

Г.О. Сіренко, Л.М. Солтис

Залежність ефектів післядії та контакту шорстких поверхонь композит-метал від орієнтаційних чинників дисперсної фази полімерної матриці

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

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. Досліджено вплив схем армування волокнистими вуглецевими матеріалами полімерних композитів та схем контактування зразків композитів з поверхнею металевого контртіла на інтенсивність зношування пари тертя та на зміну параметрів мікрошорсткості 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 релеєвського.

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

Стаття поступила до редакції 15.02.2016; прийнята до друку 15.03.2016.

Вступ

Встановлено [1-13], що інтенсивність зношування карбопластиків та карбоволокнитів суттєво залежить від орієнтації волокон і шарів стрічок та тканин 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 та 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 полімерного 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), величини навантаження і вектора швидкості ковзання на орієнтаційне співвідношення за зносостійкістю та коефіцієнтом тертя не виявлено

[3]. Так, за даними [4] анізотропія структури карбопластика найбільш різко виявляється у початковому періоді ковзання. І, навпаки, за даними [5] із збільшенням шляху тертя анізотропія армування проявляється більш суттєво.

Вплив навантаження на інтенсивність зношування під час постійного та змінного руху більш суттєвий, ніж на коефіцієнт тертя [4]. Анізотропія розташування волокон у композиті виявляється при малих питомих навантаженнях [4], а за іншими 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.

В [11] досліджено вплив природи та твердості поверхонь металевих контртіл на зношування карбопластиків: встановлені кореляційні зв'язки між твердістю НВ суміжних металевих поверхонь та питомою інтенсивністю об'ємного зношування та коефіцієнтами тертя карбоволокниту для двох напрямків стрічок та вуглецевих волокон LLLT та NLNN. Показано [11], що всі кореляційні зв'язки нелінійні, окрім «НВ – μ (LLLТ)» за критеріями: критичного значення коефіцієнта кореляції ($r_{кр.}$),

перетворення Фішера (z) та Стюдента (t) з рівнями значущості перевірки нульової гіпотези $\alpha=0,05$ та $\alpha=0,01$.

У [12] досліджено вплив технологічних (час хемо-механічної активації) та трибологічних (питома інтенсивність об'ємного зношування) властивостей на часовий та навантажувальний ефекти післядії для полімерних композитів на основі ПТФЕ-матриці, наповненої неметалізованими та металізованими (одно- або двошаровими покриттями $[\text{Cu}^0+\text{Cu}_2\text{O}]$; $[\text{Ni}^0+\text{P}]$) карбонізованими (з кінцевою температурою термообробки 1123 K) вуглецевими волокнами.

Показано [12], що під час протизносних випробувань зразків композитів як під час ступінчатого надграничного питомого навантаження $N_i=\text{var}$, так і під час сталого граничного та помірного питомого навантаження ($N_i=\text{const}$) з високою ймовірністю проявляється часовий ефект післядії – вплив процесів зношування i -моменту на j -момент часу, при цьому часовий ефект післядії значно впливає на зношування зразків композитів під час ступінчатого змінного навантаження, ніж під час сталого навантаження, і тим сильніше, чим більше навантаження, при цьому, композити, що містять міднені карбонізовані волокна, більш чутливі до часового ефекту післядії у режимі ступінчатого навантаження, ніж волокна без покриття при зміні часу активації композиції від 4 до 30 хв., тобто вибірковий механізм переносу міді більше залежить від часового ефекту післядії, ніж механізм переносу ПТФЕ на спряжені поверхні.

У [13] досліджено кореляційні зв'язки між питомими інтенсивностями об'ємного зношування, коефіцієнтами тертя карбопластика [на основі ПТФЕ-матриці та карбонізованого ($T_k=1123$ K) вуглецевого волокна] та вихідною і отриманою в процесі тертя та зношування шорсткістю (моментом нульового порядку) і змінною шорсткістю в процесі тертя та зношування поверхонь металевих контртіл без покриття та з покриттями Cr, Zn, TiN, MoS_2 та окисдованими на повітрі та під час лазерного зміцнення.

Показано [13], що між цими величинами існують нелінійні кореляційні зв'язки, окрім між початковим коефіцієнтом тертя та початковою шорсткістю поверхні контртіла.

Мета роботи полягала у дослідженні закономірностей зношування поверхонь контактної пари «полімерний композит – метал» у залежності від орієнтації структурних елементів композиту відносно поверхні тертя контртіла та вектору швидкості ковзання.

