Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія Хімія. Випуск XVIII (2014), С. 55-68 **ISSN 2310-1288**

ФІЗИКА ТА ХІМІЯ ПОВЕРХНІ ТВЕРДОГО ТІЛА

УДК 621.891+621.89+621.567; 539.62

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, М.Б. Складанюк, І.В. Сулима

Кореляція протизносних та антифрикційних властивостей карбоволокнита з шорсткістю металевих контртіл за надграничних та граничних питомих навантажень

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна

Виявлено кореляційні зв'язки між коефіцієнтом тертя та інтенсивністю зношування політетрафторетилену – карбопластика, отриманого за ХМА-технологією, та природою, твердістю, шорсткістю (вихідною та тією, що виникла в процесі тертя та зношування), зміною шорсткості суміжної поверхні, шляхом тертя тощо під час фрикційних випробувань за сталої температури та надвисоких і високих питомих навантажень (при нормальних навантаженнях 40-100 Н на один зразок).

Ключові слова: шорсткість, інтенсивність зношування, тертя, композиційний полімерний матеріал, металеві суміжні поверхні, питомі навантаження, кореляція.

H.O. Sirenko, L.M. Soltys, M.B. Skladanyuk, I.V. Sulyma

Correlation of Antiwear and Antifriction Properties of Carbon Fiber with Roughness of Metal Counterfaces at Over Limit and Limit Specific Loads

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine

Correlations between friction coefficient and intensity of wear of polytetrafluoroethylene – carbonplastic, derived by CMA-technology, and nature, hardness, roughness (initial and the one that arose in the friction and wear), changes of roughness of adjacent surface, the way of friction etc in the friction tests at constant temperature and ultrahigh and high specific loads (at normal load of 40-100 N for one sample) have been detected.

Key words: roughness, intensity of wear, friction, composite polymer material, metal adjacent surfaces, specific loads, correlation.

Стаття поступила до редакції 15.10.2014; прийнята до друку 25.12.2014.

Вступ

Вуглецеві волокна [1, 2] використовують для створення ефективних композиційних полімерних матеріалів антифрикційного призначення [3-5]. Під час дослідження протизносних і антифрикційних властивостей односпрямованих карбопластиків під час динамічного контакту з металевими поверхнями автори [6-8] та інші використали різні схеми контакту: «площина-площина», «циліндри навхрест», «циліндр-площина», «циліндр-циліндр», «вал-напіввкладка», «сфера на площині», «голка-диск» або «голка-кільце» тощо. Зміна схеми контакту приводила до зміни інтенсивності зношування на порядок [7, 8] і це не дозволяло зробити порівняльні висновки.

Єдиного погляду на вплив часу (шляху) тертя, навантаження, швидкості ковзання, температури тощо на зносостійкість та коефіцієнт тертя не виявлено [9, 10].

Під час дослідження протизносних та 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 протизносні властивості [11]. Виявлено [11-13], що вплив навантаження на інтенсивність зношування під час постійного та змінного руху більш суттєвий, ніж на коефіцієнт тертя.

Збільшення зношування односпрямованих карбопластиків із зростанням швидкості руху та питомих навантажень автори [14] пояснюють зростанням температури контакту і, відповідно, руйнацією адгезійних зв'язків волокно-матриця. Автори [7, 8, 15] пояснюють відмінності зносостійкості односпрямованих карбопластиків, які містять волокна типу НТ (високоміцні, карбонізовані) і НМ (високомодульні, ґрафітовані) тим, що ґрафітовані волокна НМ мають самозмащувальні властивості, ніж карбонізовані волокна НТ. Вуглецеві волокна діють як резервуар вуглецю, який легко відокремлюється від поверхні незалежно від орієнтації волокна і бере участь у механізмі змащення суміжних поверхонь твердих тіл [16, 17].

Суттєвим недоліком переважної більшості проведених досліджень є недотримання постійного теплового режиму контакту в 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 (інтенсивності зношування) і коефіцієнти тертя карбопластиків. Різниця цих результатів також пов'язана з різними схемами та умовами експериментів.

Під час зростання концентрації волокон типу НТ до 50 об. % анізотропія структури на зносостійкість карбопластика мало впливає [7, 13]. Знайдено, що для композитів з волокнами типу НТ зростання об'ємної частки вуглецевих волокон у полімерній матриці збільшує зносостійкість, а для композитів із волокнами типу НМ спостерігається зворотна залежність [11] або зносостійкість мало змінюється [18].

Механізм зношування карбопластиків пояснюють [19] з позиції руйнування адгезійних зв'язків «волокно-матриця», яке має місце для волокон з малим подовженням під час розриву і пружнодеформованими та орієнтованими у напрямку NN. Але ця теорія не пояснює орієнтаційних ефектів зносостійкості і коефіцієнта тертя LL- і LT-напрямків волокон. У [20] розрахунками показано, що руйнування карбопластиків під час тертя та зношування відбувається за рахунок накопичення і вивільнення енергії, утворення тріщин у матриці, при цьому досягнення ефективної довжини вуглецевих волокон сприяє зупиненню розвитку тріщин.

Механізм зношування односпрямованих карбопластиків пояснюють також [21] зароджуванням розколин у глибині поверхневого контактного шару, їх переміщенням по поверхні та відшаруванням пластинчастих частинок під дією нормальних і танґенціальних навантажень. Тут теорія зношування металів відшаруванням [22] розповсюджена на зношування карбопластиків. Композити на основі термореактивних смол і вуглецевих волокон типу НТ і НМ чутливі до високих локальних навантажень і високих швидкостей деформацій, які викликають крихкий злам матриці та волокон [23].

Огляд літературних джерел інформації з питань дослідження антифрикційних і протизносних властивостей карбопластиків приведений у [24]. У роботах [25-29] досліджені антифрикційні та протизносні властивості орієнтованих [25, 27] та отриманих за хеміко-механо-активаційною технологією (ХМА-технологією) [26, 28] карбопластиків під час сталої температури поверхонь тертя, при цьому показано вплив природи [27-29] та шорсткості суміжних металевих поверхонь на ці властивості карбопластиків.

Мета роботи полягала у виявленні кореляційних зв'язків та їх ступенів лінійності та нелінійності між коефіцієнтом тертя та інтенсивністю зношування карбоволокнитів на основі політетрафторетилену (ПТФЕ), отриманих за ХМА-технологією, та шорсткістю (вихідною та тією, що виникла в процесі тертя та зношування), зміною шорсткості суміжної поверхні та шляхом (часом) тертя тощо під час фрикційних випробувань за сталої температури та надграничних і граничних питомих навантажень (при нормальних навантаженнях 40-100 Н на один зразок).

І. Експериментальна частина

1.1. Матеріали для досліджень.

Досліджували вплив твердості НВ та вихідної шорсткості $(\sqrt{m_0})_1$ металевих суміжних поверхонь без та з покриттями на антифрикційні та протизносні властивості полімерних композитів на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого за 1123К в CH_4 вуглецевого волокна УТМ-8 на основі гідратцелюлози [флубон-15(20)] та ПТФЕ + 12,5% карбонізованого вуглецевого волокна УТМ-8 + 12,5% порошку MoS_2 [флубон-ДМ]: на шорсткість поверхонь $(\sqrt{m_0})_2$ та приріст шорсткості $\Delta_{21}= (\sqrt{m_0})_2-(\sqrt{m_0})_1$, де m_0 – момент нульового порядку спектральної щільності ізотропної шорсткої поверхні металу (контртіла) після 2-22 км тертя та зношування; на питому інтенсивність об'ємного зношування та коефіцієнт тертя під час випробувань в режимі надграничних [$I_1(S_1$=0-2 км), $\mu_1(S_1)$] та граничних [$I_2(S_2$=2-22 км), $\mu_2(S_2)$] питомих навантажень.

1.2. Методи випробування.

1. Антифрикційні випробування (на інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя) проводили за схемою контакту [II-2] [5] («напівсфера полімерного зразка – площина металевого контртіла») під час нормального навантаження на один зразок N_i=100 Н=const на шляху випробувань

S_1=0…2 км (надграничні питомі навантаження: $p_0 \approx$ НВ (пружна твердість полімерного композиту) та S_2'=2…22 км (граничні питомі навантаження p); швидкість ковзання v=0,33 м/с; температура поверхні металевого контртіла на відстані 1-2 мм від поверхні тертя T=303±2 К (тертя без мащення – у середовищі вологого повітря) [під час випробування флубону-15(20)] та N_i=40 Н=const; S_1=0…2 км; S_2=2…22 км; v=0,33 м/с; T=303±2 К; без мащення (вологе повітря) [під час випробування флубону-ДМ].

