ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 6, № 4 (2005) С. 692-701

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 6, № 4 (2005) P. 692-701

УДК 621.762.222/224:621.763:621.893

ISSN 1729-4428

Г.О. Сіренко[1], Л.Я. Мідак[1], В.П. Свідерський[2], Л.В. Базюк[1]

Вплив суміжних поверхонь на антифрикційні властивості композиційних полімерних матеріалів. Карбопластики за ХМА-технологією

[1]Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна
[2]Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, 29000, Україна

Досліджено залежність антифрикційних властивостей полімерних композитів, наповнених вуглецевими волокнистими матеріалами, від механічних і теплофізичних властивостей суміжних поверхонь твердих тіл. Встановлено, що не існує лінійної залежності між антифрикційними властивостями і твердістю та іншими фізико-механічними і теплофізичними властивостями контртіл із покриттями. Встановлено, що для композиційних матеріалів, одержаних за ХМА-технологією антифрикційні властивості визначаються станом вихідної поверхні контртіла і поверхневими шарами, що утворюються на поверхнях зразка і суміжної поверхні в процесі тертя і зношування.

Ключові слова: карбопластик, полімерна матриця, вуглецеве волокно, суміжна поверхня, твердість, інтенсивність зношування.

Стаття поступила до редакції 05.07.2005; прийнята до друку 15.11.2005.

Вступ

Кореляції між зносом і коефіцієнтом тертя карбопластиків при ковзанні по металевих контртілах не виявлено [1, 2]. Знайдено, що зносостійкість карбопластиків залежить від модуля пружності, міцності при розтягуванні, міжшарової міцності композитів [2]. У [1] не знайдено кореляції між інтенсивністю зношування та твердістю, міцністю та відносною деформацією при розтягуванні карбопластиків. У нашому першому повідомленні [3] розглянуто вплив суміжних поверхонь на антифрикційні властивості композиційних полімерних матеріалів з орієнтованими карбоновими волокнами безкінечної довжини на основі термореактивних смол. За цими результатами для всіх металів і стопів суміжної поверхні, типів на напрямків орієнтації вуглецевих волокон і типів карбопластиків знайдено лінійний зв'язок між інтенсивністю зношування карбопластиків і енергоємністю пластичного деформування, коефіцієнтом температуропровідності, коефіцієнтом теплопровідності суміжної поверхні та між коефіцієнтом тертя і міцністю при розтягуванні, енергією деформування при розтягуванні, енергоємністю пластичного деформування.

Мета роботи полягала у пошуку лінійного зв'язку між інтенсивністю зношування і коефіцієнтом тертя полімерних композитів на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2 і політетрафторетилену фторлон-4, наповнених короткими карбоновими волокнами, що розташовані випадково в шарі, з механічними і теплофізичними властивостями суміжних поверхонь твердих тіл.

I. Експериментальна частина

Для оцінки зв'язку антифрикційних властивостей карбопластиків з механічними і теплофізичними властивостями суміжних поверхонь досліджені матеріали на основі ароматичного поліаміду (АПА) фенілон С-2 + 20 % карбонового волокна з графітованої тканини ТГН-2м (LM; ГЦ; $T_к$=2670 К; $\sigma_в$ = 0,45-0,50 ГПа; $E_в$ = 30-50 ГПа) та на основі політетрафторетилену (ПТФЕ) + 20 % карбонового волокна з карбонізованої тканини УТМ-8 (LM; ГЦ; $T_к$ = 1120 К; $\sigma_в$ = 0,5-0,6 ГПа; $E_в$ = 30-50 ГПа), отриманих за хемо-механо-активаційною технологією (ХМА-технологією) [4].

Класифікація карбонових волокон (КВ) дана за [4, 5]: LM – низькомодульні; ГЦ – з гідратцелюлозної тканини; $\sigma_в$ – міцність при розтягуванні; $E_в$ – модуль пружності волокна при розтягуванні; $T_к$ – кінцева температура термообробки волокон.

Дослідження зношування композитів проведені на модифікованій машині тертя [4, 6] при терті

полімерних зразків по контртілах (твердість за Бринеллем НВ; шорсткість поверхні – середнє квадратичне відхилення профілю поверхні Ra_0). Робоча частина машини тертя складалася з шпинделя, на кінці якого була закручена головка з запресованою верхньою кулею. Остання з трьома нижніми кулями, що вільно перекочувалися у чашці, складала чотирикульову піраміду. Наявність верхньої кульової опори (чотирикульової піраміди) та нижньої вальничної системи, яка складалась з вальниці кочення радіально – упорної дворядної кульової та вальниці кочення упорної, дозволили відцентрувати систему контакту і зменшити час припрацювання та виконати вимірювання зносу без розбирання головки із дослідними зразками. До комплекту тензонометричного приладу входили: тензодавач із тензобалкою, підсилювач 8АНЧ-7М, електронний потенціометр КСП-4. Зразки закріплювали у знімній головці. Вимірювання лінійних розмірів проводили у 8 точках разом з головкою після її охолодження і релаксації розмірів(не менше 0,5 год.) на вертикальному оптиметрі (точність вимірювання 0,001 мм).

Антифрикційні властивості композитів на основі ПТФЕ + 20% УТМ-8 та ПТФЕ + 12,5% УТМ-8 + 12,5% MoS_2 досліджували при терті по металевих стопах з покриттям. Обробку технічного титану здійснювали на технологічному лазері “Spectra – Phisics SP – 973” на повітрі безперервним лазерним випромінюванням CO_2. Обробку проводили з оплавленням поверхні при потужності випромінювання ~ 2,2 кВт і швидкості переміщення зразків 0,25 – 0,5 м/хв. Діаметр плями випромінювання дорівнював 13 мм, що відповідно перевищувало ширину сліду тертя 2 – 10 мм.

