
ПЛАСТИКИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

УДК 620.1:678.07:678.01

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, Ю.Д. Пахомов

Вплив кута орієнтації вуглецевого волокна на інтенсивність зношування карбоволокнитів та карботекстолітів

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

Приведені результати досліджень впливу орієнтаційних структурних ефектів полімерних композитів на антифрикційні властивості та механізм зношування односпрямованих карбопластиків під час динамічного контакту з металевими поверхнями. Доведена оптимальна структура карбопластика та орієнтація шарів волокон та тканин у ньому відносно поверхні тертя і напрямку ковзання. Знайдені кореляційні зв'язки між кутом орієнтації вуглецевих волокон, твердістю контртіла і коефіцієнтом тертя та інтенсивністю об'ємного зношування полімерного композиту. Досліджено вплив схем армування волокнистими вуглецевими матеріалами полімерних композитів та схем контактування зразків таких композитів з поверхнею металевого контртіла на інтенсивність зношування пари тертя та на зміну параметрів мікрощорсткості металевої поверхні. Показано, що топографія поверхні металевого контртіла змінюється в процесі тертя карбопластиків з орієнтованими волокнами, але розподіл висот та кривин вершин мікронерівностей поверхні тертя значно віддалений від гавсівського розподілу і наближений до релєвського.

Ключові слова: карбонові волокна, інтенсивність зношування, композиційний полімерний матеріал, схеми армування шаруватих композитів, шорсткість, ізотропна поверхня, тертя, спектральна щільність, металеве контртіло, кривина поверхні, розподіл Гавса.

H.O. Sirenko, L.M. Soltys, Yu.D. Pakhomov

Influence of Orientation Angle of Carbon Fiber on Intensity Wear of Carbo-Fiber Plastics and Carbo-Textolites

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

Results of researches of influence orientation effects on the friction properties of carbon-plastics and wear mechanism of unidirectional carbon-plastics have been brought in a work. The optimal structure of carbon-plastics and fiber orientation layers in it relative to the surface friction and sliding direction have been provided. Correlation between the orientation angle of carbon fibers, the hardness counterface and coefficient of friction and intensity of surround wear of the polymer composite has been founded. The influence of schemes reinforcing by fibrous carbon materials of polymer composites and schemes contacting of samples of these composites with the surface of metal counterface on the intensity of wear of friction pair and on the changing of microroughness parameters of metal surface have been researched. It has been shown that the topography of metal counterface surface changes in friction carbon plastics with oriented fibers, but the allocation of heights and curvatures of microroughness peaks of friction surface far removed from the Gaussian allocation and close to Rayleigh allocation.

Key words: carbon fibers, the intensity of wear, composite polymer material, reinforcing of layered composites schemes, roughness, isotropic surface, friction, spectral density, metal counterface, curvature of surface, Gaussian allocation.

Стаття поступила до редакції 23.07.2015; прийнята до друку 15.09.2015.

Вступ

Встановлено [1], що інтенсивність зношування карбопластиків суттєво залежить від орієнтації волокон 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.

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:

1) у розробці узагальнених схем армування і контактування зі спряженими поверхнями орієнтованих карбопластиків з вуглецевими волокнами короткої та нескінченної довжини, у яких є або відсутня шаруватість відносно площини тертя і

напрямку ковзання, що дозволяє провести системний аналіз результатів дослідження механізму зношування карбопластиків;

2) у дослідженні та узагальненні впливу кута орієнтації вуглецевих волокон у різних текстильних формах наповнювачів полімерів відносно суміжної поверхні тертя та вектора швидкості на величину коефіцієнта тертя та інтенсивність зношування карбоволокнитів і карботекстолітів під час динамічного контакту з металевими поверхнями криць;

3) у дослідженні впливу схем армування полімерних композитів волокнистими вуглецевими матеріалами різної текстильної форми та схем контактування зразків композитів з поверхнею металевого контртіла на інтенсивність зношування пари тертя та на зміну параметрів мікроскорості металевої поверхні зі сталі 45 – щільності ймовірностей розподілу висот вершин та середньої кривини у вершинах мікронерівностей – під час тертя та зношування.

I. Схеми армування шаруватих композитів та їх контактування зі спряженими поверхнями

1.1. Для орієнтації волокон відносно площини ковзання і вектора швидкості в зарубіжній літературі [1-6] прийняті такі позначення: напрям **N** – волокна спрямовані перпендикулярно поверхні тертя і вектору швидкості; напрям **L** – волокна спрямовані рівнобіжно поверхні тертя і вектору швидкості; напрям **T** – волокна спрямовані рівнобіжно поверхні тертя, але перпендикулярно вектору швидкості. Така схема далеко не вичерпує всі можливі випадки орієнтації волокон та шарів тканини і стрічок відносно поверхні тертя та вектора швидкості.

Введемо позначення напрямку волокон в орієнтованому волокнистому композиті, який не має шаруватості відносно площини тертя (перша літера) та напрямку ковзання (друга літера):

LL – волокна спрямовані рівнобіжно до поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L);

LT – волокна спрямовані рівнобіжно до поверхні тертя (L) і перпендикулярно до вектору швидкості (T);

NN – волокна спрямовані перпендикулярно до поверхні тертя (N) і перпендикулярно до вектору швидкості (N).

1.2. Для шаруватих композитів введемо чотири літери: перша і друга літери позначають орієнтацію шару волокон відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно; третя і четверта – орієнтацію шару волокон відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно [7-10].

Так, сполучення індексів RRRR характеризує схему армування композиту з короткими волокнами, які хаотично розташовані у просторі. Такий композит можна виготовити, якщо до зразка не прикладати спрямоване зусилля формування [7-10].

1.3. Шаруваті композити з хаотичним розташуванням коротких або довгих волокон у шарі можна виготовити також під час спрямованого зусилля формування відносно шарів волокон. Наприклад, під час пресування композиції короткі волокна розташовуються хаотично в шарі, який перпендикулярний зусиллю пресування. Такі схеми реалізуються під час армування матриці вуглецевим або синтетичним папером.

Для таких композитів введемо три схеми армування (тут літера R вказує на випадковий кут нахилу волокон відносно поверхні тертя і вектора швидкості) [7-10]:

LLLL – шари волокон спрямовані паралельно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L), а самі волокна шару – рівнобіжно поверхні тертя (L) і не мають певної спрямованості до вектора швидкості (R);

NNRR – шари волокон спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N), а самі волокна хаотично розташовані відносно поверхні тертя (R) і вектора швидкості (R);

NLRR – шари волокон спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і паралельно вектору швидкості (L), але самі волокна не мають певної орієнтації відносно поверхні тертя (R) і вектора швидкості (R).

1.4. Для односпрямованих шаруватих композитів, які виготовляють із стрічок, введемо такі схеми армування [7-10]:

LLLL – шари волокон стрічки спрямовані паралельно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L), а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L);

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

NLLL – шари волокон стрічки спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і паралельно вектору швидкості (L), а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L);

NNLT – шари волокон стрічки спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N), а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (L) і прямолинійно вектору швидкості (T);

NNNN – шари волокон стрічки спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N), а самі волокна – прямолинійно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N);

NLNN – шари волокон стрічки спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і паралельно вектору швидкості (L), а самі волокна – прямолинійно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N).

1.5. Для шаруватих композитів на тканинній основі (текстолітів) введемо шість літер для позначення схем армування: перша і друга літери позначають орієнтацію шару тканини відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно; третя і четверта літери – орієнтацію волокна основи

тканини відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно; п'ята і шоста літери – орієнтацію волокон підткання відносно поверхні тертя і вектора швидкості відповідно. Таким чином, позначення схем армування для текстолітів читаються так [7-10] (рис. 1):

NNLT(NT) – шари тканини спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N), волокна основи тканини – рівнобіжно поверхні тертя (L) і прямолинійно вектору швидкості (T), а волокна підткання – прямолинійно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (T);

NLLL(NT) – шари тканини спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і паралельно вектору швидкості (L), волокна основи тканини – рівнобіжно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L), а волокна підткання – прямолинійно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (T);

NNNN(LT) – шари тканини спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N), волокна основи тканини – прямолинійно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N), а волокна підткання – рівнобіжно поверхні тертя (L) і прямолинійно вектору швидкості (T);

NLNN(LL) – шари тканини спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і паралельно вектору швидкості (L), волокна основи тканини – прямолинійно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (N), а волокна підткання – рівнобіжно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L);

LLLT(LL) – шари тканини спрямовані паралельно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L), волокна основи тканини – рівнобіжно поверхні тертя (L) і прямолинійно вектору швидкості (T), а волокна підткання – рівнобіжно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L);

LLLL(LT) – шари тканини спрямовані паралельно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L), волокна основи тканини – рівнобіжно поверхні тертя (L) і вектору швидкості (L), а волокна підткання – рівнобіжно поверхні тертя (L) і прямолинійно вектору швидкості (T).