2. У якості металевих контртіл вибрані [30]:

● **мосяж (латунь) ЛС 59-1** (59% Cu + 40% Zn +1% Pb) без {твердість за Брінеллем НВ 991 МПа; Ra_0=0,35 мкм [під час випробування полімерного композиту флубон-15(20)] та Ra_0=0,33 мкм [під час випробування полімерного композиту флубон-ДМ] відповідно} та з Cr-покриттям (НВ 925 МПа; Ra_0=0,44 і 0,42 мкм відповідно);

● **алюмінієвий стоп Д 16** (дуралюмін) (94,7-92,4% Al + 3,8-4,9% Cu + 1,2-1,8% Mg + 0,3-0,9% Mn) без (НВ 1240 МПа; Ra_0=1,88 і 1,85 мкм відповідно) та з оксидним покриттям (НВ 1275 МПа; Ra_0=4,0 і 4,0 мкм відповідно); з оксидним покриттям + MoS_2 (НВ 1285 МПа; Ra_0=1,75 і 1,75 мкм відповідно); з Cr-покриттям (НВ 1260 МПа; Ra_0= 0,29 і 0,30 мкм відповідно);

● **титановий стоп ВТ 1-00** (технічно чистий титан) без (НВ 1720 МПа; мікротвердість H_{100} 3500 МПа; Ra_0=0,34 і 0,35 мкм відповідно) та з оксидним покриттям: за звичайною технологією термообробки (НВ 1760 МПа; H_{100} 5600 МПа; Ra_0= 0,53 і 0,52 мкм відповідно) і за технологією лазерного зміцнення (НВ 7600 МПа; H_{100} 9300 МПа; Ra_0=0,40 і 0,62 мкм відповідно);

● **сталь 45** [середньовуглецева (0,42-0,5% C) нетермооброблена] без (НВ 1890 МПа; Ra_0=0,24 і 0,32 мкм відповідно) та з Zn-покриттям (НВ 2030 МПа; Ra_0=0,36 і 0,35 мкм відповідно);

● **титано-цирконієвий стоп РК-20** без (НВ 3300 МПа; H_{100} 3900 МПа; полірована поверхня: Ra_0=0,026 і 0,030 мкм відповідно) та з оксидним покриттям: за звичайною технологією термообробки (НВ 2130 МПа; H_{100} 6800 МПа; полірована поверхня: Ra_0=0,023 і 0,022 мкм відповідно) та за технологією лазерного зміцнення (НВ 6800 МПа; H_{100} 11000 МПа; Ra_0=0,30 і 0,34 мкм відповідно); з TiN-покриттям (НВ 10050 МПа; H_{100} 11450 МПа; полірована поверхня: Ra_0=0,028 і 0,032 мкм відповідно).

3. Полімерні зразки послідовно припрацьовували на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості, що знаходилася на масивному плоскому металевому тілі. Металеве 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 за робочих трибопараметрів випробувань до досягнення приблизно 100% дзеркальної поверхні. Після припрацювання полімерних зразків металеве контртіло знову припрацьовували на шліфувальній шкурці відповідної до завдання дослідження зернистості, що знаходилася на масивному плоскому металевому тілі.

4. Профілограми мікрошорсткості поверхонь знімали за допомогою профілометра-профілографа ВЭИ «Калібр» моделі «201» та моделі «252». Для одного напрямку знімали 50-60 базових довжин профілограм для металевого контртіла і 10-15 базових довжин профілограм для полімерного зразка. Для ізотропної поверхні профілограму знімали під кутом ~45^0 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 *Ra*, щільність нулів D_0 і щільність екстремумів D_{extr}. Виміряна *Ra* і розрахункова за профілограмами D_0 (для моделі «252» D_0 виміряна) були статистично рівні.

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

За результатами обробки профілограм визначали моменти нульового, другого та четвертого порядків спектральної щільності (СЩ) розподілу висот вершин нерівностей, кривин у вершинах нерівностей та ґрадієнтів шорсткої поверхні. За математичну моделлю шорсткої поверхні вибрана ізотропна модель випадкового поля.

ІІ. Результати та обговорення

2.1. Результати експерименту [28] були доповнені даними дослідженнями (табл. 1 і 2) і піддані кореляційному аналізу (табл. 3-6). З цією метою висували: **нульову гіпотезу:**

$$H_0 : \rho = 0$$
$$\uparrow$$
$$r_p \neq 0$$

(статистично значимий нелінійний зв'язок), де ρ – ґенеральний та r_p – вибірковий коефіцієнти кореляції, а також висували **альтернативну (щодо H_0) гіпотезу:**

$$H_1 : \rho \neq 0$$
$$\uparrow$$
$$r_p \neq 0$$

(статистично значимий лінійний зв'язок).

Під час кореляційного аналізу розраховували вибірковий коефіцієнт кореляції $|r_p|$ (N=15) та визначали його значущість (з рівнями значущості α=0,05 та α=0,01): де N – кількість варіацій коефіцієнтів кореляції (кількість досліджених металевих стопів), визначаючи прийняття H_0 або H_1 за:

● **за критичним коефіцієнтом кореляції** для α=0,05 $r_{кр}\{q=1-(\alpha/2)=0,975$; число ступенів вільностей $f=N-2=15-2=13\}=0,5139$ та для α=0,01 $r_{кр}\{q=1-(\alpha/2)=0,995$; $f=13\}=0,6411$ [31], порівнюючи $|r_p|$ з $r_{кр}$, визначали при цьому ступінь лінійності кореляційного зв'язку за співвідношеннями:

$$\xi_1(r)=\frac{|r_p|}{r_{кр}};\ \xi_1(R)=\frac{|R_p|}{r_{кр}};\ \xi_1(\overline{R})=\frac{|\overline{R}_p|}{r_{кр}},\quad (1)$$

Таблиця 1

Вихідні дані протизносних та антифрикційних властивостей композиту на основі ПТФЕ + 20% карбонового волокна УТМ-8 [флубон-15(20)] під час тертя та зношування по металевих стопах без та з покриттями (контртіла)

Металевий стоп (контртіло)	НВ, МПа	Шорсткість поверхні контртіла $\sqrt{m_0}$, мкм			Питома інтенсивність об'ємного зношування I_i, $x10^{-7}$ [мм^3/(Н·м)]		Коефіцієнт тертя	
		до тертя $(\sqrt{m_0})_1$	після тертя $(\sqrt{m_0})_2$	зміна Δ_{21}	I_1	I_2	μ_1	μ_2
					S_1=0-2 км	S_2=2-22 км	S_1=0-2 км	S_2=2-22 км
Мосяж ЛС 59-1	991	0,439	0,376	–0,063	78,5	12,4	0,25	0,27
Мосяж ЛС 59-1 з хромовим покриттям	925	0,551	0,501	–0,050	126	4,1	0,39	0,66
Алюмінієвий стоп Д-16	1240	2,356	4,549	+2,193	4860	4620	0,66	0,66
Алюмінієвий стоп Д-16 з оксидним покриттям	1275	5,013	3,760	–1,253	273	18,2	0,48	0,52
Алюмінієвий стоп Д-16 з оксидним покриттям + антифрикційні частинки MoS_2	1285	2,193	3,296	+1,103	257	16,8	0,66	0,48
Алюмінієвий стоп з хромовим покриттям	1260	0,363	3,760	+3,397	408	112	0,48	0,39
Титановий стоп ВТ 1-00	1720 (3500*)	0,426	0,351	–0,075	110	15,8	0,18	0,28
Титановий стоп ВТ 1-00 з оксидним покриттям	1760 (5600*)	0,664	0,439	–0,225	96	10,3	0,48	0,48
Титановий стоп ВТ 1-00 після лазерного зміцнення	7600 (9300*)	0,501	0,526	+0,025	177	50,7	0,48	0,49
Сталь 45	1890	0,301	0,351	+0,050	179	22,9	0,24	0,25
Сталь 45 з цинковим покриттям	2030	0,451	0,614	+0,163	25,6	2,9	0,32	0,48
Титано-цирконієвий стоп РК-20	3300 (3900*)	0,033	0,050	+0,017	65	13,5	0,32	0,38
Титано-цирконієвий стоп РК-20 з оксидним покриттям	2130 (6800*)	0,029	0,056	+0,027	37,2	6,9	0,36	0,35
Титано-цирконієвий стоп РК-20 після лазерного зміцнення	6800 (11000*)	0,376	0,188	–0,188	96	7,1	0,30	0,38
Титано-цирконієвий стоп РК-20 з поверхневим шаром TiN	10050 (11450*)	0,035	0,049	+0,014	32,5	5,2	0,28	0,36

* Мікротвердість H_{100}

Таблиця 2

Вихідні дані протизносних та антифрикційних властивостей композиту на основі ПТФЕ + 12,5% карбонового волокна УТМ-8 + 12,5% MoS_2 [флубон-ДМ] під час тертя та зношування по металевих стопах без та з покриттями (контртіла)

Металевий стоп (контртіло)	НВ, МПа	Шорсткість поверхні контр тіла $\sqrt{m_0}$,, мкм			Питома інтенсивність об'ємного зношування I_i, $x10^{-7}$ [мм^3/(Н·м)]		Коефіцієнт тертя	
		до тертя $(\sqrt{m_0})_1$	після тертя $(\sqrt{m_0})_2$	Δ_{21}	I_1	I_2	μ_1	μ_2
					S_1=0-2 км	S_2=2-22 км	S_1=0-2 км	S_2=2-22 км
Мосяж ЛС 59-1	991	0,414	0,338	–0,076	112	4,8	0,04	0,20
Мосяж ЛС 59-1 з хромовим покриттям	925	0,527	0,376	–0,151	384	3,3	0,05	0,23
Алюмінієвий стоп Д-16	1240	2,319	3,760	+1,441	3780	3600	0,08	0,86
Алюмінієвий стоп Д-16 з оксидним покриттям	1275	5,013	2,356	–2,657	242	4,3	0,25	0,32
Алюмінієвий стоп Д-16 з оксидним покриттям + антифрикційні частинки MoS_2	1285	2,193	1,730	–0,463	216	5,6	0,25	0,28
Алюмінієвий стоп з хромовим покриттям	1260	0,376	0,514	+0,138	852	33,2	0,23	0,25
Титановий стоп ВТ 1-00	1720 (3500*)	0,439	0,501	+0,062	1940	86	0,12	0,10
Титановий стоп ВТ 1-00 з оксидним покриттям	1760 (5600*)	0,652	0,564	–0,088	1890	76	0,23	0,20
Титановий стоп ВТ 1-00 після лазерного зміцнення	7600 (9300*)	0,777	0,639	–0,138	1710	63	0,25	0,21
Сталь 45	1890	0,401	0,577	+0,176	188	25,6	0,04	0,09
Сталь 45 з цинковим покриттям	2030	0,439	0,664	+0,225	42,6	0,7	0,05	0,10
Титано-цирконієвий стоп РК-20	3300 (3900*)	0,038	0,058	+0,020	38,2	10,4	0,16	0,12
Титано-цирконієвий стоп РК-20 з оксидним покриттям	2130 (6800*)	0,028	0,063	+0,035	26,5	7,5	0,20	0,17
Титано-цирконієвий стоп РК-20 після лазерного зміцнення	6800 (11000*)	0,426	0,201	–0,225	53,4	7,0	0,17	0,13
Титано-цирконієвий стоп РК-20 з поверхневим шаром TiN	10050 (11450*)	0,040	0,050	+0,010	24,3	4,4	0,12	0,15

