпотези (рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції $H_0: \rho_{x,y}=0$) здійснювали за [11-14]:

1. Критичним значенням коефіцієнта кореляції $r_{кр}$ $\{q=1-\alpha/2; f=N-2\}$ [12, 13], де α – рівень значущості, f – число ступенів вільностей, довірчої ймовірності $p=1-\alpha=0,95$ та $p=0,99$, рівня значущості $\alpha=0,05$ та $\alpha=0,01$ відповідно, числа ступенів вільностей $f=N-2$. При цьому, якщо розрахунковий (вибірковий) коефіцієнт кореляції $|r_{x,y}|=|r_p| \geq r_{кр}$, $H_0: \rho_{x,y}=0$ відкидали, що дозволяло стверджувати про наявність надійного лінійного зв'язку між випадковими величинами Y і X. Тоді ступеню лінійності лінійного зв'язку дамо оцінку за виразом:

$$\xi_1(r) = \frac{|r_{x,y}|}{r_{кр}} \geq 1 \quad (1)$$

із залишками нелінійності у лінійному зв'язку оцінювали за ступенем:

$$\xi_2(r) = \frac{r_{кр}}{|r_{x,y}|} < 1. \quad (2)$$

Якщо $|r_p| < r_{кр}$, то $H_0: \rho_{x,y}=0$ приймали, що дозволяло стверджувати про наявність надійного нелінійного зв'язку між випадковими величинами Y і X зі ступенем нелінійності:

$$\xi_2(r) = \frac{r_{кр}}{|r_{x,y}|} > 1 \quad (3)$$

та із залишками лінійності у нелінійному зв'язку зі ступенем:

$$\xi_1(r) = \frac{|r_{x,y}|}{r_{кр}} \leq 1. \quad (4)$$

2. З-за обмеженості обсягу вибірки $r_{x,y}$ і суттєвої відмінності його розподілу від нормального закону Гауса переходили до нової випадкової величини z_p за перетворенням Фішера [11]:

$$z_p = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r_{x,y}}{1-r_{x,y}}, \quad (5)$$

розподіл якої добре апроксимується нормальним законом розподілу Гауса [11] із середнім квадратичним відхиленням:

$$s_z = \frac{1}{\sqrt{N-3}}. \quad (6)$$

Для довірчої ймовірності $p=1-\alpha=0,95$ або $p=1-\alpha=0,99$, рівня значущості $\alpha=1-p=0,05$ або $\alpha=1-p=0,01$, числа ступенів вільностей $f=N-2$ значення квантиля нормованого розподілу випадкової величини z [11] дорівнює для $\alpha=0,05$: $z_T \{q=1-\alpha/2=0,975\}=z_{0,975}=1,96$ [11] та для $\alpha=0,01$: $z_T \{q=1-\alpha/2=0,995\}=z_{0,995}=2,58$ [11], тоді розраховували добуток $(z_{0,975} \cdot s_z)$ або $(z_{0,995} \cdot s_z)$.

Нульову гіпотезу перевіряли за наступною процедурою:

а) якщо $|z_p| \geq (z_{0,975} \cdot s_z)$ або $|z_p| \geq (z_{0,995} \cdot s_z)$, то H_0 відкидали, що дозволяло з довірчою ймовірністю $p=1-\alpha=0,95$ або $p=1-\alpha=0,99$ та рівнем значущості $\alpha=0,05$ або $\alpha=0,01$ відповідно стверджувати про наявність надійного лінійного зв'язку між випадковими величинами Y і X із ступенем лінійності лінійного зв'язку:

$$\xi_1(z) = \frac{|z_p|}{(z_{0,975} \cdot s_z)} \geq 1 \text{ або } \xi_1(z) = \frac{|z_p|}{(z_{0,995} \cdot s_z)} \geq 1 \quad (7)$$