II. Вплив кута орієнтації вуглецевого волокна на інтенсивність зношування

2.1. Вплив напрямків пресування та нормального навантаження на зношування зразків на основі політетрафторетилену (ПТФЕ), наповненого 20% карбонізованих (кінцева температура термообробки ГЦ-волокна 1123K у CH_4) вуглецевих волокон УТМ-8, розподілених за довжинами за законом Вейбулла в межах 20-1200 мкм з основною фракцією 50-150 мкм (діаметром волокон 10-12 мкм), визначали на машині тертя ХТІ-72 за схемою контакту «площина-площина» (зразки діаметром 10 мм, висотою 15 мм) за питомим навантаженням 3 МПа, швидкістю ковзання $V = 1,3$ м/с по

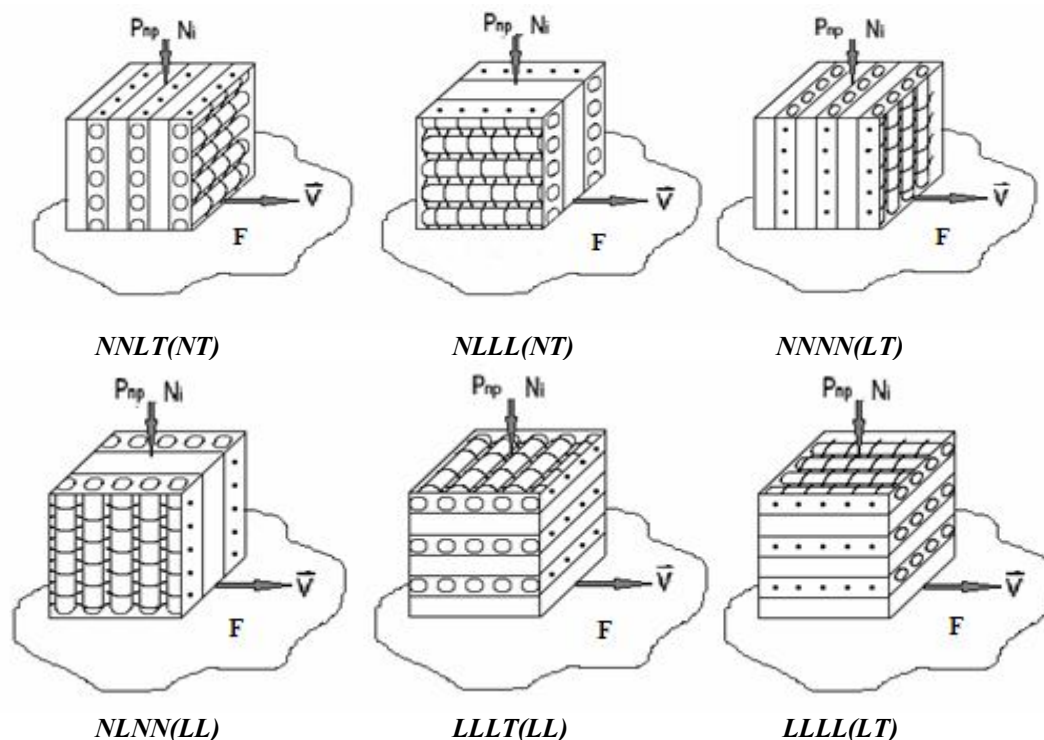


Рис. 1. Схеми армування шаруватих композитів на тканинній основі та їх контактування зі спряженими поверхнями (F). P_{np} – напрямок зусилля пресування; N_i – напрямок дії нормального навантаження на один зразок; \vec{V} – вектор швидкості ковзання.

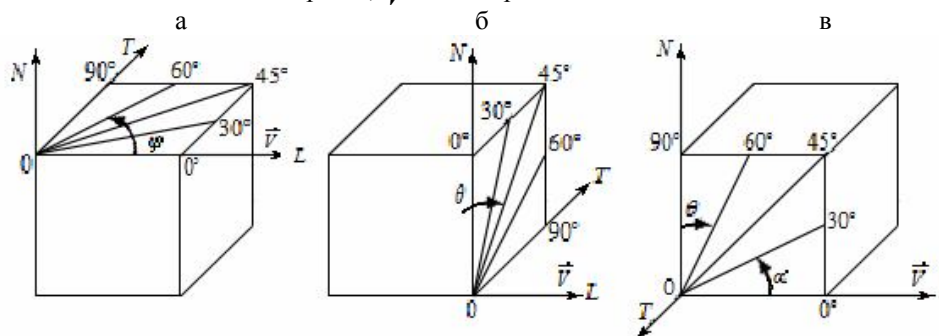


Рис. 2. Кути орієнтації вуглецевого волокна у площинах LOT (а), NOT (б) та NOL (в) відносно площини контакту з металевим контртілом та вектору швидкості (\vec{V}).

криці 45 (HB 4,5 ГПа; $Ra_0 = 0,2$ мкм), за температури поверхні $T = 373 \pm 1$ К.

Для ПТФЕ карбопластиків з короткими волокнами і хаотичним їх розподілом у шарі, утвореному перпендикулярно напрямку пресування, знайдено (табл. 1), що орієнтація шару волокон впливає на зношування під час стаціонарного процесу. Орієнтація шарів волокон відносно поверхні тертя мало впливає на зношування, а при паралельному розташуванні волокон спостерігається мінімальне зношування.

2.2. Результати оцінки впливу кута орієнтації вуглецевого високомодульного волокна ВМН-4 типу НМ у площинах LOT, NOT та NOL (рис. 2) на інтенсивність зношування карбопластика на основі епоксидної ЕД-20 + фенолформальдегідної РФН-60 смол (1:1) приведені в табл. 2. Результати експерименту отримані за однаковими схемами випробувань («площина-площина»), об'ємній температурі 323 ± 1 К, за нормального навантаження

$N_i = 100$ Н на один зразок і швидкості ковзання 0,5 м/с та шляху тертя $S_1 = 0 - 100$ км і $S_2 = 100 - 200$ км.

Таблиця 1
Вплив орієнтації коротких волокон на зношування ПТФЕ-композиту з 20 % карбонізованого волокна УТМ-8

Схеми армування та випробувань	Інтенсивність об'ємного зношування I , $\times 10^{-7}$ мм ³ /(Н·м) на шляху тертя	
	0 – 50 км	50 – 300 км
NLN _R N _R	6,8 ± 0,6	4,0 ± 0,3
NNN _R N	6,3 ± 0,5	3,4 ± 0,2
LLL _R	5,5 ± 0,5	2,5 ± 0,2

Таблиця 2

Вплив кута орієнтації вуглецевих волокон на інтенсивність об'ємного зношування карбопластика на основі епоксидної + фенолоформальдегідної (1:1) смол + 55% графітованого волокна ВМН-4 (нм)

Площина орієнтації	Напрямок орієнтації	Інтенсивність зношування, $I, \times 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$ на шляху тертя	
		0 - 100 км	100 - 200 км
LOT	$LL_{0^\circ}=LL$	15,5	13,811
LOT	LL_{30°	13,8	6
LOT	LL_{45°	10,6	9,2
LOT	LL_{60°	9,1	6,6
LOT	$LL_{90^\circ}=LL$	7,3	4,8
NOT	$N_{0^\circ}N=NN$	8,1	11,4
NOT	$N_{30^\circ}N$	6,2	8,5
NOT	$N_{45^\circ}N$	4,7	7,4
NOT	$N_{60^\circ}N$	6,5	6,2
NOT	$N_{90^\circ}N=LT$	7,3	4,8
NOL	$N_{-90^\circ}L_{180^\circ}=LL$	15,5	13,8
NOL	$N_{-60^\circ}L_{150^\circ}$	12,3	10,3
NOL	$N_{-45^\circ}L_{135^\circ}$	10,1	6,5
NOL	$N_{-30^\circ}L_{120^\circ}$	9,4	8,7
NOL	$N_{0^\circ}L_{90^\circ}=NN$	8,1	11,4
NOL	$N_{30^\circ}L_{60^\circ}$	8,8	8,2
NOL	$N_{45^\circ}L_{45^\circ}$	9,6	6,4
NOL	$N_{60^\circ}L_{30^\circ}$	11,9	10,5
NOL	$N_{90^\circ}L_{0^\circ}=LL$	15,5	13,8

Як видно з табл. 2, зміна кута орієнтації від 0° до 90° відносно вектора швидкості у площині LOT за паралельною орієнтацією волокон відносно площини ковзання приводить до зменшення інтенсивності зношування. При зміні кута орієнтації волокон у площині NOT інтенсивність зношування карбопластика залежить від шляху тертя (табл. 2): на дільниці 0-100 км мінімальне зношування спостерігається при куті орієнтації 45° ; на дільниці 100 - 200 км зношування монотонно зменшується від NN до LT-орієнтації.