Антифрикційні властивості поверхні титанових стопів та інших матеріалів контртіл вивчали при терті по них без мащення композитів на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2+20 % карбонового волокна ТГН-2м та політетрафторетилену + 20% УТМ-8. Суміжні поверхні контртіл діаметром 60±0,15 мм і висотою 10±0,15 мм були виготовлені з (рис.1-4): полімеру – фенілону С-2 (НВ 220 МПа); алюмінієвого стопу D-1 (технічний алюміній) (НВ 230 МПа); цинку електролітичного (НВ 233 МПа); карбопластика з волокнистим наповнювачем УГЕТ-В (НВ 250 МПа); полімерних композитів графелону У8 (НВ 260 МПа), графелон-20 (НВ 345 МПа); та армопласту (77%Fe) (НВ 423МПа); карбопластика з тканинним наповнювачем УГЕТ-Т (НВ 470МПа); міді електролітичної (НВ 658 МПа); спижів – кремністо-манґанового Бр КМц 3-1 (НВ 730 МПа); ціново-фосфористого Бр ОФ 6,5-0,15 (НВ 863 МПа); чавуну Сч 20 (НВ 870); оливного мосяжу ЛС 59-1 (59% Cu + 1% Pb, решта Zn) (НВ 991 МПа); ціново-олив’янистого спижу Бр ОС 12-2 (НВ 1100 МПа); сталі 10Х18Н10Т (НВ 1250 МПа); сталі 10Х18Н9Т (НВ 1370 МПа); сталі 10Х17Н13М3Т (НВ 1450 МПа); чавуну СЧ 21-40 (НВ 1600 МПа); титанового стопу – ВТ 1-00 (технічно чистий титан, Ti – 99,99%) (НВ

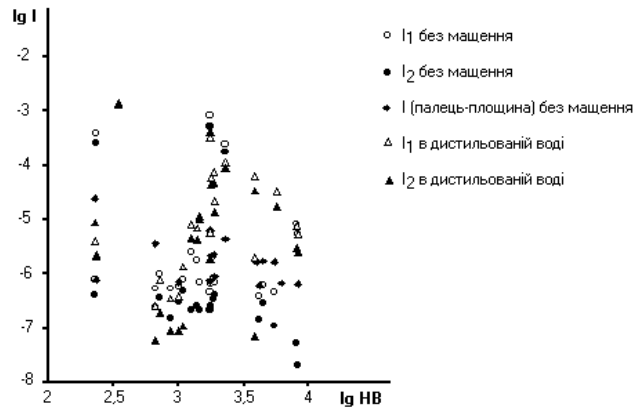

Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування композиту на основі ПТФЕ + 20% УТМ-8 від твердості суміжної поверхні (I в мм^3/(Н·м); НВ в МПа).

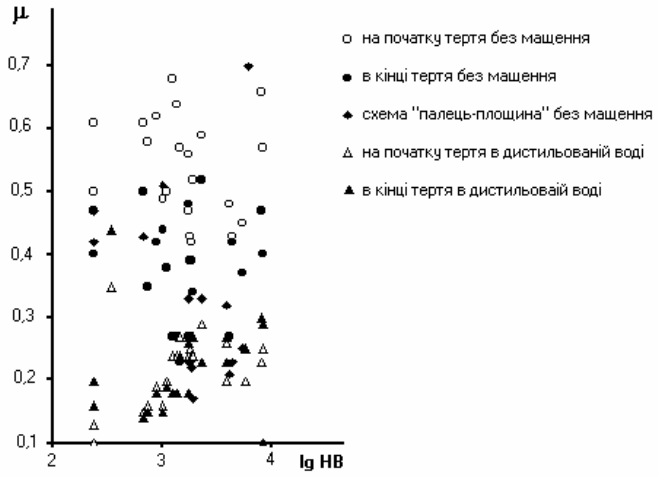

Рис. 2. Залежність коефіцієнта тертя композиту на основі ПТФЕ + 20% УТМ-8 від твердості суміжної поверхні (НВ в МПа).

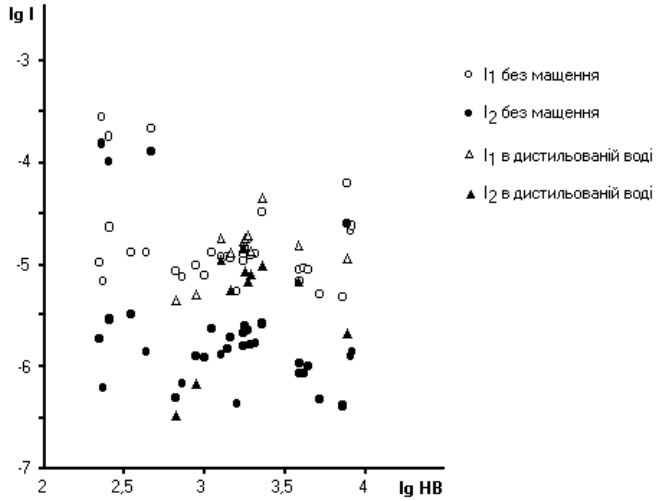

Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування композиту на основі АПА + 20% ТГН-2м від твердості суміжної поверхні (I в мм^3/(Н·м); НВ в МПа).

1720 МПа); сталі 30Х13 (НВ 1750 МПа); сталі У8

(НВ 1795 МПа); сталі 45 (НВ 1868 МПа); сталі 38ХМЮА (НВ 1885 МПа); сталі 40Х (НВ 2130 МПа); титанового стопу ПТ 3В [Ti + (3,5-5,0)% Al + (1,5-2,5)% V] (НВ 2300 МПа); сталі 45 (термообробленої) (НВ 3820 МПа; 3910 МПа); спижу Бр НТ 2,5-1 (НВ 3920 МПа); нікелевого покриття на сталі 45 (термообробленої) (НВ 3990 МПа); сталі 30Х13 (термообробленої) (НВ 4200 МПа); сталі 40Х (термообробленої) (НВ 4400 МПа); сталі 45 (термообробленої) (НВ 4450 МПа); сталі У8 (термообробленої) (НВ 5200 МПа; 5450 МПа; 5800 МПа); хромового покриття на сталі 45 (термообробленій) (НВ 6200 МПа); азотованої сталі (НВ 7200 МПа); силіційованого графіту СГ-П (НВ 7600 МПа); стопу групи вольфраму ВК 11 (НВ 8200 МПа) та ВК 6 (НВ 8400 МПа). Випробування впливу твердості суміжної поверхні на зношування та тертя композитів проводили за двома схемами контактування:

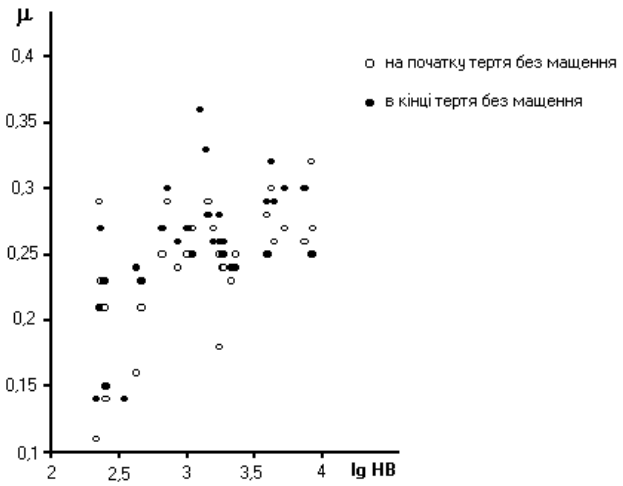

Рис. 4. Залежність коефіцієнта тертя композиту на основі АПА + 20% ТГН-2м від твердості суміжної поверхні (НВ в МПа).

Схема {I} – "палець-площина"; режим постійного питомого і нормального навантаження. Три зразки у вигляді циліндрів діаметром 10±0,05 мм і висотою 15±0,1 мм {I-1}, оброблені до Ra_0=0,3...0,4 мкм, ковзали торцями по поверхні металічного контртіла, обробленої до початкової шорсткості Ra_0=0,2±0,03 мкм. Умови випробувань: нормальне навантаження на один зразок N_i=235,5 Н, швидкість ковзання v=0,5 м/с, температура, що визначена на відстані 0,5-1мм від поверхні контртіла, дорівнювала T=373±2 К, шлях тертя S=40...200 км, питоме навантаження P=3 МПа.

Схема {II} – "сфера-площина"; режим змінних питомих навантажень при постійному нормальному навантаженні. Три зразки висотою 15±0,1 мм і діаметром 10±0,1 мм {II-2} з кінцевою сферою радіусом 6,35 мм були рівнорозташовані під кутом 120^0 і ковзали по площині металічного контртіла, яка була оброблена до початкового середнього арифметичного відхилення профілю поверхні Ra_0=0,2±0,03 мкм. Умови випробувань: нормальне навантаження на один зразок N_i=100 Н, швидкість ковзання v=0,3 м/с, температура, що визначена на відстані 0,5-1мм від поверхні контртіла, дорівнювала T=(323±2) К, шлях тертя S_1=0...2 км, S_2=2...22 км, коефіцієнти взаємного перекриття $K_{вз}$ в кінці S_1 і S_2 були рівні відповідно 0,05-0,1 і 0,07-0,15.

В цій схемі випробувань можна виділити дві характерні області:

– ділянка нелінійної залежності питомої інтенсивності зношування від шляху тертя, коли питоме навантаження змінюється від навантаження, близького до твердості НВ матеріалу, до навантаження, що відповідає граничній навантажувальній здатності; позначення: шлях тертя S_1, інтенсивність зношування I_1, коефіцієнт тертя на початку $\mu_{1п}$ і в кінці $\mu_{1к}$ ковзання, питоме навантаження в кінці тертя P_1;

– ділянка майже лінійної залежності інтенсивності зношування від шляху тертя, коли граничне питоме навантаження значно менше змінюється, ніж в першій ділянці; позначення: шлях тертя S_2, інтенсивність зношування I_2, коефіцієнт тертя на початку $\mu_{2п}$ і в кінці $\mu_{2к}$ ковзання, питоме навантаження в кінці тертя P_2.

Експерименти проведені як при мащенні протічною дистильованою водою, так і без мащення.

Дослідження зношування матеріалів на основі ПТФЕ + 20% КВ УТМ-8 і АПА + 20% ТГН –2м проводили за схемою {II-2} при терті торцями без мащення при N_i = 100 Н; V=0,3м/с; T = 323±2 К по сталі 45 (НВ 4,5±0,18 ГПа; Ra_0 = 0,2±0,03 мкм); S_1 (I_1) = 0-2 км; S_0 = 0-5 м; S_3 ($\mu_{1к}$) = 1995-2000 м; та по сталі 30Х13 (НВ 4,2±0,15 ГПа; Ra_0 = 0,24±0,02 мкм); S_1 (I_1) = 0-2 км; S_2 (I_2) = 2-10 км; S_0 ($\mu_{1н}$) = 0-5 м; S_3 ($\mu_{1к}$) = 5-0 м; S_4 ($\mu_{2к}$) = 5-0 м. Результати дослідження приведені на рис. 5-8 і в табл. 1-4.

II. Результати та обговорення

Зв'язок інтенсивності зношування карбопластиків з механічними і теплофізичними властивостями суміжних поверхонь

Досліджували матеріали на основі ПТФЕ + 20% УТМ-8 і ароматичного поліаміду фенілон С-2 (АПА) + 20% ТГН-2м за схемою випробувань { II-2}.

Контртіла без покриття. Результати дослідження впливу твердості контртіла на інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя карбопластиків наведені на рис. 1-4. За результатами досліджень (рис. 1-4) не встановлено кореляційного зв'язку між інтенсивністю зношування та коефіцієнтами тертя і твердістю суміжних поверхонь.

При терті карбопластика на основі ПТФЕ + 20% КВ (рис.1) без мащення максимальні значення інтенсивності зношування на першому етапі спостерігаються для алюмінієвого стопу і матеріалів УГЕТ-В та УГЕТ-Т ~ $(2000\text{-}2800)\cdot 10^{-7}$ $мм^3/Н\cdot м$, а мінімальні – для азотованої сталі, термообробленої сталі У8 і електролітичної міді. Для спижів і мосяжу

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляції інтенсивності зношування та коефіцієнтів тертя карбопластика з механічними і теплофізичними властивостями металевих контртіл.

