

Якущенко Сергій Вікторович, PhD, доцент, Херсонська державна морська академія, ORCID: 0000-0002-1724-8171

Браїло Микола Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, Херсонська державна морська академія, ORCID: 0000-0001-8167-9999

Зінченко Сергій Миколайович, д.т.н, доцент кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, ORCID: 0000-0001-5012-5029

Сапронова Анна Вікторівна, PhD, молодший науковий співробітник, Херсонська державна морська академія, ORCID: 0000-0002-4327-4293

Клементьєв Ігор Євгенович, здобувач вищої освіти, Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, ORCID: 0000-0003-2994-7292

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ НАПОВНЕНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

Досліджено можливість підвищення експлуатаційних характеристик елементів транспортних засобів шляхом застосування наповнених епоксидно-поліефірних композитних матеріалів. Для формування полімерної матриці композиту використовували епоксидіановий олігомер ЕД-20 ($q = 100$ мас. ч.), ортофталеву дициклопентадієнову ненасичену передприскорену поліефірну смолу ENYDYNE H 68372 TAE – $q = 10$ мас. ч. (на 100 мас. ч. епоксидної смоли), твердник холодного тверднення поліетиленполіамін (ПЕПА) ($q = 10$ мас.ч.), ініціатор для поліефірних смол Butanox-M50 – ($q = 1,5$ мас. ч.). В якості модифікатора застосовували метилендіфенілдіізоціанат ($q = 0,25$ мас. ч.). У якості наповнювача використано гексагональний h-BN – $8...10$ мкм – ($q = 60$ мас. ч.) та слюда $20...40$ мкм ($q = 20$ мас. ч.). Проведено дослідження трибологічних властивостей в умовах сухого тертя, мастильного середовища за допомогою машини тертя 2070 СМТ-1 за схемою «диск-колодка» відповідно до ASTM G77-17. Умови випробовування розроблених матеріалів: питома навантаження $p = 1$ МПа, швидкість ковзання $u = 1,0$ м/с, шлях ковзання – $10\,000$ м. Температуру в зоні контакту визначали за допомогою термопари «хромель-копель», сигнал від якої реєстрували вимірювальною апаратурою. Встановлено, що вміст наповнювачів в епоксидно-поліефірній матриці позитивно впливає на трибологічні властивості композиту. При експериментальному дослідженні проаналізовано, що трибологічні властивості композиту при сухому терті за вмісту слюди та h-BN поліпшуються порівняно з епоксидною матрицею. При роботі композиту в умовах мастильного середовища коефіцієнт тертя становить – $f = 0,05...0,06$, шлях припрацювання – $l = 3500...4000$ м, інтенсивність зношування – $I_m = 0,27...0,30$ мг/км, робоча температура $T = 308...310$ К.

Ключові слова: епоксидно-поліефірний композит, трибологічні властивості, антифрикційний матеріал, коефіцієнт тертя, інтенсивність зносу

Постановка проблеми. На сьогодні одним з важливим для металевих та полімерних конструкцій засобів транспорту є їх надійність, довговічність та ремонтпридатність. Дані властивості суттєво впливають на техніко-економічні характеристики транспорту в цілому, як морського, річкового так і наземного [1–2]. До деталей та механізмів, які піддаються постійному впливу тертя ставлять максимально високі вимоги щодо їх фізико-механічних та трибологічних властивостей [2]. Поширеними методами підвищення експлуатаційних характеристик вузлів тертя засобів транспорту є застосування

полімерних матеріалів, як покриттів на металевій основі, так і конструкційний матеріал для зменшення втрати енергії на тертя та знос деталей, що може привести до виходу з ладу всього механізму. З цією метою використовують полімери, які мають термопластичну основу та реактопластичну [3–5]. З розвитком сучасної транспортної галузі та постійного вдосконалення технологій потребує розробку та використання матеріалів у тертьових парах, які відрізняються в цілому поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Тому актуальним і перспективним є розробка полімерних матеріалів з поліпшеними у комплексі фізико-механічними, теплофізичними та трибологічними властивостями [6–7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні полімери та матеріали на їх основі витісняють такі основні конструкційні матеріали, як залізобетон, метал, дерево. Можливості полімерних матеріалів надзвичайно широкі завдяки їх широкому вибору та застосування наповнювачів, що дозволяє керувати впливом їх модифікацією та характеристиками [3–8]. Широкого використання набули полімери на основі епоксидних та поліефірних смол. Ці матеріали відрізняються простотою формування, можливістю керувати впливом на властивості та низькою собівартістю [7–12]. Авторами в своїх працях [5–12] проведено дослідження наповнених епоксидних та поліефірних композитів та доведено можливість створення композитів із поліпшеними експлуатаційними характеристиками за рахунок введення добавок. Водночас виникає необхідність постійного вдосконалення складу та технології формування композитів для їх використання в сучасних транспортних засобах. Тому є перспективним створення багатокомпонентних полімерних матеріалів з поліпшеними в комплексі фізико-механічними, теплофізичними та трибологічними властивостями із застосування антифрикційних наповнювачів.