та із залишками нелінійності у лінійному зв'язку зі ступенем:

$$\xi_2(z) = \frac{(z_{0,975} \cdot s_z)}{|z_p|} < 1 \text{ або } \xi_2(z) = \frac{(z_{0,995} \cdot s_z)}{|z_p|} < 1 \quad (8)$$

б) якщо $|z_p| < (z_{0,975} \cdot s_z)$ або $|z_p| < (z_{0,995} \cdot s_z)$, то H_0 приймали, що дозволяло з довірчою ймовірністю $p=1-\alpha=0,95$ або $p=1-\alpha=0,99$ та рівнем значущості $\alpha=0,05$ або $\alpha=0,01$ відповідно стверджувати про наявність надійного нелінійного зв'язку між випадковими величинами Y і X із ступенем нелінійності нелінійного зв'язку:

$$\xi_2(z) = \frac{(z_{0,975} \cdot s_z)}{|z_p|} > 1 \text{ або } \xi_2(z) = \frac{(z_{0,995} \cdot s_z)}{|z_p|} > 1 \quad (9)$$

та із залишками лінійності у нелінійному зв'язку зі ступенем:

Таблиця 1

Інтенсивність об'ємного зношування карбопластика, армованого у напрямку LLLT і NLNN, під час ковзання по поверхнях криць, кольорових металів і металевих стопах

Суміжна поверхня	НВ, МПа	Інтенсивність об'ємного зношування карбоволокниту (J) ($\times 10^{-6}$), мм ³ /(Нм)		Температура контртіла під час динамічного контакту (Т), К		Коефіцієнт тертя (μ)	
		LLLТ	NLNN	LLLТ	NLNN	LLLТ	NLNN
Алюмінієвий стоп Д1	230	26,3	31,3	361	350	0,26	0,36
Технічний цинк	233	2,9	9,5	385	425	0,34	0,75
Електролітична мідь М-1	660	2,8	4,5	391	380	0,33	0,36
Спиж Бр. КМц 3-1	730	6,2	8,2	385	390	0,32	0,65
Спиж Бр. ОФ 6,5-0,15	860	5,2	2,6	400	365	0,30	0,34
Чавун СЧ 20	870	5,1	5,7	360	349	0,38	0,40
Спиж Бр. ОС 12-2	1100	5,9	5,7	385	405	0,38	0,49
Криця 10Х18Н9Т	1250	6,1	10,6	402	429	0,25	0,59
Криця 30Х13	1750	5,5	7,8	373	415	0,31	0,43
Криця У8 (відпалена)	1800	5,0	5,1	404	373	0,35	0,45
Криця 45 (відпалена)	1870	4,4	4,6	393	374	0,34	0,36
Криця 38ХМЮА	1890	5,3	6,1	365	383	0,41	0,37
Спиж Бр. БНТ 2,5-1	3920	5,0	1,9	347	330	0,29	0,42
Криця 40Х	4400	6,0	9,0	403	408	0,42	0,39
Тверда криця 45	4450	5,8	8,2	379	443	0,37	0,50
Тверда криця У8	5440	7,2	9,6	383	434	0,34	0,36
Стоп ВК 11	8200	2,0	5,1	390	395	0,49	0,49
Стоп ВК 6	8400	2,2	5,5	390	385	0,39	0,39

$$\xi_1(z) = \frac{|z_p|}{(z_{0,975} \cdot S_z)} \leq 1 \text{ або } \xi_1(z) = \frac{|z_p|}{(z_{0,995} \cdot S_z)} \leq 1. \quad (10)$$

3. За критерієм Стьюдента t , розраховуючи статистику [11]:

$$t_p = \frac{r_{x,y}}{\sqrt{1-r_{x,y}^2}} \cdot \sqrt{N-2}, \quad (11)$$

порівнюючи $|t_p|$ з t_T ($q=1-\alpha/2$; $f=N-2$) за [12].