Лінійний зв'язок між величинами	ПТФЕ + 20% УТМ-8		АПА + 20% ТГН-2м	
	$r_{1,2}$	$r_{кр}$	$r_{1,2}$	$r_{кр}$
I_1~HB	-0,221	0,390	-0,171	0,408
I_1~Eq	-0,010	0,632	0,650*	0,632
I_1~λ	-0,156	0,433	-0,086	0,444
I_1~a	-0,268	0,497	-0,081	0,514
I_2~HB	-0,242	0,390	-0,179	0,408
I_2~Eq	0,020	0,632	-0,132	0,632
I_2~λ	-0,386	0,433	-0,087	0,444
I_2~a	-0,466	0,497	-0,091	0,514
$\mu_{1н}$~HB	0,182	0,390	0,202	0,408
$\mu_{1н}$~Eq	0,680*	0,632	0,928*	0,632
$\mu_{1н}$~$\sigma_в$	0,055	0,433	-0,464*	0,456
$\mu_{1н}$~($\sigma_в \cdot \delta$)	0,335	0,433	0,174	0,456
$\mu_{1н}$~I_1	0,149	0,390	0,196	0,408
$\mu_{2к}$~HB	0,140	0,390	-0,078	0,408
$\mu_{2к}$~Eq	0,556	0,632	-0,937*	0,632
$\mu_{2к}$~$\sigma_в$	0,359	0,433	-0,362	0,456
$\mu_{2к}$~($\sigma_в \cdot \delta$)	0,534*	0,433	-0,427	0,456
$\mu_{2к}$~I_2	-0,359	0,390	0,447*	0,408

* - є лінійний зв'язок.

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляцій інтенсивностей зношування з коефіцієнтами тертя карбопластиків для різних металічних контртіл.

Лінійний зв'язок між величинами	Метали і стопи	Композит	Коефіцієнт кореляції $\lvert r_{1,2} \rvert$	Число ступенів вільностей f	Критичне значення коефіцієнта кореляції при α = 0,05 [7]
I~μ (рис.6)	сталь 45	АПА+20% ТГН-2м	0,956*	9	0,602
I_1~ $\mu_{2к}$ (рис.7,8)	сталь 30Х13	ПТФЕ+20% УТМ-8	0,344	10	0,576
I_2~ $\mu_{2к}$ (рис.7,8)	сталь 30Х13	ПТФЕ+20% УТМ-8	0,547	10	0,576
lgI_1~ $\mu_{2к}$ (рис.7,8)	сталь 30Х13	ПТФЕ+20% УТМ-8	0,223	10	0,576
lgI_2~ $\mu_{2к}$ (рис.7,8)	сталь 30Х13	ПТФЕ+20% УТМ-8	0,371	10	0,576
I_1~ $\mu_{1н}$ (рис.7,8)	сталь 45	ПТФЕ+20% УТМ-8	0,847*	11	0,553
lgI_1~ $\mu_{1н}$ (рис.7,8)	сталь 45	ПТФЕ+20% УТМ-8	0,748*	11	0,553
I_1~ $\mu_{1к}$ (рис.7,8)	сталь 45	ПТФЕ+20% УТМ-8	0,623*	11	0,553
lgI_1~ $\mu_{1к}$ (рис.7,8)	сталь 45	ПТФЕ+20% УТМ-8	0,832*	11	0,553

** - є лінійний зв'язок.*

інтенсивність зношування коливається в межах (80-

100)·10^{-7} мм^3/Н·м. При терті по титановому стопу ВТ1-00 інтенсивність зношування приблизно така ж як і при терті по нержавіючих сталях ~(110-130)·10^{-7} мм^3/Н·м, а для стопу ПТ-3В у 3 рази більша. Термообробка вуглецевих сталей приводить до зменшення інтенсивності зношування карбопластика.

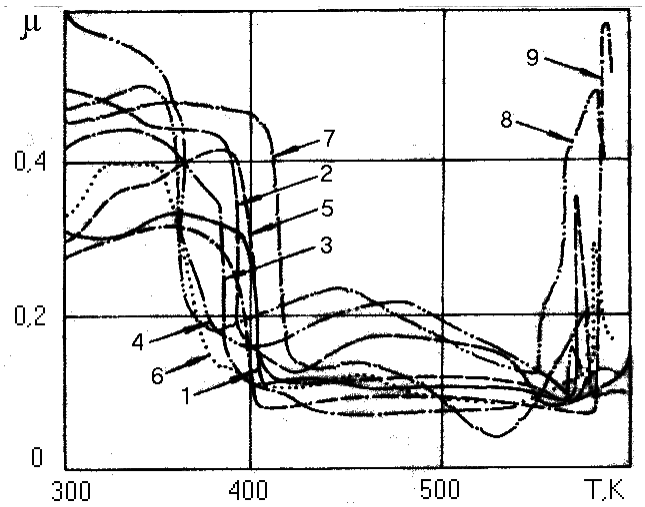

Рис. 5. Вплив природи суміжної поверхні на коефіцієнт тертя композиту на основі АПА + 20% графітованого волокна ТГН-2м:
1 – сталь У-8 (термооброблена), 2 – титановий стоп ПТ-3В, 3 – титановий стоп ВТ1-00, 4 – стоп вольфрамової групи ВК-6, 5 – хромове покриття на термоброблений сталі 45, 6 – нержавіюча сталь 10Х18Н9Т, 7 – мідь електролітична, 8 – сталь У-8 (відпалена), 9 – сталь 45 (термооброблена), Ra_0 = 0,20 мкм, схема випробувань {І-1}, Р=0,5 МПа; V = 0,27 м/с; V_T = 0,03-0,05 К/с.

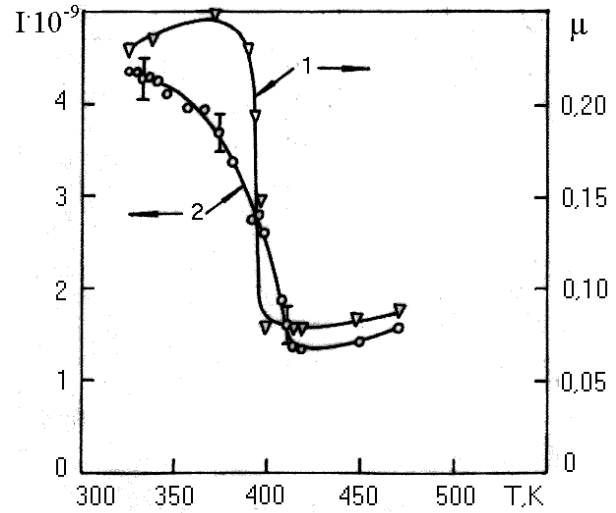

Рис. 6. Залежність коефіцієнта тертя (1) і лінійної інтенсивності зношування (2) матеріалу на основі ароматичного поліаміду +20 % ТГН-2м від температури контртіла: схема випробувань {І-1}; Р=2 МПа; V = 1,3 м/с; S_T = 150 км; сталь 45 (НВ 4,5 ГПа; Ra_0 = 0,24мкм).