Мета роботи – дослідити трибологічні властивості наповнених епоксикомпозитів для підвищення експлуатаційних характеристик елементів транспортних засобів за рахунок їх використання.

Матеріали та методика дослідження. При формуванні матриць КМ використовували наступні компоненти:

1. Епоксидіановий олігомер ЕД-20 (ГОСТ 10587-84) ($q = 100$ мас. ч.).
2. Ортофталева дициклопентадієнова ненасичена передприскорена поліефірна смола ENYDYNE H 68372 TAE – $q = 10$ мас. ч. (вміст вказано на 100 мас. ч. епоксидної смоли), яка містить інгібітор для попередження миттєвої полімеризації (час гелеутворення $\tau = 20 \dots 24$ хв). Слід зазначити, що при реакції сополімеризації композицій ненасичених поліефірів з неграничними мономерними з'єднаннями в присутності ініціаторів виділяється значна кількість тепла, тому реакція є екзотермічною.
3. Твердник холодного тверднення поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78) $q = 10$ мас. ч. (вміст вказано на 100 мас. ч. епоксидної смоли).
4. Ініціатор для поліефірних смол Butanox-M50 – $q = 1,5$ мас. ч., що є перекисом метилетилкетону (МЕКП), і містить низьку кількість води та мінімальну кількість полярних з'єднань, порівняно з етиленгліколем.
5. Модифікатор метилендіфенілдіізоціанат, широко відомий як pure MDI (4,4-MDI) – $q = 0,25$ мас. ч. Метилендіфенілдіізоціанат є ароматичним діізоціанатом, який використовують для тривимірного зшивання полімерів при виготовленні поліуретану. Хімічна формула: $\text{CH}_2(\text{C}_6\text{H}_4\text{NCO})_2$, молярна маса – 250 г/моль, густина – 1,18 г/см³.
6. Наповнювач 1: гексагональний h-NB – 8...10 мкм – $q = 60$ мас. ч.
7. Наповнювач 2: слюда 20...40 мкм – $q = 20$ мас. ч. (мікрослюда фракціонована серії «Стандарт» (ТУ 5725-005-40705684-2001) марки МС-20-80 з дисперсністю

20...40 мкм. Мінеральний склад: слюда-мусковіт $KA_2[(OH, F)_2AlSi_3O_{10}]$. Хімічний склад згідно з ТУ 5725-005-40705684-2001: оксид кремнію (SiO_2) – 44...50%, оксид алюмінію (Al_2O_3) – 27...35%, оксид заліза (Fe_2O_3) – менше 5%, оксид магнію (MgO) – менше 2%, оксид калію (K_2O) – більше 8%, водорозчинні солі – менше 0,2%.

Перед введенням твердників до композиції модифікували її ультрафіолетовим опроміненням тривалістю 5 хв.

Затверджували матеріали за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $t = 12,0 \pm 0,1$ год. за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання зразків при даній температурі впродовж часу $t = 2,0 \pm 0,05$ год., повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $t = 24$ год. на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К. Трибологічні властивості матеріалів досліджували на випробувальній машині 2070 СМТ-1 за схемою «диск-колодка» і методикою відповідно до ASTM G77-17.

Масову інтенсивність зносу визначали за формулою:

$$I_m = \frac{\Delta m}{\Delta L}, \quad (1)$$

де Δm – різниця маси зразка до і після тертя, мг; ΔL – шлях тертя, км.

Коефіцієнт тертя розраховували відповідно до ASTM G77-17 за формулою:

$$f = \frac{M}{F \cdot r}, \quad (2)$$

де M – середньоарифметичне значення моменту тертя, Н × м; F – навантаження на колодку, Н; r – радіус металевого контртіла (плеча), м.

