

Вплив синтетичних дискретних волокон на властивості епоксидних композитів для захисних покриттів

А.В. Букетов, Д.О. Зінченко*, О.В. Шарко

Херсонська державна морська академія, проспект Ушакова, 20, 73000 Херсон, Україна

(Одержано 05.01.2017, опубліковано online 28.04.2017)

У роботі представлені результати дослідження впливу синтетичних дискретних волокон на фізико-механічні та трибологічні властивості епоксидних композитів. Аналіз кривих залежності робочої температури та коефіцієнту тертя епоксидних композитів від вмісту волокон та пройденого шляху тертя дозволив встановити оптимальні масові співвідношення наповнювачів у матеріалі з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Для формування матриці з поліпшеними фізико-механічними та трибологічними властивостями оптимальний вміст скляних та поліакрилонітрилових волокон становить $-q = 0,02$ мас. ч.

Ключові слова: Епоксидний композит, Скляні волокна, Поліакрилонітрилові волокна, Коефіцієнт тертя, Трибологічні властивості, Інтенсивність зношення, Модуль пружності при згинанні, Руйнівні напруження при згинанні.

DOI: [10.21272/jnep.9\(2\).02014](https://doi.org/10.21272/jnep.9(2).02014)

PACS numbers: 81.05.Zx, 81.70. - q, 62.20.Qp, 46.55. + d

1. ВСТУП

Враховуючи умови експлуатації (агресивні середовища, знакозмінні температури, динамічні навантаження та ін.) сучасного технологічного устаткування, виникає необхідність застосування захисних покриттів різного функціонального призначення. У цьому плані перспективним є застосування композитів на основі епоксидного зв'язувача. Поліпшені властивості епоксидних композитів дають можливість використовувати їх у вигляді покриттів. Відомо [1-3], що застосування таких матеріалів у різних сферах промисловості зумовлено широким спектром фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Водночас, враховуючи те, що до композитних матеріалів (КМ) висувають підвищені вимоги, виникає потреба поліпшення їх експлуатаційних характеристик в тому числі і трибологічних.

Основними напрямками підвищення ресурсу роботи вузлів тертя є створення нових триботехнічних полімерних матеріалів і забезпечення умов, що сприяють реалізації явища фрикційного перенесення та плівкоутворення при терті [4, 5].

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Як основний компонент для зв'язувача при формуванні КМ вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20. Для зшивання епоксидних композицій використано твердник поліетилеполіамін ПЕПА.

Як наповнювач використано скляні волокна (СВ) і поліакрилонітрилові волокна (ПВ) дискретністю $d = 9...11$ мкм, $l = 0,5...2,0$ мм.

Епоксидний композит, наповнений частками дискретних наповнювачів, формували за такою технологією: попереднє дозування епоксидної діанової смоли ЕД-20, підігрівання смоли до температури $T = 353 \pm 2$ К і її витримка при даній температурі впродовж часу $\tau = 20 \pm 0,1$ хв; дозування дисперсного наповнювача та

подальше введення його у епоксидний зв'язувач; гідродинамічне суміщення олігомеру ЕД-20 і дисперсного наповнювача впродовж часу $\tau = 1 \pm 0,1$ хв; ультразвукова обробка (УЗО) композиції впродовж часу $\tau_3 = 1,5 \pm 0,1$ хв; охолодження композиції до кімнатної температури впродовж часу $\tau = 60 \pm 5$ хв; введення твердника ПЕПА і перемішування композиції впродовж часу $\tau = 5 \pm 0,1$ хв. Надалі затверджували КМ за експериментально встановленим режимом: формування зразків та їх витримання впродовж часу $\tau = 12,0 \pm 0,1$ год за температури $T = 293 \pm 2$ К, нагрівання зі швидкістю $v = 3$ К/хв до температури $T = 393 \pm 2$ К, витримання КМ впродовж часу $\tau = 2,0 \pm 0,05$ год, повільне охолодження до температури $T = 293 \pm 2$ К. З метою стабілізації структурних процесів у матриці зразки витримували впродовж часу $\tau = 24$ год на повітрі за температури $T = 293 \pm 2$ К з наступним проведенням експериментальних випробувань.