На другому етапі тертя характер залежностей такий самий, як і на першому етапі. Інтенсивність зношування карбопластика по стопу ВТ1-00 в 1,7 рази менша, ніж по ПТ-3В.

Мащення дистильованою водою зумовлює зменшення інтенсивності зношування карбопластика при терті по кольорових стопах, і збільшення її значень при терті по нержавіючих і вуглецевих сталях, а особливо по титанових стопах, при чому це характерно для першого і другого етапів тертя.

Коефіцієнти тертя досліджуваного карбопластика (рис.2) мало залежать від твердості суміжних поверхонь. Мінімальні їх значення на обох етапах спостерігаються при терті по полімерних матеріалах і титанових стопах ~ 0,23-0,28, а максимальні – по нержавіючих сталях і вольфрамових стопах. Термообробка вуглецевих сталей практично не впливає на коефіцієнт тертя.

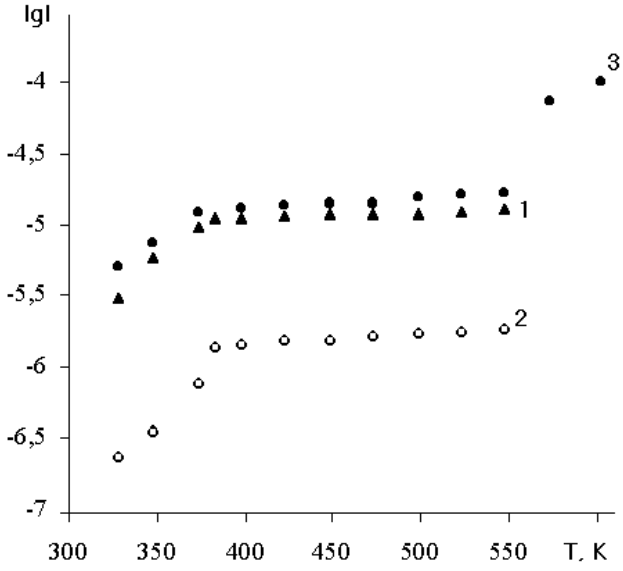

Рис. 7. Залежність інтенсивності зношування композиту на основі ПТФЕ+20% карбонізованого волокна УТМ-8 від температури поверхні сталі 30Х13 (НВ 4,2 ГПа; Ra_0 = 0,24 мкм) (1, 2) та сталі 45 (НВ 4,5 ГПа; Ra_0 = 0,20 мкм) (3) при сталій температурі на шляху тертя S_1 = 0-2 км (1, 3), S_2 = 2-10 км (2).

Встановлено, що при терті матеріалу на основі АПА + 20% КВ (рис. 3) максимальні значення інтенсивності зношування карбопластика спостерігаються при терті його по цинку і титанових стопах (на обох етапах тертя), мінімальна інтенсивність зношування спостерігається для міді, спижів, оливного мосяжу (І~ (3-7)·10^{-7} мм^3/Н·м). Для хромового покриття і хромистих сталей зношування мале і зменшується зі збільшенням кількості хрому. Введення в хромисті сталі молібдену (сталь 10Х17Н13М3Т) зменшує інтенсивність зношування в 2,6-3,5 рази. Термообробка вуглецевих сталей і сталі 30Х13 призводить до зменшення інтенсивності зношування ~ в 1,4 рази.

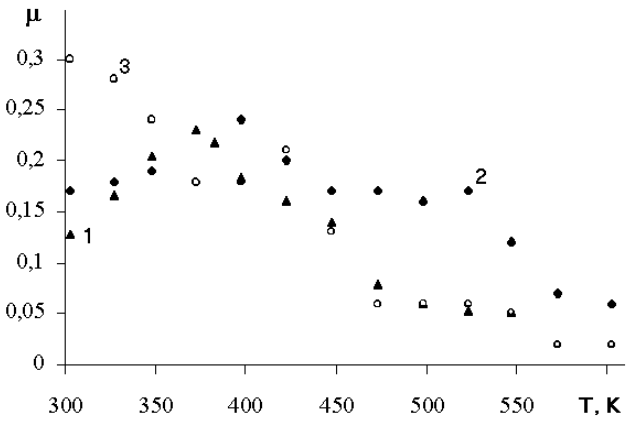

Рис. 8. Залежність коефіцієнта тертя композиту на основі ПТФЕ+20% карбонізованого волокна УТМ-8 від температури поверхні сталі 30Х13 (НВ 4,2 ГПа; Ra_0 = 0,24 мкм) (1) та сталі 45 (НВ 4,5 ГПа; Ra_0 = 0,20 мкм) (2, 3) при сталій температурі на шляху тертя $\mu_{1н}$ (S_1 = 0-5 м) (2), $\mu_{1к}$ (3), $\mu_{2к}$ (1).

Таблиця 3

Антифрикційні властивості*** композиту на основі ПТФЕ + 20% карбонового волокна УТМ-8 при терті по металевих стопах з покриттям.

