

УДК 667.64:678.026

ТРИБОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ ДИСПЕРСНИМИ ЧАСТИНКАМИ І ТЕРМОПЛАСТАМИ

А. В. БУКЕТОВ¹, М. В. БРАЇЛО¹, О. С. КОБЕЛЬНИК², О. В. АКИМОВ¹

¹ Херсонська державна морська академія;

² Коледж Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

Встановлено, що найвищі трибологічні властивості має матеріал, наповнений частинками антифрикційного графіту марки АГ-1500 (дисперсність 63...80 μm), перліту (дисперсність 5...10 μm) та гранулами поліаміду ПА-6 у співвідношенні 60:20:30, відповідно. Такий композит за швидкості ковзання $v = 1,0$ m/s має такі властивості: момент тертя $M = 1,0...1,2$ N·m, коефіцієнт тертя $f = 0,20...0,22$, температура $T = 340...341$ К, інтенсивність зношування $I_m = 0,4...0,5$ mg/km, шлях припрацювання $l = 2500...3000$ m.

Ключові слова: *тертя, трибологічні властивості, епоксидний композит.*

Експлуатація технічних засобів постійно призводить до зношування деталей і вузлів та пошкодження робочих поверхонь. Завданням сучасної промисловості є застосування деталей з конструкційних матеріалів [1], які матимуть підвищений термін експлуатації та здатність протидіяти знакозмінним навантаженням. Серед широкого спектру таких конструкційних матеріалів важливе значення мають композити на основі епоксидних полімерів.

Основними критеріями довговічності обладнання є зносотривкість матеріалів та їх здатність працювати в критичних умовах. Тому перспективно створювати матеріали з поліпшеними не лише фізико-механічними, але й трибологічними властивостями [2, 3].

Розробляли матеріали з посиленими трибологічними властивостями і оптимізували технологічні режими їх формування такі вчені, як Похмурський В. І. [4, 5], Богданович П. Н. [6], Стухляк П. Д. [7], Кіндрачук М. В. [8], Ляшенко Б. А. [9]. Великий внесок у розвиток трибології зробили Крагельський І. В. [3], Костецький Б. І. [10], Гаркунов Д. Н. [11], Бєлий В. А. [12]. Важливою є праця Бузкова В. А. [13] у напрямку поліпшення трибологічних властивостей композитних матеріалів (КМ) суднових дейдвудних комплексів. Водночас створення матеріалів з низькою собівартістю і високими показниками трибологічних та фізико-механічних характеристик завжди є пріоритетним і актуальним [3–13].

Мета роботи – дослідити трибологічні властивості матеріалів, наповнених термопластичними гранулами поліаміду ПА-6, і розробити композити з підвищеною зносотривкістю для деталей і механізмів, які експлуатуються у вузлах тертя, у тому числі й у дейдвудному комплексі суден.

Матеріали та методика дослідження. Для дослідження трибологічних властивостей використали попередньо розроблену матрицю [14] на основі епоксидної смоли CHS-Ероху 525 ($q = 100$ m. р.) і твердників ПЕПА + Telalit 410 ($q_1 + q_2 = 5 + 5$ m. р.), яка сформована за температури зшивання $T = 433$ К (CHS-Ероху 525

– низькомолекулярний епоксидний олігомер, який не має модифікаторів і є аналогом епоксидного діанового олігомеру ED-20; ПЕПА – вітчизняний твердник (ТУ 6-05-241-202-78) для зшивання епоксидних композицій; Telalit 410 – модифікований аміноаддуктовий твердник на основі аліфатичного поліаміну).

Використовували розроблені КМ на основі двокомпонентних бідисперсних наповнювачів такого складу.

1. Матеріал, наповнений частинками антифрикційного графіту марки АГ-1500 (ТУ 48-20-4-87) (дисперсність 63...80 μm) та перліту (дисперсність 5...10 μm) у співвідношенні 60:20 відповідно (матеріал АГП) [15]. Графіт АГ-1500 виготовлений з непрокаленого нафтового коксу, кам'яновугільного пеку з додавкою природного графіту. Використовують його для деталей і вузлів, які працюють в умовах сухого, напівсухого і рідинного тертя. Перліт – матеріал, отриманий в результаті термічної обробки водовмісної алюмосилікатної перлітової породи вулканічного походження. Хімічний склад перліту, згідно з ГОСТ 25226-96, такий: оксид кремнію (SiO_2) – 65...77%, оксид алюмінію (Al_2O_3) – 11...16%, оксид заліза ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) – 0,5...6,0%, оксид кальцію (CaO) – 0,1...3,5%, оксид калію і натрію ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) – 3...10%.