* Мікротвердість H_{100}

де r_p, R_p, $\overline{R}_p$ – розрахункові значення вибіркових коефіцієнтів кореляцій, частинних інваріантних комбінацій коефіцієнтів кореляції та середнього значення узагальненого коефіцієнта кореляцій, відповідно, а ступінь нелінійності кореляційного зв'язку – за співвідношеннями:

$$\xi_2(r)=\frac{r_{кр}}{|r_p|};\ \xi_2(R)=\frac{r_{кр}}{|R_p|};\ \xi_2(\overline{R})=\frac{r_{кр}}{|\overline{R}_p|};\ (2)$$

● **за теоретичним значенням t-критерію Стьюдента** для α=0,05 t_T{q=1-(α/2)=0,975; f=N–2=13}=2,160; для α=0,01 t_T{q=1-(α/2)=0,995; f=N–2=13}=3,012 [31], розраховуючи статистику t_p [32],

$$\left|t'_p\right| = \frac{r_p}{\sqrt{1-r_p^2}}\sqrt{\mathrm{N}-2};\ \left|t''_p\right| = \frac{R_p}{\sqrt{1-R_p^2}}\sqrt{\mathrm{N}-2};$$

$$\left|t'''_p\right| = \frac{\overline{R}_p}{\sqrt{1-\overline{R}_p^2}}\sqrt{\mathrm{N}-2}, \qquad (3)$$

і, порівнюючи $|t_p|$ з t_T визначали:
ступінь лінійності лінійного зв'язку за співвідношеннями:

$$\xi_1(t') = \frac{\left|t'_p\right|}{t_T};\ \xi_1(t'') = \frac{\left|t''_p\right|}{t_T};\ \xi_1(t''') = \frac{\left|t'''_p\right|}{t_T}, \qquad (4)$$

а ступінь нелінійності – за співвідношеннями:

$$\xi_2(t') = \frac{t_T}{\left|t'_p\right|};\ \xi_2(t'') = \frac{t_T}{\left|t''_p\right|};\ \xi_2(t''') = \frac{t_T}{\left|t'''_p\right|}; \qquad (5)$$

● **за функцією перетворення Фішера**, розраховуючи z статистику [32]:

$$z'_p = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+r_p}{1-r_p}\right);\ \ z''_p = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+R_p}{1-R_p}\right);$$

$$z'''_p = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1+\overline{R}_p}{1-\overline{R}_p}\right) \qquad (6)$$

та середнє квадратичне відхилення z [32]:

$$\sigma_{z'} = \frac{1}{\sqrt{\mathrm{N}-3}}. \qquad (7)$$

Порівнюючи $|z_p|$ зі стандартом у вигляді добутку для α=0,05 ($\sigma_z \cdot z_T\{q=1-(\alpha/2)=0,975\}$)=0,5659, де $z_T\{q= 0,975\}$=1,96 (квантиль нормованого нормального розподілу), а для α=0,01 ($\sigma_z \cdot z_T\{q=1-(\alpha/2)=0,995\}$)=0,7449, де $z_T\{q=0,995\}$=2,58 [32]; визначали ступінь лінійності кореляційного зв'язку за співвідношеннями:

$$\xi_1(z') = \frac{\left|z'_p\right|}{(\sigma_r \cdot z_q)};\ \xi_1(z'') = \frac{\left|z''_p\right|}{(\sigma_r \cdot z_q)};\ \xi_1(z''') = \frac{\left|z'''_p\right|}{(\sigma_r \cdot z_q)}, \qquad (8)$$

а ступінь нелінійності – за співвідношеннями:

$$\xi_2(z') = \frac{(\sigma_r \cdot z_q)}{\left|z'_p\right|};\ \xi_2(z'') = \frac{(\sigma_r \cdot z_q)}{\left|z''_p\right|};\ \xi_2(z''') = \frac{(\sigma_r \cdot z_q)}{\left|z'''_p\right|}. \qquad (9)$$

Результати розрахунків за табл. 1 і 2 коефіцієнтів кореляції та ступенів лінійності та нелінійності кореляційних зв'язків зведені в табл. 3 і 5 (для α=0,05) та в табл. 4 і 6 (для α=0,01).

2.2. За результатами табл. 3-6 складено мінорантні та мажорантні ряди.

1. Мінорантний ряд кореляційних зв'язків (рівень значущості **α=0,05**) за ступенем **нелінійності** для композиту флубон-15(20):

[HB~μ₂(S₂)]>[Δ₂₁~μ₂(S₂)]>[HB~I₂(S₂)]>[HB~I₁(S₁)]

ξ_2(r): 3,192 > 3,153 > 3,041 > 2,663 >
ξ_2(t): 3,672 > 3,626 > 3,494 > 3,046 >
ξ_2(z): 3,484 > 3,441 > 3,316 >2,895 >

[HB~Δ₂₁] > [HB~μ₁(S₁)] > [($\sqrt{m_0}$)₁~I₂ (S₂)] >

ξ_2(r): 2,426 > 2,318 > 1,723 >
ξ_2(t): 2,764 > 2,635 > 1,917 >
ξ_2(z): 2,631 > 2,510 > 1,839 >

[($\sqrt{m_0}$)₁~I₁(S₁)]>[HB~($\sqrt{m_0}$)₂]>[($\sqrt{m_0}$)₁~μ₂(S₂)]>

ξ_2(r): 1,524 > 1,278 > 1,096 >
ξ_2(t): 1,673 > 1,365 > 1,128 >
ξ_2(z): 1,615 > 1,328 > 1,112 >

[Δ₂₁ ~ μ₁ (S₁)] > [Δ₂₁ ~ I₂ (S₂)] > [Δ₂₁ ~ I₁ (S₁)] >

ξ_2(r): 1,088 > 1,083 > 1,024 >
ξ_2(t): 1,118 > 1,112 > 1,032 >
ξ_2(z): 1,103 > 1,097 > 1,026 >

[($\sqrt{m_0}$)₁~μ₁(S₁)]>[Δ₂₁~($\sqrt{m_0}$)₂]>[($\sqrt{m_0}$)₁~($\sqrt{m_0}$)₂]>

[I₁(S₁)~ I₂(S₂)] >

ξ_2(r): 0,915 > 0,871 > 0,699 > 0,515 >
ξ_2(t): 0,883 > 0,820 > 0,552 > 0,040 >
ξ_2(z): 0,893 > 0,836 > 0,602 > 0,166.

2. Мажорантний ряд кореляційних зв'язків (рівень значущості **α=0,05**) за ступенем **лінійності** для композиту флубон-15(20):

[HB~μ₂(S₂)]<[Δ₂₁~μ₂(S₂)]<[HB~I₂(S₂)]<[HB~I₁(S₁)]

ξ_1(r): 0,313 < 0,317 < 0,329 < 0,376 <
ξ_1(t): 0,272 < 0,276 < 0,286 < 0,328 <
ξ_1(z): 0,287 < 0,291 < 0,302 < 0,345 <

[HB~Δ₂₁]<[HB~μ₁(S₁)]<[($\sqrt{m_0}$)₁~I₂(S₂)]<[($\sqrt{m_0}$)₁~ I₁(S₁)]

ξ_1(r): 0,412 < 0,431 < 0,580 < 0,656 <
ξ_1(t): < 0,362 < 0,380 < 0,522 < 0,598 <
ξ_1(z): < 0,380 < 0,398 < 0,544 < 0,619 <

[HB~($\sqrt{m_0}$)₂]<[($\sqrt{m_0}$)₁~μ₂(S₂)]<[Δ₂₁~μ₁(S₁)]<[Δ₂₁~ I₂(S₂)] <

ξ_1(r): < 0,782 < 0,913 < 0,919 < 0,923 <
ξ_1(t): < 0,733 < 0,887 < 0,894 < 0,900 <
ξ_1(z): < 0,753 < 0,899 < 0,907 < 0,911 <

[Δ₂₁~I₁(S₁)]<[($\sqrt{m_0}$)₁~μ₁(S₁)]<[Δ₂₁~($\sqrt{m_0}$)₂]< [($\sqrt{m_0}$)₁~($\sqrt{m_0}$)₂] <

ξ_1(r): < 0,977 < 1,092 < 1,148 < 1,431 <
ξ_1(t): < 0,969 < 1,132 < 1,219 < 1,812 <
ξ_1(z): < 0,975 < 1,120 < 1,197 < 1,662 <

[I₁ (S₁) ~ I₂ (S₂)].