Металевий стоп	НВ, МПа	Ra, мкм		Інтенсивність зношування ($\cdot 10^{-7}$), мм^3/Н·м		Коефіцієнт тертя	
		до тертя	після тертя	0 – 2 км	2 – 22 км	0 – 2 км $\mu_{1н}$	2 – 22км $\mu_{2к}$
Мосяж ЛС 59-1	991	0,35	0,30	78,5	12,4	0,25	0,27
Мосяж ЛС 59-1 з хромовим покриттям	925	0,44	0,40	126,0	4,1	0,39	0,66
Алюмінієвий стоп Д-16	1240	1,88	3,63	4860	4620	0,66	0,66
Алюмінієвий стоп Д-16 з оксидним покриттям	1275	4,0	3,0	273	18,2	0,48	0,52
Алюмінієвий стоп Д-16 з оксидним покриттям + антифрикційні частинки MoS_2	1285	1,75	2,63	257	16,8	0,66	0,48
Алюмінієвий стоп з хромовим покриттям	1260	0,29	3,0	408	112	0,48	0,39
Титановий стоп ВТ 1-00	1720 (3500**)	0,34	0,28	110	15,8	0,18	0,28
Титановий стоп ВТ 1-00 з оксидним покриттям	1760 (5600**)	0,53	0,35	96	10,3	0,48	0,48
Титановий стоп ВТ 1-00 після лазерного зміцнення	7600 (9300**)	0,40	0,42	177/32*	50,7/20*	0,48	0,49
Сталь 45	1890	0,24	0,28	179	22,9	0,24	0,25
Сталь 45 з цинковим покриттям	2030	0,36	0,49	25,6	2,9	0,32	0,48
Титано-цирконієвий стоп РК-20	3300 (3900**)	0,026	0,040	65	13,5	0,32	0,38
Титано-цирконієвий стоп РК-20 оксидований	2130 (6800**)	0,023	0,045	37,2	6,9	0,36	0,35
Титано-цирконієвий стоп РК-20 після лазерного зміцнення	6800 (11000**)	0,30	0,15	96	7,1	0,30	0,38
Титано-цирконієвий стоп РК-20 з поверхневим шаром нітриду титану	10050 (11450**)	0,028	0,039	32,5	5,2	0,28	0,36

* - знаменник – композит на основі ПТФЕ + 70% поліміду ПМ-69;
** - мікротвердість H_{100};
*** - {II-2}: Ni = 100 Н; v = 0,33 м/с; T = 303±2 K; тертя без мащення.

Значення коефіцієнта тертя для цього ж матеріалу (рис. 4) коливаються в межах 0,42-0,68. Найменші значення $\mu_{1н}$ спостерігаються для вуглецевих сталей, при чому їх термообробка не дає помітних змін. Для $\mu_{2к}$ характерні менші значення 0,23-0,52. Мінімальні значення спостерігаються для нержавіючих сталей, а максимальні – для титанових стопів μ=0,52-0,59.

При переході до другої схеми випробувань {I} і питомого навантаження 3 МПа максимальне зношування композиту на основі ароматичного поліаміду спостерігається для алюмінієвого і титанових стопів (I ~ (45-80)$\cdot 10^{-7}$ мм^3/Н·м), а мінімальне – для цинку, хромового покриття і хромистих сталей. Коефіцієнт тертя для алюмінію, цинку, міді, спижів, і нікелевого покриття має значення 0,3-0,5, для титанових стопів – 0,35; а для решти матеріалів – 0,1-0,25.

Мащення дистильованою водою приводить до збільшення інтенсивностей зношування карбопластика при терті по нержавіючих і вуглецевих сталях, але помітно зменшується їх значення для титанових стопів, цинку, спижів і мосяжу. В умовах мащення дистильованою водою спостерігається збільшення коефіцієнта тертя $\mu_{1н}$ карбопластика при збільшенні твердості суміжної поверхні, для $\mu_{2к}$ ця залежність слабша.

Для цих матеріалів шукали лінійний зв'язок між інтенсивністю зношування композиту (I) і коефіцієнтом тертя (μ) та твердістю HB, міцністю ($\sigma_в$), границею текучості ($\sigma_т$), енергією деформування при розтягуванні ($\sigma_в \cdot \delta$) (де δ - відносне подовження при розриві) та звужуванні ($\sigma_в \cdot \psi$) (де ψ - відносне звуження), модулем пружності (E), коефіцієнтами тепло- (λ) та температуро- (a) провідністю та енергією пластичного деформування (Eq) контртіла (табл.1). Силі (тісноті) лінійного зв'язку давали оцінку за вибірковим коефіцієнтом кореляції. Значущість коефіцієнта перевіряли, порівнюючи його абсолютну величину з критичним значенням при рівні значущості 0,05 і числі ступенів вільності f=N-2, де N – число випробувань [7]. Введемо в науковий обіг поняття потужності лінійного зв'язку як відношення абсолютної величини вибіркового коефіцієнта кореляції $|r_{1,2}|$ до його критичного значення $r_{кр}$:

$$\xi = \frac{|r_{1,2}|}{r_{кр}}$$

Як видно з табл. 1 коефіцієнти кореляцій між величинами I_1~Eq, $\mu_{1н}$~Eq, $\mu_{1н}$~$\sigma_в$, $\mu_{2к}$~Eq виявилися значущими для матеріалу на основі АПА при відповідній потужності зв'язку 1,028; 1,468; 1,018; 1,483. Близька до 1 (ξ=0,936) і потужність зв'язку $\mu_{2к}$~($\sigma_в \cdot \delta$). Для решти залежностей ξ знаходиться в межах від 0,158 до 0,495 (для $\mu_{2к}$~$\sigma_в$ ξ=0,794).

У зв'язку з тим, що для матеріалів на основі АПА I_1~Eq, $\mu_{1н}$~(Eq, $\sigma_в$) і $\mu_{2к}$~[Eq, ($\sigma_в \cdot \delta$)] має місце тісний лінійний зв'язок (табл.1), інтенсивність зношування і коефіцієнт тертя не залежать від твердості металевого контртіла (тобто контакт метал-карбопластик є пружний), теплофізичних та багатьох механічних властивостей, то тертя і зношування визначаються станом вихідної поверхні контртіла і поверхневими шарами, що утворюються на поверхнях зразка і контртіла на початку ковзання. Свідченням цього є тісний лінійний зв'язок між коефіцієнтом тертя в кінці другого етапу випробувань ($\mu_{2к}$) та інтенсивністю зношування за цей же етап (I_2): коефіцієнт кореляції $r_{1,2}$=0,447; потужність зв'язку ξ=1,096. При цьому звертаємо увагу на те, що коефіцієнт тертя і інтенсивність зношування сильно залежить від енергії пластичного деформування суміжної поверхні контртіла.