У роботі досліджували наступні властивості КМ: руйнівні напруження при згинанні, модуль пружності при згинанні, коефіцієнт тертя.

Відхилення значень при дослідженнях показників фізико-механічних властивостей КМ становило 4...6 % від номінального.

Досліджували трибологічні властивості матеріалів на випробувальній машині серійного виробництва 2070 СМТ-1 за схемою «вал – сегмент втулки» Розрахунки параметрів тертя проводили відповідно до праці [7].

Масу зразків визначали ваговим методом на аналітичних вагах з точністю $\pm 0,0001$ г.

Дослідження структури матеріалів проводили на металографічному мікроскопі моделі ХJL-17АТ, який обладнаний камерою Levenhuk C310 NG (3,2 Mega Pixels). Діапазон збільшення зображення змінювали в межах від $\times 100$ до $\times 1600$ разів. Безпосередньо у роботі зразки досліджували при збільшенні у $\times 400$ разів. Для обробки цифрових зображень використовували програмне забезпечення «Levenhuk TourView».

* denim102@bk.ru

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Дослідження фізико-механічних та трибологічних властивостей епоксидних композитів, наповнених дискретними синтетичними волокнами

На першому етапі досліджували фізико-механічні властивості КМ на основі епоксидного олігомеру ЕД-20, зшитого твердником ПЕПА, і наповнених синтетичними скляними та поліакрилонітриловими волокнами (СВ та ПВ відповідно). Температура формування КМ – $T = 493 \pm K$. Результати дослідження фізико-механічних властивостей наведено у табл. 1.

Встановлено, що введення у епоксидний олігомер дискретних волокон СВ у кількості $q = 0,01...0,02$ мас.ч. та ПВ у кількості $q = 0,01...0,25$ мас.ч. приводить до збільшення показників руйнівних напружень КМ від $\sigma_{zg} = 48,0$ МПа

(для епоксидної матриці) до $\sigma_{zg} = 48,9...49,9$ МПа та $\sigma_{zg} = 49,1...68,0$ МПа відповідно. Такі результати можна пояснити хімічною взаємодією на межі поділу фаз «дискретне волокно – матриця». Крім того, слід врахувати й фізичну взаємодію, яка виникає завдяки зчепленню мікронерівностей поверхні волокна з матрицею. Під час наповнення зв'язувача волокнами можливе виникнення фізичних зв'язків також за рахунок змочування і сил поверхневого натягу при просочуванні поверхні волокон рідкою фазою зв'язувача. Збільшення вмісту волокон до $q = 0,05...0,25$ мас.ч. призводить до зменшення руйнівних напружень КМ за рахунок механічної несумісності компонентів. Остання, у свою чергу, залежить від різниці коефіцієнтів Пуассона та модуля пружності компонентів гетерогенних систем. Після формування КМ це призводить до виникнення залишкових напружень на межі поділу фаз, що спричиняє передчасне руйнування матеріалів в умовах впливу статичних навантажень.

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості епоксидних КМ, наповнених СВ та ПВ

Вміст наповнювача, q , мас.ч.	Модуль пружності при згинанні, E , ГПа	Руйнівні напруження при згинанні, σ_{zg} , МПа
матриця	2,9	48,0
КМ, наповнені СВ		
0,01	3,9	48,9
0,02	3,9	49,9
0,05	4,0	45,7
0,10	4,1	43,1
0,25	4,3	39,2
КМ, наповнені ПВ		
0,01	3,7	66,2
0,02	3,8	68,0
0,05	4,0	52,3
0,10	4,2	50,1
0,25	4,4	49,1

Крім того, доведено (табл. 1), що збільшення вмісту синтетичних волокон призводить до монотонного збільшення показників модуля пружності КМ від $E = 2,9$ ГПа (для епоксидної матриці) до $E = 3,9...4,3$ ГПа (для КМ з СВ) та до $E = 3,8...4,3$ ГПа (для КМ з ПВ). Тобто, при збільшенні вмісту СВ та ПВ у КМ утворюються адгезійні зв'язки між поверхнею волокна та олігомером, що частково нівелює механізм пластичної деформації вихідної матриці. У такому випадку показники фізико-механічних властивостей КМ наближуються до аналогічних показників наповнювачів (СВ та ПВ). Максимальне значення модуля пружності при згинанні КМ ($E = 4,3$ ГПа та $E = 4,4$ ГПа) встановлено при введенні у зв'язувач волокон СВ та ПВ відповідно у кількості $q = 0,25$ мас.ч.

