

АНТИФРИКЦІЙНІ ТА ФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 621.763:667.637.22

¹П. П. Савчук, канд. техн. наук, доц.,
²А. Г. Косторнов, д-р техн. наук, академік НАНУ

ЗАКОНОМІРНОСТІ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТИВ З РІЗНИМ СТУПЕНЕМ НАПОВНЕННЯ

¹Луцький національний технічний університет, icenter@bsc.lutsk.ua

²Інститут проблем матеріалознавства НАН України

Проаналізовано триботехнічні характеристики епоксидних композиційних матеріалів з різним ступенем дисперсного наповнення. Показано оптимальні режими функціонування створених трибосистем. Обґрунтовано шляхи досягнення необхідних характеристик та забезпечення стабільності роботи вузлів тертя на основі епоксидних композитів.

Вступ і постановка проблеми. Проблема підвищення надійності та довговічності роботи триботехнічних вузлів машин і обладнання, які працюють в умовах значних динамічних навантажень, абразивного й гідроабразивного зношування, корозії, перепадів температур, набуває дедалі більшого значення для економії металів, енергоресурсів, ефективного використання сировини та техніки [1; 2]. Основними шляхами підвищення ресурсу роботи вузлів тертя є створення нових триботехнічних матеріалів і забезпечення умов, що сприяють реалізації явища фрикційного перенесення та плівкоутворення при терті [3].

Аналіз досліджень в галузі трибоматеріалознавства показує, що перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є направлення регулювання експлуатаційних властивостей композиційних матеріалів науково-обґрунтованим введенням структурно-активних модифікаторів та наповнювачів. У цьому плані значний науковий інтерес становить застосування композиційних високонаповнених прес-матеріалів і покриттів на основі полімерів, зокрема епоксидних смол, що зумовлено комплексом їх функціональних та експлуатаційних характеристик.

На сьогодні епоксидні композиційні матеріали (ЕКМ) складають вагомий часткою в загальному об'ємі полімерних композитів

[2; 4; 5]. У світовій практиці вже набутий значний науковий і практичний досвід в напрямі створення композитів триботехнічного призначення на основі епоксидних в'язучих, які знайшли практичне застосування в різних галузях промисловості. Однак у відомих на даний час роботах недостатня увага приділяється процесам структурування і взаємодії компонентів у наповнених системах, явищу фрикційного перенесення і плівкоутворення, практично не досліджено вплив ступеня наповнення на трибологічні властивості ЕКМ.

Мета роботи – проаналізувати трибологічні властивості наповнених епоксидних композитів з різними концентраційними співвідношеннями.

Матеріали та методи досліджень. Як матеріал основи використали епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20, твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) та кремнійорганічні лаки-модифікатори. Як наповнювачі застосували базальтове та вуглецеве волокна, базальтову луску, а також порошки графіту, фторопласту та оксиду міді.

Кількісний вміст інгредієнтів розраховували у масових частинах на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20.

Дослідження макро- та мікроструктури епоксидних композитів проводили на оптичному мікроскопі МБС-9 при збільшенні ($\times 30$) та металографічному мікроскопі МИМ-10 ($\times 100 \dots 600$). Фрактограми зламу досліджували на сканувальному електронному мікроскопі SUPERPROBE 733 (JEOL, Японія) при прискорювальній напрузі 25 кВ через аналіз зображень після наплення золотом. Термостійкість композитів оцінювали методом диференціально-термічного аналізу на дериватографі Паулік-Паулік-Ердей.

Дослідження триботехнічних характеристик проводили на машинах тертя М-22П та СМЦ-2 за схемою «диск–сегмент втулки» в умовах сухого тертя. Контртіло виготовляли у формі диска зі сталі 45 (ГОСТ 1050-74) діаметром 50 мм з шорсткістю поверхні $R_a = 3,2$. Шлях тертя становив 2000 м. Масу зразків визначали з точністю 0,0001 г.