2. Матеріал, наповнений частинками сірого шламу (СШ) (дисперсність 63...80 μm) та перліту (дисперсність 5...10 μm) у співвідношенні 50:50 (матеріал СШП) [16]. Сірий шлам – тверда або пастоподібна суміш відходів (шлам) процесу Байера – технології видалення та очищення оксиду алюмінію (сировини для видобутку алюмінію) з бокситів. Складається зі суміші оксидів (м. р.): заліза – 32...35, алюмінію – 6...9, кремнію – 13...14, кальцію – 14...16, титану – 5...6, ванадію – 1,0...2,0, олова – 1,0...1,3 та інших оксидів – до 100 м. р.

До вищеперерахованих матеріалів додавали гранули термопластичного наповнювача поліаміду ПА-6 ($\varnothing 3,2 \pm 0,1$ мм, довжина $3,5 \pm 0,1$ мм, вміст $q = 30$ та 60 м. р). Поліамід ПА-6 (ОСТ 6-06-С9-93) є полімером на основі синтетичних високомолекулярних сполук, що містять в основному ланцюгу амідні групи $-\text{CONH}-$.

Формували КМ з дисперсними частинками та гранулами поліаміду (за умови їх розташування боковою поверхнею до області контакту) такого складу: АГПП-БП (АГ-1500 + перліт + поліамід); СШПП-БП (сірий шлам + перліт + поліамід).

Досліджували трибологічні властивості матеріалів на випробувальній машині серійного виробництва 2070 СМТ-1 за схемою “диск–колодка” і методикою відповідно до ГОСТ 23.224-86. Розраховували параметри тертя згідно з працею [17].

Диск (контртіло) виготовляли зі сталі 45, термообробленої до твердості 45...48 HRC і з шорсткістю поверхні $R_a = 0,16...0,32$ μm .

Досліджували в умовах сухого тертя за питомого навантаження $p = 1$ МПа і швидкості ковзання $v = 0,5$ та 1,0 м/с. Випробувальний шлях тертя зразків становив 10 000 м (при $v = 0,5$ м/с) та 20 000 м (при $v = 1,0$ м/с).

Температуру досліджуваних зразків визначали за допомогою термопари “хромель–копель”, сигнал від якої реєстрували вимірювальною апаратурою. Розташовували термопару на відстані 0,8 мм від області контакту зразка з контртілом. Температуру реєстрували з кроком випробувального шляху тертя 100 м. Режими випроб вибрали відповідно до умов використання КМ. Масу зразків визначали ваговим методом на аналітичних вагах з точністю $\pm 0,0001$ г.

Структуру КМ після тертя досліджували на металографічному мікроскопі XJL-17AT, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення змінювали у межах від $\times 100$ до $\times 1600$ разів. Безпосередньо у роботі зразки досліджували за збільшення у $\times 100$ та $\times 200$ разів. Для

обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення “Levenhuk TourView”.

Затверджували матеріали за експериментально встановленим режимом [14]: формування зразків та їх витримка впродовж $12,0 \pm 0,1$ h за температури 293 ± 2 K, нагрівання зі швидкістю 3 K/min до температури 433 ± 2 K, витримання зразків за цієї температури впродовж $2,0 \pm 0,05$ h, повільне охолодження до 293 ± 2 K. Для стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж 24 h на повітрі за температури 293 ± 2 K.

Результати досліджень та їх обговорення. Досліджували у два етапи. На першому вивчали трибологічні властивості розробленого двокомпонентного бідисперсного матеріалу, наповненого гранулами поліаміду ПА-6 (АГПП-БП) за вмісту $q = 30$ м. р. (рис. 1a, c) та 60 м. р. (рис. 1b, d). Досліджували швидкості ковзання $v = 0,5$ та 1,0 м/с, питоме навантаження $p = 1$ МПа [14, 15]. Результати трибологічних досліджень наведено на рис. 1 та у табл. 1.