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

1.1. Для орієнтації волокон відносно площини ковзання і вектору 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 вектору швидкості відповідно; третя і четверта – орієнтацію шару волокон відносно поверхні тертя і вектору швидкості відповідно.

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.

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 вектору швидкості):

LLLR – 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 вектору швидкості (R);

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

1.4. Для односпрямованих шаруватих композитів, які виготовляють із стрічок, введемо такі схеми армування:

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),

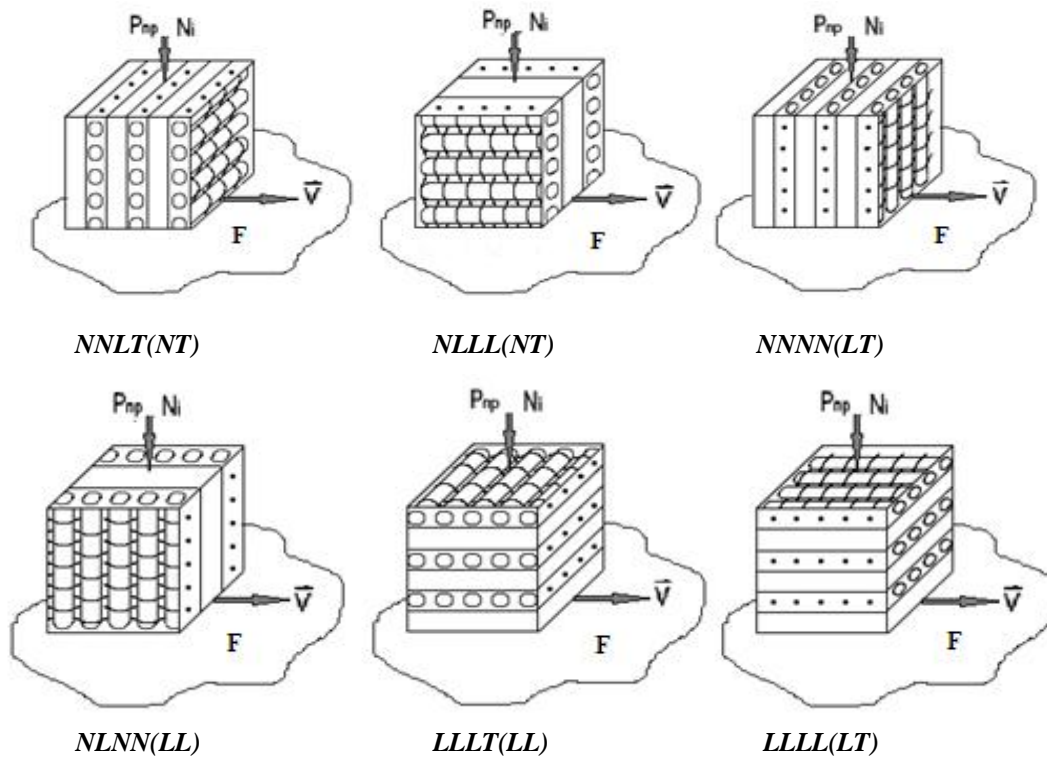


Fig. 1. Schemes of reinforcement of layered composites on weaving base and their contact with conjugated surfaces (F). P_{np} – direction of movement efforts; N_i – direction of the normal loads for one sample; \hat{v} – vector of sliding velocity.

а самі волокна – рівнобіжно поверхні тертя (L) і прямовисно 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 прямовисно вектору швидкості (T);

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

NLNN – шари волокон стрічки спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і паралельно вектору швидкості (L), а самі волокна – прямовисно 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 волокон 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 (рис. 1):

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

волокна підткання – прямовисно 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 – прямовисно поверхні тертя (N) і вектору швидкості (T);

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

NLNN(LL) – шари тканини спрямовані перпендикулярно поверхні тертя (N) і паралельно вектору швидкості (L), волокна основи тканини – прямовисно 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 прямовисно 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 прямовисно вектору швидкості (T).

II. Вплив кута орієнтації вуглецевого волокна на питому інтенсивність об'ємного зношування

2.1. Вплив напрямків пресування та нормального навантаження на зношування зразків на основі політетрафторетилену (ПТФЕ), наповненого 20% карбонізованих (кінцева температура термообробки ГЦ-волокна 1123К у CH₄) вуглецевих волокон УТМ-8 (LM-низькомодульне), 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 криці 45 (НВ 4,5 ГПа; $Ra_0 = 0,2$ мкм), за температури поверхні $T = 373 \pm 1$ К.