При зміні кута орієнтації волокон у площині NOL від 0° до 180° та від -90° до $+90^\circ$ інтенсивність зношування карбопластика зменшується від LL до NN – орієнтації за гострокутового та тупокутового напрямків ковзання волокон при $S_1=0-100$ км. У той же час при $S_2=100-200$ км інтенсивність зношування проходить через мінімум за 45° гострокутовому та тупокутовому напрямку ковзання волокон.

Визначали лінійні і нелінійні кореляційні зв'язки між випадковими величинами – кутом орієнтації вуглецевих волокон (α) та інтенсивностями

зношування [$I, \times 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н}\cdot\text{м})$] зразків карбокомполиту на шляхах тертя $S_1=0-100$ км та $S_2=100-200$ км для площин (рис. 2): LOT (а), NOT (б), NOL (в) за результатами випробування (табл. 2).

Вибірковий коефіцієнт кореляції r_p , статистики t_p та z_p розраховували за [11-13]. Висували нульову гіпотезу [11]:

$$H_0: \rho = 0$$

$$\uparrow$$

$$r_p \neq 0 \quad (1)$$

(рівності нулю генерального коефіцієнта кореляції за оцінкою вибіркового коефіцієнта кореляції (r_p), тобто відсутності надійного лінійного зв'язку).

Нульову гіпотезу H_0 перевіряли за такими критеріями: критичного коефіцієнта кореляції ($r_{кр}$) [12-13], Стьюдента (t_T) [13] і перетворенням Фішера (z_T) [11, 13], використовуючи при цьому добуток ($z_T \cdot \sigma_z$) [11] за рівнянням значущості $\beta_1=0,05$ та $\beta_2=0,01$.

Оцінки ступенів лінійності (ξ_1) і нелінійності (ξ_2) кореляційних зв'язків розраховували за формулами, використовуючи:

- критичний коефіцієнт кореляції:

$$\xi_1(r) = \frac{|r_p|}{r_{kp}}; \quad \xi_2(r) = \frac{r_{kp}}{|r_p|}; \quad (2)$$

- теоретичне значення розподілу Стьюдента:

$$\xi_1(t) = \frac{|t_p|}{t_T}; \quad \xi_2(t) = \frac{t_T}{|t_p|}; \quad (3)$$

- z – перетворення Фішера:

$$\xi_1(z) = \frac{|z_p|}{(z_T \cdot \sigma_z)}; \quad \xi_2(z) = \frac{(z_T \cdot \sigma_z)}{|z_p|}. \quad (4)$$

Результати розрахунків зведені в табл. 3-5. Як видно з табл. 3-5, за всіма критеріями [r_{kp} , t_T , ($z_T \cdot \sigma_z$)] та рівнями значущості $\beta_1=0,05$ і $\beta_2=0,01$ за силою кореляційних зв'язків спостерігаються такі мінорантні ряди:

- за рівнями лінійності:

$$(\alpha - I_2)(NOT) > (\alpha - I_2)(LOT) > (\alpha - I_1)(LOT) >> >> (\alpha - I_1)(NOT) > (\alpha - I_1)(NOL) >>> (\alpha - I_2)(NOL); \quad (5)$$

(жирним шрифтом виділені статистично значущі лінійні зв'язки)

- за рівнями нелінійності:

$$(\alpha - I_2)(NOL) >>> (\alpha - I_1)(NOL) > (\alpha - I_1)(NOT) >>> >>> (\alpha - I_1)(LOT) \approx (\alpha - I_2)(LOT) \approx (\alpha - I_2)(NOT); \quad (6)$$

(жирним шрифтом виділені статистично значущі нелінійні зв'язки)

Таблиця 3

Значущість коефіцієнта кореляції за критичним коефіцієнтом кореляції (r_{kp}) за результатами табл. 2

Площина армування (зв'язок)	r_p	r_{kp}	$\xi_1(r)$	$\xi_2(r)$
$\beta_1 = 0,05$				
LOT ($\alpha - I_1$)	-0,9744	0,878	1,1098	0,9011
LOT ($\alpha - I_2$)	-0,9825	0,878	1,1190	0,8936
NOT ($\alpha - I_1$)	-0,18401	0,878	0,2096	4,7715
NOT ($\alpha - I_2$)	-0,9869	0,878	1,1240	0,8897
NOL ($\alpha - I_1$)	0,04827	0,666	0,0725	13,7974
NOL ($\alpha - I_2$)	0,0056	0,666	0,0084	118,9286
$\beta_2 = 0,01$				
LOT ($\alpha - I_1$)	-0,9744	0,960	1,015	0,9852
LOT ($\alpha - I_2$)	-0,9825	0,960	1,0234	0,9771
NOT ($\alpha - I_1$)	-0,18401	0,960	0,1917	5,21711
NOT ($\alpha - I_2$)	-0,9869	0,960	1,0280	0,97274
NOL ($\alpha - I_1$)	0,04827	0,800	0,06034	16,5734
NOL ($\alpha - I_2$)	0,0056	0,800	0,0070	142,857

Таблиця 4

Значущість коефіцієнта кореляції за перетворенням Фішера (z) за результатами табл. 2

Площина армування (зв'язок)	r_p	z_p	z_T	$z_T \cdot \sigma$	$\xi_1(z)$	$\xi_2(z)$
$\beta_1 = 0,05$						
LOT ($\alpha - I_1$)	-0,9744	-2,1727137	1,96	1,385929	1,5677	0,6379
LOT ($\alpha - I_2$)	-0,9825	-2,3649565	1,96	1,385929	1,7064	0,5860
NOT ($\alpha - I_1$)	-0,18401	-0,1861301	1,96	1,385929	0,1343	7,4460
NOT ($\alpha - I_2$)	-0,9869	-2,5108593	1,96	1,385929	1,8117	0,5520
NOL ($\alpha - I_1$)	0,04827	0,0483075	1,96	0,800167	0,0604	16,5640
NOL ($\alpha - I_2$)	0,0056	0,0056001	1,96	0,800167	0,0070	142,8854
$\beta_2 = 0,01$						
LOT ($\alpha - I_1$)	-0,9744	-2,1727137	2,58	1,824335	1,1910	0,8397
LOT ($\alpha - I_2$)	-0,9825	-2,3649565	2,58	1,824335	1,2963	0,7714
NOT ($\alpha - I_1$)	-0,18401	-0,1861301	2,58	1,824335	0,1020	9,8014
NOT ($\alpha - I_2$)	-0,9869	-2,5108593	2,58	1,824335	1,3763	0,7266
NOL ($\alpha - I_1$)	0,04827	0,0483075	2,58	1,053281	0,0459	21,8037
NOL ($\alpha - I_2$)	0,0056	0,0056001	2,58	1,053281	0,0053	188,0839

Таблиця 5

Значущість коефіцієнта кореляції за критерієм Стьюдента (t) за результатами табл. 2