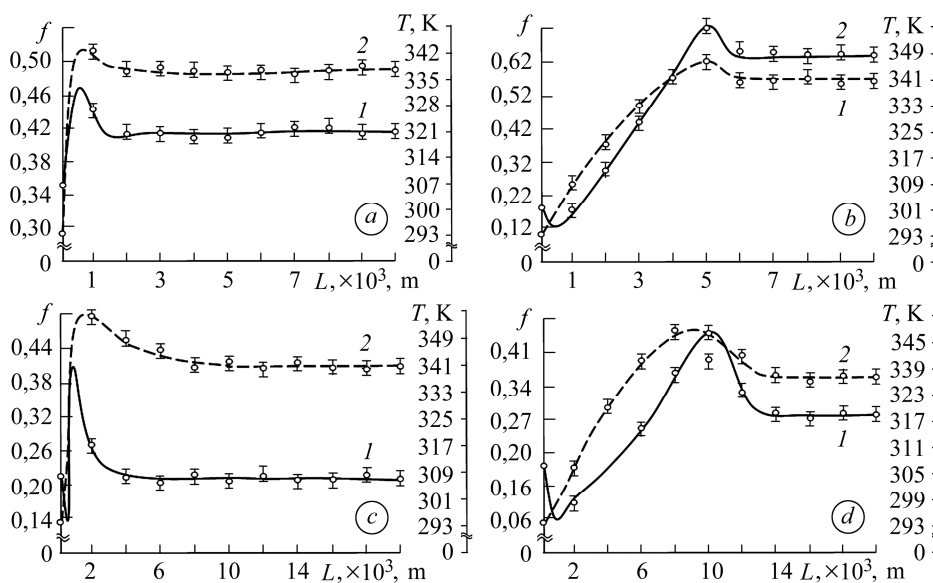


Рис. 1. Залежність коефіцієнта тертя від шляху випробовування матеріалів за вмісту гранул ПА-6 $q = 30$ м. р. (a, c) та 60 м. р. (b, d) при швидкості ковзання $v = 0,5$ м/с (a, b) і 1,0 м/с (c, d): 1 – коефіцієнт тертя; 2 – температура в області тертя.

Fig. 1. Dependence of the friction coefficient on the mode of materials testing for the content of ПА-6 granules $q = 30$ m. p. (a, c) and 60 m. p. (b, d) with sliding speed $v = 0,5$ m/s (a, b) and 1.0 m/s (c, d): 1 – friction coefficient; 2 – temperature in the friction area.

Таблиця 1. Трибологічні властивості КМ АГПП-БП

Параметри	$q = 30$ м. р.		$q = 60$ м. р.	
	$v = 0,5$ м/с	$v = 1,0$ м/с	$v = 0,5$ м/с	$v = 1,0$ м/с
M , N·m	2,0...2,1	1,0...1,2	3,1...3,3	1,3...1,5
f	0,40...0,42	0,20...0,22	0,61...0,63	0,26...0,28
T , K	335...337	340...341	339...341	337...339
l , m	1600...2000	2500...3000	5800...6100	11900...12800
I_m , mg/km	0,8...1,0	0,4...0,5	2,6...2,8	0,9...1,1

Експериментально встановили, що зі збільшенням швидкості ковзання від $v = 0,5$ m/s (рис. 1а, б) до 1,0 m/s (рис. 1с, д) зменшується момент (M) та коефіцієнт тертя (f) й підвищується зносотривкість (табл. 1). Водночас з поліпшенням трибологічних властивостей і дії сил тертя спостерігали тенденцію до підвищення температури від 335...337 К до 340...341 К та збільшення шляху припрацювання матеріалу від 1600...1800 м до 2500...3000 м.

Відповідно до отриманих результатів можна зробити такі припущення.

1. На початковому етапі дослідження підвищена швидкість ковзання ($v = 1,0$ m/s) призводить до поліпшеного припрацювання матеріалу. Мікрозріз нерівностей відбувається інтенсивніше, тому на етапі тертя момент, коефіцієнт тертя та інтенсивність зносу (I_m) мають нижчі показники.