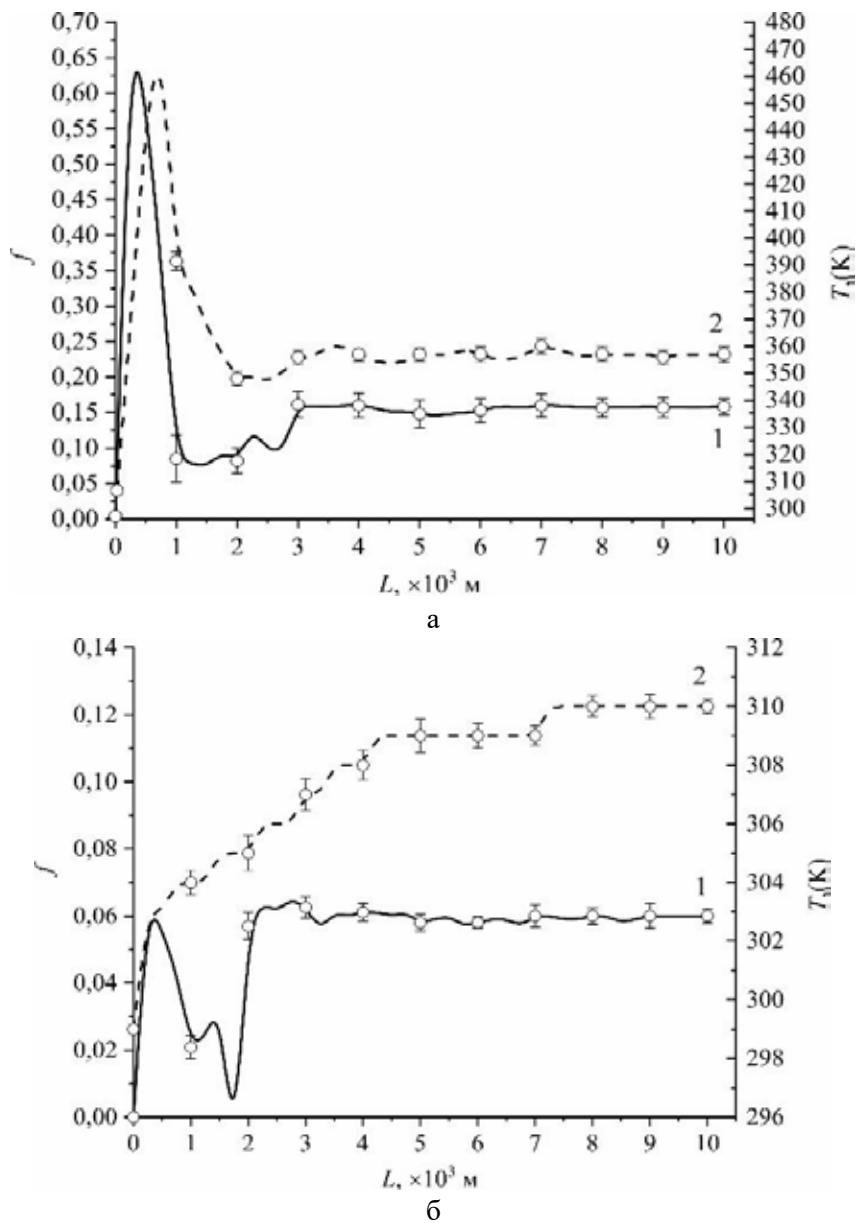
Диск (контртіло) виготовляли з матеріалу сталь 45, термообробленої до твердості 45...48 HRC і з шорсткістю поверхні $R_a = 0,16...0,32$ мкм.

Дослідження проводили в умовах сухого тертя, мастильного середовища. Всі дослідження проводили за питомого навантаження $p = 1$ МПа і швидкості ковзання $v = 1,0$ м/с відповідно до умов експлуатації композитних матеріалів. Шлях ковзання зразків при випробуваннях становив 10 000 м.

Температуру в зоні контакту визначали за допомогою термопари «хромель-копель», сигнал від якої реєстрували вимірювальною апаратурою. Розташовували термопару на відстані $l_r = 2$ мм від області контакту зразка з контртілом.