Площина армування (зв'язок)	t_p	t_r	$\xi_1(t)$	$\xi_2(t)$
$\beta_1=0,05$				
LOT ($\alpha-I_1$)	-7,5069	3,182	2,3592	0,4239
LOT ($\alpha-I_2$)	-9,1362	3,182	2,8712	0,3483
NOT ($\alpha-I_1$)	-0,3243	3,182	0,1019	9,8134
NOT ($\alpha-I_2$)	-10,5952	3,182	3,3297	0,3003
NOL ($\alpha-I_1$)	0,1279	2,365	0,0541	18,4969
NOL ($\alpha-I_2$)	0,0148	2,365	0,0063	159,6200
$\beta_2=0,01$				
LOT ($\alpha-I_1$)	-7,5069	5,841	1,28520	0,7781
LOT ($\alpha-I_2$)	-9,1362	5,841	1,5642	0,63932
NOT ($\alpha-I_1$)	-0,3243	5,841	0,0555	18,0138
NOT ($\alpha-I_2$)	-10,5952	5,841	1,8139	0,5513
NOL ($\alpha-I_1$)	0,1279	3,499	0,0365	27,3660
NOL ($\alpha-I_2$)	0,0148	3,499	0,00423	236,1566

Тобто, кореляційні зв'язки між кутом орієнтації вуглецевих волокон у площинах NOT і LOT та інтенсивністю зношування композиту на шляху тертя $S_2 = 100-200$ км, а також між кутом орієнтації вуглецевих волокон у площині LOT та інтенсивністю зношування композиту на шляху тертя $S_1 = 0 - 100$ км статистично значущі лінійні, при цьому ступені лінійності зв'язку становлять: 1,11-3,33 за $\beta_1=0,05$ та 1,02-1,81 за $\beta_2=0,01$.

Кореляційні зв'язки між кутом орієнтації вуглецевих волокон у площині NOL та інтенсивністю зношування композиту на шляху тертя $S_2 = 100-200$ км статистично значимі нелінійно, при цьому спостерігається максимальний ступінь нелінійності зв'язку: 118,93-159,62 за $\beta_1=0,05$ та 142,86-236,16 за $\beta_2=0,01$, а кореляційні зв'язки між кутом орієнтації волокон у площинах NOL і NOT та інтенсивністю зношування композиту на шляху тертя $S_1=0 - 100$ км теж нелінійні зі ступенями нелінійності в межах: 4,77-18,50 за $\beta_1=0,05$ та 5,22-27,36 за $\beta_2=0,01$.

III. Вплив орієнтації вуглецевих волокон і тканин на зношування та зміну шорсткості поверхні

3.1. Матеріали.

Для оцінки впливу орієнтації наповнювача відносно площини ковзання, вектора швидкості та його текстильної форми на інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя досліджені карбопластики, які армовані волокнистим (С-50), стрічковим (НВМ-55) та тканинним (Т-1/0) наповнювачами. Композит С-50 був виготовлений на основі епоксидної смоли + 50% низькомодульного волокна

гратен (LM) з хаотичним розташуванням у напрямку X і Y; композит НВМ-55 – на основі епоксидної + фенолформальдегідної смол (1:1) + 55% графітованої стрічки ЛУ-2 з високоміцними волокнами (НТ); композит Т-1/0 – на основі епоксидної смоли + 60% тканини УУТ-2 з волокнами середньої міцності (МТ).

3.2. Методика дослідження.

Вивчалася зміна шорсткості поверхні з використанням теорії випадкового поля [14-89].

1) Методика дослідження триботехнічних властивостей на машині тертя ХТІ-72 [14].

Полімерні зразки у вигляді паралелепіпедів з площиною контактної поверхні 10×10 мм і висотою 15 мм після токарної обробки та фрезерування, послідовно припрацьовували на шліфувальній шкурці та металевому контртілі до досягнення приблизно 100% площі контакту. Металеve контртіло шліфували, а потім обробляли на шліфувальній шкурці у випадкових напрямках (для того, щоб отримати поверхню, яка була би близькою до ізотропної). Після припрацювання полімерних зразків металеве контртіло знову припрацьовували на шліфувальній шкурці.

Перша серія випробувань. Дослідження проводили за схемою [I-5] [14] при швидкості ковзання $V=0,54$ м/с, питомому навантаженні $P=2$ МПа по сталі 45 (НВ 4,35 ГПа; середнє арифметичне відхилення профілю вихідної поверхні $Ra_0=0,35$ мкм) на шляху тертя $S_1=0 \dots 100$ км (С-50; Т-1/0) та $S_2=0 \dots 500$ км (НВМ-55). Температура спряженої поверхні підтримувалась у межах $T=373 \pm 2$ К протічною водою, яка нагніталася через порожнину металевого контртіла за допомогою авторегулюючого термостату. Температура металеві поверхні контртіла визначалася термпарою ХК на відстані

~ 0,5-1 мм від поверхні у ділянці сліду тертя (сигнал від термопарі ХК записували на ленту потенціометра КСП-4).

Друга серія випробувань. Дослідження проводили за схемою [I-5] [14] при швидкості ковзання $V=0,84$ м/с, питомому навантаженні $P=2$ МПа по сталі 45 (НВ 4,7 ГПа; $R_{a0}=0,22$ мкм) без мащення на шляху тертя $S=0\dots 400$ км. Температура спряженої поверхні підтримувалась у межах $T_1=373\pm 2$ К та $T_2=418\pm 2$ К протічною водою, яка нагніталася через порожнину металевого контртіла за допомогою авторегулюючого термостату. Температура металевої поверхні контртіла визначалася термопарою ХК на відстані ~ 0,5-1 мм від поверхні у ділянці сліду тертя (сигнал від термопарі ХК записували на ленту потенціометра КСП-4).

2) Методика експериментального дослідження мікрошорсткості поверхонь тертя.

Профілограми мікрошорсткості знімали за допомогою профілометра-профілографа ВЭИ «Калибр» моделі «201» і моделі «252». Для одного напрямку знімали 50-60 базових довжин пофілограм для металевого контртіла і 10-15 базових довжин профілограм для полімерного зразка. Для ізотропної поверхні профілограму знімали під кутом ~ 45° до напрямку ковзання. Ділянки зйомки поверхні були рівнорозподілені за слідом тертя. Статистичні характеристики різних ділянок поверхні були однаковими в статистичному розумінні.

Профілограми оброблялися за методом [69]: знаходили середньоарифметичне відхилення профілю поверхні R_a , щільність нулів D_0 і щільність екстремумів D_{extr} . Виміряна R_a і розрахункова за

профілограмами D_0 (для моделі «252» D_0 виміряна) були статистично рівні.

Великий об'єм виборки і рівномірний розподіл її по поверхні 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 α був більше 1,8, тобто тієї величини, яка характерна для «білого шуму». Розглянута ізотропна модель шорсткості поверхні.

3.3. Результати та обговорення.

І. Залежність антифрикційних властивостей карбопластиків від орієнтації волокон, стрічок і тканин наповнювачів.

Властивості карбоволокниту С-50 досліджені для двох напрямків армування NNRR, LLRR; волокниту НВМ-55 для чотирьох – LLLL, NLNN, NNNN, LLLT; карботекстоліту Т-1/10 – для шерсті: NNLT(NN), NNNN(LT), NLNN(LL), NLLL(NN), LLLL(LT), LLLT(LL).

У табл. 6 приведені результати питомої об'ємної інтенсивності зношування карбопластика і спряженої поверхні за першою серією випробувань. Як видно з табл. 6, анізотропія властивостей композиту дуже помітно проявляється для всіх досліджених матеріалів. У табл. 6: вихідне органічне волокно: ГЦ – з гідратцелюлози; ПАН – з поліакрилонітрилу; вуглецеве волокно: LM – низького модуля; НТ – високої міцності; МТ – середньої міцності.