2. Внаслідок дії сил тертя частина затраченої корисної енергії відводиться на нагрівання матеріалу. За швидкості ковзання $v = 1,0$ m/s температура в області контакту підвищена, що сприяє нагріванню гранул ПА-6 (які є термопластами) та переходу їхнього верхнього шару (розташований у області тертя) в еластичний стан. Своєю чергою, розплавлений верхній шар термопластичного матеріалу внаслідок переносу під час тертя заповнює мікропори та мікронерівності контртіла. На поверхні тертя утворюється третє тіло у вигляді плівки з ПА-6 та частинок наповнювачів АГ-1500 і перліту. При цьому тертя відбувається не за схемою “метал–полімер”, а за схемою “полімер–полімер”, що і поліпшує трибологічні властивості матеріалу. Водночас слід зауважити, що наявність у складі частинок антифрикційного наповнювача АГ-1500 призводить до змащування поверхні тертя.

Аналогічну тенденцію та механізм зношування спостерігали і під час дослідження трибологічних властивостей КМ АГППП-БП із додаванням 60 м. р. гранул ПА-6. Зі збільшенням швидкості ковзання від 0,5 до 1,0 m/s коефіцієнт тертя, момент та інтенсивність зношування зменшуються (рис. 1б, д, табл. 1), температура при цьому змінюється несуттєво. Однак ці показники є вищими порівняно із показниками КМ, наповненого гранулами ПА-6 за вмісту $q = 30$ м. р. Водночас слід зауважити, що значно збільшується шлях припрацювання матеріалу, позаяк при $v = 0,5$ m/s $l = 5800...6100$ м, а при $v = 1,0$ m/s він становить 11900...12800 м (табл. 1). Можна припустити, що зі збільшенням вмісту гранул ПА-6 у матеріалі зростає площа контакту термопласту з металом, що призводить до утворення плівки в області контакту, яка є надлишковою. Велика площа розм'якшеного (розплавленого) матеріалу через підвищену температуру сприяє міжмолекулярній взаємодії контактної пари. Це зумовлює прилипання молекул, що збільшує адгезію між поверхнями. При цьому збільшення товщини розплавленої плівки на контртілі сприяє додатковому скупченню відпрацьованих частинок наповнювачів і погіршенню трибологічних властивостей КМ. Збільшений шлях припрацювання матеріалу підтверджує вищеперераховані припущення.

Додатково для підтвердження отриманих результатів досліджували поверхню тертя матеріалів за допомогою методу оптичної мікроскопії за збільшення у $\times 100$ та $\times 200$ разів. Проаналізувавши поверхні контртіла і досліджуваного матеріалу, можна зробити такі висновки.

Поверхня КМ АГППП-БП за вмісту гранул поліаміду $q = 30$ м. р. і швидкості ковзання $v = 0,5$ m/s (рис. 2а, б) має помітні тонкі лінії тертя. Це підтверджує припущення, що на стадії припрацювання матеріалу за такої швидкості ковзання зріз мікронерівностей недостатній. Виступи призводять до дряпання матеріалу і утворення ліній тертя, а отже, до підвищення моменту і коефіцієнта тертя та збільшення інтенсивності зношування (табл. 1).

Аналізуючи зображення поверхні КМ після тертя за швидкості ковзання $v = 1,0$ m/s (рис. 2с, д), встановили, що на ній відсутні яскраво виражені лінії тер-

тя. Опосередковано це свідчить про поліпшене припрацювання матеріалу і вигладжування поверхні тертя. Однак помітні включення деяких частинок в області тертя. Припускали, що вони є частинками наповнювача АГ-1500 і знаходяться в області контакту внаслідок переносу під час тертя. Отримані зображення підтверджують наявність додаткового змащування у області контакту антифрикційним матеріалом і підвищення трибологічних властивостей КМ.