Результати досліджень та їх обговорення. Попередньо було розроблено багатокомпонентний композитний матеріал який у комплексі відрізняється поліпшеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями та містить в своєму складі антифрикційні наповнювачі [4]. На даному етапі досліджено трибологічні властивості розробленого матеріалу з наповнювачами слюда – 20 мас. ч., нітрид бор гексагональний – 60 мас. ч. На рис. 1 показано графіки залежності коефіцієнту тертя від шляху тертя при швидкості ковзання $v = 1,0$ м/с та питомому навантаженні 1 МПа. При дослідженні трибологічних властивостей композитних матеріалів порівняння проводили з епоксидною матрицею, яка характеризується наступними показниками досліджуваних властивостей: коефіцієнт тертя – $f = 0,39...0,41$, робоча температура – $T = 310...313$ К, шлях припрацювання $l = 3900...4100$ м та інтенсивність зношування – $I_m = 1,7...1,9$ мг/км [15]. Результати дослідження трибологічних властивостей КМ, який випробовували при сухому терті, показали, що за вмісту слюди (20 мас. ч.) та h-BN (60 мас. ч.) матеріал характеризується зниженням коефіцієнту тертя від $f = 0,39...0,41$ (для епоксидної матриці) до $f = 0,14...0,16$ та зменшенням шляху припрацювання від $l = 3900...4100$ м до $l = 2800...3000$ м. Водночас, за високим початковим зношуванням на цьому шляху

припрацювання слідує ділянка стабільного зношування для всіх досліджень. Режим високого зношування (до 1000 м) пов'язаний із зрушенням мікронерівностей, які піддаються пластичній деформації, і в точках з високими місцевими температурами виникає руйнування таких мікронерівностей з подальшою адгезією оголених поверхонь та схоплювання металу контртіла. Внаслідок відкладення полімерного матеріалу на контртілі, утворюється плівка перенесення, яка відділяє полімерний штифт від металевої поверхні. Це викликає додатковий опір при ковзній взаємодії спряжених поверхонь та призводить до підвищення інтенсивності зношування від $I_m = 1,7 \dots 1,9$ мг/км до $I_m = 13,9 \dots 14,10$ мг/км та, як наслідок, до розігріву КМ на цій ділянці до $T = 460$ К. Підвищення температури в зоні контакту призводить до поверхневої деструкції та підвищення коефіцієнту тертя на етапі припрацювання, що відображено на рисунку 1.



а – при сухому терті; б – при випробуванні в мастильному середовищі
Рисунк 1 – Залежність коефіцієнту тертя (1) і робочої температури (2)
від шляху випробування композитного матеріалу

Слід зазначити, що температура в зоні контакту на ділянці стабільного зносу при цьому підвищилась від $T = 310...313$ К до $T = 357...360$ К (порівняно з аналогічною ділянкою епоксидної матриці).

Очевидно, що вміст наповнювачів в епокси-поліефірній матриці позитивно впливає на трибологічні властивості композиту. Відомо, що слюда-мусковіт має пластинчасту будову, а гексагональна модифікація нітриду бору має подібну кристалічну структуру до графіту. В попередніх дослідженнях [13] за допомогою ІЧ-спектроскопії проаналізовано епокси-поліефірну матрицю за різного вмісту наповнювачів слюда та h-BN. Визначено, що за такого вмісту наповнювачів (слюда – 20 мас.ч., h-BN – 60 мас.ч.) композитний матеріал характеризується міцними зв'язками між матрицею та бідисперсним наповнювачем. Встановлено наявність смуг та піків поглинання, які відповідають епоксидним та поліефірним функціональним групам матриці. Зазначено, що бідисперсний наповнювача приймає участь у формуванні просторової сітки та його наявність приводить до підвищення ступеня зшивання матеріалу. Оскільки, на спектрі КМ наявні смуги поглинання біля хвильових чисел $\nu = 500...610$ cm^{-1} , $\nu = 1034$ cm^{-1} , $\nu = 2855$ cm^{-1} (відповідають слюді), які характерні для Si–O деформаційних коливань, SiO₄ валентних та деформаційних коливань, та $\nu = 820$ cm^{-1} , $\nu = 1121$ cm^{-1} , $\nu = 1373$ cm^{-1} (h-BN), які характерні для B–N–B деформаційних коливань, B–N валентних коливань, w-BN коливань відповідно.