Свідченням цього також є результати, які показані на рис. 5, 6. Як видно з рис. 5, коефіцієнт тертя карбопластика на основі АПА + 20% ТГН-2м при неперервному підвищенні температури зі швидкістю 0,03-0,05 К/с має загальну залежність від температури для контртіл різної природи. Температура переходу до низького тертя залежить від природи контртіла, а для ділянки низького тертя спостерігається утворення міцних плівок на поверхнях термооброблених вуглецевих і хромових сталях та хромового покриття. На м'яких поверхнях міді, мідних і титанових стопів, алюмінію і цинку утворюються нерегулярні плівки, що приводить до нестабільного тертя. Як видно із рис.6, інтенсивність зношування композитів на основі АПА складним чином пов'язана з коефіцієнтом тертя через утворення проміжних плівок при терті по оновленій поверхні і сталій температурі протягом 150 км. При цьому коефіцієнт кореляції зв'язку I~μ $r_{1,2}$=0,956 при високій потужності 1,588 (табл. 2).

Як видно з табл.1, коефіцієнт кореляції для матеріалу на основі ПТФЕ виявилися значущими лише для $\mu_{1н}$~Eq і $\mu_{2к}$~($\sigma_в \cdot \delta$) при відповідній потужності зв'язку 1,076 і 1,233. Близька до 1 і потужність зв'язку між інтенсивністю зношування на другому етапі і теплофізичними властивостями контртіла I_2~λ (ξ=0,891) та I_2~a (ξ=0,938). Високі значення потужності характерні і для зв'язків $\mu_{2к}$~Eq (ξ=0,880), $\mu_{2к}$~$\sigma_в$ (ξ=0,829) та $\mu_{1н}$~($\sigma_в \cdot \delta$) (ξ=0,774). Для решти залежностей ξ знаходиться в межах від 0,015 до 0,621. Ці результати свідчать про те, що тертя і зношування матеріалу на основі ПТФЕ визначаються іншими властивостями суміжних поверхонь, іншими механізмами утворення, природою і властивостями проміжних шарів, ніж для матеріалу на основі АПА.

Як видно з табл. 1, між коефіцієнтом тертя в кінці другого етапу ($\mu_{2к}$) та інтенсивністю зношування на цьому етапі (I_2) для матеріалу на основі АПА існує тісний лінійний зв'язок ($r_{1,2}$=0,447 при $r_{кр}$=0,408) з потужністю ξ=1,096, достатньо потужний зв'язок існує між цими величинами і для матеріалу на основі ПТФЕ (ξ=0,921). Тому можна стверджувати, що для композиту на основі ПТФЕ спостерігається складніший взаємозв'язок між інтенсивністю зношування і коефіцієнтом тертя, ніж для матеріалу на основі АПА (рис.7, 8).

Таблиця 4

Антифрикційні властивості* композиту на основі ПТФЕ і 12,5% карбонового волокна УТМ-8 + 12,5% MoS_2 при терті по металевих стопах з покриттям

Металевий стоп	НВ, МПа	Ra, мкм		Інтенсивність зношування ($\cdot 10^{-7}$), мм^3/Н·м		Коефіцієнт тертя	
		до тертя	після тертя	0 – 2 км	2 – 22 км	0 – 2 км $\mu_{1н}$	2 – 22км $\mu_{2к}$
Латунь ЛС 59-1 з хромовим покриттям	925	0,42	0,30	384	3,3	0,05	0,23
Алюмінієвий стоп Д-16	1240	1,85	3,0	3780	3600	0,08	0,86
Алюмінієвий стоп з хромовим покриттям	1260	0,30	0,41	852	33,2	0,23	0,25
Алюмінієвий стоп Д-16 з оксидним покриттям	1275	4,0	1,88	242	4,3	0,25	0,32
Алюмінієвий стоп Д-16 з оксидним покриттям + антифрикційні частинки MoS_2	1285	1,75	1,38	216	5,6	0,25	0,28
Титановий стоп ВТ 1-00 з оксидним покриттям	1760	0,52	0,45	1890	76	0,23	0,20
Титано-цирконієвий стоп РК-20 з оксидним покриттям	2130	0,022	0,050	26,5	7,5	0,20	0,17
Сталь 45 з цинковим покриттям	2030	0,35	0,53	42,6	0,7	0,05	0,10

* схема випробувань {II-2}: Ni = 40 Н; v = 0,33 м/с; T = 303±2 K; тертя без мащення.

При температурах 300-375 К інтенсивність зношування матеріалу на основі ПТФЕ різко збільшується, що пов'язане із втратою волокном вільної вологи. В інтервалі температур 375-545 К інтенсивність зношування композиту зростає повільно, а при 545-600 К – зростає на порядок (рис.7), при цьому початковий коефіцієнт тертя дорівнює 0,06-0,07, в кінці тертя – 0,02 (рис.8). Коефіцієнт тертя складним чином залежить від температури і знижується від 0,23-0,25 при 375 К до 0,05-0,06 при 473-523 К (рис.8).

При дослідженні залежності інтенсивності зношування і коефіцієнта тертя від температури карбопластиків ПТФЕ+20% УТМ-8 (рис.7-8), як і для АПА+20% ТГН-2м (рис.6), при термостатуванні та оновленні поверхні стального контртіла для кожного ступеня температури виявлена кореляція інтенсивності зношування і коефіцієнта тертя при ковзанні по сталі 45 (табл.2): $r_{1,2}$=0,623 – 0,847 при $r_{кр}$=0,553 і ξ=1,127 – 1,532. А при ковзанні по сталі 30Х13 лінійної залежності між цими параметрами не виявлено (табл.2): $r_{1,2}$=0,223 – 0,547 при $r_{кр}$=0,576 і ξ=0,387 – 0,950. Тут близький до критичного значення коефіцієнт кореляції між I_2 і $\mu_{2к}$ ($r_{1,2}$=0,547 при $r_{кр}$=0,576) при потужності близькій до 1 (ξ=0,950).

Контртіла з покриттями. Враховуючи низьку зносостійкість композитів при ковзанні по алюмінієвих і титанових стопах, досліджували антифрикційні властивості композитів на основі ПТФЕ, наповнених 20% УТМ-8 (табл.3) та 12,5% УТМ-8 + 12,5% MoS_2 (табл.4), при терті по металевих стопах з покриттям.

Внаслідок лазерної обробки поверхні мікротвердість зони лазерного впливу збільшилася від 3,5 до 7,6-9,3 ГПа (для титанового стопу ВТ 1-00), від 3,3 до 5,3 ГПа (для титано-алюмінієвого стопу ПТ-3В) і від 3,3 – 3,9 до 6,8 – 11 ГПа (для титано-цирконієвого стопу РК-20). При цьому структура обробленої зони ВТ 1-00 складалася із кількох шарів: верхній – зона оплавлення з H_{100} ~ 8 ГПа, нижній – зона термічного впливу з H_{100} ~ 6 ГПа.