Процедура прийняття або відкидання $H_0: \rho_{x,y}=0$ і, відповідно, прийняття рішення наступна:

а) якщо $|t_p| \geq t_T$, то $H_0: \rho_{x,y}=0$ відкидали, що дозволяло з довірчою ймовірністю $p=1-\alpha=0,95$ або $p=1-\alpha=0,99$ та рівнем значущості $\alpha=0,05$ або $\alpha=0,01$ стверджувати про наявність надійного лінійного зв'язку між випадковими величинами Y і X зі ступенем лінійності лінійного зв'язку:

$$\xi_1(t) = \frac{|t_p|}{t_T} \geq 1 \quad (12)$$

та залишками нелінійності у лінійному зв'язку зі ступенем:

$$\xi_2(t) = \frac{t_T}{|t_p|} < 1; \quad (13)$$

б) якщо $|t_p| < t_T$, то $H_0: \rho_{x,y}=0$ приймали, що дозволяло з довірчою ймовірністю $p=1-\alpha=0,95$ або $p=1-\alpha=0,99$ та рівнем значущості $\alpha=0,05$ або $\alpha=0,01$ стверджувати про наявність надійного нелінійного зв'язку між випадковими величинами Y і X зі ступенем нелінійності нелінійного зв'язку:

$$\xi_2(t) = \frac{t_T}{|t_p|} > 1 \quad (14)$$

та із залишками лінійності у нелінійному зв'язку зі ступенем:

$$\xi_1(t) = \frac{|t_p|}{t_T} \leq 1. \quad (15)$$

II. Результати та обговорення

1. Результати дослідження інтенсивності об'ємного зношування карбопластика НВМ-55 (J), температури контртіла під час динамічного контакту з НВМ-55 (Т) та коефіцієнтом тертя (μ) контакту тверде тіло – карбопластик НВМ-55 у залежності від природи та твердості (НВ) 18 поверхонь твердих тіл та спрямованості шарів стрічки волокон та самих вуглецевих волокон відносно поверхні тертя та вектору швидкості ковзання приведені у табл. 1.

Значущість коефіцієнта кореляції

а) за критичним коефіцієнтом кореляції ($r_{кр}$)

Зв'язок	r_p	$r_{кр}$	$\xi_1(r)$	$\xi_2(r)$
$\alpha=0,05$				
HB-T(LLLT)	0,0950	0,4683	0,203	4,930
HB-T(NLNN)	0,1843	0,4683	0,394	2,541
J(LLLT)-T(LLLT)	-0,3475	0,4683	0,742	1,348
J(NLNN)-T(NLNN)	0,0085	0,4683	0,018	55,094
μ (LLLT)-T(LLLT)	0,1421	0,4683	0,303	3,296
μ (NLNN)-T(NLNN)	0,4500	0,4683	0,961	1,041
HB-J(LLLT)	-0,3125	0,4683	0,667	1,499
HB-J(NLNN)	-0,2332	0,4683	0,498	2,008
HB- μ (LLLT)	0,5927	0,4683	1,266	0,790
HB- μ (NLNN)	-0,1948	0,4683	0,416	2,404
J(LLLT)- μ (LLLT)	-0,4565	0,4683	0,975	1,026
J(NLNN)- μ (NLNN)	0,0143	0,4683	0,031	32,748
$\alpha=0,01$				
HB-T(LLLT)	0,0950	0,5897	0,161	6,207
HB-T(NLNN)	0,1843	0,5897	0,313	3,200
J(LLLT)-T(LLLT)	-0,3475	0,5897	0,589	1,697
J(NLNN)-T(NLNN)	0,0085	0,5897	0,014	69,377
μ (LLLT)-T(LLLT)	0,1421	0,5897	0,241	4,150
μ (NLNN)-T(NLNN)	0,4500	0,5897	0,763	1,310
HB-J(LLLT)	-0,3125	0,5897	0,530	1,887
HB-J(NLNN)	-0,2332	0,5897	0,396	2,529
HB- μ (LLLT)	0,5927	0,5897	1,005	0,995
HB- μ (NLNN)	-0,1948	0,5897	0,330	3,027
J(LLLT)- μ (LLLT)	-0,4565	0,5897	0,774	1,292
J(NLNN)- μ (NLNN)	0,0143	0,5897	0,024	41,238

2. Оцінки кореляційних зв'язків між твердістю контртіл HB, напрямками стрічок і волокон LLLT і NLNN за інтенсивністю зношування (J) та коефіцієнтом тертя (μ) для рівнів значущості $\alpha=0,05$ та $\alpha=0,01$, приведені у табл. 2.