Для ПТФЕ-карбoplastиків 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.

Table 1

The influence of orientation of short fibers on the intensity volumetric of wear and time aftereffect PTFE-composite with 20% carbonated fiber UTM-8 (LM)

Схеми армування та випробувань	Питома інтенсивність об'ємного зношування I , $\times 10^{-7}$ мм ³ /(Н·м) на шляху тертя		ξ_S
	$S_1=0-50$ км	$S_2=50-300$ км	
NLN _R N _R	$6,8 \pm 0,6$	$4,0 \pm 0,3$	0,588
NNN _R N	$6,3 \pm 0,5$	$3,4 \pm 0,2$	0,540
LLLR	$5,5 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,2$	0,455

Table 2

The influence of angle orientation of carbon fibers on the intensity volumetric of wear and time aftereffect of carbon-plastics based on epoxy + phenol formaldehyde (1:1) pitches + 55% graphite fiber VMN-4 (HM)

Площина орієнтації	Напрямок орієнтації	Інтенсивність зношування, I , $\times 10^{-7}$ мм ³ /(Н·м) на шляху тертя		ξ_S
		$S_1=0-100$ км	$S_2=100-200$ км	
LOT	LL _{0°} =LL	15,5	13,811	0,890
LOT	LL _{30°}	13,8	6	0,435
LOT	LL _{45°}	10,6	9,2	0,868
LOT	LL _{60°}	9,1	6,6	0,725
LOT	LL _{90°} =LL	7,3	4,8	0,658
NOT	N _{0°} N=NN	8,1	11,4	1,407
NOT	N _{30°} N	6,2	8,5	1,371
NOT	N _{45°} N	4,7	7,4	1,575
NOT	N _{60°} N	6,5	6,2	0,954
NOT	N _{90°} N=LT	7,3	4,8	0,658
NOL	N _{-90°} L _{180°} =LL	15,5	13,8	0,890
NOL	N _{-60°} L _{150°}	12,3	10,3	0,837
NOL	N _{-45°} L _{135°}	10,1	6,5	0,644
NOL	N _{-30°} L _{120°}	9,4	8,7	0,926
NOL	N _{0°} L _{90°} =NN	8,1	11,4	1,407
NOL	N _{30°} L _{60°}	8,8	8,2	0,932
NOL	N _{45°} L _{45°}	9,6	6,4	0,667
NOL	N _{60°} L _{30°}	11,9	10,5	0,882
NOL	N _{90°} L _{0°} =LL	15,5	13,8	0,890

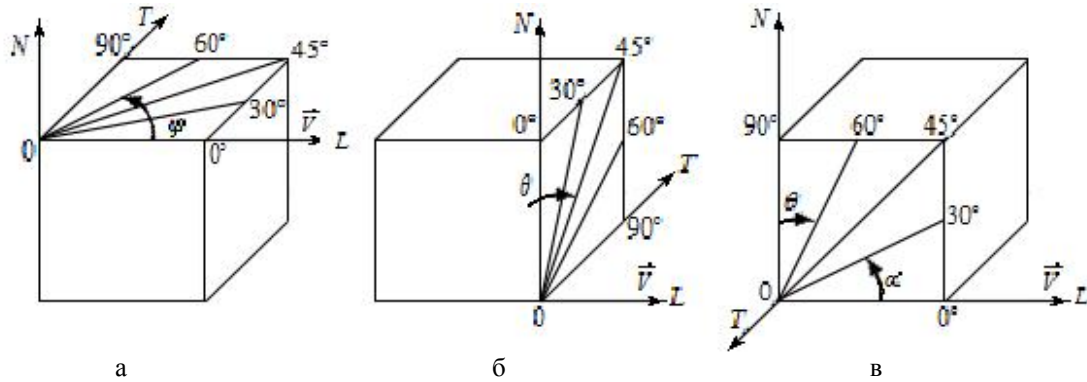


Fig. 2. Angles of orientation of carbon fiber in planes LOT (a), NOT (b) and NOL (c) relative to the plane of contact with metal counterface and velocity vector (\vec{v}).

Оцінку часового ефекту післядії визначали за співвідношенням:

$$X_s = \frac{I_2(S_2)}{I_1(S_1)}, \quad (1)$$

де $I_1(S_1)$, $I_2(S_2)$ – питомі інтенсивності об’ємного зношування на шляху тертя S_1 і S_2 відповідно.