ξ_1(r): < 1,942.
ξ_1(t): < 25,123.
ξ_1(z): < 6,018.

3. Мінорантний ряд кореляційних зв'язків (рівень значущості **α=0,01**) за ступенем **нелінійності** для композиту флубон-15(20):

[HB~μ₂(S₂)]>[Δ₂₁~μ₂(S₂)]>[HB~I₂(S₂)]>[HB~I₁(S₁)]

ξ_2(r): > 3,982 > 3,933 > 3,794 > 3,322 >
ξ_2(t): 5,121 > 5,057 > 4,872 > 4,247 >
ξ_2(z): 4,586 > 4,529 > 4,365 >3,811 >

[HB~Δ₂₁]>[HB~μ₁(S₁)]>[($\sqrt{m_0}$)₁~I₂(S₂)]>

ξ_2(r): > 3,027 > 2,892 > 2,149 >
ξ_2(t): > 3,855 > 3,674 > 2,673 >
ξ_2(z): > 3,463 > 3,304 > 2,421 >

[($\sqrt{m_0}$)₁~I₁(S₁)]>[HB~($\sqrt{m_0}$)₂]>[($\sqrt{m_0}$)₁~μ₂(S₂)] >

ξ_2(r): > 1,901 > 1,595 > 1,367 >

$\xi_2(t)$: > 2,332 > 1,903 > 1,573 >
$\xi_2(z)$: > 2,122 > 1,748 > 1,464 >
$[\Delta_{21} \sim \mu_1 (S_1)] > [\Delta_{21} \sim I_2 (S_2)] > [\Delta_{21} \sim I_1 (S_1)] >$
$\xi_2(r)$: > 1,357 > 1,351 > 1,277 >
$\xi_2(t)$: > 1,559 > 1,550 > 1,440 >
$\xi_2(z)$: > 1,452 > 1,444 > 1,350 >
$[(\sqrt{m_0})_1 \sim \mu_1 (S_1)] > [\Delta_{21} \sim (\sqrt{m_0})_2] >$
$\xi_2(r)$: > 1,142 > 1,087 >
$\xi_2(t)$: > 1,231 > 1,144 >
$\xi_2(z)$: > 1,173 > 1,100 >
$[(\sqrt{m_0})_1 \sim (\sqrt{m_0})_2] > [I_1 (S_1) \sim I_2 (S_2)]$.
$\xi_2(r)$: 0,872 > 0,643.
$\xi_2(t)$: 0,770 > 0,056.
$\xi_2(z)$: 0,792 > 0,219.

4. Мажорантний ряд кореляційних зв'язків (рівень значущості **α=0,01**) за ступенем **лінійності** для композиту флубон-15(20):
$[HB \sim \mu_2(S_2)] < [\Delta_{21} \sim \mu_2(S_2)] < [HB \sim I_2(S_2)] < [HB \sim I_1(S_1)] < [HB \sim \Delta_{21}] <$
$\xi_1(r)$: 0,251 < 0,254 < 0,264 < 0,301 < 0,330 <
$\xi_1(t)$: 0,195 < 0,198 < 0,205 < 0,236 < 0,259 <
$\xi_1(z)$: 0,218 < 0,221 < 0,229 < 0,262 < 0,289 <
$[HB \sim \mu_1(S_1)] < [(\sqrt{m_0})_1 \sim I_2(S_2)] < [(\sqrt{m_0})_1 \sim I_1(S_1)] < [HB \sim (\sqrt{m_0})_2] <$
$\xi_1(r)$: 0,346 < 0,465 < 0,526 < 0,627 <
$\xi_1(t)$: < 0,272 < 0,374 < 0,429 < 0,526 <
$\xi_1(z)$: < 0,303 < 0,413 < 0,471 < 0,572 <
$[(\sqrt{m_0})_2 \sim \mu_2(S_2)] < [\Delta_{21} \sim \mu_1(S_1)] < [\Delta_{21} \sim I_2(S_2)] < [\Delta_{21} \sim I_2(S_2)] <$
$\xi_1(r)$: < 0,732 < 0,737 < 0,740 < 0,783 <
$\xi_1(t)$: < 0,636 < 0,641 < 0,645 < 0,695 <
$\xi_1(z)$: < 0,683 < 0,689 < 0,693 < 0,741 <
$[(\sqrt{m_0})_1 \sim \mu_1(S_1)] < [\Delta_{21} \sim (\sqrt{m_0})_2] < [(\sqrt{m_0})_1 \sim (\sqrt{m_0})_2] < [I_1(S_1) \sim I_2(S_2)] <$
$\xi_1(r)$: < 0,876 < 0,920 < 1,147 < 1,556 <
$\xi_1(t)$: < 0,812 < 0,874 < 1,299 < 18,017 <
$\xi_1(z)$: < 0,852 < 0,910 < 1,263 < 4,573.

Таблиця 3

Кореляційний аналіз (α=0,05) протизносних та антифрикційних властивостей композиту флубон-15(20) під час тертя та зношування по металевим поверхнях контртіл

Кореляційний зв'язок	Коефіцієнт кореляцій (r_p)	t_p	z_p	Ступінь лінійності			Ступінь нелінійності		
				$\xi_1(r)$	$\xi_1(t)$	$\xi_1(z)$	$\xi_2(r)$	$\xi_2(t)$	$\xi_2(z)$
$HB \sim (\sqrt{m_0})_2$	-0,4020	-1,583	-0,426	0,782	0,733	0,753	**1,278**	**1,365**	**1,328**
$HB \sim I_1 (S_1)$	-0,1930	-0,709	-0,196	0,376	0,328	0,345	**2,663**	**3,046**	**2,895**
$HB \sim I_2 (S_2)$	-0,1690	-0,618	-0,171	0,329	0,286	0,302	**3,041**	**3,494**	**3,316**
$HB \sim \mu_1 (S_1)$	-0,2217	-0,820	-0,225	0,431	0,380	0,398	**2,318**	**2,635**	**2,510**
$HB \sim \mu_2 (S_2)$	-0,1610	-0,588	-0,162	0,313	0,272	0,287	**3,192**	**3,672**	**3,484**
$HB \sim \Delta_{21}$	-0,2118	-0,781	-0,215	0,412	0,362	0,380	**2,426**	**2,764**	**2,631**
$(\sqrt{m_0})_1 \sim (\sqrt{m_0})_2$	**0,7354**	**3,913**	**0,940**	**1,431**	**1,812**	**1,662**	0,699	0,552	0,602
$(\sqrt{m_0})_1 \sim I_1 (S_1)$	0,3372	1,291	0,351	0,656	0,598	0,619	**1,524**	**1,673**	**1,615**
$(\sqrt{m_0})_1 \sim I_2 (S_2)$	0,2983	1,127	0,308	0,580	0,522	0,544	**1,723**	**1,917**	**1,839**
$\Delta_{21} \sim I_1 (S_1)$	0,5019	2,092	0,552	0,977	0,969	0,975	**1,024**	**1,032**	**1,026**
$\Delta_{21} \sim I_2 (S_2)$	0,4744	1,943	0,516	0,923	0,900	0,911	**1,083**	**1,112**	**1,097**
$\Delta_{21} \sim (\sqrt{m_0})_2$	**0,5898**	**2,633**	**0,677**	**1,148**	**1,219**	**1,197**	0,871	0,820	0,836
$I_1 (S_1) \sim I_2 (S_2)$	**0,9978**	**54,266**	**3,406**	**1,942**	**25,123**	**6,018**	0,515	0,040	0,166
$(\sqrt{m_0})_1 \sim \mu_1 (S_1)$	**0,5614**	**2,446**	**0,635**	**1,092**	**1,132**	**1,120**	0,915	0,883	0,893
$(\sqrt{m_0})_1 \sim \mu_2 (S_2)$	0,4691	1,915	0,509	0,913	0,887	0,899	**1,096**	**1,128**	**1,112**
$\Delta_{21} \sim \mu_1 (S_1)$	0,4723	1,932	0,513	0,919	0,894	0,907	**1,088**	**1,118**	**1,103**
$\Delta_{21} \sim \mu_2 (S_2)$	0,1630	0,596	0,165	0,317	0,276	0,291	**3,153**	**3,626**	**3,441**

Таблиця 4

Кореляційний аналіз (α=0,01) протизносних та антифрикційних властивостей композиту флубон-15(20) під час тертя та зношування по металевих поверхнях контртіл