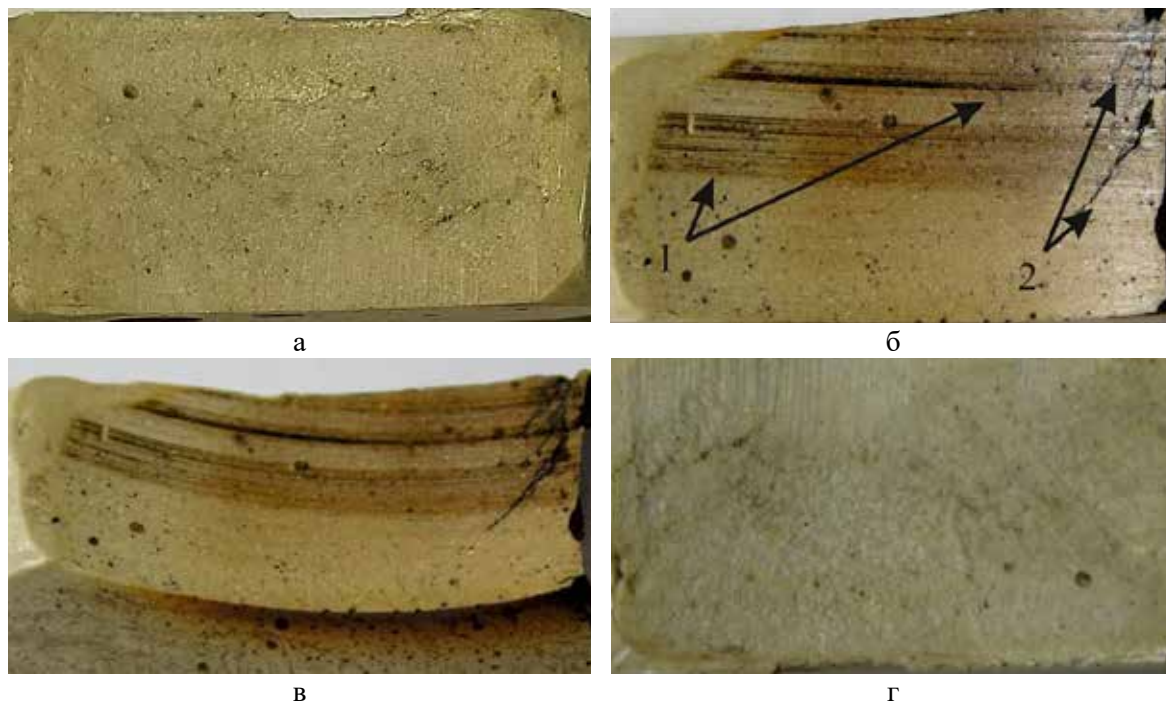
Надалі досліджували КМ при терті в мастильному середовищі. Встановлено, що коефіцієнт тертя такого матеріалу знижується до $f = 0,05...0,06$, але шлях припрацювання, порівняно із сухим тертям, підвищується до $l = 3500...4000$ м (табл. 1). Це можна пояснити наявністю мастильного матеріалу між спряженими поверхнями та утворенню граничного шару в процесі тертя. Усі мінеральні мастила, які є механічною сумішшю неактивних вуглеводів, здатні адсорбуватися на металевій поверхні за рахунок наявності включень органічних кислот, смол та інших поверхнево-активних речовин. Тому майже всі змащувальні матеріали утворюють на металічних поверхнях граничну фазу товщиною до 0,1 мкм, що має більш або менш міцний зв'язок з поверхневою та поздовжньою когезією. Мастильний матеріал у граничному шарі анізотропний, в тангенціальному напрямку молекулярні шари легко деформуються і при товщині шару більше деякої критичної величини ковзають один по одному. Завдяки рухомості молекул мастильного матеріалу на поверхні тертя проходить адсорбція з великою швидкістю, що надає мастильній плівці здатність «самовідновлюватись» при її локальних пошкодженнях. Ця здатність відіграє важливу роль у попередженні лавинного процесу схоплювання. Тому ділянка початкового зношування (2500...3000 м) характеризується зниженням коефіцієнту тертя, у порівнянні з ділянкою стабільного зношування, за рахунок процесів притирання та утворення граничної плівки. Інтенсивність зношування при граничному мащенні становила лише $I_m = 0,27...0,30$ мг/км.