Результати досліджень та їх обговорення. У діапазоні можливого концентраційного співвідношення наповнених ЕКМ слід розрізняти три зони наповнення (мало-, середньо- та високонаповнені системи), що підтверджується морфологією стану такого роду композицій, результатами мікроструктурних, реологічних та фізи-

ко-механічних досліджень [5; 6]. В еквіваленті масових частинок (відносно 100 мас. ч. епоксидного в'язучого) це становить 0,5–12, 12–100, 100 і більше, а в об'ємному співвідношенні – відповідно 0,05–8 % (об.), 8–30 % (об.) та понад 30 % (об.) наповнювача.

Для кожної групи були виділені свої характерні особливості-домінанти, що відображаються на триботехнічних властивостях і довговічності роботи пар тертя. Так, для малонаповнених систем спостерігається відчутний вплив природи в'язучого (матеріалу матриці) на досліджувані характеристики. При цьому зазначено стабільно високі значення коефіцієнта тертя ($f = 0,2-0,36$) та інтенсивності зношування, що пов'язано із неспроможністю ЕКМ своєчасно відводити теплову енергію через недостатню теплопровідність такої системи. Застосування твердозмашувальних компонентів у композиції ефективно лише за низької потужності тертя ($Pv \leq 1$ МПа·м/с), кремнійорганічні модифікатори здатні лише частково продовжити ресурс роботи матеріалів цієї групи за рахунок збільшення термостійкості та втомної міцності. Матеріал не здатний самовідновлюватися, лише прагне зменшити теплове навантаження, інтенсивно руйнуючись на поверхні та у підповерхневих шарах. Підтвердженням цьому є результати дериватографічного аналізу та мікроструктурних досліджень фрактограм зламу. При цьому в підповерхневих шарах ЕКМ зазначені характерні мікро-руйнування та магістральні тріщини (рис. 1), – ініціатори швидкого та катастрофічного руйнування таких систем.

Експлуатація ЕКМ доцільна у зміні конструкції вузла тертя, формування багат шарових покриттів. Це забезпечує більш інтенсивне тепловідведення та підвищує навантажувальну здатність пари тертя [7; 8].

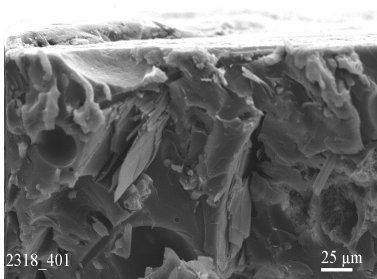


Рис. 1. Фрактограма зламу малонаповненого ЕКМ за оптимальних умов фрикційного контакту

Для середньо-наповнених систем особливої ваги набувають технологічні режими їх отримання, зокрема додаткова обробка енергетичними полями, а також відчутний вплив природи та кількості модифікувальних складових полімерного в'язучого.

Показано, що направлене введення в епоксиполімерну систему кремнійорганічних складових в оптимальних кількостях за додатковою термічною впливу дає змогу отримати ЕКМ з найвищою зносостійкістю ($I_g = 0,3-0,5$ мг/км при $P = 1,2$ МПа та $v = 1,5$ м/с) за рахунок оптимальної щільності структурної сітки та протікання процесів самоорганізації при навантаженні тертям.

Результати експериментальних досліджень впливу кількості кремнійорганічних лаків за різних температур тверднення на інтенсивність зношування при навантаженні $P = 1,2$ МПа та швидкості ковзання $v = 1,5$ м/с свідчать, що при кінцевій температурі 483 К інтенсивність зношування модифікованого епоксидного композиту нижча на 32,8 %, ніж за температури 513 К, що пояснюється початком процесів термоокислювальної деструкції та виникненням додаткових внутрішніх напружень в системі. При температурі 513 К відбувається руйнування епоксидної компоненти та відрив органічних радикалів від силоксанового скелета поліметилфенілсилоксану, що супроводжується зростанням інтенсивності зношування та зниженням вмісту гель-фракції у композиті.

Зі збільшенням ступеня наповнення понад 30 мас. ч. зростає вагомість впливу інгредієнтів наповнення на трибологічну систему, що охарактеризовано в роботах [9; 10].