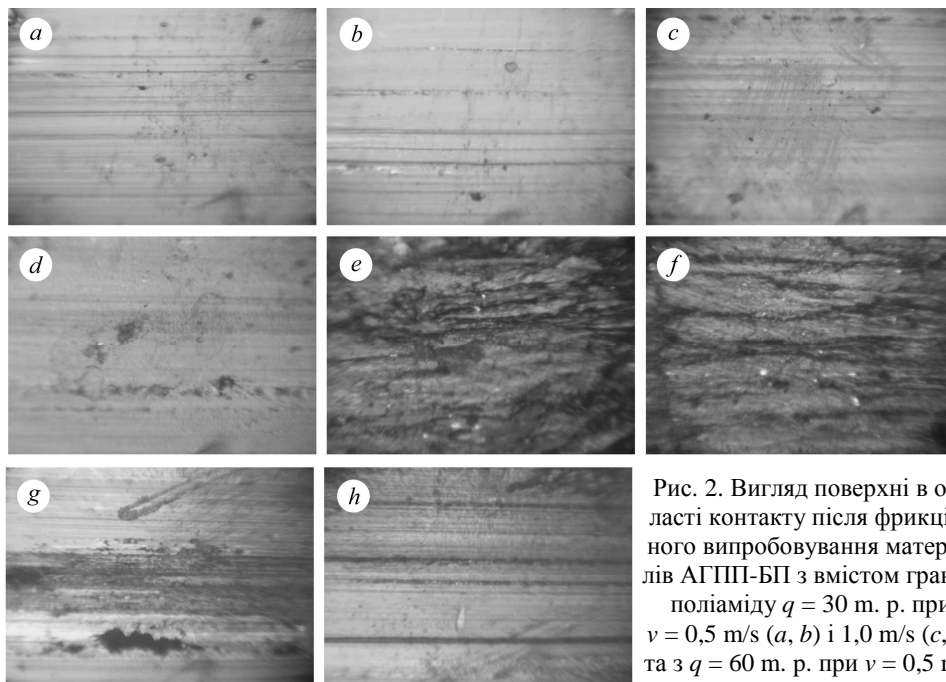


Рис. 2. Вигляд поверхні в області контакту після фрикційного випробування матеріалів АГПП-БП з вмістом гранул поліаміду $q = 30$ м. р. при $v = 0,5$ м/с (a, b) і 1,0 м/с (c, d) та з $q = 60$ м. р. при $v = 0,5$ м/с (e, f) і 1,0 м/с (g, h). a, c, e, g – $\times 100$; b, d, f, h – $\times 200$.

Fig. 2. A view of the surface in the contact area after friction testing of the materials АГПП-БП with a content of polyamide granules $q = 30$ m. p. at $v = 0.5$ m/s (a, b) and 1.0 m/s (c, d) and with $q = 60$ m. p. at $v = 0.5$ m/s (e, f) and 1.0 m/s (g, h). a, c, e, g – $\times 100$; b, d, f, h – $\times 200$.

На поверхні тертя КМ АГПП-БП за вмісту гранул ПА-6 $q = 60$ м. р. виявлені яскраво виражені доріжки тертя, причому лінії мають нерівномірний і хаотичний вигляд (рис. 2e, f). Ці лінії безпосередньо утворюються мікронерівностями матеріалу та в результаті перенесення під час руху відпрацьованих частинок наповнювача в область тертя. Наведені припущення підтвержені отриманими експериментальними результатами – збільшення шляху припрацювання і низькі трибологічні властивості матеріалу. Водночас на поверхні після випробування за швидкості ковзання $v = 1,0$ м/с (рис. 2g, h) виявлено доріжки тертя, які розташовані рівномірно до напрямку руху контртіла. Однак встановлено, що виникають зосереджене “випрацювання” та пошкодження у матеріалі, які зумовлені адгезійною взаємодією за підвищеної еластичності та розплавлення матеріалу.

Отже, аналізом поверхні матеріалів методом оптичної мікроскопії підтверджено отримані експериментальні результати трибологічних властивостей та припущення про взаємодію матеріалів під час тертя. Встановлено, що максимально поліпшенні трибологічні властивості має КМ АГПП-БП за вмісту гранул ПА-6 $q = 30$ м. р. та за умови швидкості ковзання $v = 1,0$ м/с.