Таблиця 6

Питома об'ємна інтенсивність зношування карбопластика і спряженої поверхні

Пластик: полімерна матриця	Вуглецевий волокнистий матеріал			Напря армування	Питома об'ємна інтен- сивність зношування, мм ³ /Н·м	
	марка	текстильна форма	кінцева температура термо- обробки, К		карбо- пластика ($\times 10^{-7}$)	металевого контртіла ($\times 10^{-11}$)
1. Карбоволокнит: епоксидна смола	грален	волокно;	1973	LLRR	39	160
2. Карбоволокнит: епоксидна смола	грален	ГЦ; LM	1973	NNRR	88	230
3. Карбоволокнит: епоксидна+фенол- формальдегідна смоли (1:1)	ЛУ-2	стрічка; ПАН; НТ	2673	LLLL	8,1	1,1
4. Так само	ЛУ-2	так само	2673	LLLT	7,6	0,5
5. Так само	ЛУ-2	так само	2673	NNNN	6,5	5,1
6. Так само	ЛУ-2	так само	2673	NLNN	5,3	3,6
7. Карботекстоліт: епоксидна смола	УУТ-2	тканина;	1123	LLLL(LT)	41	11
8. Так само	УУТ-2	ГЦ; МТ	1123	LLLT(LL)	38	9
9. Так само	УУТ-2	так само	1123	NNNN(LT)	51	37
10. Так само	УУТ-2	так само	1123	NLNN(LL)	74	68
11. Так само	УУТ-2	так само	1123	NNLT(NN)	76	97
12. Так само	УУТ-2	так само	1123	NLLL(NN)	45	13

Інтенсивність зношування карбоволокниту С-50 у LLRR напрямку менша, ніж у напрямку NNRR:

$$\begin{aligned} \text{LLRR} &< \text{NNRR} \\ 39 &< 88. \end{aligned} \quad (7)$$

Така ж залежність спостерігається під час зношування металевої спряженої поверхні:

$$\begin{aligned} \text{LLRR} &< \text{NNRR} \\ 160 &< 230. \end{aligned} \quad (8)$$

Головним фактором, який впливає на знос, є орієнтація шарів відносно площини ковзання. Питомий об'ємний знос карбопластику С-50 лінійно змінюється з шляхом тертя.

У мінорантних рядах (7) – (15) під орієнтаційними позначеннями приведені цифри інтенсивності зношування I , $\times 10^{-7}$ мм³/(Н·м) (для композиту) та I , $\times 10^{-11}$ мм³/(Н·м) (для металевого контртіла).

У карбоволокниту НВМ-55 однозначної залежності інтенсивності зношування від орієнтації шарів не виявлено. У початковий період тертя переважним напрямком, який забезпечує мінімальний знос, є напрямком NNNN, однак після 200 км більшу зносостійкість мають зразки, які армовані в NLNN напрямку. Орієнтаційні співвідношення за інтенсивністю зношування (табл. 6) виглядають так (у ряду зліва направо інтенсивність зношування зростає):

• **композит:**

$$\begin{aligned} \text{NLNN} &< \text{NNNN} < \text{LLLT} < \text{LLLL} \\ 5,3 &< 6,5 < 7,6 < 8,1; \end{aligned} \quad (9)$$

• **спряжена металева поверхня:**

$$\begin{aligned} \text{LLLT} &< \text{LLLL} < \text{NLNN} < \text{NNNN} \\ 0,5 &< 1,1 < 3,6 < 5,1. \end{aligned} \quad (10)$$

Коефіцієнт тертя при цьому змінюється аналогічно :бувши мінімальним на початку шляху тертя для напрямку армування NNNN, після 200 км він збільшується і поступається місцем напрямку NLNN. Орієнтаційне співвідношення за коефіцієнтом тертя виглядає так (у ряду зліва направо коефіцієнт тертя зростає):

• **0-200 км:**

$$\text{NNNN} < \text{NLNN} < \text{LLLT} < \text{LLLL}; \quad (11)$$

• **200-450 км:**

$$\text{NLNN} < \text{LLLL} < \text{LLLT} < \text{NNNN}. \quad (12)$$

Для карботекстоліту Т-1/10 мінімальний знос забезпечується для випадку LLLL(LT), коли шари

та волокна основи в шарі паралельні площині ковзання і вектору швидкості. Знос карботекстоліту збільшується при зміні орієнтації шарів тканини від паралельного до перпендикулярного. Напрямок армування помітно впливає на коефіцієнт тертя карботекстоліту в період припрацювання, а в сталому режимі тертя різниці невеликі. Орієнтаційні співвідношення для карботекстоліту і шляху тертя 100 км виглядають так:

• за коефіцієнтом тертя (у ряду зліва направо величина коефіцієнта зростає):

$$\begin{aligned} \text{LLLL(LT)} &< \text{LLLT(LL)} < \text{NLLL(NN)} < \\ &< \text{NNNN(LT)} < \text{NNLT(NN)} < \text{NLNN(LL)}; \end{aligned} \quad (13)$$

• за інтенсивністю зношування карботекстоліту (у ряду зліва направо інтенсивність зношування зростає):

$$\begin{aligned} \text{LLLT(LL)} &< \text{LLLL(LT)} < \text{NLLL(NN)} < \\ &< \text{NNNN(LT)} < \text{NLNN(LL)} < \text{NNLT(NN)} \\ 38 &< 41 < 45 < 51 < 74 < 76; \end{aligned} \quad (14)$$

• за інтенсивністю зношування поверхні металевого контртіла (у ряду зліва направо інтенсивність зношування зростає):

$$\begin{aligned} \text{LLLT(LL)} &< \text{LLLL(LT)} < \text{NLLL(NN)} < \\ &< \text{NNNN(LT)} < \text{NLNN(LL)} < \text{NNLT(NN)} \\ 9 &< 11 < 13 < 37 < 68 < 97. \end{aligned} \quad (15)$$

Узагальнений висновок можна зробити за впливом T_k вуглецевого матеріалу на зношування карбопластиків [збільшення T_k зменшує зношування: I' (1123 K) > I'' (1973 K) > I''' (2673 K)] і впливом структури наповнювача (зношування зменшується від волокон хаотичної до тканної і спрямованої орієнтації).

Проведені дослідження показали, що зношування карбопластиків значно залежить не тільки від орієнтації шарів тканини відносно поверхні тертя, але і від орієнтації шарів відносно вектора швидкості, а також орієнтації волокон основи та підткання відносно поверхні тертя і вектора швидкості. У зв'язку з цим було цікаво виявити внесок в анізотропію антифрикційних властивостей карботекстолітів орієнтації кожного елемента структури: шарів тканини, волокон основи, волокон підткання. При обробці результатів експериментів був складений неоптимальний (табл. 7) план і отримані наближені рівняння інтенсивності зношування карботекстоліту.

Таблиця 7

Схема випробувань карботекстоліту*

Номер точки плану	Фактор і рівень						Позначення на схемі випробувань
	T/F	T/V	O/F	O/V	П/F	П/V	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	
1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	NLNN(LL)
2	+1	+1	+1	+1	-1	+1	NNNN(LT)
3	+1	-1	-1	-1	+1	+1	NLLL(NN)
4	+1	+1	-1	+1	+1	+1	NNLT(NN)
5	-1	-1	-1	-1	-1	+1	LLLL(LT)
6	-1	-1	-1	+1	-1	-1	LLLL(LL)

* Умовні позначення: **T** – тканина; **O** – основа; **П** – підткання; (+1) – перпендикулярний, (-1) – паралельний напрямку армування; **F** – площа тертя; **V** – вектор швидкості ковзання.

Досліджували карботекстоліт на основі епоксидної смоли + 60% вуглецевої тканини УУТ-2 ($T_k=1120$ К). Результати експерименту обробляли по методу напівблочних планів першого порядку. Рівняння інтенсивності зношування ($\times 10^{-6}$ мм³/Н·м) має вигляд:

$$I = 6,45 + 2,813X_1 - 1,713X_2 + 2,097X_3 + 2,623X_4 - 1,977X_5 - 1,633X_6. \quad (16)$$

Ранжування факторів за методом випадкового балансу і рівнях значущості дозволило отримати таку нерівність:

$$X_1 > X_4 > X_3 > X_6 > X_2 > X_5. \quad (17)$$

Таким чином, встановлено, що визначальний вплив на зношування карботекстоліту мають два фактори: орієнтація шарів тканини відносно площини ковзання і орієнтація волокон основи відносно площини ковзання і вектора швидкості.

За планом (табл. 7) досліджено також вплив напрямку шарів вуглецевої тканини і волокон на антифрикційні властивості карботекстоліту на основі аліомофенілсилоксанової + епоксидної смол + 60% графітованої тканини ТГН-2м типу LM ($T_k=2670$ К) із гідратцелюлози з низькомодульними волокнами при терті по титановому стопу ПТ-3В ($R_{a0}=0,24$ мкм) у модельній океанській воді [склад (г/л): 26,518 NaCl + 2,447 MgCl₂·6H₂O + 6,765 MgSO₄·6H₂O + 2,252 CaCl₂·6H₂O + 0,725 KCl + 0,202 NaHCO₃ + 0,083 NaBr] при $P=2$ МПа; $V=0,3$ м/с; $T=306 \pm 2$ К; $S=10$ км. При цьому значення критеріїв гідродинамічних ефектів склали $S_h=7,6x \times 10^{-13}$ м²; $S_m=1,7 \cdot 10^{-8}$; $S_c=1,9 \cdot 10^{-5}$ Н [90].