Зміцнення поверхневих шарів титанових стопів у зоні оплавлення пов'язане з насиченням азотом і киснем, внаслідок чого утворюються нітриди і оксиди титану. Зміцнення в зоні термічного впливу пов'язане з інтенсивною термодеструкцією і рекристалізацією, що зменшує розмір зерна і перешкоджає переміщенню дислокацій.

Внаслідок нестабільності переміщення лазерного променя по поверхні зона оплавлення характеризувалася порушенням початкової шорсткості і нерівномірним розподілом мікронерівностей, що впливало на початковий період тертя (табл.3). Для композиту на основі поліміду зносостійкість у початковий період збільшувалася у 3,3 (для РК-20) і 5,5 (для ВТ1-00) рази порівняно з композитом на основі ПТФЕ. Для основного періоду тертя лазерне зміцнення не вносить суттєвих змін порівняно з оксидуванням (табл.3).

При переході від тертя без мащення до тертя у

дистильованій воді інтенсивність зношування композиту по стопах РК-20 і ВТ 1-00 після лазерного зміцнення збільшується у 2-12 разів. У такому середовищі оптимальною композицією є та, що містить матеріал (кокс або поліімід), який зменшує шорсткість поверхні: ПТФЕ + (10% КВ + 10% коксу) або ПТФЕ +(10% КВ + 50% поліміду).

Вивчено вплив твердості металів з оксидним, хромовим, оксидноазотним і нітридотитановим покриттями на зносостійкість композиту на основі ПТФЕ + 20% КВ УТМ-8 та ПТФЕ + 12,5% КВ УТМ-8 + 12,5% MoS_2. Як і для непокритих металів, не виявлено лінійної залежності інтенсивності зношування і коефіцієнта тертя від твердості та інших фізико-механічних і теплофізичних властивостей контртіла.

Хромове покриття на латуні збільшує зношування обох матеріалів у ділянці надвисоких навантажень і зменшує – в ділянці граничних навантажень (табл. 3 і 4). І навпаки, оксидування або хромування поверхні алюмінієвого стопу значно знижує інтенсивність зношування цих двох матеріалів в обох ділянках навантаження. Аналогічно спостерігається ефект при покритті цинком відпаленої сталі 45, оксидуванні або покритті нітридом титану титанових стопів. При цьому ефект від покриття металів значно вищий, ніж при лазерній обробці цих же стопів.

Висновки

1. Встановлено, що для композиційних матеріалів, отриманих за ХМА- технологією, антифрикційні властивості не залежать від твердості суміжної поверхні, а визначаються станом вихідної поверхні контртіла і поверхневими шарами, що утворюються на поверхнях зразка і суміжної поверхні в процесі тертя.
2. Встановлено, що не існує лінійної залежності між антифрикційними властивостями і твердістю та іншими фізико-механічними і теплофізичними властивостями контртіл із покриттями.
3. Знайдено, що для карбопластиків, отриманих за ХМА- технологією, існує лінійний зв'язок між інтенсивністю зношування та енергією пластичного деформування контртіла, а також між коефіцієнтом тертя та енергією пластичного деформування контртіла і енергією деформування при розтягуванні.
4. Встановлено, що для композиційних матеріалів на основі АПА існує лінійний зв'язок між інтенсивністю зношування та коефіцієнтом тертя. Для композиційного матеріалу на основі ПТФЕ такої залежності не знайдено.
5. Введено в науковий обіг поняття потужності лінійного зв'язку як відношення абсолютної величини вибіркового коефіцієнта кореляції до його критичного значення.

Сіренко Г.О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної і прикладної хімії;
Мідак Л.Я. – аспірант кафедри теоретичної і прикладної хімії;
Свідерський В.П. – к.т.н., доцент;
Базюк Л.В. – аспірант кафедри теоретичної і прикладної хімії.

[1] J.C. Roberts. Surface morphology studies in polymer-graphite/ epoxy sliding // *ASLE Trans*., **28**(4), pp. 503-510 (1985).
[2] Chang Lhymn, K.E. Tempelmeyer, P.K. Davis The abrasive wear of short fiber composites // *Composites*, **16**(2), pp. 90, 127-136 (1985).
[3] Г.О. Сіренко, Л.Я. Мідак, В.П. Свідерський, О.С. Дробот. Вплив суміжних поверхонь на антифрикційні властивості композиційних полімерних матеріалів. Орієнтовані карбопластики // *Фізика і хімія твердого тіла*, **6**(2) сс. 317-326 (2005).
[4] Г. О. Сіренко. Створення антифрикційних композитних матеріалів на основі порошків термотривких полімерів та вуглецевих волокон: Дис. доктора техн. наук. Ін-т матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ, К. 431 с. (1997).
[5] В.П. Свідерський, О.І. Федоришин. Аналітичний огляд науково-технічних основ і властивостей антифрикційних карбопластиків: 1. Вуглецеві волокна // *Вісник Прикарп. ун-ту. Сер. Хімія*, І, сс. 118-132 (2001).
[6] Р.В. Гриневич, В.В. Цасюк, А.С. Смирнов. Специализированные машины трения// Сб. науч. трудов «*Применение синтетических материалов*». Картя Молдовеняскэ, Кишинев. сс. 33-36 (1975).
[7] Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий*. Наука, М. 280 с. (1976).

H.O. Sirenko, L.Ya. Midak, V.P. Sviderskyy, L.V. Bazyuk

The influence of neighboring surfaces on antifriction properties of composite polymer materials. Carbon-plastics by ChMA-technology

The dependence of antifriction properties of polymer composites filled by carbon fiber materials from mechanical and thermal-physics properties of neighboring surfaces of solid states has been researched. It has been ascertained, that there aren't the dependences between antifriction properties and hardness, other physic-mechanical and thermophysical properties of counterface with blankets. It has been ascertained, antifriction properties are determined by state of starting surface of counterface and surface layers, which are formed on surfaces of composite and neighboring surface in friction for composite materials by ChMA-technology.