3. Всі кореляційні зв'язки є нелінійними за критеріями $r_{кр}$ (а), z (б) та t (в) та за рівнем значущості $\alpha=0,05$ та $\alpha=0,01$, окрім «HB- μ (LLLT)» – «твердість за Бринеллем металевої спряженої поверхні – коефіцієнт тертя для пари метал – карбоволокнит з розташуванням вуглецевих волокон LLLT [шари волокон стрічки спрямовані рівнобіжно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L), а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (L) і прямовисно вектору швидкості (T)], при цьому ступені лінійності зв'язку дорівнювали:

- для $\alpha=0,05$: $\xi_1(r)=1,266$; $\xi_1(z)=1,347$; $\xi_1(t)=1,389$;
- для $\alpha=0,01$: $\xi_1(r)=1,005$; $\xi_1(z)=1,023$; $\xi_1(t)=1,008$.

4. Мінорантні ряди за ступенями нелінійності (ξ_2) виглядають так:

I. Для рівня значущості $\alpha=0,05$:

1) за $r_{кр}$:

$$[J(NLNN)-T(NLNN)] > [J(NLNN)-\mu(NLNN)] >> \\ \xi_2(r): 55,094 > 32,748 >>$$

$$>> [HB-T(LLLT)] > [\mu(LLLT)-T(LLLT)] >$$

$$>> 4,930 > 3,296 >$$

$$> [HB-T(NLNN)] > [HB-\mu(NLNN)] >$$

$$> 2,541 > 2,404 >$$

$$> [HB-J(NLNN)] > [HB-J(LLLT)] >$$

$$> 2,008 > 1,499 >$$

$$> [J(LLLT)-T(LLLT)] > [\mu(NLNN)-T(NLNN)] >$$

$$> 1,348 > 1,041 >$$

$$> [J(LLLT)-\mu(LLLT)] > [HB-\mu(LLLT)].$$

$$> 1,026 > 0,790.$$

2) за ($z_T \cdot \sigma_z$):

$$[J(NLNN)-T(NLNN)] > [J(NLNN)-\mu(NLNN)] >>$$

$$\xi_2(z): 59,541 > 35,389 >>$$

$$>> [HB-T(LLLT)] > [\mu(LLLT)-T(LLLT)] >$$

$$>> 5,311 > 3,538 >$$

$$> [HB-T(NLNN)] > [HB-\mu(NLNN)] >$$

$$> 2,715 > 2,565 >$$

$$> [HB-J(NLNN)] > [HB-J(LLLT)] >$$

$$> 2,130 > 1,565 >$$

$$> [J(LLLT)-T(LLLT)] > [\mu(NLNN)-T(NLNN)] >$$

$$> 1,396 > 1,044 >$$

$$> [J(LLLT)-\mu(LLLT)] > [HB-\mu(LLLT)].$$

$$> 1,027 > 0,742.$$

б) за перетворенням Фішера (z)