На другому етапі досліджували трибологічні властивості матеріалів СШПП-БП за вмісту гранул ПА-6 $q = 30$ м. р. (рис. 3a, c) та 60 м. р. (рис. 3b, d).

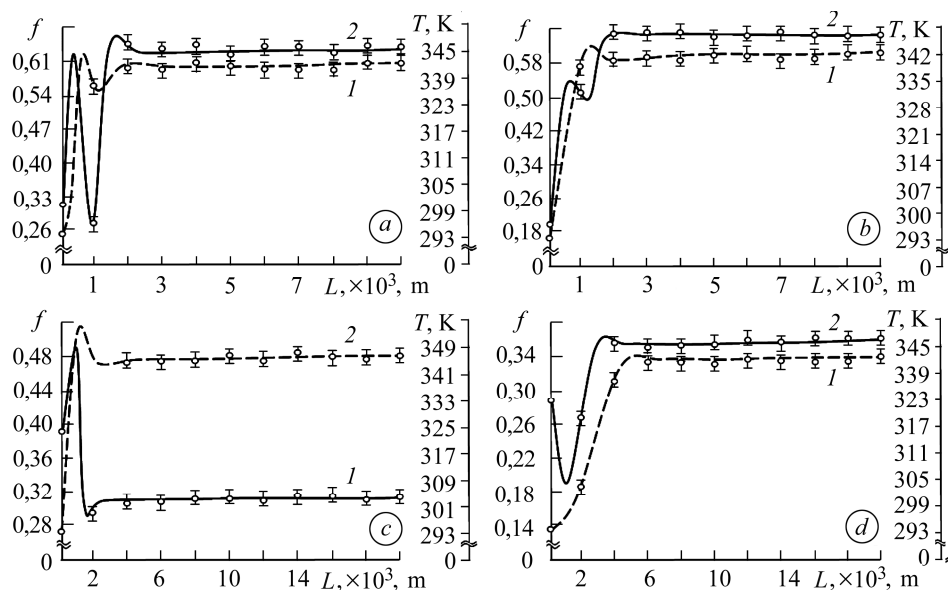


Рис. 3. Залежність коефіцієнта тертя від шляху випробовування матеріалів СШПП-БП з вмістом гранул поліаміду $q = 30$ м. р. (а, с) та 60 м. р. (b, d) при швидкості ковзання $v = 0,5$ м/с (а, b) і 1,0 м/с (с, d). 1 – коефіцієнт тертя; 2 – температура в області тертя.

Fig. 3. Dependence of friction coefficient on the mode of СШПП-БП materials testing with a content of polyamide granules $q = 30$ m. р. (а, с) and $q = 60$ m. р. (b, d) with sliding speed $v = 0.5$ m/s (а, b) and $v = 1$ m/s (с, d). 1 – friction coefficient; 2 – temperature in the friction area.

Експериментально встановили, що матеріали СШПП-БП з вмістом гранул поліаміду $q = 30$ м. р. та 60 м. р. мають трибологічні властивості, які за показниками (за однакових умов випробовування) відрізняються несуттєво (рис. 3а, b; табл. 2). З підвищенням швидкості ковзання до $v = 1,0$ м/с спостерігали тенденцію до поліпшення трибологічних властивостей. Водночас слід зауважити, що зі збільшенням вмісту гранул ПА-6 температура зменшується від 347...349 К до 341...343 К, проте підвищується шлях припрацювання від 2100...2800 м до 3900...4100 м та інтенсивність зношування від $I_m = 2,1...2,3$ mg/km до 2,9...3,1 mg/km (рис. 3b, c; табл. 2). Несуттєву розбіжність результатів пояснюють подібним механізмом зношування таких матеріалів, де вагомий вплив має склад КМ.