Коефіцієнт тертя карботекстоліту для різних схем випробувань змінюється від 0,13 до 0,27, середнє квадратичне відхилення профілю поверхні R_q стопу ПТ-3В у кінці тертя – від 0,75 до 1,87 мкм. При введенні у карботекстоліт порошка ПТФЕ коефіцієнт тертя мало залежав від розташування шарів тканини та волокон і дорівнював 0,21-0,23, а середнє квадратичне відхилення профілю поверхні ($R_q=0,19-0,28$ мкм) стопу ПТ-3В у кінці тертя наближалось до вихідного ($R_q=0,30$ мкм).

Обробка експериментальних даних дозволила отримати рівняння інтенсивності зношування ($\times 10^{-6}$ мм³/Н·м):

- для вихідного карботекстоліту (без домішок):

$$I_1 = 11,967 - 1,269X_1 - 1,473X_2 - 3,314X_3 - 5,225X_4 + 2,045X_5 + 3,753X_6; \quad (18)$$

$$I_2 = 8,633 - 1,865X_1 - 1,366X_2 - 3,07X_3 - 4,254X_4 + 1,205X_5 + 2,89X_6; \quad (19)$$

- для карботекстоліту з домішкою 14% порошку ПТФЕ:

$$I_1 = 18,590 - 1,477X_1 - 2,277X_2 + 0,285X_3 + 1,167X_4 - 1,767X_5 - 3,443X_6; \quad (20)$$

$$I_2 = 10,077 - 0,261X_1 - 0,527X_2 - 0,028X_3 + 0,275X_4 - 0,234X_5 - 0,801X_6; \quad (21)$$

де інтенсивність зношування відповідає шляху тертя I_1 ($S=0-5$ км); I_2 ($S=5-10$ км).

Для карботекстоліту величина лінійних ефектів складає максимум 50% і мінімум 11% від середнього ефекту. Для карботекстоліту з домішкою 14% порошку ПТФЕ величина лінійних ефектів складає максимум 18% і мінімум 0,3% від середнього ефекту. Таким чином, введення порошку ПТФЕ в карботекстоліт зменшує вплив орієнтації шарів тканини і волокон на процеси зношування карботекстоліту.

Ранжування факторів за методом випадкового балансу і рівнях значущості дозволило отримати такі нерівності за інтенсивністю зношування (у ряду зліва направо інтенсивність зношування зменшується):

- для вихідного карботекстоліту (без домішок):

$$I_1: X_4 > X_6 > X_3 > X_5 > X_2 > X_1; \quad (22)$$

$$I_2: X_4 > X_3 > X_6 > X_1 > X_2 > X_5; \quad (23)$$

- для карботекстоліту з домішкою 14% порошку ПТФЕ:

$$I_1: X_6 > X_2 > X_5 > X_1 > X_4 > X_3; \quad (24)$$

$$I_2: X_6 > X_2 > X_4 > X_1 > X_5 > X_3. \quad (25)$$

Для вихідного карботекстоліту максимальний вплив на інтенсивність зношування надає орієнтація волокон основи відносно напрямку ковзання, потім – орієнтація волокон основи відносно поверхні тертя, а мінімальний – орієнтація шарів тканини. Під час введення порошку ПТФЕ в карботекстоліт вплив орієнтації тканини відносно напрямку ковзання збільшується.

При переході від паралельного до перпендикулярного напрямку волокон основи і шарів тканини і, навпаки, від перпендикулярного до паралельного напрямку волокон підткання відносно поверхні тертя і напрямку ковзання знос зменшується. При терті карботекстоліту з домішкою порошку ПТФЕ для напрямку шарів тканини ця закономірність зберігається, а для орієнтації волокон змінюється.

II. Дослідження топографії поверхні металевого контртіла в процесі тертя карбопластиків з орієнтованими волокнами.

Досліджували зміну розподілу щільності ймовірностей висот вершин $p(\epsilon_1')$ і середньої кривини у вершинах мікронерівностей $H(\epsilon_1')$ сталеві поверхні на шляху тертя 0...400 км до і після тертя та зношування без мащення карбопластика [на основі епоксидної + фенолформальдегідної смол та вуглецевої стрічки ЛУ-2 з волокнами НМ, які орієнтовані у напрямках LLLL, LLLT, NNNN] за другою серією випробувань.

Розрахункові формули приведені в [70] для щільності ймовірностей розподілу висот вершин ізотропної поверхні та в [69] для розподілу середньої кривини у вершинах мікронерівностей, де ϵ_1' – нормована безрозмірна висота мікронерівностей.

Як видно з рис. 3, розподіл щільності ймовірностей розподілу висот вершин поверхні сталі 45 із збільшенням шляху тертя змінюється по-різному для кожної із орієнтації волокон.

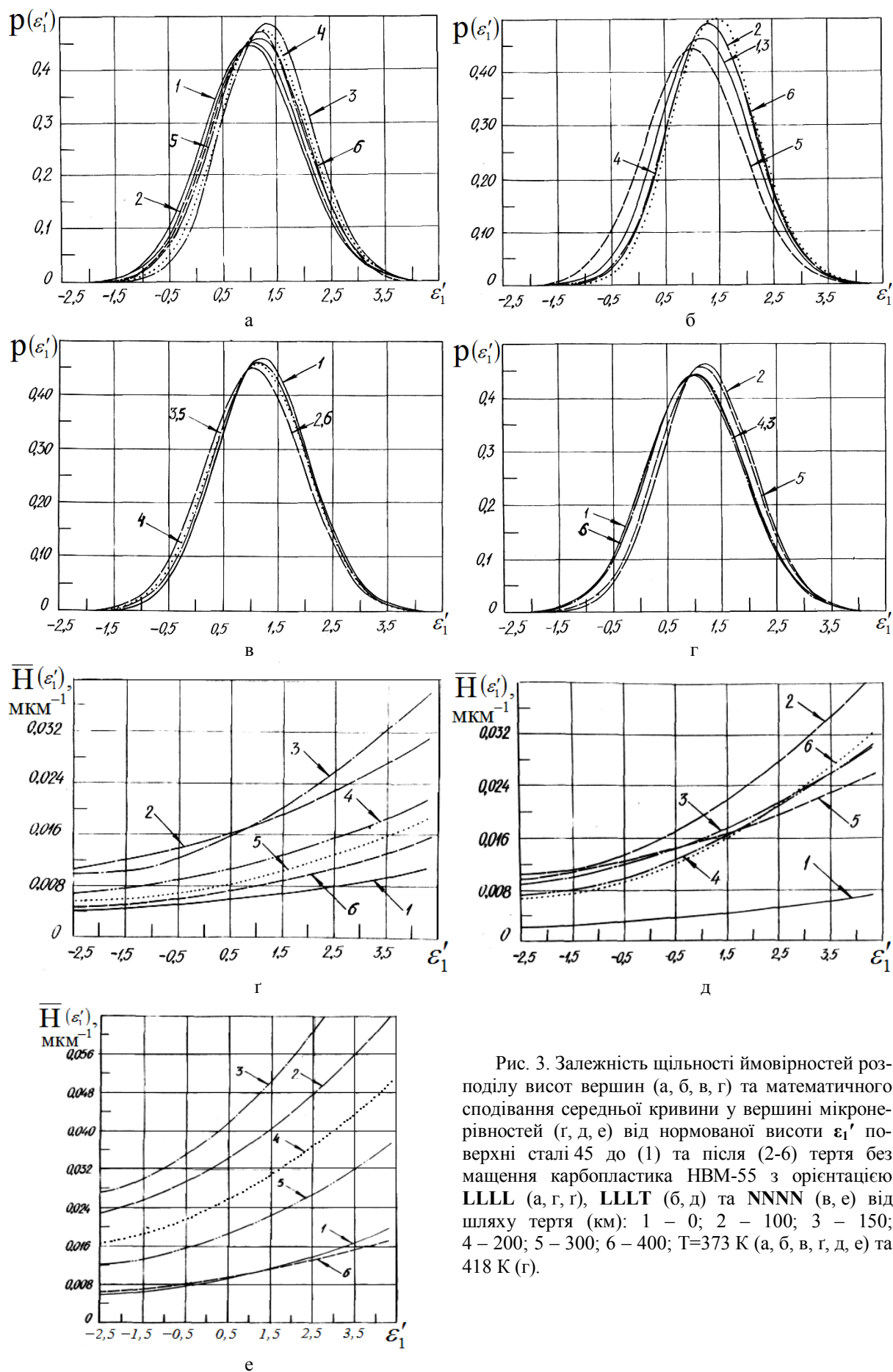


Рис. 3. Залежність щільності ймовірностей розподілу висот вершин (а, б, в, г) та математичного сподівання середньої кривини у вершині мікронерівностей (г, д, е) від нормованої висоти ε_1' поверхні сталі 45 до (1) та після (2-6) тертя без мащення карбопластика НВМ-55 з орієнтацією LLL (а, г, г), LLLT (б, д) та NNNN (в, е) від шляху тертя (км): 1 – 0; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200; 5 – 300; 6 – 400; $T=373$ К (а, б, в, г, д, е) та 418 К (г).