Зв'язок	r_p	z_p	z_T	$z_T \cdot \sigma$	$\xi_1(z)$	$\xi_2(z)$
a=0,05						
HB-T(LLLT)	0,0950	0,095287	1,96	0,5061	0,188	5,311
HB-T(NLNN)	0,1843	0,186430	1,96	0,5061	0,368	2,715
J(LLLT)-T(LLLT)	-0,3475	-0,362598	1,96	0,5061	0,717	1,396
J(NLNN)-T(NLNN)	0,0085	0,008500	1,96	0,5061	0,017	59,541
μ (LLLT)-T(LLLT)	0,1421	0,143068	1,96	0,5061	0,283	3,538
μ (NLNN)-T(NLNN)	0,4500	0,484700	1,96	0,5061	0,958	1,044
HB-J(LLLT)	-0,3125	-0,323314	1,96	0,5061	0,639	1,565
HB-J(NLNN)	-0,2332	-0,237571	1,96	0,5061	0,469	2,130
HB- μ (LLLT)	0,5927	0,681818	1,96	0,5061	1,347	0,742
HB- μ (NLNN)	-0,1948	-0,197322	1,96	0,5061	0,390	2,565
J(LLLT)- μ (LLLT)	-0,4565	-0,492881	1,96	0,5061	0,974	1,027
J(NLNN)- μ (NLNN)	0,0143	0,014301	1,96	0,5061	0,028	35,389
a=0,01						
HB-T(LLLT)	0,0950	0,095287	2,58	0,6662	0,143	6,992
HB-T(NLNN)	0,1843	0,186430	2,58	0,6662	0,280	3,574
J(LLLT)-T(LLLT)	-0,3475	-0,362598	2,58	0,6662	0,544	1,837
J(NLNN)-T(NLNN)	0,0085	0,008500	2,58	0,6662	0,013	78,377
μ (LLLT)-T(LLLT)	0,1421	0,143068	2,58	0,6662	0,215	4,657
μ (NLNN)-T(NLNN)	0,4500	0,484700	2,58	0,6662	0,728	1,375
HB-J(LLLT)	-0,3125	-0,323314	2,58	0,6662	0,485	2,061
HB-J(NLNN)	-0,2332	-0,237571	2,58	0,6662	0,357	2,804
HB- μ (LLLT)	0,5927	0,681818	2,58	0,6662	1,023	0,977
HB- μ (NLNN)	-0,1948	-0,197322	2,58	0,6662	0,296	3,376
J(LLLT)- μ (LLLT)	-0,4565	-0,492881	2,58	0,6662	0,740	1,352
J(NLNN)- μ (NLNN)	0,0143	0,014301	2,58	0,6662	0,022	46,584

3) за t_T :

[J(NLNN)-T(NLNN)] > [J(NLNN)- μ (NLNN)] >>
 $\xi_2(t)$: 62,351 > 37,059 >>

>> [HB-T(LLLT)] > [μ (LLLT)-T(LLLT)] >

>> 5,554 > 3,692 >

> [HB-T(NLNN)] > [HB- μ (NLNN)] >

> 2,827 > 2,669 >

> [HB-J(NLNN)] > [HB-J(LLLT)] >

> 2,210 > 1,611 >

> [J(LLLT)-T(LLLT)] > [μ (NLNN)-T(NLNN)] >

> 1,430 > 1,052 >

> [J(LLLT)- μ (LLLT)] > [HB- μ (LLLT)].

> 1,033 > 0,720.

II. Для рівня значущості $\alpha=0,01$:1) за $r_{кр}$:

[J(NLNN)-T(NLNN)] > [J(NLNN)- μ (NLNN)] >>

$\xi_2(r)$: 69,377 > 41,238 >>

>> [HB-T(LLLT)] > [μ (LLLT)-T(LLLT)] >

>> 6,207 > 4,150 >

> [HB-T(NLNN)] > [HB- μ (NLNN)] >

> 3,200 > 3,027 >

> [HB-J(NLNN)] > [HB-J(LLLT)] >

> 2,520 > 1,887 >

> [J(LLLT)-T(LLLT)] > [μ (NLNN)-T(NLNN)] >

> 1,697 > 1,310 >

> [J(LLLT)- μ (LLLT)] > [HB- μ (LLLT)].

> 1,292 > 0,995.