Як видно з табл. 1, часовий ефект післядії для всіх орієнтацій вуглецевого волокна менше 1 за свідношенням:

$$NLNN, NNNN > LLLR. \quad (2)$$

2.2. Результати оцінки впливу кута орієнтації вуглецевого високомодульного волокна ВМН-4 типу НМ (високомодульне) у площинах LOT, NOT та NOL (рис. 2) на питому інтенсивність об’ємного 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.

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 та часового ефекту післядії від 0,890 до 0,658 при мінімальному його значенні за 30° орієнтації. 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 цьому часовий ефект післядії поступово зменшується від 1,407 до 0,658 при зміні кута орієнтації від 0° до 90° .

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. При цьому часовий ефект післядії зменшується від 0,890 до 0,644 під час зміни кутів орієнтації від -90° до

-45° за N при зміні кута орієнтації від -45° до $+135^\circ$ за L; а при зростанні кута орієнтації 0° за N та зменшення цього кута до 90° за L ефект післядії зростає до 1,407, а потім знову падає до 0,667 за $+45^\circ$ за N та $+45^\circ$ за L; а при зміні кута орієнтації до $+90^\circ$ за N та до 0° за L ефект післядії знову зростає до 0,890.

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 грален (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 [14-31].

1. Методика дослідження триботехнічних властивостей на машині тертя ХТІ-72 [32].

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. Металеве контртіло шліфували, а потім обробляли на шліфувальній шкурці у випадкових напрямках (для того, щоб отримати поверхню, яка була би близькою до ізотропної). Після припрацьовування полімерних зразків металеве контртіло знову припрацьовували на шліфувальній шкурці.

Перша серія випробувань. Дослідження проводили за схемою [I-5] [32] при швидкості ковзання $V=0,54$ м/с, питомому навантаженні $P=2$ МПа по сталі 45 (НВ 4,35 ГПа; середнє арифметичне відхи-

лення профілю вихідної поверхні $R_{a0}=0,35$ мкм) на шляху тертя $S_1=0...100$ км (С-50; Т-1/0) та $S_2=0...500$ 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 металевої поверхні контртіла визначалася термопарою ХК на відстані $\sim 0,5-1$ мм від поверхні у ділянці сліду тертя (сигнал від термопар ХК записували на ленту потенціометра КСП-4).

Друга серія випробувань. Дослідження проводили за схемою [1-5] [32] 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 $S=0...400$ 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 $\sim 0,5-1$ мм від поверхні у ділянці сліду тертя (сигнал від термопар 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 профілограм для металевого контртіла і 10-15 базових довжин профілограм для полімерного зразка. Для ізотропної поверхні профілограму знімали під кутом $\sim 45^\circ$ до напрямку ковзання. Ділянки зйомки поверхні були рівнорозподілені за слідом тертя. Статистичні характеристики різних ділянок поверхні були однаковими в статистичному розумінні.

Профілограми оброблялися за методом [21]: 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 шорсткої 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. 3 приведені результати питомої об'ємної інтенсивності зношування карбопластика і спряженої поверхні за першою серією випробувань. Як видно з табл. 3, анізотропія властивостей композиту дуже помітно проявляється для всіх досліджених матеріалів. У табл. 3: вихідне органічне волокно: ГЦ – з гідратцелюлози; ПАН – з поліакрилонітрилу; вуглецеве волокно: LM – низького модуля; НТ – високої міцності; МТ – середньої міцності.

У табл. 3 ефект динамічного контакту поверхонь полімерного композиту (1) і металу (2) визначали за співвідношенням:

$$X_{12} = \frac{I(1)}{I(2)}, \quad (3)$$

де $I(1)$, $I(2)$ – питомі інтенсивності об'ємного зношування поверхонь полімерного композиту (1) та металу (2) відповідно.

Як видно з табл. 3, ефект динамічного контакту «полімерний композит-метал» визначається: вихідним органічним волокном, температурою кінцевої термообробки, властивостями вуглецевого волокна, текстильною формою ВВМ та напрямками армування і контакту.