Комплексна оцінка фізико-механічних властивостей дозволяє стверджувати, що КМ, наповнені СВ та ПВ у кількості $q = 0,02$ мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20, характеризуються поліпшеними властивостями, а саме: $\sigma_{zg} = 49,9$ МПа, $E = 3,9$ ГПа та $\sigma_{zg} = 68,0$ МПа, $E = 3,8$ ГПа відповідно.

3.2 Трибологічні властивості розроблених КМ

На наступному етапі досліджували трибологічні

властивості розроблених КМ. Зокрема, випробовували такі композити:

– матриця (матрицю формували за наступного співвідношення компонентів – епоксидний олігомер ЕД-20 : твердник ПЕПА – 100 : 10);

– КМ 1 (композит формували за наступного співвідношення компонентів – ЕД-20 : ПЕПА : СВ – 100 : 10 : 0,02);

– КМ 2 (композит формували за наступного співвідношення компонентів ЕД-20 : ПЕПА : ПВ – 100 : 10 : 0,02);

Результати трибологічних досліджень наведено на рис. 1. і у табл. 2.

На основі отриманих експериментальних даних доведено (рис. 1, б, в), що за швидкості ковзання $v = 0,5$ м/с матеріали КМ 1 і КМ 2, сформовані на основі епоксидного зв'язувача з добавками СВ і ПВ, мають коефіцієнт тертя нижчий ($f = 0,26$ та $f = 0,22$ відповідно), порівняно з вхідною матрицею ($f = 0,37$) (рис. 1, а). Це зумовлено тим, що КМ 1 і КМ 2 відзначаються вищими, порівняно з матрицею, показниками фізико-механічних властивостей (табл. 1). Найменший коефіцієнт тертя ($f = 0,22$), температура у області тертя ($T = 325...327$ К) та найбільший шлях