2) за ($z_T \cdot \sigma_z$):

[J(NLNN)-T(NLNN)] > [J(NLNN)- μ (NLNN)] >>

$\xi_2(z)$: 78,377 > 46,584 >>

>> [HB-T(LLLT)] > [μ (LLLT)-T(LLLT)] >

>> 6,992 > 4,657 >

> [HB-T(NLNN)] > [HB- μ (NLNN)] >

> 3,574 > 3,376 >

> [HB-J(NLNN)] > [HB-J(LLLT)] >

> 2,804 > 2,061 >

> [J(LLLT)-T(LLLT)] > [μ (NLNN)-T(NLNN)] >

> 1,837 > 1,375 >

> [J(LLLT)- μ (LLLT)] > [HB- μ (LLLT)].

> 1,352 > 0,977.

3) за t_T :

[J(NLNN)-T(NLNN)] > [J(NLNN)- μ (NLNN)] >>

$\xi_2(t)$: 85,909 > 51,061 >>

>> [HB-T(LLLT)] > [μ (LLLT)-T(LLLT)] >

>> 7,652 > 5,087 >

> [HB-T(NLNN)] > [HB- μ (NLNN)] >

> 3,894 > 3,677 >

> [HB-J(NLNN)] > [HB-J(LLLT)] >

> 3,045 > 2,220 >

> [J(LLLT)-T(LLLT)] > [μ (NLNN)-T(NLNN)] >

в) за критерієм Стьюдента (t)

Зв'язок	r_p	t_p	t_r	$\xi_1(t)$	$\xi_2(t)$
$\alpha=0,05$					
HB-T(LLLT)	0,0950	0,381726	2,120	0,180	5,554
HB-T(NLNN)	0,1843	0,750048	2,120	0,354	2,827
J(LLLT)-T(LLLT)	-0,3475	-1,482382	2,120	0,699	1,430
J(NLNN)-T(NLNN)	0,0085	0,034001	2,120	0,016	62,351
μ (LLLT)-T(LLLT)	0,1421	0,574227	2,102	0,271	3,692
μ (NLNN)-T(NLNN)	0,4500	2,015613	2,120	0,951	1,052
HB-J(LLLT)	-0,3125	-1,315903	2,120	0,621	1,611
HB-J(NLNN)	-0,2332	-0,959248	2,120	0,453	2,210
HB- μ (LLLT)	0,5927	2,943545	2,120	1,389	0,720
HB- μ (NLNN)	-0,1948	-0,794419	2,120	0,375	2,669
J(LLLT)- μ (LLLT)	-0,4565	-2,052323	2,102	0,968	1,033
J(NLNN)- μ (NLNN)	0,0143	0,057206	2,120	0,027	37,059
$\alpha=0,01$					
HB-T(LLLT)	0,0950	0,381726	2,921	0,131	7,652
HB-T(NLNN)	0,1843	0,750048	2,921	0,257	3,894
J(LLLT)-T(LLLT)	-0,3475	-1,482382	2,921	0,508	1,971
J(NLNN)-T(NLNN)	0,0085	0,034001	2,921	0,012	85,909
μ (LLLT)-T(LLLT)	0,1421	0,574227	2,921	0,197	5,087
μ (NLNN)-T(NLNN)	0,4500	2,015613	2,921	0,690	1,449
HB-J(LLLT)	-0,3125	-1,315903	2,921	0,451	2,220
HB-J(NLNN)	-0,2332	-0,959248	2,921	0,328	3,045
HB- μ (LLLT)	0,5927	2,943545	2,921	1,008	0,992
HB- μ (NLNN)	-0,1948	-0,794419	2,921	0,272	3,677
J(LLLT)- μ (LLLT)	-0,4565	-2,052323	2,921	0,703	1,423
J(NLNN)- μ (NLNN)	0,0143	0,057206	2,921	0,020	51,061

> 1,971 > 1,449 >
 > [J(LLLT)- μ (LLLT)] > [HB- μ (LLLT)].
 > 1,423 > 0,992.