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

$$\text{LLRR} < \text{NNRR} \\ 39 < 88. \quad (4)$$

Така ж залежність спостерігається під час зношування металевої спряженої поверхні:

$$\text{LLRR} < \text{NNRR} \\ 160 < 230. \quad (5)$$

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 (4) – (12) 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 напрямок **NNNN**, однак після 200 км більшу зносостійкість мають зразки, які армовані в **NLNN** напрямку. Орієнтаційні співвідношення за інтенсивністю зношування (табл. 3) виглядають так (у ряду зліва направо інтенсивність зношування зростає):

- **композит:**

$$\text{NLNN} < \text{NNNN} < \text{LLLL} < \text{LLLL} \\ 5,3 < 6,5 < 7,6 < 8,1; \quad (6)$$

- **спряжена металева поверхня:**

$$\text{LLLL} < \text{LLLL} < \text{NLNN} < \text{NNNN} \\ 0,5 < 1,1 < 3,6 < 5,1. \quad (7)$$

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):

Table 3

Specific volumetric intensity of wear of carbon-plastic and conjugated metal surface and the effect of dynamic contact of polymer composite and metal

Пластик: полімерна матриця	Вуглецевий волокнистий матеріал			Напрямок армування	Питома об'ємна інтенсивність зношування, мм ³ /Н·м		ξ_{12} , ($\times 10^4$)
	марка	текстильна форма (вихідне органічне волокно) тип вуглецевого волокна	кінцева темпе- ратура термо- обробки, К		(1) карбо- пластика ($\times 10^{-7}$)	(2) метале- вого контртіла ($\times 10^{-11}$)	
Карбоволокнит: епоксидна смола	грален	волокно (ГЦ) LM	1973	LLRR	39	160	0,244
Карбоволокнит: епоксидна смола	грален	волокно (ГЦ) LM	1973	NNRR	88	230	0,383
Карбоволокнит: епоксидна+ фенол- формальдегідна смоли (1:1)	ЛУ-2	стрічка (ПАН) НТ	2673	LLLL	8,1	1,1	7,364
-//-	ЛУ-2	-//-	2673	LLLT	7,6	0,5	15,200
-//-	ЛУ-2	-//-	2673	NNNN	6,5	5,1	1,275
-//-	ЛУ-2	-//-	2673	NLNN	5,3	3,6	1,472
Карботекстоліт: епоксидна смола	УУТ-2	тканина (ГЦ) МТ	1123	LLLL(LT)	41	11	3,727
-//-	УУТ-2	-//-	1123	LLLT(LL)	38	9	4,222
-//-	УУТ-2	-//-	1123	NNNN(LT)	51	37	1,378
-//-	УУТ-2	-//-	1123	NLNN(LL)	74	68	1,088
-//-	УУТ-2	-//-	1123	NNLT(NN)	76	97	0,784
-//-	УУТ-2	-//-	1123	NLLL(NN)	45	13	3,462

● 0-200 км:

$$\text{NNNN} < \text{NLNN} < \text{LLLT} < \text{LLLL}; \quad (8)$$

● 200-450 км:

$$\text{NLNN} < \text{LLLL} < \text{LLLT} < \text{NNNN}. \quad (9)$$

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):

$$\text{LLLL(LT)} < \text{LLLT(LL)} < \text{NLLL(NN)} < \text{NNNN(LT)} < \text{NNLT(NN)} < \text{NLNN(LL)}; \quad (10)$$

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

$$\text{LLLT(LL)} < \text{LLLL(LT)} < \text{NLLL(NN)} < \text{NNNN(LT)} < \text{NLNN(LL)} < \text{NNLT(NN)} \\ 38 < 41 < 45 < 51 < 74 < 76; \quad (11)$$

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

$$\text{LLLT(LL)} < \text{LLLL(LT)} < \text{NLLL(NN)} < \text{NNNN(LT)} < \text{NLNN(LL)} < \text{NNLT(NN)} \\ 9 < 11 < 13 < 37 < 68 < 97. \quad (12)$$

Узагальнений висновок можна зробити за впливом T_k вуглецевого матеріалу на зношування карбопластиків [збільшення T_k зменшує зношування: I' (1123 К) > I'' (1973 К) > I''' (2673 К)] 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. 4) план і отримані наближені рівняння інтенсивності зношування карботекстоліту.

Table 4

Scheme of test of carbo-textolites*

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	LLLT(LL)

* Legend: **T** – cloth; **O** – the basis; **P** – weft; (+1) – perpendicular, (-1) – parallel to the direction of reinforcement; **F** – plane friction; **V** – vector of velocity sliding.