Таблиця 1 – Трибологічні властивості КМ за вмісту слюди та h-BN

Параметри	Випробовування КМ в умовах	
	сухого тертя	тертя з мащенням
Робочий момент M , Н×м	0,74...0,84	0,26...0,33
Коефіцієнт тертя f	0,14...0,16	0,05...0,06
Робоча температура T , К	357...360	308...310
Шлях припрацювання L , м	2800...3000	3500...4000
Інтенсивність зносу I_m , мг/км	13,9...14,10	0,27...0,30

На рис. 2 наведено поверхню вихідного зразка та поверхні зразка після випробуванні в мастильному матеріалі.

Робоча температура при терті в мастильному середовищі становила $T = 308...310$ К. Отримані значення не виходять за межі температур (близько 673 К) при яких відбувається розплавлення та руйнування граничної плівки і позитивно характеризують процес тертя в мастильному середовищі.



а – вихідний зразок; б, в – після випробовування при сухому терті;
г – після випробовування у мастильному середовищі
Рисунок 2 – Поверхня композитного матеріалу при збільшенні у $\times 3$ рази

На поверхні вихідного зразка (рис. 2) відсутні доріжки тертя, але наявні мікронерівності поверхні, які виникають при формуванні зразка та його підготовки до випробування. На етапі припрацювання мікронерівності зрізаються і поверхня тертя характеризується цілісністю площини контакту, як наведено на рис. 2, б. Зразок, який випробовували при сухому терті характеризується рівномірними доріжками тертя (рис. 2, б, точки 1) з помітними залишковими напруженнями першого роду, які виникають внаслідок процесів тертя і розігрівання матеріалу на ділянці притирання (рис. 2, б, точки 2). На рис. 2, в добре помітно, що поверхневий шар матеріалу зазнав впливу високих температур, що узгоджується з даними, які наведені в табл. 1. Наявні деструкційні процеси викликані розігрівом КМ на етапі припрацювання. Композитний матеріал, який випробовували в мастильному середовищі, не має виражених доріжок тертя на своїй поверхні (рис. 2, г). Очевидно, що за час випробування при шляху тертя 10000 м, зважаючи на низькі покази коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування, та тертя в умовах наявності граничної плівки, доріжки тертя не сформувалися.

Отже, при дослідженні епокси-поліефірного КМ при сухому терті та маслі встановлено, що досліджувані властивості, а саме, коефіцієнт тертя знижуються в 1,5...2,8 рази та інтенсивність зносу в 50...150 рази порівняно з тертям без мащення. Шлях припрацювання при цьому підвищується однак не значно. Тому отримані результати досліджень трибологічних властивостей композиту за вмісту слюди (20 мас. ч.) та гексагонального нітриду бору (60 мас. ч.) дозволяють говорити про доцільність

використання таких композитних матеріалів у вузлах тертя механізмів, які працюють при мащенні.

Висновки. Встановлено, що трибологічні властивості композитного матеріалу при сухому терті за вмісту слюди та h-BN поліпшуються порівняно з епоксидною матрицею: коефіцієнт тертя підвищується від $f = 0,39...0,41$ до $f = 0,14...0,16$, шлях припрацювання знижується від $l = 3900...4100$ м до $l = 2800...3000$ м, проте інтенсивність зношування підвищується від $I_m = 1,7...1,9$ мг/км до $I_m = 13,9...14,10$ мг/км. Робоча температура підвищилась від $T = 310...313$ К до $T = 357...360$ К.

Композит, який випробовували в мастильному середовищі характеризується наступними показниками: коефіцієнт тертя – $f = 0,05...0,06$, шлях припрацювання – $l = 3500...4000$ м, інтенсивність зношування – $I_m = 0,27...0,30$ мг/км, робоча температура становила $T = 308...310$ К.

Отримані результати дослідження трибологічних властивостей КМ, за вмісту бідисперсного наповнювача (слюда, h-BN), дозволяють стверджувати про доцільність використання розроблених матеріалів у вузлах тертя механізмів, які працюють при мащенні мастилом.

Публікація містить результати досліджень, проведених у рамках НДДКР молодих вчених «Розробка антифрикційних нанокompозитних матеріалів для підвищення експлуатаційних характеристик вузлів тертя наземного і водного транспорту» (№ державної реєстрації 0120U101566).