Найактуальнішими параметрами варіювання триботехнічних характеристик високонаповнених систем є природа і властивості наповнювачів (зокрема, розмірність і характер розвиненості поверхні частинок), а також режими термічної обробки ЕКМ. При цьому важливе правильне поєднання інгредієнтів для досягнення необхідної зносостійкості та стабільності роботи трибосистеми. Так, формування системи на основі поєднання різнофункціональних наповнювачів (графіту, фторопласту, вуглецевого волокна) дає змогу отримати стійку, стабільну систему, в якій ці складові виконують твердозмашувальну, армувальну функції та функцію рідинного змащення на різних етапах трибологічної взаємодії [11]. Саме високонаповнені системи, де в'язуче виконує функцію граничного змащення, здатні в повній мірі реалізувати процеси самоорганіза-

ції, однак вони найбільш чутливі до технологічних та конструктивних змін. Експериментально доведено [11], що найвищі антифрикційні характеристики притаманні ЕКМ із ступенем наповнення понад 100 мас. ч. (30 – 40 об. %) при $Pv = 2,0 - 2,5$ МПа·м/с. При цьому для таких систем характерні дві зони оптимуму: перша відображає здатність фрикційних добавок ефективно виконувати закладену в них функцію, а друга – пов’язана із самоорганізувальними процесами, «запрограмованими» на етапі створення системи (попередня обробка інгредієнтів та композицій в цілому енергетичними полями тощо).

Приклади трибологічних характеристик типових ЕКМ з різним ступенем наповнення наведено у таблиці. При цьому для аналізу вибрано епоксикремнійорганічні композити, наповнені оксидом міді, лускатим графітом, фторопластом і вуглецевим волокном при оптимальному концентраційному співвідношенні, визначеному методом багатофакторного планування експерименту.

Отримані триботехнічні характеристики демонструють хорошу працездатність середньо- та високонаповнених ЕКМ в умовах тертя ковзання без змащування.

Таблиця

Триботехнічні характеристики ЕКМ при швидкості ковзання $v = 1$ м/с та навантаженні 1 МПа / 2 МПа

Тип системи	Коефіцієнт тертя	Лінійний знос пари тертя, I_h (мкм/км)	Ваговий знос, I_g (мг/км)	
			зразок	контртіло
Малонаповнена (10 мас. ч.)	<u>0,32</u>	<u>10,2</u>	<u>0,51</u>	<u>0,34</u>
	0,36	10,9	0,82	0,39
Середньонаповнена (50 мас. ч.)	<u>0,24</u>	<u>6,1</u>	<u>0,30</u>	<u>0,12</u>
	0,30	6,6	0,37	0,16
Висконаповнена (100 мас. ч.)	<u>0,15</u>	<u>5,9</u>	<u>0,42</u>	<u>0,14</u>
	0,22	6,9	0,46	0,18

Слід також зазначити, що за оптимальних умов фрикційного навантаження на поверхні контртіла в процесі тертя середньо- та високонаповнених ЕКМ утворюється самоорганізована плівка перенесення, що стабілізує фрикційні параметри (рис. 2). За структурою вона являє собою окремі конгломерати, об’єднані в стійкі угруповання з яскраво вираженою орієнтацією в напрямку тертя. Вона утворюється

за рахунок комплексу основних причин: дифундування твердих мас-тил до поверхні металу, здійснення розплавленими полімерами функ-ції граничного змащення, спрацювання ефекту «запам'ятовування та пристосування» до попередніх граничних температур на стадії фор-мування композицій.

В цілому ЕКМ працездатні в умовах сухого тертя при значенні критерію $Pv \leq 3$ МПа·м/с. З них можливе виготовлення як багат шарових покриттів, так і монолітних матеріалів для вузлів тертя ковзання.