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:

$$I = 6,45 + 2,813X_1 - 1,713X_2 + 2,097X_3 + 2,623X_4 - 1,977X_5 - 1,633X_6. \quad (13)$$

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

$$X_1 > X_4 > X_3 > X_6 > X_2 > X_5. \quad (14)$$

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

За планом (табл. 4) досліджено також вплив напрямку шарів вуглецевої тканини і волокон на антифрикційні властивості карботекстоліту на основі алюмофенілсилоксанової + 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 ($Ra_0=0,24$ мкм) у модельній океанській воді [склад (г/л): 26,518 NaCl + 2,447 MgCl₂·6H₂O + 6,765 MgSO₄·x·6H₂O + 2,252 CaCl₂·6H₂O + 0,725KCl + 0,202NaHCO₃+0,083NaBr] при $P=2$ МПа; $V=0,3$ м/с; $T=306\pm 2$ К; $S=10$ км. При цьому значення критеріїв гідродинамічних ефектів склали $S_h=7,6 \cdot 10^{-13}$ м²; $S_m=1,7 \cdot 10^{-8}$; $S_c=1,9 \cdot 10^{-5}$ Н [33].

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):

$$I_1 = 11,967 - 1,269X_1 - 1,473X_2 - 3,314X_3 - 5,225X_4 + 2,045X_5 + 3,753X_6; \quad (15)$$

$$I_2 = 8,633 - 1,865X_1 - 1,366X_2 - 3,07X_3 - 4,254X_4 + 1,205X_5 + 2,89X_6; \quad (16)$$

• для карботекстоліту з домішкою 14% порошку ПТФЕ:

$$I_1 = 18,590 - 1,477X_1 - 2,277X_2 + 0,285X_3 + 1,167X_4 - 1,767X_5 - 3,443X_6; \quad (17)$$

$$I_2 = 10,077 - 0,261X_1 - 0,527X_2 - 0,028X_3 + 0,275X_4 - 0,234X_5 - 0,801X_6; \quad (18)$$

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 чинників 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):

$$I_1: X_4 > X_6 > X_3 > X_5 > X_2 > X_1; \quad (19)$$

$$I_2: X_4 > X_3 > X_6 > X_1 > X_2 > X_5; \quad (20)$$

• для карботекстоліту з домішкою 14% порошку ПТФЕ:

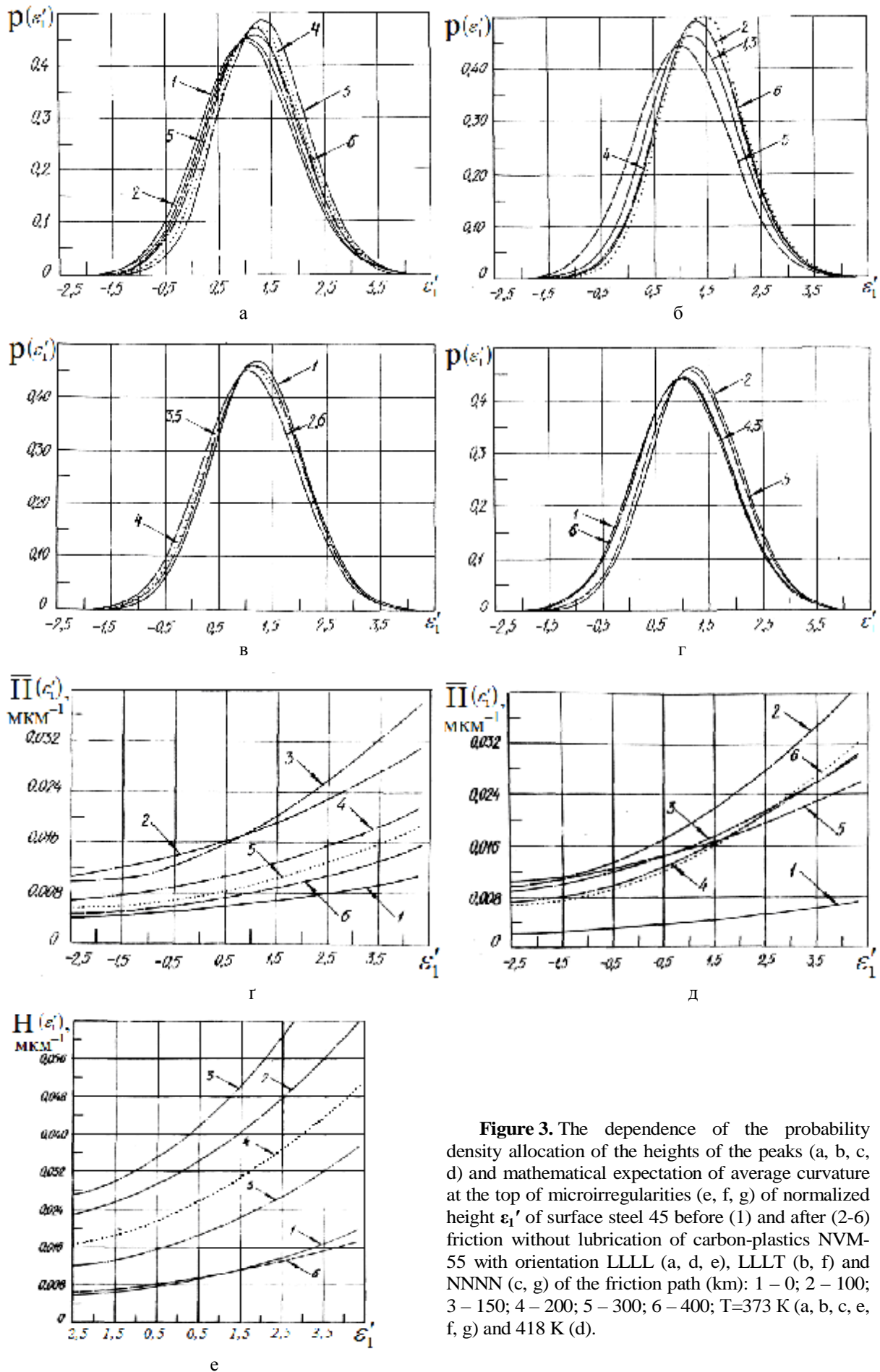
$$I_1: X_6 > X_2 > X_5 > X_1 > X_4 > X_3; \quad (21)$$