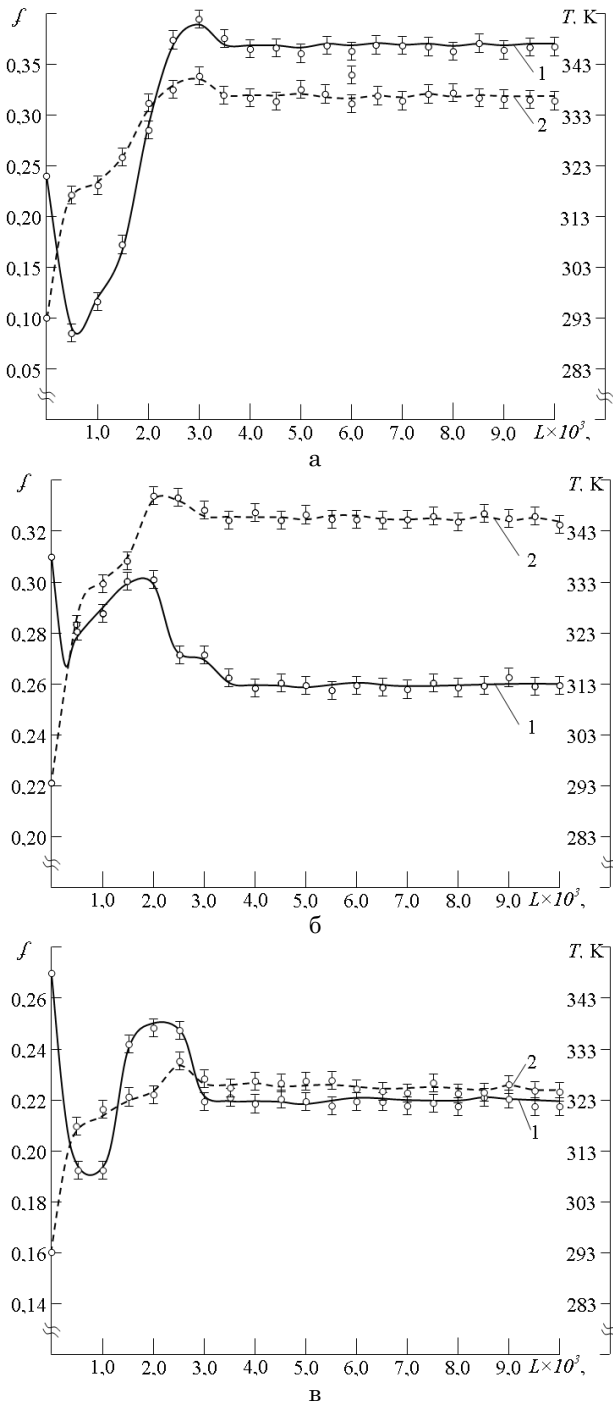


Рис. 1 – Залежність коефіцієнту тертя і температури у області тертя від шляху випробування матеріалів при швидкості $v = 0,5$ м/с: 1 – коефіцієнт тертя (f); 2 – температура у області тертя (T); а) матриця; б) КМ 1; в) КМ 2

припрацювання ($l = 2750 \dots 3000$ м) встановлено для композиту, наповненого поліакрилонітриловими волокнами. Це пов'язано із здатністю поліакрилонітрилу своєчасно відводити теплову енергію при терті через підвищену теплопровідність наповнювача порівняно з матрицею, що приводить до поліпшення перебігу процесу припрацювання. Внаслідок цього зменшуються показники моменту, коефіцієнту тертя, робочої температури. Водночас збільшуються показники шляху припрацювання, а, відповідно, зменшу-

ється інтенсивність зносу матеріалів (табл. 2). Очевидно, що підвищені значення шляху припрацювання свідчать про стійкість даного матеріалу до пружних деформацій.

Таблиця 2 – Трибологічні властивості матеріалів

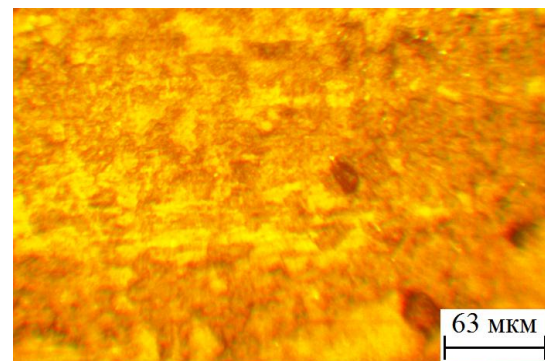
Параметри	Матеріал		
	Матриця	КМ 1	КМ 2
Момент тертя, M , Н × м	1,8...2,0	1,3...1,6	1,1...1,3
Коефіцієнт тертя, f	0,36...0,38	0,26...0,27	0,22...0,24
Температура, T , К	335...337	345...347	325...327
Шлях припрацювання, l , м	2500...3500	2500...3500	2750...3000
Масова інтенсивність зношення, I_m , мг/км	2,0...2,2	1,8...2,1	1,6...2,0

Необхідно зазначити, що після припрацювання стабілізується температура тертя матеріалів. Встановлено (рис. 1), що температура зразків з КМ 1 вища, порівняно із температурою матриці та КМ 2 на $\Delta T = 10$ К. Це пов'язано з підвищеними теплоізоляційними характеристиками СВ, за рахунок невеликої щільності і вмісту серед волокон повітря, якому притаманна здатність до теплоізоляції.