Кореляційний зв'язок	Коефіцієнт кореляцій (r_p)	t_p	z_p	Ступінь лінійності			Ступінь нелінійності		
				$\xi_1(r)$	$\xi_1(t)$	$\xi_1(z)$	$\xi_2(r)$	$\xi_2(t)$	$\xi_2(z)$
НВ ~ $(\sqrt{m_0})_2$	-0,4020	-1,583	-0,426	0,627	0,526	0,572	**1,595**	**1,903**	**1,748**
НВ ~ I_1 (S_1)	-0,1930	-0,709	-0,196	0,301	0,236	0,262	**3,322**	**4,247**	**3,811**
НВ ~ I_2 (S_2)	-0,1690	-0,618	-0,171	0,264	0,205	0,229	**3,794**	**4,872**	**4,365**
НВ ~ μ_1 (S_1)	-0,2217	-0,820	-0,225	0,346	0,272	0,303	**2,892**	**3,674**	**3,304**
НВ ~ μ_2 (S_2)	-0,1610	-0,588	-0,162	0,251	0,195	0,218	**3,982**	**5,121**	**4,586**
НВ ~ Δ_{21}	-0,2118	-0,781	-0,215	0,330	0,259	0,289	**3,027**	**3,855**	**3,463**
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ $(\sqrt{m_0})_2$	**0,7354**	**3,913**	**0,940**	**1,147**	**1,299**	**1,263**	0,872	0,770	0,792
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ I_1 (S_1)	0,3372	1,291	0,351	0,526	0,429	0,471	**1,901**	**2,332**	**2,122**
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ I_2 (S_2)	0,2983	1,127	0,308	0,465	0,374	0,413	**2,149**	**2,673**	**2,421**
Δ_{21} ~ I_1 (S_1)	0,5019	2,092	0,552	0,783	0,695	0,741	**1,277**	**1,440**	**1,350**
Δ_{21} ~ I_2 (S_2)	0,4744	1,943	0,516	0,740	0,645	0,693	**1,351**	**1,550**	**1,444**
Δ_{21} ~ $(\sqrt{m_0})_2$	0,5898	2,633	0,677	0,920	0,874	0,910	**1,087**	**1,144**	**1,100**
I_1 (S_1) ~ I_2 (S_2)	**0,9978**	**54,266**	**3,406**	**1,556**	**18,017**	**4,573**	0,643	0,056	0,219
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ μ_1 (S_1)	0,5614	2,446	0,635	0,876	0,812	0,852	**1,142**	**1,231**	**1,173**
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ μ_2 (S_2)	0,4691	1,915	0,509	0,732	0,636	0,683	**1,367**	**1,573**	**1,464**
Δ_{21} ~ μ_1 (S_1)	0,4723	1,932	0,513	0,737	0,641	0,689	**1,357**	**1,559**	**1,452**
Δ_{21} ~ μ_2 (S_2)	0,1630	0,596	0,165	0,254	0,198	0,221	**3,933**	**5,057**	**4,529**

5. Мінорантний ряд кореляційних зв'язків (рівень значущості **α=0,05**) за ступенем **нелінійності** для композиту флубон-ДМ:

[Δ_{21}~$(\sqrt{m_0})_2$]>[НВ~Δ_{21}]>[НВ~$I_1(S_1)$]>[НВ~$\mu_1(S_1)$]>

$\xi_2(r)$: > 39,229 > 14,395 > 3,576 > 3,311 >
$\xi_2(t)$: 45,727 > 16,770 > 4,126 > 3,813 >
$\xi_2(z)$: 43,196 > 15,845 > 3,911 >3,617 >

[НВ ~ I_2 (S_2)] > [$(\sqrt{m_0})_1$ ~ I_1 (S_1)] >[НВ ~ μ_2 (S_2)] >

$\xi_2(r)$: > 3,068 > 2,767 > 2,059 >
$\xi_2(t)$: > 3,526 > 3,170 > 2,324 >
$\xi_2(z)$: > 3,347 > 3,012 > 2,219 >

[Δ_{21}~$\mu_2(S_2)$]>[$(\sqrt{m_0})_1$~$I_2(S_2)$]>[НВ~$(\sqrt{m_0})_2$] >

$\xi_2(r)$: > 1,825 > 1,808 > 1,492 >
$\xi_2(t)$: > 2,041 > 2,021 > 1,633 >
$\xi_2(z)$: > 1,955 > 1,936 > 1,576 >

[$(\sqrt{m_0})_1$~$\mu_1(S_1)$] > [Δ_{21}~$I_1(S_1)$] > [Δ_{21}~$\mu_1(S_1)$] >

$\xi_2(r)$: > 1,471 > 1,110 > 1,095 >
$\xi_2(t)$: > 1,607 > 1,148 > 1,127 >
$\xi_2(z)$: > 1,551 > 1,130 > 1,111 >

[$(\sqrt{m_0})_1$~$\mu_2(S_2)$]>[Δ_{21}~$I_1(S_1)$]>[$I_1(S_1)$~$I_2(S_2)$] >

$\xi_2(r)$: > 0,995 > 0,969 > 0,658 >
$\xi_2(t)$: > 0,994 > 0,957 > 0,480 >
$\xi_2(z)$: > 0,990 > 0,958 > 0,540 >

[$(\sqrt{m_0})_1$ ~ $(\sqrt{m_0})_2$].

$\xi_2(r)$: > 0,654.
$\xi_2(t)$: > 0,472.
$\xi_2(z)$: > 0,534.

6. Мажорантний ряд кореляційних зв'язків (рівень значущості **α=0,05**) за ступенем **лінійності** для композиту флубон-ДМ:

[Δ_{21}~$(\sqrt{m_0})_2$]<[НВ~Δ_{21}]<[НВ~$I_1(S_1)$]<[НВ~$\mu_1(S_1)$]<

$\xi_1(r)$: 0,026 < 0,070 < 0,280 < 0,302 <
$\xi_1(t)$: 0,023 < 0,060 < 0,242 < 0,262 <
$\xi_1(z)$: 0,023 < 0,063 < 0,256 < 0,277 <

[НВ ~ I_2 (S_2)] < [$(\sqrt{m_0})_1$ ~ I_1 (S_1)] <[НВ ~ μ_2 (S_2)] <

$\xi_1(r)$: 0,326 < 0,361 < 0,486 <
$\xi_1(t)$: < 0,284 < 0,316 < 0,430 <
$\xi_1(z)$: < 0,299 < 0,332 < 0,451 <

[Δ_{21}~μ_2 (S_2)] < [($\sqrt{m_0}$)$_1$~I_2 (S_2)] < [HB~($\sqrt{m_0}$)$_2$] <

ξ_1(r): < 0,548 < 0,553 < 0,670 <
ξ_1(t): < 0,490 < 0,495 < 0,612 <
ξ_1(z): < 0,511 < 0,516 < 0,635 <

[($\sqrt{m_0}$)$_1$~μ_1 (S_1)] < [Δ_{21}~I_1 (S_1)] < [[Δ_{21}~μ_1 (S_1)] <

ξ_1(r): < 0,680 < 0,901 < 0,914 <
ξ_1(t): < 0,622 < 0,872 < 0,888 <
ξ_1(z): < 0,645 < 0,885 < 0,900 <

[($\sqrt{m_0}$)$_1$~μ_2(S_2)] < [Δ_{21}~I_2 (S_2)] < [I_1 (S_1)~I_2 (S_2)] <

ξ_1(r): < 1,005 < 1,032 < 1,519 <
ξ_1(t): < 1,007 < 1,045 < 2,085 <
ξ_1(z): < 1,010 < 1,044 < 1,850 <

[($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ ($\sqrt{m_0}$)$_2$].

ξ_2(r): < 1,528.
ξ_2(t): < 2,117.
ξ_2(z): < 1,871.

7. Мінорантний ряд кореляційних зв'язків (рівень значущості **α=0,01**) за ступенем **нелінійності** для композиту флубон-ДМ:

[Δ_{21}~($\sqrt{m_0}$)$_2$]>[HB~Δ_{21}]>[HB~I_1(S_1)]>[HB~μ_1(S_1)]>

ξ_2(r): > 48,939 > 17,958 > 4,461 > 4,131 >
ξ_2(t): 63,764 > 23,385 > 5,753 > 5,317 >
ξ_2(z): 56,859 > 20,857 > 5,148 > 4,761 >

[HB ~ I_2 (S_2)] > [($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ I_1 (S_1)] >[HB ~ μ_2 (S_2)] >

ξ_2(r): > 3,828 > 3,452 > 2,569 >
ξ_2(t): > 4,917 > 4,420 > 3,241 >
ξ_2(z): > 4,405 > 3,965 > 2,921 >

[Δ_{21}~μ_2(S_2)]>[($\sqrt{m_0}$)$_1$~I_2(S_2)]>[HB~($\sqrt{m_0}$)$_2$] >

ξ_2(r): > 2,277 > 2,256 > 1,862 >
ξ_2(t): > 2,847 > 2,818 > 2,277 >
ξ_2(z): > 2,574 > 2,549 > 2,075 >

[($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ μ_1 (S_1)] > [Δ_{21} ~ I_1 (S_1)] > [Δ_{21} ~ μ_1 (S_1)] >

ξ_2(r): > 1,835 > 1,385 > 1,366 >
ξ_2(t): > 2,240 > 1,600 > 1,571 >
ξ_2(z): > 2,042 > 1,487 > 1,462 >

[($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ μ_2 (S_2)] > [Δ_{21} ~ I_2 (S_2)] >

ξ_2(r): > 1,242 > 1,209 >
ξ_2(t): > 1,385 > 1,335 >
ξ_2(z): > 1,304 > 1,261 >

[I_1 (S_1 ~ I_2 (S_2)] > [($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ ($\sqrt{m_0}$)$_2$].

ξ_2(r): 0,821 > 0,816.
ξ_2(t): 0,669 > 0,659.
ξ_2(z): 0,711 > 0,703.