Таблиця 2. Трибологічні властивості КМ СШПП-БП

Параметри	$q = 30$ м. р.		$q = 60$ м. р.	
	$v = 0,5$ м/с	$v = 1,0$ м/с	$v = 0,5$ м/с	$v = 1,0$ м/с
$M, N \cdot m$	3,2...3,4	1,5...1,6	3,3...3,4	1,6...1,7
f	0,63...0,65	0,29...0,31	0,64...0,65	0,31...0,33
T, K	342...344	347...349	341...343	341...343
l, m	2000...2200	2100...2800	1850...2000	3900...4100
$I_m, mg/km$	3,2...3,3	2,1...2,3	3,2...3,3	2,9...3,1

Матеріал СШПП-БП має підвищені фізико-механічні властивості матеріалу завдяки міцності та твердості частинок самого наповнювача. Посилена міцність і твердість КМ сприяє підвищенню опору зрізуванню мікронерівностей та темпе-

ратури в області тертя. Збільшення температури призводить до плавлення верхнього шару гранул ПА-6 та утворення третього тіла. Однак мікронерівності, в складі яких є наповнювач, викришуються постійно. Наповнювач зосереджується у розплавленій плівці, що, своєю чергою, призводить до абразивного зношування матеріалів. При цьому утворюються задири та пошкоджується поверхня КМ, що негативно впливає на трибологічні властивості. Тому навіть збільшення площі контакту гранул ПА-6 (через збільшення їх вмісту) має невелике значення для поліпшення властивостей композитів.

Для підтвердження наведених вище припущень матеріали дослідили методом оптичної мікроскопії. На поверхні тертя за різної швидкості ковзання виявлені яскраво виражені доріжки з суттєвими заглибленнями, які свідчать про викришування наповнювача, зосередження його в місці тертя і дряпання матеріалу. Напрямо цих доріжок є паралельним до дії абразиву.

Водночас слід зазначити, що цікавим з наукової та практичної точки зору є використання таких матеріалів в умовах рідинного тертя, а саме у морській воді, що передбачає застосування матеріалу у дейдвудних підшипниках. Вода не лише відводить тепло, але змачує і очищує поверхню від абразиву. Очищена поверхня зменшить взаємодію поліаміду з контртілом під час тертя, інтенсивність його розплавлення, що зумовить поліпшення трибологічних властивостей матеріалу.

ВИСНОВКИ

Доведено, що найвищі трибологічні властивості має матеріал, наповнений частинками антифрикційного графіту марки АГ-1500 (дисперсність 63...80 μm), перліту (дисперсність 5...10 μm) та гранулами поліаміду ПА-6 у співвідношенні 60:20:30, відповідно, а саме: момент тертя $M = 1,0...1,2 \text{ N}\cdot\text{m}$, коефіцієнт тертя $f = 0,20...0,22$, температура $T = 340...341 \text{ K}$, інтенсивність зношування $I_m = 0,4...0,5 \text{ mg/km}$, шлях припрацювання $l = 2500...3000 \text{ m}$ за швидкості ковзання $v = 1,0 \text{ m/s}$.

Експериментально встановлено, що матеріал СШПП-БП через підвищені фізико-механічні властивості має нижчі трибологічні показники порівняно із матеріалом АГПП-БП. За швидкості ковзання $v = 0,5 \text{ m/s}$ момент тертя таких матеріалів $M = 3,2...3,4 \text{ N}\cdot\text{m}$, коефіцієнт тертя $0,63...0,65$, температура $341...344 \text{ K}$, шлях припрацювання $1850...2000 \text{ m}$, інтенсивність зношування $3,2...3,3 \text{ mg/km}$, а за швидкості $v = 1 \text{ m/s}$ $M = 1,5...1,7 \text{ N}\cdot\text{m}$, $f = 0,29...0,33$.

РЕЗЮМЕ. Установлено, что лучшими трибологическими свойствами отличается материал, наполненный частицами антифрикционного графита марки АГ-1500 (дисперсность 63...80 μm), перлита (дисперсность 5...10 μm) и гранулами полиамида ПА-6 в соотношении 60:20:30 соответственно. Такой композит при скорости скольжения $v = 1,0 \text{ m/s}$ имеет следующие свойства: рабочий момент трения $M = 1,0...1,2 \text{ N}\cdot\text{m}$, коэффициент трения $f = 0,20...0,22$, рабочая температура $T = 340...341 \text{ K}$, интенсивность изнашивания $I_m = 0,4...0,5 \text{ mg/km}$, путь приработки $l = 2500...3000 \text{ m}$.