$$I_2: X_6 > X_2 > X_4 > X_1 > X_5 > X_3. \quad (22)$$

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 та зношування карбопластиків з орієнтованими волокнами.

Ймовірно, що всі ці чинники властивостей та структур ВВМ змінюють топографії поверхонь контактної пари, тому виникла необхідність дослідження зміни шорскості металевих поверхонь у процесі тертя та зношування.

Використовуючи теорію випадкового поля для математичного опису шорскості поверхонь [14-31], 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 [22] для щільності ймовірностей розподілу висот вершин ізотропної поверхні та в [21] 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.

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 сталі 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. 3 г, 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:

$$LLLT < LLLL < NNNN. \quad (23)$$

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 та 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 металевої 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 металевої 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 металевої

поверхні не змінює цих закономірностей. Для розподілу середніх кривин у вершинах мікронерівностей металевої 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 металевої поверхні.

7. Встановлено, що суттєвими характеристиками тертя та зношування пари «полімерний композит (зі структурованою дисперсною фазою) – метал» є часовий ефект післядії та ефект динамічного контакту.

Сіренко Г.О. – заслужений діяч науки і техніки України, академік АТНУ, професор, доктор технічних наук, професор кафедри неорганічної та фізичної хімії;

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

- [1] J.P. Giltrow, J.D. Lancaster, Friction and wear of Polymers Reinforced with Carbon Fibres, Nature 214, 5093, 1106 (1967).
- [2] T. Tsukizoe, N. Ohmae, Wear mechanism of unidirectionally oriented fiber-reinforced plastics, Proc. Intern. Conf. on Wear of Materials (St. Luuis: Amer Soc. Mech. Eng., 1977).
- [3] Tadasu Tsukizoe, Nobuo Ohmae, Friction and wear performance of Unidsrectionally Oriented Class, Carbon, Aramid and Stainless Steel Fiber-Reinforced Plastics, Frict. and Wear Polym. Compos. (Amsterdam, 1986).
- [4] T. Tsukizoe, N. Ohmae, Tribo- mechanics of carbon-fiber reinforced plastics, Industrial Lubrication and Tribology, 28 (1), 19 (1976).
- [5] Z. Eliezer, V. D. Kxanna, M.F Amateau, Wear 51 (3), 169 (1978).
- [6] J. Metals and Mater, 2 (5), 285 (1968).
- [7] H.O. Sirenko, L.Ya. Midak, L.M. Soltys, Yu.D. Pakhomov, Matematychni metody v khimiyi i biolohiyi, 1 (2), 55 (2013).
- [8] L.M. Soltys, H.O. Sirenko, L.Ya. Midak, Visnyk Prykarp. nats. un-tu im. Vasylyya Stefanyka. Seriya Khimiya, KhI, 95 (2011).
- [9] H.O. Sirenko, V.P. Sviders'kyy, L.Ya. Midak, O.S. Drobot, Problemy trybolohiyi 2, 63 (2004).
- [10] H.O. Sirenko, L.Ya. Midak, V.P. Sviders'kyy, O.S. Drobot, L.V. Karavanovych, Fyzyka i khimiya tverdoho tila, 6 (2), 317 (2005).