5. Аналіз цих мінорантних рядів показує, що нижчі сходинки за величиною нелінійності посідають кореляційні зв'язки:

а) між твердістю поверхні контртіла та коефіцієнтом тертя чи інтенсивністю зношування для обох орієнтацій шарів стрічки та волокон відносно поверхні тертя та вектора швидкості LLLT та NLNN;

б) між твердістю та температурою поверхні контртіла під час динамічного контакту з карбоволокнитом для обох орієнтацій шарів стрічки та волокон відносно поверхні та вектора швидкості LLLT та NLNN;

в) між коефіцієнтом тертя та температурою поверхні контртіла під час динамічного контакту з карбоволокнитом для обох орієнтацій шарів стрічки та волокон відносно поверхні тертя та вектора швидкості LLLT та NLNN;

г) між інтенсивністю зношування карбоволокниту та коефіцієнтом тертя чи температурою поверхні контртіла під час динамічного контакту з карбоволокнитом лише з рівнобіжною орієнтацією стрічок

і волокон відносно поверхні тертя та вектора швидкості LLLT, при цьому ступінь нелінійності становила:

• **за r_{kp} :**

для $\alpha=0,05$: $\xi_2(r)=1,026 - 4,930$;

для $\alpha=0,01$: $\xi_2(r)=1,292 - 6,207$;

• **за $(z_T \cdot \sigma_z)$:**

для $\alpha=0,05$: $\xi_2(z)=1,027 - 5,311$;

для $\alpha=0,01$: $\xi_2(z)=1,352 - 6,992$;

• **за t_r :**

для $\alpha=0,05$: $\xi_2(t)=1,033 - 5,554$;

для $\alpha=0,01$: $\xi_2(t)=1,423 - 7,652$.

Другу сходинку за величиною нелінійності займає кореляційний зв'язок між інтенсивністю зношування карбоволокниту та коефіцієнтом тертя під час динамічного контакту металевого контртіла та карбоволокниту з орієнтацією NLNN стрічок і волокон, при цьому ступінь нелінійності становила:

• **за r_{kp} :**

для $\alpha=0,05$: $\xi_2(r)=32,748$;

для $\alpha=0,01$: $\xi_2(r)=41,238$;

• **за $(z_T \cdot \sigma_z)$:**

для $\alpha=0,05$: $\xi_2(z)=35,389$;

для $\alpha=0,01$: $\xi_2(z)=46,584$;

• за t_T :

для $\alpha=0,05$: $\xi_2(t)=37,059$;

для $\alpha=0,01$: $\xi_2(t)=51,061$.

Першу сходинку за величиною нелінійності займає кореляційний зв'язок між інтенсивністю зношування карбоволокнисту та температурою поверхні контртіла під час динамічного контакту металевого контртіла та карбоволокнисту з орієнтацією NLNN стрічок і волокон, при цьому ступінь нелінійності становила:

• за $\Gamma_{кр}$:

для $\alpha=0,05$: $\xi_2(r)=55,094$;

для $\alpha=0,01$: $\xi_2(r)=69,377$;

• за $(z_T \cdot \sigma_z)$:

для $\alpha=0,05$: $\xi_2(z)=59,541$;

для $\alpha=0,01$: $\xi_2(z)=78,377$;

• за t_T :

для $\alpha=0,05$: $\xi_2(t)=62,351$;

для $\alpha=0,01$: $\xi_2(t)=85,909$.

Висновки

1. Інтенсивність об'ємного зношування та коефіцієнт тертя карбоволокнисту на основі термо-реактивних смол та високоміцних графітованих волокон стрічки під час ковзання по 18 поверхнях

металевих твердих тіл залежать від природи та твердості поверхонь контакту та спрямованості шарів стрічки волокон і самих вуглецевих волокон відносно поверхонь тертя та вектору швидкості.