SUMMARY. It is established that the best tribological properties has the material filled with particles of anti-friction АГ-1500 graphite (dispersion 63...80 μm), pearlite (dispersion 5...10 μm) and granules of polyamide ПА-6 in a ratio of 60:20:30, respectively. This composite for sliding velocity $v = 1.0 \text{ m/s}$ has the following properties: working moment of friction $M = 1.0...1.2 \text{ N}\cdot\text{m}$, friction coefficient $f = 0.20...0.22$, operating temperature $T = 340...341 \text{ K}$, wear intensity $I_m = 0.4...0.5 \text{ mg/km}$, the running-in path $l = 2500...3000 \text{ m}$.

1. *Influence of deformation process in material at multiple cracking and fragmentation of nano-coating* / P. O. Maruschak, S. V. Panin, S. R. Ignatovich, I. M. Zakiev, I. V. Konovalenko, I. V. Lytvynenko, V. P. Sergeev // Theoretical and applied fracture mechanics. – 2012. – № 57. – P. 43–48.

2. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие* / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин и др.; под ред. А. А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.
3. *Трение, изнашивание и смазка. Справ. В 2-х кн. Кн. 2.* / Под. ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 2002. – 358 с.
4. *Трибологічна поведінка електродугових покриттів із порошкових дротів системи Fe–Cr–B–Al за робочих умов штоків запірних вентилів ТЕС* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, Т. Р. Ступницький та ін. // Вісник ТНТУ. – 2012. – **67**, № 3. – С. 81–91.
5. *Антифрикційні електродугові покриття Cu–Al та Zn–Al* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік, І. Й. Сидорак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – **38**, № 3. – С. 114–115.
(*Cu–Al and Zn–Al antifriction electric-arc coatings* / V. I. Pokhmurs'kyi, M. M. Student, V. M. Dovhunyk, I. I. Sydorak // *Materials Science*. – 2002. – **38**, № 3. – P. 455–457.)
6. *Богданович П. Н., Прушак В. Я.* Трение и износ в машинах: учеб. для вузов. – Минск: Высш. шк., 1999. – 374 с.
7. *Стухляк П. Д.* Эпоксидные композиты для защитных покрытий. – Тернополь: Збруч, 1994. – 177 с.
8. *Трибологія: підруч.* / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко, Є. В. Корбут. – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту “НАУ-друк”, 2009. – 392 с.
9. *Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями* / В. Є. Марчук, Б. А. Ляшенко, М. В. Кіндрачук, О. І. Духота // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 2. – С. 80–87.
10. *Костецкий Б. И.* Трение, смазка и износ в машинах. – К.: Техника, 1970. – 396 с.
11. *Гаркунов Д. Н.* Триботехника (износ и безызносность): учебник. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
12. *Белый В. А., Петроковец М. И.* Трение и износ материалов на основе полимеров. – Минск: Наука и техника, 1976. – 432 с.
13. *Бузков В. А.* Підвищення службових властивостей матеріалів для розвитку суднових дейдвудних обладнань та захисту моря: автореф. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.02.01 – матеріалознавство. – Ін-т проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАНУ. – К., 1999. – 36 с.
14. *Букетов А. В., Браїло М. В.* Оптимізація вмісту і природи інгредієнтів епоксидної матриці за її властивостями // Вісник ТНТУ. – 2014. – № 2. – С. 90–99.
15. *Визначення оптимального вмісту двокомпонентного наповнювача методом математичного планування експерименту* / А. В. Букетов, М. В. Браїло, В. Л. Алексенко, В. М. Овдій // Наукові нотатки. – 2014. – Вип. 44. – С. 18–27.
16. *Применение метода математического планирования эксперимента для определения состава эпоксикомпозитов* / А. В. Букетов, Н. В. Браило, В. Л. Алексенко, А. А. Сапронов // Вестник Карагандинского гос. ун-та. Сер. “Математика”. – 2014. – № 3 (75). – С. 23–35.
17. *Обеспечение износостойкости изделий. Метод ускоренной оценки материалов трущихся сопряжений: Р 50-54-62-88.* – М.: Госстандарт СССР, 1988. – 46 с. – (ВНИИНМАШ).

Одержано 04.11.2014