Бібліографічний перелік

1. Chen, X. Marine Transport Efficiency Evaluation of Cross-border E-commerce Logistics Based on Analytic Hierarchy Process. *Journal of Coastal Research*. 2019. 94. P. 682–686.
2. Sui, C., Stapersma, D., Visser, K., de Vos, P., & Ding, Y. Energy effectiveness of ocean-going cargo ship under various operating conditions. *Ocean Engineering*. 2019. 190.
3. Kerber, M.L., Vinogradov, V.M., & Golovkin, G.S. Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svojstva, tekhnologiya. COP «Professiya». 2014. 560.
4. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S., & Sapronova, A. Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. P. 1–6.
5. Park, J.H., Rutledge, G.C. 50th anniversary perspective: Advanced polymer fibers: High performance and ultrafine. *Macromolecules*. 2017. 50. P. 5627–5642.
6. Mozdzen, L.C., Rodgers, R., Banks, J.M., Bailey, R.C., Harley, B.A.C. Increasing the strength and bioactivity of collagen scaffolds using customizable arrays of 3D-printed polymer fibers. *Acta Biomater*. 2016. 33. P. 25–33.
7. Kashytskyi, V., Sadova, O., Liushuk, O., Davydiuk, O., Myskovets, S. Examining a mechanism of generating the fragments of protective film in the tribological system “epoxycomposite–steel.” *Eastern-European J. Enterp. Technol*. 2017. 2. P. 10–16.
8. Stukhlyak, P.D., Holotenko, O.S., Dobrotvor, I.H., Mytnyk, M.M. Investigation of the Adhesive Strength and Residual Stresses in Epoxy Composites Modified by Microwave Electromagnetic Treatment. *Mater. Sci*. 2015. 51. P. 208–212.
9. Jamshidi, R., Heidarpour, A., Aghamohammadi, H., Eslami-Farsani, R. Improvement in the mechanical and tribological behavior of epoxy matrix with the inclusion of synthesized Ti 3 AlC 10 MAX particles. *J. Compos. Mater*. 2019. 53. P. 3819–3827.
10. Şahin, Y., De Baets, P. Friction and Wear Behavior of Carbon Fabric-Reinforced Epoxy Composites. *JOM*. 2017. 69. P. 2443–2447.
11. Buketov A.V., Brailo M.V., Sapronov O.O., Kruglyj D.G., Appazov E.S., Dulebova L., Klevtsov K.M. Nanofilled Antifriction Polymeric Composite Materials for Parts of Friction Units of Sea and River Transport. *Journal of nano- and electronic physics*. 2020. Vol. 12. No. 5. P. 05025-1–05025-6.
12. Yakushchenko S.V., Brailo M.V., Buketov A.V., Sapronov O.O., Popovych V., Dulebova L. Investigation of the properties and structure of epoxy–polyester composites with two-component bidispersed filler. *Composites: Mechanics, Computations, Applications, An International Journal*. 2022. 13(1). P. 81–95.

References

1. Chen, X. Marine Transport Efficiency Evaluation of Cross-border E-commerce Logistics Based on Analytic Hierarchy Process. *Journal of Coastal Research*. 2019. 94. P. 682–686.
2. Sui, C., Stapersma, D., Visser, K., de Vos, P., & Ding, Y. Energy effectiveness of ocean-going cargo ship under various operating conditions. *Ocean Engineering*. 2019. 190.
3. Kerber, M.L., Vinogradov, V.M., & Golovkin, G.S. Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svojstva, tekhnologiya. COP «Professiya». 2014. 560.
4. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S., & Sapronova, A. Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. P. 1–6.
5. Park, J.H., Rutledge, G.C. 50th anniversary perspective: Advanced polymer fibers: High performance and ultrafine. *Macromolecules*. 2017. 50. P. 5627–5642.
6. Mozdzen, L.C., Rodgers, R., Banks, J.M., Bailey, R.C., Harley, B.A.C. Increasing the strength and bioactivity of collagen scaffolds using customizable arrays of 3D-printed polymer fibers. *Acta Biomater*. 2016. 33. P. 25–33.
7. Kashytskyi, V., Sadova, O., Liushuk, O., Davydiuk, O., Myskovets, S. Examining a mechanism of generating the fragments of protective film in the tribological system “epoxycomposite–steel.” *Eastern-European J. Enterp. Technol*. 2017. 2. P. 10–16.
8. Stukhlyak, P.D., Holotenko, O.S., Dobrotvor, I.H., Mytnyk, M.M. Investigation of the Adhesive Strength and Residual Stresses in Epoxy Composites Modified by Microwave Electromagnetic Treatment. *Mater. Sci*. 2015. 51. P. 208–212.
9. Jamshidi, R., Heidarpour, A., Aghamohammadi, H., Eslami-Farsani, R. Improvement in the mechanical and tribological behavior of epoxy matrix with the inclusion of synthesized Ti 3 AlC 10 MAX particles. *J. Compos. Mater*. 2019. 53. P. 3819–3827.
10. Şahin, Y., De Baets, P. Friction and Wear Behavior of Carbon Fabric-Reinforced Epoxy Composites. *JOM*. 2017. 69. P. 2443–2447.
11. Buketov A.V., Brailo M.V., Sapronov O.O., Kruglyj D.G., Appazov E.S., Dulebova L., Klevtsov K.M. Nanofilled Antifriction Polymeric Composite Materials for Parts of Friction Units of Sea and River Transport. *Journal of nano- and electronic physics*. 2020. Vol. 12. No. 5. P. 05025-1–05025-6.
12. Yakushchenko S.V., Brailo M.V., Buketov A.V., Sapronov O.O., Popovych V., Dulebova L. Investigation of the properties and structure of epoxy–polyester composites with two-component bidispersed filler. *Composites: Mechanics, Computations, Applications, An International Journal*. 2022. 13(1). P. 81–95.