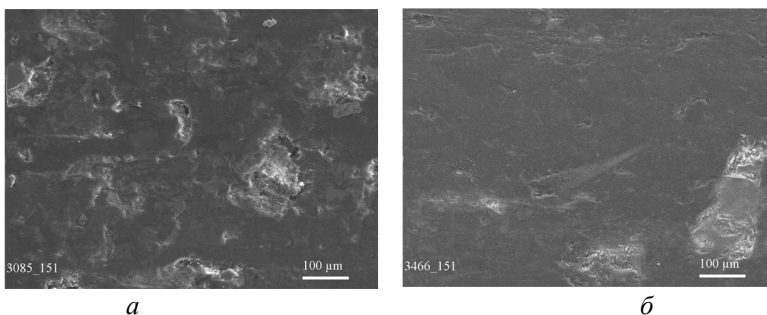


Рис. 2. Структура утвореної плівки перенесення середньо-наповнених (а) і високонаповнених (б) ЕКМ за оптимальних умов фрикційного контакту

Висновки. У результаті проведених досліджень слід зазначити таке:

1. За результатами досліджень та проведеного аналізу класифіковано ЕКМ на мало-, середньо- та високонаповнені системи. Для кожної групи виділено характерні особливості-домінанти, що відображаються на їх структурі та трибологічних властивостях. Виявлено кореляцію між величиною наповнення системи, природою компонентів та отриманими триботехнічними характеристиками.

2. Проаналізовано методи регулювання триботехнічних характеристик ЕКМ варіюванням інгредієнтів системи (якісна та кількісна складові), а також при застосуванні термічного і фізичного модифікування, показані основні варіанти управління процесами структуризації розроблених епоксидних композитів.

3. Встановлено, що розроблені ЕКМ працездатні в умовах сухого тертя при значенні критерію $Pv \leq 3$ МПа·м/с. За оптимальних умов фрикційного навантаження середньо- та високонаповнених

ЕКМ на поверхні контртіла утворюється самоорганізована плівка перенесення, яка підвищує довговічність роботи трибовузлів.

Список літератури

1. *Богданович П.Н., Прушак В.Я.* Трение и износ в машинах. – Минск: Вища шк. 1999. – 374 с.

2. *Стухляк П.Д.* Эпоксидные композиты для защитных покрытий. – Тернополь: Збруч, 1994. – 177 с.

3. *Белый В.А.* Проблема создания композиционных материалов и управление их фрикционными свойствами // Трение и износ. – 1982. – Т. 3. – № 3. – С. 389–395.

4. *Козак Н.В., Косянчук Л.Ф., Низельский Ю.Н., Горбатенко А.Н.* Теплофизические характеристики эпоксидиановых и полиизоцианатных композиций как возможных связующих для фрикционных материалов // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, – № 5. – С. 678–682.

5. *Косторнов А.Г., Савчук П.П.* Трибологические свойства эпоксикремнийорганических композитов // HighMatTech. Матеріали міжнародної конференції (12 – 16 жовтня 2007 р., м. Київ). – К.: ИПМ. – С. 368.

6. *Савчук П.П.* Методи оцінки структури модифікованих епоксидних композитів // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – Т. 13. – № 3. – С. 71–77.

7. Пат. 34752 Україна, МПК⁶ C08K3/00, C09D163/00, C23C14/00. Спосіб одержання двошарового епоксидного композиційного покриття / П.П.Савчук, А.Г. Косторнов, В.П.Кашицький; заявник і патентовласник Луцьк. держ. техн. ун-т. – № u200802352 ; заявл. 25.02.08; опубл. 26.08.08, Бюл. № 16.

8. *Кашицький В.П.* Розробка захисних покриттів з підвищеною зносостійкістю на основі епоксидних композитів, модифікованих кремнійорганічним лаком КО-921: Автореф. дис... к-та техн. наук: 05.02.01 – Луцьк: ЛДТУ, 2006. – 20 с.

9. *Савчук П.П., Косторнов А.Г.* Трибологічні властивості модифікованих базальтонаповнених композитів на основі епоксидних смол // Проблеми трибології. – 2008. – № 3 (49). – С. 11–14.

10. *Савчук П.П., Косторнов А.Г.* Особливості впливу процесів модифікації на триботехнічні характеристики епоксидних композиційних матеріалів // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ. – Вип. 48. – С. 135–148.

11. *Савчук П.П.* Розробка композиційних антифрикційних матеріалів на основі епоксидних смол, неорганічних і органічних наповнювачів для динамічно навантажених вузлів тертя: Автореф. дис.... к-та техн. наук: 05.02.01. – Тернопіль: ТДПУ, 1999. – 18 с.

Стаття надійшла до редакції 04.04.09.