2. Виявлено, що всі кореляційні зв'язки між твердістю контртіл, напрямками стрічок і волокон LLLT і NLNN за інтенсивністю зношування та коефіцієнтом тертя для рівнів значущості $\alpha=0,05$ та $\alpha=0,01$ за трьома критеріями є нелінійними, окрім зв'язку між твердістю та коефіцієнтом тертя спряженої поверхні, контактуючої із полімерним карбоволокнитом, у якого шари волокон стрічки спрямовані рівнобіжно поверхні тертя і вектору швидкості, а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя і прямо-висно вектору швидкості.

Сіренко Г.О. – заслужений діяч науки і техніки України, 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. – кандидат фізико-математичних наук, старший лаборант кафедри неорганічної та фізичної хімії.

- [1] J.P. Giltrow, J.D. Lancaster, Friction and wear of Polymers Reinforced with Carbon Fibres, Nature 214, 5093, 1106 (1967).
- [2] T. Tsukizoe, N. Ohmae, Wear mechanism of unidirectionally oriented fiber-reinforced plastics, Proc. Intern. Conf. on Wear of Materials (St. Luuis: Amer Soc. Mech. Eng., 1977).
- [3] Tadasu Tsukizoe, Nobuo Ohmae, Friction and wear performance of Unidsrectionally Oriented Class, Carbon, Aramid and Stainless Steel Fiber-Reinforced Plastics, Frict. and Wear Polym. Compos. (Amsterdam, 1986).
- [4] T. Tsukizoe, N. Ohmae, Tribo- mechanics of carbon-fiber reinforced plastics, Industrial Lubrication and Tribology, 28 (1), 19 (1976).
- [5] Z. Eliezer, V. D. Kxanna, M.F Amateau, Wear 51 (3), 169 (1978).
- [6] L.M. Soltys, H.O. Sirenko, L.Ya. Midak, Visnyk Prykarp. nats. un-tu im. Vasylya Stefanyka. Seriya Khimiya, XI, 95 (2011).
- [7] H.O. Sirenko, L.Ya. Midak, L.M. Soltys, Yu.D. Pakhomov, Matematychni metody v khimiyi i biolohiyi 1(2), 55 (2013).
- [8] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, Yu.D. Pakhomov, Visnyk Prykarp. nats. un-tu im. Vasylya Stefanyka. Seriya Khimiya, XIX, 103 (2015).
- [9] H.O. Sirenko, V.P. Svidersky, L.Ya. Midak, O.S. Drobot, Problemy trybolohiyi, 2, 63 (2004).
- [10] H.O. Sirenko, L.Ya. Midak, V.P. Svidersky, O.S. Drobot, L.V. Karavanovych, Fizyka i khimiya tverdoho tila, 6(2), 317 (2005).
- [11] M.N. Stepnov, Statesticheskaja obrobka rezul'tatov mehanicheskikh ispytaniy (Mashinostroenie, Moskva, 1972).
- [12] P. Mjuller, P. Nojman, R. Shtorm, Tablicy po matematicheskoy statistike (Finansy i statistika, Moskva, 1982).
- [13] Ju.P. Adler, E.V. Markova, Ju.B. Granovs'kij, Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij (Nauka, Moskva, 1976).
- [14] H.O. Sirenko, V.I. Kyrychenko, Vlastyivosti mastyl'nykh nanoplivok pid chas nadvysokykh tyskiv (PP Petrash K.T., Ivano-Frankivsk, 2015).

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

The Influence of Nature and Hardness of Surfaces of Metal Counterfaces on Wear of Carbo-Fiber Plastic

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine
Tel. (0342) 77.64.15; (096) 813.93.53, e-mail: orijant@gmail.com*

Correlations between temperature of surface of friction, hardness of adjacent surfaces of steels, nonferrous metals and metal alloys and intensity of surround wear and coefficient of friction of polymer composite filled with unidirectional carbon fibers has been researched. It has been shown that between the investigated variables preferably exist nonlinear correlations.

Key words: polymer composite, carbo-fiber plastic, intensity of wear, coefficient of friction, counterface, surface of friction, hardness, temperature of friction, scheme of reinforcing, layered composite.