Yakushchenko Serhii, PhD, Associate Professor, Kherson State Maritime Academy, ORCID: 0000-0002-1724-8171

Brailo Mykola, PhD., Associate Professor, Kherson State Maritime Academy, ORCID: 0000-0001-8167-9999

Zinchenko Serhii, PhD., Associate Professor, Kherson State Maritime Academy, ORCID: 0000-0001-5012-5029

Sapronova Anna, PhD, Junior Researcher, Kherson State Maritime Academy, ORCID: 0000-0002-4327-4293

Klementiev Igor, Graduate of the Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, ORCID: 0000-0003-2994-7292

THE INCREASING OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF VEHICLE ELEMENTS BY THE USE OF FILLED EPOXY COMPOSITES

The increasing the operational characteristics of vehicle elements by using filled epoxy-polyester composite materials was investigated. The composite the ED–20 epoxy diene oligomer ($q = 100$ wt. %), orthophthalic dicyclopentadiene unsaturated preaccelerated polyester resin ENYDYNE H 68372 TAE – $q = 10$ wt. % (per 100 weight parts of epoxy resin), polyethylenepolyamine (PEPA) hardener ($q = 10$ wt. %), Butanox-M50 initiator for

polyester resins – ($q = 1.5$ wt. %) were used to form the polymer matrix. Methylene diphenyl diisocyanate ($q = 0.25$ wt. %) was used as a modifier. Hexagonal boron nitride (h-BN) – $8-10 \mu\text{m}$ – ($q = 60$ wt. %) and mica $20-40 \mu\text{m}$ ($q = 20$ wt. %) were used as fillers. A study of tribological properties under conditions of dry friction, lubricating medium was carried out using a friction machine 2070 SMT-1 according to the “disk-pad” scheme in accordance with ASTM G77-17. Test conditions of the developed materials: specific load $p = 1$ MPa, sliding speed $u = 1,0$ m/s, the sliding distance is $10,000$ m. The temperature in the contact zone was determined using a chromel-drop thermocouple, the signal from which was recorded by measuring equipment. It has been established that the content of fillers in the epoxy-polyester matrix has a positive effect on the tribological properties of the composite. In an experimental study, it was analyzed that the tribological properties of the composite during dry friction in terms of the content of mica and h-BN are improved compared to the epoxy matrix. During the operation of the composite in the conditions of the lubricating medium, the coefficient of friction is – $f = 0.05...0.06$, the run-in distance – $l = 3500...4000$ m, the wear rate – $l_m = 0.27...0.30$ mg/km, the contact temperature in the friction area $T = 308...310$ K. In addition, the friction surface after testing the composite material was studied and the feasibility of using the developed material in the friction nodes of mechanisms that work when lubricated with oil was proved.

Keywords: epoxy-polyester composite, tribological properties, antifriction material, coefficient of friction, wear rate

Стаття надійшла до редакції 22.04.2022 р.