Розподіл щільності висот вершин вихідної поверхні не підпорядкований гавсівському розподілу. Для LLLL-орієнтації ВВ (рис. 3а) і значною мірою для LLLT-орієнтації ВВ (рис. 3б) під час збільшення шляху тертя до 150 км (LLLL) та до 100 км (LLLT) проходить збільшення ймовірності появи високих піків, а розподіл висот вершин поверхні стали ще більше, ніж для вихідної поверхні, і віддаляється від гавсівського розподілу. Параметр широкосмугастості спектру α зменшується, що говорить про звуження діапазону довжин хвиль. Для LLLL-орієнтації в діапазоні 200-400 км проходять значні коливання розподілу відносно вихідного розподілу висот вершин.

Для NNNN-орієнтації (рис. 3в) спостерігається зміщення розподілу висот вершин до гавсівського на початковому шляху тертя (0 ... 100 км), а надалі спостерігається невелике коливання розподілу. Разом з тим, для всіх випадків $\alpha < 15$ збільшення температури поверхні від 373 до 418 К не змінює виявлених закономірностей (пор. рис. 3а і рис. 3г). Для розподілу середніх кривин у вершині мікронерівностей металеві поверхні (рис. 3г, д, е) спостерігається загальна закономірність: із збільшенням шляху тертя до 100-150 км середні кривини зростають, потім до 400 км розподіл кривин поступово наближається до вихідної поверхні. За мінімальною зміною розподілу кривини спряженої сталеві поверхні орієнтацію ВВ карбопластика можна укласти до такого ряду:

$$LLLT < LLLL < NNNN. \quad (26)$$

Висновки

1. З'ясовано, що для переважної більшості схем армування і випробувань орієнтованих карбопластиків у загальному випадку на початку тертя зберігаються орієнтаційні співвідношення за мінімальним коефіцієнтом тертя і інтенсивністю зношування карбопластика та спряженої металеві поверхні, коли шари і самі волокна розташовані перпендикулярно до поверхні тертя і вектора швидкості для інтенсивності зношування та паралельно поверхні тертя і перпендикулярно або паралельно напрямку ковзання для коефіцієнта тертя. З часом тертя або під час зміни температури ці орієнтаційні співвідношення змінюються до орієнтації волокон паралельно поверхні тертя і перпендикулярно вектору швидкості і орієнтації шарів волокон паралельно вектору швидкості та паралельно або перпендикулярно поверхні тертя.

2. Кути орієнтації вуглецевих волокон суттєво впливають на інтенсивність зношування армованих карбопластиків, причому між кутом орієнтації вуглецевих волокон у площині LOT на шляху тертя 0 – 100 км та в площинах LOT і NOT на шляху тертя 100 – 200 км та інтенсивністю зношування зразків композиту існують статистично надійні лінійні зв'язки, у той же час між кутом орієнтації вуглецевих волокон у площині NOL і

NOT на шляху тертя 0 – 100 км та в площині NOL на шляху тертя 100 – 200 км та інтенсивністю зношування зразків композиту існують статистично надійні нелінійні зв'язки, причому в останньому випадку спостерігається максимальний ступінь нелінійності, який перевищує попередні площини у 8,6-27,4 рази.

3. Доведено, що оптимальна структура карбопластика відповідає паралельній орієнтації шарів волокон відносно поверхні тертя і напрямку ковзання при хаотичному розташуванні волокон у шарі. Для структурного забезпечення зносостійкості карбопластика достатньо одноосьового напрямку волокон.

4. Виявлено, що анізотропія фізико-механічних, у тому числі і фрикційних, властивостей орієнтованих волокнитів та вуглецевих волокнистих матеріалів має місце при всіх схемах армування та випробувань.

5. З'ясовано, що для переважної більшості схем армування і випробувань орієнтованих карбопластиків на початку тертя зберігаються орієнтаційні співвідношення у часі випробувань за мінімальним коефіцієнтом тертя, інтенсивностей зношування карбопластика та спряженої металеві поверхні, коли шари і самі волокна наповнювача розташовані перпендикулярно поверхні тертя і вектора швидкості (для інтенсивності зношування) та паралельно поверхні тертя та перпендикулярно або паралельно напрямку ковзання (для коефіцієнта тертя). З часом випробувань або (та) зміни температури ці орієнтаційні співвідношення змінюються до орієнтації волокон паралельно поверхні тертя і перпендикулярно вектору швидкості, а орієнтація шарів волокон – паралельно вектору швидкості та паралельно або перпендикулярно поверхні тертя.

6. Виявлено, що розподіли щільностей ймовірностей висот вершин вихідної металеві поверхні та поверхні, що утворюється у процесі тертя та зношування орієнтованих карбопластиків значно віддалені від гавсівського розподілу, а більш наближені до граничного релеевського розподілу. При орієнтації шарів і волокон композиту відносно спряженої металеві поверхні та вектору швидкості на початку тертя спостерігається збільшення ймовірностей появи високих піків, а розподіл висот вершин ще більше, ніж для вихідної поверхні, віддаляється від гавсівського розподілу і при тривалому випробуванні відбуваються значні коливання цього розподілу відносно вихідного. А при перпендикулярній орієнтації шарів і волокон композиту відносно спряженої поверхні та вектору швидкості спостерігається зміщення розподілу щільності ймовірностей висот вершин мікронерівностей до гавсівського на початку випробувань, а надалі спостерігаються незначні коливання розподілу. Зростання температури металеві поверхні не змінює цих закономірностей. Для розподілу середніх кривин у вершинах мікронерівностей ме-

талевої спряженої поверхні під час тертя та зношування орієнтованого карбопластика спостерігається загальна закономірність: на початку

випробувань середні кривини зростають, а потім розподіл кривин поступово наближається до вихідної металеві поверхні.