8. Мажорантний ряд кореляційних зв'язків (рівень значущості **α=0,01**) за ступенем **лінійності** для композиту флубон-ДМ:

[Δ_{21}~($\sqrt{m_0}$)$_2$]<[HB~Δ_{21}]<[HB~I_1(S_1)]<[HB~μ_1(S_1)]

ξ_1(r): 0,020 < 0,056 < 0,224 < 0,242 <
ξ_1(t): 0,016 < 0,043 < 0,174 < 0,188 <
ξ_1(z): 0,018 < 0,048 < 0,194 < 0,210 <

[HB ~ I_2 (S_2)] < [($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ I_1 (S_1)] <[HB ~ μ_2 (S_2)] <

ξ_1(r): 0,261 < 0,290 < 0,389 <
ξ_1(t): < 0,203 < 0,226 < 0,309 <
ξ_1(z): < 0,227 < 0,252 < 0,342 <

[Δ_{21}~μ_2 (S_2)] < [($\sqrt{m_0}$)$_1$~I_2 (S_2)] < [HB~($\sqrt{m_0}$)$_2$] <

ξ_1(r): < 0,439 < 0,443 < 0,537 <
ξ_1(t): < 0,351 < 0,355 < 0,439 <
ξ_1(z): < 0,389 < 0,392 < 0,482 <

[($\sqrt{m_0}$)$_1$~μ_1 (S_1)] < [Δ_{21}~I_1 (S_1)] < [[Δ_{21}~μ_1 (S_1)] <

ξ_1(r): < 0,545 < 0,722 < 0,732 <
ξ_1(t): < 0,446 < 0,625 < 0,637 <
ξ_1(z): < 0,490 < 0,672 < 0,684 <

[($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ μ_2 (S_2)] < [Δ_{21} ~ I_2 (S_2)] <

ξ_1(r): < 0,806 < 0,828 <
ξ_1(t): < 0,722 < 0,749 <
ξ_1(z): < 0,767 < 0,793 <

[I_1 (S_1) ~ I_2 (S_2)] < [($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ ($\sqrt{m_0}$)$_2$].

ξ_2(r): < 1,218 < 1,225.
ξ_2(t): < 1,496 < 1,518.
ξ_2(z): < 1,406 < 1,422.

2.3. Загальний аналіз результатів досліджень.

1. Як видно з табл. 3 і 4, твердість НВ поверхонь металевих контртіл без та з покриттями має нелінійні кореляційні зв'язки – **нелінійно** впливає на шорсткість ($\sqrt{m_0}$)$_2$ цих поверхонь після 22 км тертя та зношування, питому інтенсивність об'ємного зношування I_1 та коефіцієнт тертя μ_1 у режимі надграничних навантажень (S_1=0…2 км) та питому інтенсивність об'ємного зношування I_2 та коефіцієнт тертя μ_2 у режимі граничних навантажень (S_2=2…22 км) та приріст шорсткості поверхонь контртіл Δ_{2-1}=($\sqrt{m_0}$)$_2$–($\sqrt{m_0}$)$_1$ зі **ступенями нелінійності ξ_2:**

- від 1,278 до 1,365 (для зв'язку НВ ~ ($\sqrt{m_0}$)$_2$) та від 2,318 до 3,672 (для зв'язків НВ~I_1, НВ~I_2, НВ~μ_1, НВ~μ_2, НВ~Δ_{2-1}) під час випробувань полімерного композиту на основі ПТФЕ + 20% УТМ-8 [флубон-15(20)];
- від 1,492 до 1,633 (для зв'язку НВ ~ ($\sqrt{m_0}$)$_2$) та від 2,059 до 16,770 (для зв'язків НВ~I_1, НВ~I_2, НВ~μ_1, НВ~μ_2, НВ~Δ_{2-1}) під час випробувань полімерного композиту на основі ПТФЕ + 12,5% УТМ-8 + 12,5% MoS_2 (флубон-ДМ).

Тут наявно видно за силою цих нелінійних зв'язків нерівність за ξ_2: [флубон-15(20)] < [флубон-ДМ].

2. Між вихідною шорсткістю ($\sqrt{m_0}$)$_1$ та шорсткістю ($\sqrt{m_0}$)$_2$ поверхонь контртіл, що утворилася в процесі 22 км тертя та зношування, існує надійний **лінійний зв'язок** зі ступенем лінійності ξ_1 від 1,431 до 1,812 під час випробувань флубона-15(20) та від 1,528 до 2,117 – флубона-ДМ (наявна нерівність за ξ_1: [флубон-15(20)] < [флубон-ДМ]), при цьому, так як $r_{x,y} > 0$, то зменшення вихідної шорсткості ($\sqrt{m_0}$)$_1$ приводить до зменшення шорсткості ($\sqrt{m_0}$)$_2$, що утворилась на поверхні контртіла після тертя та зношування полімерного композиту.

Таблиця 5

Кореляційний аналіз (α=0,05) протизносних та антифрикційних властивостей композиту флубон-ДМ під час тертя та зношування по металевих поверхнях контртіл

Кореляційний зв'язок	Коефіцієнт кореляцій (r_p)	t_p	z_p	Ступінь лінійності			Ступінь нелінійності		
				$\xi_1(r)$	$\xi_1(t)$	$\xi_1(z)$	$\xi_2(r)$	$\xi_2(t)$	$\xi_2(z)$
НВ ~ $(\sqrt{m_0})_2$	-0,3444	-1,323	-0,359	0,670	0,612	0,635	**1,492**	**1,633**	**1,576**
НВ ~ I_1 (S_1)	-0,1437	-0,524	-0,145	0,280	0,242	0,256	**3,576**	**4,126**	**3,911**
НВ ~ I_2 (S_2)	-0,1675	-0,613	-0,169	0,326	0,284	0,299	**3,068**	**3,526**	**3,347**
НВ ~ μ_1 (S_1)	0,1552	0,566	0,157	0,302	0,262	0,277	**3,311**	**3,813**	**3,617**
НВ ~ μ_2 (S_2)	-0,2496	-0,929	-0,255	0,486	0,430	0,451	**2,059**	**2,324**	**2,219**
НВ ~ Δ_{21}	0,0357	0,129	0,036	0,070	0,060	0,063	**14,395**	**16,770**	**15,845**
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ $(\sqrt{m_0})_2$	**0,7853**	**4,573**	**1,059**	**1,528**	**2,117**	**1,871**	0,654	0,472	0,534
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ I_1 (S_1)	0,1857	0,681	0,188	0,361	0,316	0,332	**2,767**	**3,170**	**3,012**
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ I_2 (S_2)	0,2842	1,069	0,292	0,553	0,495	0,516	**1,808**	**2,021**	**1,936**
$\Delta_{2\text{-}1}$ ~ I_1 (S_1)	0,4628	1,882	0,501	0,901	0,872	0,885	**1,110**	**1,148**	**1,130**
Δ_{21} ~ I_2 (S_2)	**0,5305**	**2,256**	**0,591**	**1,032**	**1,045**	**1,044**	0,969	0,957	0,958
Δ_{21} ~ $(\sqrt{m_0})_2$	-0,0131	-0,047	-0,013	0,026	0,023	0,023	**39,229**	**45,727**	**43,196**
I_1 (S_1) ~ I_2 (S_2)	**0,7807**	**4,504**	**1,047**	**1,519**	**2,085**	**1,850**	0,658	0,480	0,540
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ μ_1 (S_1)	0,3494	1,345	0,365	0,680	0,622	0,645	**1,471**	**1,607**	**1,551**
$(\sqrt{m_0})_1$ ~ μ_2 (S_2)	**0,5164**	**2,174**	**0,571**	**1,005**	**1,007**	**1,010**	0,995	0,994	0,990
Δ_{21} ~ μ_1 (S_1)	-0,4695	-1,917	-0,509	0,914	0,888	0,900	**1,095**	**1,127**	**1,111**
Δ_{21} ~ μ_2 (S_2)	0,2816	1,058	0,289	0,548	0,490	0,511	**1,825**	**2,041**	**1,955**

3. Вихідна шорсткість $(\sqrt{m_0})_1$ поверхні контртіла та приріст шорсткості її у процесі тертя Δ_{2-1} нелінійно впливають на питому інтенсивність об'ємного зношування I_1 та I_2 зі ступенем нелінійності ξ_2=1,024-1,917 під час випробувань зразків полімерного композиту флубон-15(20) та ξ_2=1,110-3,170 під час випробувань зразків полімерного композиту флубон-ДМ (як бачимо зберігається нерівність за ξ_2 ([флубон-15(20)] < [флубон-ДМ]), за виключенням зв'язку Δ_{21} ~ I_2 для флубону-ДМ, для якого спостерігається лінійна залежність зі ступенем лінійності ξ_1=1,032-1,045 та $r_{x,y} > 0$.

4. Якщо для композиту флубон-15(20) існує лінійний зв'язок між вихідною шорсткістю поверхні контртіла $(\sqrt{m_0})_1$ та коефіцієнтом тертя μ_1 у режимі надграничних навантажень (S_1=0…2 км) зі ступенем лінійності ξ_1=1,092-1,132, а між вихідною шорсткістю поверхні контртіла $(\sqrt{m_0})_1$ та коефіцієнтом тертя μ_2 у режимі критичних навантажень (S_2=2…22 км), приростом шорсткості поверхні контртіла Δ_{2-1} та коефіцієнтом тертя μ_1 та μ_2 існують нелінійні зв'язки зі ступенем нелінійності ξ_2=1,088-3,626, то для композиту флубон-ДМ між вихідною шорсткістю поверхні контртіла та коефіцієнтом тертя μ_2 у режимі критичних навантажень існує лінійний зв'язок зі ступенем лінійності ξ_1=1,005-1,008, а між $(\sqrt{m_0})_1$ та μ_1 та приростом шорсткості Δ_{21} поверхні контртіла у процесі тертя та зношування за 22 км та коефіцієнтами тертя μ_1 та μ_2 у режимі надграничних μ_1 та граничних μ_2 навантажень існують нелінійні зв'язки зі ступенем нелінійності ξ_2=1,095-2,041 (тут нерівність за ξ_2 інша: [флубон-15(20)] > [флубон-ДМ]).