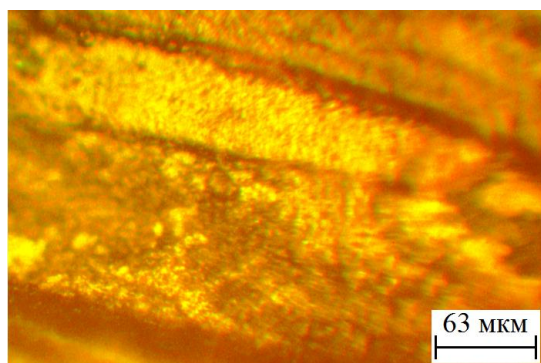
Для підтвердження отриманих результатів додатково досліджували поверхню контакту матеріалів після тертя за допомогою методу оптичної мікроскопії при збільшенні у $\times 250$ та $\times 400$ разів. При аналізі поверхні контакту зразка з матриці (рис. 2, а, б) відмічено наявність включень мікрочасток контртіла, які утворюються під час припрацювання матеріалу.

Це підтверджує наведене вище припущення про те, що матриця має підвищену міцність, внаслідок чого у процесі тертя відбувається дряпання матеріалу контртіла. У результаті зрізані мікрочастки переносяться у область тертя, що призводить до підвищення інтенсивності зносу, збільшення коефіцієнту тертя. Окрім того, на рис. 2, а помітні утворені в процесі дослідження лінії тертя у поверхневому шарі матриці, що зумовлено частковим його руйнуванням. Це унеможливило використання даного матеріалу у парах тертя.

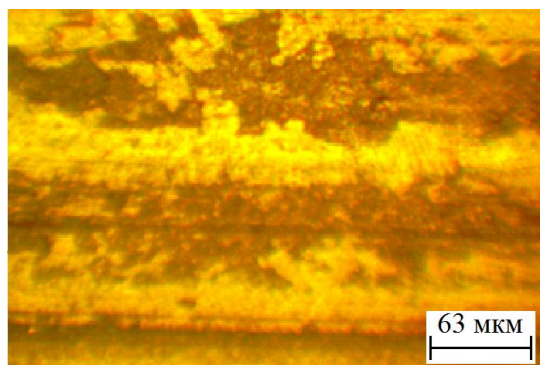
Аналіз світлин поверхні зразків КМ 1, наповнених СВ (рис. 2, б), дозволяє констатувати про наявність включень часток контр тіла у області тертя.



а



б



в

Рис. 2 – Мікроструктура поверхні у області контакту після фрикційного випробування матеріалів: а) матриця 1; б) КМ 1; в) КМ 2

Аналіз світлин поверхні зразків КМ 2, наповнених ПВ (рис. 2, в), дозволяє констатувати, що за швидкості ковзання $v = 0,5$ м/с також помітні поодинокі включення часток контргіла, однак за рахунку підвищеної теплопровідності даного матеріалу їх кількість незначна. В результаті припрацювання формується рівномірна поверхня контакту без помітних задирів і з яскраво вираженими включеннями дискретних волокон.

Влияние синтетических дискретных волокон на свойства эпоксидных композитов для защитных покрытий

А.В. Букетов, Д.А. Зинченко, А.В. Шарко

Херсонская государственная морская академия, проспект Ушакова, 20, 73000 Херсон, Украина

В работе представлены результаты исследования влияния синтетических дискретных волокон на физико-механические и трибологические свойства эпоксидных композитов. Анализ кривых зависимости температуры и коэффициента трения эпоксидных композитов от содержания волокон и пройденного пути трения позволил установить оптимальные массовые соотношения наполнителей в материале с повышенными эксплуатационными характеристиками. Для формирования матрицы с улучшенными физико-механическими и трибологическими свойствами оптимальное содержание стеклянных и полиакрилонитриловых волокон составляет – $q = 0,02$ мас.ч.

Ключевые слова: Эпоксидный композит, Стеклянные волокна, Полиакрилонитриловые волокна, Коэффициент трения, Трибологические свойства, Интенсивность износа, Модуль упругости при изгибе, Разрушающие напряжения при изгибе.

Отже, результати дослідження поверхні зразків у області тертя методом оптичної мікроскопії підтверджують наведені вище теоретичні положення і експериментальні випробування, що передбачає надалі при розробці КМ з поліпшеними трибологічними властивостями необхідність використання матеріалів КМ 1 і КМ 2.