- [11] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, M.B. Skladanyuk, Fyzyka i khimiya tverdoho tila, 16 (4), 734 (2015).
- [12] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, M.B. Skladanyuk, A.V. Lutsas', Fyzyka i khimiya tverdoho tila, 16 (2), 360 (2015).
- [13] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, I.V. Sulyma, Fyzyka i khimiya tverdoho tila, 15 (4), 822 (2014).
- [14] N.F. Semenyuk, H.A. Syrenko, Trenye y yznos, 1 (3), 465 (1980).
- [15] N.F. Semenyuk, H.A. Syrenko, Trenye y yznos, 1 (5), 815 (1980).
- [16] M.F. Semenyuk, H.O. Sirenko, L.M. Soltys, Fyzyka i khimiya tverdoho tila, 12 (1), 200 (2011).
- [17] M.F. Semenyuk, H.O. Sirenko, L.M. Soltys, Visnyk Prykarp. nats. un-tu im. V. Stefanyka. Ser. Khimiya, (IKh), 62 (2010).
- [18] N.F. Semenyuk, Trenye y yznos, 7 (6), 1017 (1986).
- [19] N.F. Semenyuk, Trenye y yznos, 7 (5), 830 (1986).
- [20] N.F. Semenyuk, Trenye y yznos, 7 (1), 85 (1986).
- [21] H.O. Sirenko, M.F. Semenyuk, L.M. Soltys, Visnyk Prykarp. nats. un-tu im. V. Stefanyka. Ser. Khimiya, (Kh), 123 (2010).
- [22] H.O. Sirenko, M.F. Semenyuk, L.M. Soltys, Fyzyka i khimiya tverdoho tila, 11 (4), 914 (2010).
- [23] H.O. Sirenko, M.F. Semenyuk, L.M. Soltys, Fyzyka i khimiya tverdoho tila, 11 (3), 768 (2010).
- [24] A.P. Khusu, Yu.R. Vyttenberh, V.A. Pal'mov, Sherokhovatost' poverkhnostey. Teoretyko-veroyatnostnyy podkhod (Nauka, Moskva, 1975).
- [25] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, Fyzyka i khimiya tverdoho tila, 11 (2), 423 (2010).
- [26] M.Y. Yadrenko, Spektral'naya teoryya sluchaynykh poley (Vyshcha shk., Kyev, 1980).
- [27] M.S. Lonhe-Khyhhyns, Statystycheskaya heometryya sluchaynykh poverkhnostey (Myr, Moskva, 1964).

- [28] H.O. Sirenko, L.M. Soltys, M.F. Semenyuk, Visnyk Prykarp. nats. un-tu im. V. Stefanyka. Ser. Khimiya, (KhII), 133 (2011).
- [29] M.F. Semenyuk, H.O. Sirenko, L.M. Soltys, Fyzyka i khimiya tverdoho tila, 12 (3), 795 (2011).
- [30] M.F. Semenyuk, H.O. Sirenko, L.M. Soltys, Visnyk Prykarp. nats. un-tu im. V. Stefanyka. Ser. Khimiya, (IKh), 62 (2010).
- [31] N.F. Semenyuk, H.A. Syrenko, Trenye y yznos, 1 (6), 1010 (1980).
- [32] H.O. Sirenko, Stvorenniya antyfryktsiynykh materialiv na osnovi poroshkiv termotryvkykh polimeriv ta vuhletsevykh volokon: Dys. ... dokt. tekhn. nauk (In-t problem materialoznavstva im. I.M. Frantsevycha NANU, Kyiv, 1997).
- [33] H.A. Syrenko, A.A. Kut'kov, V.P. Svydersky, O mekhanizme trenyya polyamydov pry smazke polyorhanosyloksanamy: Prymenenye syntetycheskykh materyalov (Kartya Moldovenyaske, Kyshyneu, 1975).

H.O. Sirenko, L.M. Soltys

The Dependence of Aftereffects and Contact of Rough Surfaces Composite – Metal from Orientation Factors of Dispersed Phase of Polymer Matrix

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76018, Ukraine, e-mail: orijant@gmail.com*

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. The influence of schemes reinforcing by fibrous carbon materials of polymer composites and schemes contacting of samples 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, aftereffect, effect of contact.