5. Відмітимо також, що під час випробувань композиту флубон-15(20) приріст шорсткості поверхні контртіла Δ_{2-1} в процесі тертя та зношування лінійно змінює шорсткість поверхні контр-

тіла ($\sqrt{m_0}$)$_2$, що утворилася в процесі тертя та зношування за 22 км, зі ступенем рівності ξ_1=1,148-1,219, у той же час при випробуваннях композиту флубон-ДМ цей зв'язок сильно нелінійний (ξ_2= 39,229-45,727). Цікаво, що між інтенсивністю зношування I_1 в режимі надграничних навантажень та I_2 в режимі граничних навантажень існує лінійний зв'язок зі ступенем лінійності ξ_1=1,942-25,301 [для композиту флубон-15(20)] та ξ_1=1,519-2,085 (для композиту флубон-ДМ) при нерівності за ξ_1: [флубон-15(20)] > [флубон-ДМ], при цьому коефіцієнти кореляцій для обох матеріалів $r_{x,y} > 0$, тобто під час менших I_1 (в режимі надграничних навантажень) спостерігаються і менші I_2 (в режимі граничних навантажень), хоча така закономірність відповідає більш високим питомим навантаженням як під час випробувань у першому, так і другому режимі, що говорить про ефект післядії впливу попередніх фізико-хімічних і механічних процесів на наступні процеси.

2.4. Індивідуальний аналіз результатів досліджень.

1. Як видно з табл. 1 і 2, контртіла (метали та стопи) без покриття за зносостійкістю (відносна характеристика) полімерного композиту на основі ПТФЕ [$(1/I_i)$, $x10^{-3}$] можна розташувати у такі мажорантні ряди:

а) +20% карбонізованого волокна УТМ-8:

- S_1=0…2 км (надграничні питомі навантаження): (Al-Cu-Mg-Mn)<<(Fe-C)<Ti<(Cu-Zn-Pb)<(Ti-Zr), 0,2<<5,6<9,1<12,7<15,4;
- S_2=2…22 км (граничні питомі навантаження): (Al-Cu-Mg-Mn)<<(Fe-C)<Ti<(Ti-Zr)<(Cu-Zn-Pb), 0,2<<43,7<63,3<74,1<80,7;

б) +12,5% УТМ-8 + 12,5% MoS_2:

- S_1=0…2 км (надграничні питомі навантаження): (Al-Cu-Mg-Mn)<Ti<<(Fe-C)<(Cu-Zn-Pb)<(Ti-Zr), 0,3<0,5<<5,3<8,9<26,2;
- S_2=2…22 км (граничні питомі навантаження): (Al-Cu-Mg-Mn)<<Ti<(Fe-C)<(Ti-Zr)<(Cu-Zn-Pb), 0,3<<11,6<39,1<96,2<208,3.

Таблиця 6

Кореляційний аналіз (α=0,01) протизносних та антифрикційних властивостей композиту флубон-ДМ під час тертя та зношування по металевих поверхнях контртіл

Кореляційний зв'язок	Коефіцієнт кореляцій (r_p)	t_p	z_p	Ступінь лінійності			Ступінь нелінійності		
				$\xi_1(r)$	$\xi_1(t)$	$\xi_1(z)$	$\xi_2(r)$	$\xi_2(t)$	$\xi_2(z)$
НВ ~ ($\sqrt{m_0}$)$_2$	-0,3444	-1,323	-0,359	0,537	0,439	0,482	**1,862**	**2,277**	**2,075**
НВ ~ I_1 (S_1)	-0,1437	-0,524	-0,145	0,224	0,174	0,194	**4,461**	**5,753**	**5,148**
НВ ~ I_2 (S_2)	-0,1675	-0,613	-0,169	0,261	0,203	0,227	**3,828**	**4,917**	**4,405**
НВ ~ μ_1 (S_1)	0,1552	0,566	0,157	0,242	0,188	0,210	**4,131**	**5,317**	**4,761**
НВ ~ μ_2 (S_2)	-0,2496	-0,929	-0,255	0,389	0,309	0,342	**2,569**	**3,241**	**2,921**
НВ ~ Δ_{21}	0,0357	0,129	0,036	0,056	0,043	0,048	**17,958**	**23,385**	**20,857**
($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ ($\sqrt{m_0}$)$_2$	**0,7853**	**4,573**	**1,059**	**1,225**	**1,518**	**1,422**	0,816	0,659	0,703
($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ I_1 (S_1)	0,1857	0,681	0,188	0,290	0,226	0,252	**3,452**	**4,420**	**3,965**
($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ I_2 (S_2)	0,2842	1,069	0,292	0,443	0,355	0,392	**2,256**	**2,818**	**2,549**
Δ_{21} ~ I_1 (S_1)	0,4628	1,882	0,501	0,722	0,625	0,672	**1,385**	**1,600**	**1,487**
Δ_{21} ~ I_2 (S_2)	0,5305	2,256	0,591	0,828	0,749	0,793	**1,209**	**1,335**	**1,261**
Δ_{21} ~ ($\sqrt{m_0}$)$_2$	-0,0131	-0,047	-0,013	0,020	0,016	0,018	**48,939**	**63,764**	**56,859**
I_1 (S_1) ~ I_2 (S_2)	**0,7807**	**4,504**	**1,047**	**1,218**	**1,496**	**1,406**	0,821	0,669	0,711
($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ μ_1 (S_1)	0,3494	1,345	0,365	0,545	0,446	0,490	**1,835**	**2,240**	**2,042**
($\sqrt{m_0}$)$_1$ ~ μ_2 (S_2)	0,5164	2,174	0,571	0,806	0,722	0,767	**1,242**	**1,385**	**1,304**
Δ_{21} ~ μ_1 (S_1)	-0,4695	-1,917	-0,509	0,732	0,637	0,684	**1,366**	**1,571**	**1,462**
Δ_{21} ~ μ_2 (S_2)	0,2816	1,058	0,289	0,439	0,351	0,389	**2,277**	**2,847**	**2,574**

Як бачимо, розташування металевих контртіл без покриття в мажорантних рядах за зносостійкістю полімерних композитів якісно не змінюються й після додаткового введення у композит на основі ПТФЕ + УТМ-8 порошку твердого мастила MoS_2 (лише змінюються кількісні співвідношення) як в режимі надграничних, так і граничних навантажень.

2. Cr-покриття поверхні контртіла мосяжа ЛС 59-1 **збільшує** I_1 у 1,61 рази під час випробування флубон-15(20) та у 3,43 рази під час випробування флубон-ДМ та **зменшує** I_2 у 3,02 рази [флубон-15(20)] та у 1,45 рази (флубон-ДМ), у той же час Cr-покриття поверхні контртіла алюмінієвого стопу Д-16 **знижує** I_1 флубону-15(20) у 11,91 раз, а флубону-ДМ – у 4,44 рази під час випробувань у режимі надграничних питомих навантажень, а також **знижує** I_2 флубону-15(20) у 41,25 рази, а флубону-ДМ – у 108,43 рази під час випробувань у режимі граничних питомих навантажень, тобто роль MoS_2 в полімерному композиті не є однозначною.

3. Оксидація поверхні контртіла – алюмінієвого стопу Д-16 без чи разом з частинками MoS_2 приводить до **зменшення** I_1 флубону-15(20) у 17,80 рази та у 18,91 рази відповідно до покривної технології, а композиту флубон-ДМ – у 15,62 рази та у 17,50 рази відповідно до покривної технології під час випробувань у режимі надграничних питомих навантажень, та **зменшує** I_2 флубону-15(20) у 253,85 рази і 275,0 рази відповідно до покривної технології та флубону-ДМ – у 837,2 рази і 642,9 рази відповідно до покривної технології під час випробувань у режимі граничних питомих навантажень. Таким чином, оксидація і, особливо, оксидація у присутності MoS_2 поверхні контртіла – алюмінієвого стопу Д-16, є високоефективним методом підвищення зносостійкості карбопластиків без і, особливо, з наповнювачем MoS_2.

4. Оксидація поверхні контртіла – титанового стопу ВТ 1-00 приводить до значно меншого ефекту, ніж алюмінієвого стопу Д-16: I_1 флубону-15(20) **зменшується** у 1,15 рази та для флубону-ДМ – у 1,03 рази під час випробувань у режимі надграничних питомих навантажень та I_2 **зменшується** для флубону-15(20) у 1,53 рази та у 1,13 рази для флубону-ДМ під час випробувань у режимі граничних питомих навантажень.

5. Для контртіла стопу Ti-Zr (РК-20) оксидація поверхні приводить до **зменшення** I_1 флубону-15(20) у 1,75 рази, а флубону-ДМ – у 1,44 рази під час випробувань у режимі надграничних питомих навантажень та **зменшення** I_2 флубону-15(20) у 1,96 рази, а флубону-ДМ – у 1,39 рази під час випробувань у режимі граничних питомих навантажень, у той же час покриття поверхні РК-20 Ti–N (висока НВ) привело до **зниження** I_1 флубону-15(20) у 2,0 рази, а флубону-ДМ – у 1,57 рази під час випробувань у режимі надграничних питомих навантажень та до **зниження** I_2 флубону-15(20) у 2,60 рази, а флубону-ДМ – у 2,36 рази під час випробувань у режимі граничних питомих навантажень.