4. ВИСНОВКИ

Доведено, що для формування композитів з поліпшеними фізико-механічними властивостями необхідно у епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.) вводити наповнювач у вигляді синтетичних дискретних скляних або поліакрилонітрилових волокон у кількості $q = 0,02$ мас.ч. У такому випадку порівняно з вихідною епоксидною матрицею ($\sigma_{32} = 48,0$ МПа, $E = 2,9$ ГПа) формуються матеріали з наступними властивостями: руйнівні напруження при згинанні $\sigma_{32} = 49,9$ МПа, модуль пружності при згинанні $E = 3,9$ ГПа (для композиту, наповненого скляними волокнами) і $\sigma_{32} = 68,0$ МПа та $E = 3,8$ ГПа (для композиту, наповненого поліакрилонітриловими волокнами).

Встановлено, що для формування матеріалів з поліпшеними трибологічними властивостями у епоксидний зв'язувач (ЕД-20 ($q = 100$ мас.ч.), твердник ПЕПА ($q = 10$ мас.ч.)) необхідно вводити дискретні поліакрилонітрилові волокна у кількості $q = 0,02$ мас.ч.

Формування такого композиту забезпечує поліпшення наступних показників трибологічних характеристик, порівняно з матрицею: коефіцієнт тертя зменшується від $f = 0,36 \dots 0,38$ до $f = 0,22 \dots 0,24$, температура зменшується від $T = 335 \dots 337$ К до $T = 325 \dots 327$ К, масова інтенсивність зношування зменшується від $I_m = 2,0 \dots 2,2$ мг/км до $I_m = 1,6 \dots 2,0$ мг/км, а шлях припрацювання змінюється в межах від $l = 2500 \dots 3500$ м до $l = 2750 \dots 3000$ м.

Effect of Synthetic Discrete Fibers on the Properties of Epoxy Composites for Protective Means of Transportation Coatings

A.V. Buketov, D.A. Zinchenko, A.V. Sharco

Kherson State Maritime Academy, Prospect Ushakova, 20, 73000 Kherson, Ukraine

The results of studies of the effect of synthetic discontinuous fibers on physico-mechanical and tribological properties of epoxy composites. Analysis of the dependence of the temperature and the coefficient of friction of epoxy composites by fiber content and traveled friction way possible to establish optimum mass ratio of fillers in a material with high performance. In order to form a matrix with improved physical-mechanical and tribological properties of optimum content of the glass and polyacrylonitrile fibers is – $q = 0,02$ wt.%.

Keywords: Epoxy composite, Glass fibers, Polyacrylonitrile fibers, Coefficient of friction, Tribological properties, Wear intensity, Flexural modulus, Failure stress in bending.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A. Buketov, P. Maruschak, O. Saprionov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, S Panin, *Transport*. **31** No 3, 333 (2016).
2. А.В. Букетов, А.А. Сапронов, Д.А. Зинченко, В.Н. Яцюк, *Механика композиционных материалов и конструкций*. **21** №4, 534 (2015) (A.V. Buketov, A.A. Saprionov, D.A. Zinchenko, V.N. Jacyuk, *Mehanika kompozicionnyh materialov i konstrukcij*. **21** №4, 534 (2015)).
3. A. Buketov, O. Saprionov, H. Savina, D. Zinchenko, *Abstract Book of participants of the International Summer School and International research and practice conference*, 40 (2015).
4. M. Brailo, A. Buketov, D. Zinchenko, V. Nigalatiy, *Theses of International scientific conference «Possibilities of scientific and educational cooperation between universities of Ukraine and Poland»*, 22 (2015).
5. A. Buketov, O. Saprionov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, *Visnyk of Kherson National Technical University* **No 4(55)**, 192 (2015).
6. O. Saprionov, A. Buketov, D. Zinchenko, V. Yatsyuk, *Composites: Mechanics, Computations, Applications. An International Journal* **1(8)**, (2017).
7. A. Buketov, A. Akimov, D. Zinchenko, C. Smetankin, *Materials of the International scientific conference «Modern problems of mathematics, mechanics and informatics» dedicated to the 25 anniversary of Independence of the Republic of Kazakhstan*, 79 (2016).
8. A. Buketov, P. Maruschak, O. Saprionov, M. Brailo, O. Leshchenko, L. Bencheikh, A. Menou, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **628**, 167 (2016).