Література

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. Luis: Amer Soc. Mech. Eng., 1977)*.
3. Tadasu Tsukizoe, Nobuo Ohmae, Friction and wear performance of Unidirectionally 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. J. Metals and Mater, 2 (5), 285 (1968).
7. Г.О. Сіренко, В.П. Свідерський, Л.Я. Мідак, О.С. Дробот, *Проблеми трибології* 2, 63 (2004).
8. Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак, В.П. Свідерський, О.С. Дробот, Л.В. Караванович, *Фізика і хімія твердого тіла* 6 (2), 317 (2005).
9. Л.М. Солтис, Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак, *Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. Василя Стефаника. Серія Хімія*, XI, 95 (2011).
10. Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак, Л.М. Солтис, Ю.Д. Пахомов, *Математичні методи в хімії і біології*, 1 (2), 55 (2013).
11. М.Н. Степнов, *Статистическая обработка результатов механических испытаний (Машиностроение, Москва, 1972)*.
12. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.Б. Грановський, *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий (Наука, Москва, 1976)*.
13. П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм, *Таблицы по математической статистике (Финансы и статистика, Москва, 1982)*.
14. 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)*.
15. Ю.В. Ашкерев, Ю.В. Заикин, А.Ю. Паплев, *Трение и износ*, 5 (1), 651 (1984).
16. Н.В. Балабанова, С.А. Чижик, З. Римуза, *Трение и износ*, 27 (5), 514 (2006).
17. Н.К. Бачинская, *Исследования контактных характеристик шероховатых, сильно анизотропных поверхностей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 (Хмельницкий, 1994)*.
18. А. Бенгтссон, А. Ренберг, *Трение и износ*, 7 (1), 27 (1986).
19. Э.А. Буланов, *Трение и износ*, 27 (2), 132 (2006).
20. А.И. Буря, А.Д. Деркач, В.И. Шемавнев, *Трение и износ*, 27 (1), 98 (2006).
21. В.А. Валетов, *Труды ЛКИ «Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении» (Ленинград)*, 19 (1978).
22. Н.Б. Демкин, *Трение и износ*, 3 (4), 586 (1982).
23. Н.Б. Демкин, С.В. Удалов, В.А. Алексеев, В.В. Измайлов, А.Н. Болотов, *Трение и износ*, 29 (3), 231 (2008).
24. М.Н. Добычин, *Трение и износ*, 1 (2), 341 (1980).
25. И.В. Крагельский, В.В. Алексин, В.С. Колебанов и др., *Характеристики взаимодействия в микрогеометрии, определяющие контактное взаимодействие шероховатых поверхностей (ИМАШ, Москва, 1973)*.
26. И.В. Крагельский, *Трение и износ*, 1 (1), 12 (1980).
27. И.И. Кудиш, *Трение и износ*, 12 (2), 197 (1991).
28. В.Б. Лемберский, *Трение и износ*, 4 (2), 301 (1983).
29. Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец, С.А. Чижик, В.В. Кончиц, А.И. Свириденко, *Трение и износ*, 4 (5), 845 (1983).
30. Л.Ю. Пружанский, *Трение и износ*, 4 (5), 801 (1983).
31. А.И. Свириденко, Т.Ф. Калмыкова, *Трение и износ*, 1 (5), 898 (1980).
32. И.О. Сивак, В.В. Савуляк, С.И. Сухоруков, Е.И. Сивак, *The Bulletin of Politechnic Institute of Jassi. XLVIII (LII), 3-4*, 165 (2002).
33. Г.А. Сиренко, Н.Ф. Семенюк, *3 Всесою. совещания по уплотнительной технике (ВНИИкомпрессормаш, Сумы, 1982)*, с. 46.

34. В.Т.Фонотов, И.А. Вяткин, Ю.В. Волков, Проблемы трения и изнашивания, (4), 66 (1973).
35. Я. Цуан, С.А. Чижик, Ю.М. Плескачевский, А.Л. Зайцев, Трение и износ, 28 (1), 77 (2007).
36. И.Х. Чеповецкий, В.И. Левитас, С.А. Ющенко, Трение и износ, 7 (5), 841 (1986).
37. И.Х. Чеповецкий, В.Л. Стрижаков, Трение и износ, 2 (5), 928 (1981).
38. А.А. Чернов, БСЭ, (13), 435 (1973).
39. В.М. Шавелин, А.С. Щеглов, Трение и износ, 7 (1), 148 (1986).
40. И.Б. Шендеров, А.С. Духанин, В.А. Калинов, Трение и износ, 10 (2), 313 (1989).
41. В.Г. Щербинский, Трение и износ, 12 (6), 1133 (1991).
42. М.О. Якобсон, Качество поверхности деталей машин, (5), 120 (1961).
43. V.M. Baranov, E.M. Kudryavstev, G.A. Sarychev, A.Z. Stopyra, Friction and wear, 24 (2), 139 (2002).
44. A.Ya. Grigoriev, K.-L. Cho, N.K. Myshkin, Friction and wear, 22 (2), 128 (2000).
45. V.S. Kharchenkov, V.A. Pogonyshev, V.I. Lemeshko, Friction and wear, 21 (1), 91 (1999).
46. A.A. Khmyl, A.P. Dostanko, V.G. Anisimovich, S.A. Chizhik, Friction and wear, 18 (4), 491 (1996).
47. V.M. Khokhlov, Friction and wear, 19 (3), 415 (1997).
48. T.R. Thomas, Wear, 79 (1), 73 (1982).
49. T.R. Thomas, Wear, 33 (2), 205 (1975).
50. V.P. Tikhomirov, O.A. Gorlenko, Friction and wear, 18 (1), 74 (1996).
51. A.I. Voyachek, Friction and wear, 18 (3), 307 (1996).
52. D.J. Whitehouse, J.F. Archard, Proceedings of the Royal Soc., 316 (A), 97 (1970).
53. D.J. Whitehouse, J.F. Archard, Surface Mechanics, Proceedings of the ASME Annual winter meeting, Los Angeles, Calif, November, 16 (1969).
54. A.A. Yevtushenko, E.G. Ivanik, E.V. Kovalenko, Friction and wear, 20 (1), 17 (1998).
55. I.A. Zharov, Friction and wear, 18 (6), 715 (1996).
56. Н.Ф. Семенюк, Н.К. Бачинская, Проблемы трибологии, (3), 103 (1998).
57. Н.Ф. Семенюк, Трение и износ, 7 (6), 1017 (1986).
58. Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко, Трение и износ, 1 (3), 465 (1980).
59. Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко, Трение и износ, 1 (5), 815 (1980).
60. М.Ф. Семенюк, Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 12 (1), 200 (2011).
61. М.Ф. Семенюк, Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (IX), 62 (2010).
62. Н.Ф. Семенюк, К.С. Соколан, Проблеми трибології, 2 (2000).
63. Н.Ф. Семенюк, Трение и износ, 7 (5), 830 (1986).
64. Н.Ф. Семенюк, Трение и износ, 7 (1), 85 (1986).
65. Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая, Проблемы трибологии, (1), 83 (1998).
66. Н.Ф. Семенюк, Е.В. Терлецкая, Проблемы трибологии, (1), 90 (1998).
67. Г.О. Сиренко, О.В. Кузишин, Л.Я. Мідак, Четверта міжнародна науково-практична конференція «Розвиток наукових досліджень 2008» (ІнтерГрафіка, Полтава, 2008), с. 38.
68. Г.О. Сиренко, М.Ф. Семенюк, I Міжнарод. симпозиум «Фізико-хімічна механіка композиційних матеріалів» (Івано-Франківськ, 1993), с. 53.
69. Г.О. Сиренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (X), 123 (2010).
70. Г.О. Сиренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 11 (4), 914 (2010).
71. Г.О. Сиренко, М.Ф. Семенюк, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 11 (3), 768 (2010).
72. Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 11 (2), 423 (2010).
73. Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (VII), 104 (2009).
74. А.П. Хусу, Ю.Р. Виттенберг, В.А. Пальмов, Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход (Наука, Москва, 1975).
75. М.И. Ядренко, Спектральная теория случайных полей (Вища шк., Киев, 1980).
76. A.W. Bush, R.D. Gibson, G.P. Keogh, Res. Comm. Mech., 3, 169 (1976).
77. A.W. Bush, R.D. Gibson, T.R. Thomas, Wear, 35, 87 (1976).
78. A.W. Bush, R.D. Gibson, G.P. Keogh, Wear, 40, 399 (1976).
79. С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина, Введение в теорию трения полимеров (Зинатне, Рига, 1978).
80. С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина, Механика полимеров, (2), 241 (1977).
81. С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина, Механика полимеров, (4), 651 (1977).
82. Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 14 (3), 636 (2013).
83. М.С. Лонге-Хиггинс, Статистическая геометрия случайных поверхностей (Мир, Москва, 1964).
84. Г.О. Сиренко, Л.М. Солтис, М.Ф. Семенюк, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (XII), 133 (2011).

85. Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (VIII), 99 (2009).
86. М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, Фізика і хімія твердого тіла, 12 (3), 795 (2011).
87. М.Ф. Семенюк, Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, Вісник Прикарп. нац. ун-ту ім. В. Стефаника. Сер. Хімія, (IX), 62 (2010).
88. Н.Ф. Семенюк, Г.А. Сиренко, Трение и износ, 1 (6), 1010 (1980).
89. Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис, Математичні методи в хімії і біології, 2 (1), 105 (2014).
90. Г.А. Сиренко, А.А. Кутьков, В.П. Свидерский, О механизме трения полиамидов при смазке полиорганосилоксанами: Применение синтетических материалов (Картя Молдовеняске, Кишинеу, 1975).

Сіренко Геннадій Олександрович – заслужений діяч науки і техніки України, 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.

Пахомов Юрій Дмитрович – аспірант кафедри неорганічної та фізичної хімії.