6. Доповнюючи висновки [28], зауважимо, що внаслідок лазерної обробки поверхні мікротвердість зони лазерного впливу збільшилася від 3,5 до 7,6-9,3 ГПа (для титанового стопу ВТ 1-00), від 3,3 до 5,3 ГПа [для титано-алюмінієвого стопу ПТ-3В (4% Al + 2% V)] і від 3,3-3,9 до 6,8-11,0 ГПа (для титано-цирконієвого стопу РК-20), при цьому структура обробленої зони ВТ 1-00 складалася із кількох шарів: верхній – зона стоплення з $H_{100} \sim 8$ ГПа, нижній – зона термічного впливу з $H_{100} \sim 6$ ГПа.

7. Зміцнення поверхневих шарів титанових стопів у зоні стоплення, ймовірно всього, пов'язане з насиченням поверхні стопу нітроґеном та оксиґеном, внаслідок чого утворюються нітриди і оксиди титану. Зміцнення поверхні в зоні термічного впливу пов'язане з інтенсивною термодеструкцією і рекристалізацією, що зменшує розмір зерна і перешкоджає переміщенню дислокацій.

8. Під час лазерної обробки поверхонь стопів, внаслідок нестабільності переміщення лазерного променю по поверхні, зона стоплення характеризується порушенням начальної шорсткості і нерівномірним розподілом мікронерівностей, що впливало на початковий період тертя (табл. 3 і 4). Для композиту на основі поліміду + 20% ґрафітованого волокна ТГН-2м зносостійкість у начальний період збільшувалася у 3,3 рази (для РК-20) і 5,5 рази (для ВТ 1-00), порівняно з композитом на основі ПТФЕ + 20% карбонізованого вуглецевого волокна. Для основного періоду тертя лазерне зміцнення не вносить суттєвих змін, порівняно з оксидуванням (табл. 3 і 4).

При переході від тертя без мащення до тертя у дистильованій воді інтенсивність зношування композиту по стопах РК-20 і ВТ 1-00 після лазерного зміцнення збільшується від 2 до 12 разів [28].

Така технологія зміцнення поверхні Ti- та Ti-Zr-стопів (контртіл) приводить до **збільшення** I_1 флубону-15(20) у 1,61 рази (Ti-стоп) та у 1,48 рази (Ti-Zr-стоп), а I_1 флубону-ДМ **зменшується** у 1,13 рази (Ti-стоп) та **збільшується** у 1,40 рази (Ti-Zr-стоп) під час випробувань у режимі надграничних питомих навантажень, при цьому I_2 флубону-15(20) **збільшується** у 3,21 рази (Ti-стоп) та **зменшується** у 1,90 рази (Ti-Zr-стоп), а для флубону-ДМ I_2 **зменшується** у 1,37 рази (Ti-стоп) та у 1,49 рази (Ti-Zr-стоп) під час випробувань у режимі граничних питомих навантажень.

Покриття поверхні контртіла сталі 45 цинком привело до **зниження** I_1 флубону-15(20) у 6,99 рази та флубону-ДМ – у 4,41 рази під час випробувань у режимі надграничних питомих навантажень та до **зниження** I_2 флубону-15(20) у 7,90 рази, а флубону-ДМ – у 36,57 рази під час випробувань у режимі граничних питомих навантажень.

Висновки

1. Пошук кореляційних зв'язків між питомими інтенсивностями об'ємного зношування (I_i), коефіцієнтами тертя (μ_i) карбоволокниту, отриманого за ХМА-технологією з політетрафторетилену + 20% карбонізованого за 1123 К гідратцелюлозного волокна, твердістю (НВ), вихідною $(\sqrt{m_0})_1$ та утвореною в процесі тертя та зношування $(\sqrt{m_0})_2$ та приростом шорсткості $(\sqrt{m_0})_i$ поверхні металевого контртіла на основі сталі 45, мідних, алюмінієвих, титанових стопів без та з хромовим, оксидним, цинковим, MoS_2, TiN – покриттями під час випробувань у режимах надвисоких [μ_1, I_1] і високих [μ_2, I_2] питомих навантажень показало, лише між: вихідною $(\sqrt{m_0})_1$ та утвореною в процесі тертя та зношування $(\sqrt{m_0})_2$ шорсткостями поверхонь; зміною шорсткості ($\Delta_{2\text{-}1}$) та шорсткістю $(\sqrt{m_0})_2$, утвореною в процесі тертя та зношування; інтенсивностями об'ємного зношування в режимах надвисоких (I_1) та високих (I_2) питомих навантажень; коефіцієнтом тертя в режимі надвисоких питомих навантажень (μ_1) та вихідною шорсткістю поверхонь $(\sqrt{m_0})_1$, існує тісний лінійний зв'язок, у решти випадків між величинами існує надійний нелінійний зв'язок.

2. Природа металевих стопів контртіла без покриття впливає на знососійкість полімерного композиту таким чином (у ряду зносостійкість зростає зліва направо): Al << Fe < Ti < Ti–Zr < Cu (у режимі високих навантажень).

3. Хромові, цинкові покриття, оксидація поверхні металічного контртіла може приводити до збільшення або зменшення зносостійкості суміжного полімерного композиційного матеріалу, при цьому режим оксидації поверхні (звичайний або за лазерною технологією) значно впливає на зносостійкість композиту.

4. Введення у покриття металевої поверхні контртіла мікрочастинок твердих мастил (MoS_2, TiN) приводить до збільшення зносостійкості полімерного композиційного матеріалу.

Література

1. А.А. Конкин, Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы (Химия, Москва, 1974).
2. А.А. Конкин, Термостойкие и негорючие волокна. Жаростойкие углеродные волокна (Химия, Москва, 1978).
3. Г.А. Сиренко, В.П. Свидерский, В.Д. Герасимов, В.З. Никонов, Антифрикционные термостойкие полимеры (Техніка, Київ, 1978).
4. Г.А. Сиренко, Антифрикционные карбопластики (Техніка, Київ, 1985).
5. Г.О. Сіренко, Створення антифрикційних матеріалів на основі порошків термотривких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. … докт. техн. наук (Ін-т проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ, Київ, 1997).
6. J.P. Giltrow, J.D. Lancaster, Nature, 214 (5093), 1106 (1967).
7. J.P. Giltrow, J.D. Lancaster, Wear, 16 (5), 359 (1970).
8. T. Tzukizoe, N. Ohmae, Tribolog. International, 8 (4), 171 (1975).
9. T. Tzukizoe, N. Ohmae, Proc. Intern. Conf. on Wear of materials (St. Luis: Amer. Soc. Mech. Eng., 1977), P. 518.
10. T. Tzukizoe, N. Ohmae, Frict. and Wear Polym. Compos., Amsterdam, 205 (1986).
11. T. Tzukizoe, N. Ohmae, Industrial Lubrication and Tribology, 28 (1), 19 (1976).
12. Z. Eliezer, V.D. Kxanna, M.F. Amateau, Wear, 51 (3), 169 (1978).
13. J. Metals and Mater, 2 (5), 285 (1968).
14. D. Play, M. Godet, Colleges Internationaux du C. N. R. S., 233 – Polimeres et Lubrification, (233), 413 (1975).
15. L. Eliezer, C.H. Romage, H.G. Rylander, R.H. Flowers, M.F. Amateau, Wear, 49 (1), 119 (1978).
16. J.D. Lancaster, Tribology International, 12, 65(1979).
17. I.C. Rosehnan, D. Tabor, J. Phys. D. Appl. Phys., 9 (17), 2517 (1976).
18. T. Tzukizoe, N. Ohmae, Trans. ASME, 99 (Ser.F, 4), 401 (1977).
19. E. Rabinowicz, Friction and wear of materials (Willey, New-York, 1965).
20. Г.О. Сіренко, Ю.Д. Пахомов, Фізика і хімія твердого тіла, 15 (2), 380 (2014).
21. Sung Nak-Ho, Suh Nam P., Wear, 53 (1), 129 (1979).
22. N.P. Suh, Wear, 5A, 5 (1974).
23. Betts Scott, Dackow John, Murray Frank, ASLE Proc. 2nd Int. Conf. Solid. Lubr. (Denver Colo, Park Ridge, 111, 1978), P. 195.
24. Г.О. Сіренко, Ю.Д. Пахомов, Фізика і хімія твердого тіла, 15 (1), 173 (2014).
25. Г.О. Сіренко, В.П. Свідерський, Л.Я. Мідак, О.С. Дробот, Проблеми трибології, 2, 63 (2004).
26. Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, В.П. Свідерський, Б.О. Таланкін, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, XV, 150 (2012).

27. Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак, В.П. Свідерський, О.С. Дробот, Л.В. Караванович, Фізика і хімія твердого тіла, 6 (2), 317 (2005).
28. Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак, В.П. Свідерський, Л.В. Базюк, Фізика і хімія твердого тіла, 6 (4), 692 (2005).
29. Г.О. Сіренко, Л.В. Базюк, Л.Я. Мідак, В.П. Свідерський, О.С. Дробот, Фізика і хімія твердого тіла, 10 (4), 929 (2009).
30. О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко, Металознавство (Політехніка, Київ, 2002).
31. П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм, Таблицы по математической статистике (Финансы и статистика, Москва, 1982).
32. М.Н. Степнов, Статистическая обработка результатов механических испытаний (Машиностроение, Москва, 1972).

Сіренко Геннадій Олександрович – доктор технічних наук, професор, академік Академії технологічних наук України, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії.

Солтис Любов Михайлівна – кандидат хімічних наук, член-кореспондент Академії технологічних наук України, викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії.

Складанюк Марія Богданівна – провідний інженер, старший лаборант кафедри неорганічної та фізичної хімії.

Сулима Ірина Володимирівна – аспірант кафедри неорганічної та фізичної хімії.