

<sup>1</sup>П. П. Савчук, канд. техн. наук, доц.,  
<sup>1</sup>В. П. Кашицький, канд. техн. наук, доц.,  
<sup>1</sup>О. П. Киселюк, асп.,  
<sup>2</sup>І. С. Сміян, асп.

## ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕПОКСИКОМПОЗИТНИХ ДВОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, [icenter@bsc.lutsk.ua](mailto:icenter@bsc.lutsk.ua),  
<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, [ptznau@ukr.net](mailto:ptznau@ukr.net)

*Проаналізовано триботехнічні характеристики епоксидних композиційних покриттів, що містять адгезійний і робочий зносостійкий шари. Показано оптимальні режими функціонування створеної трибосистеми. Обґрунтовано шляхи досягнення необхідних характеристик та забезпечення стабільності роботи захисних покриттів на основі епоксидних композитів.*

**Вступ та постановка проблеми.** Підвищення зносостійкості робочих поверхонь технологічного устаткування є важливою проблемою сучасного трибоматеріалознавства. Особливо гостро вона постає під час експлуатації технічних систем в умовах впливу корозійно-активних гідро- та газових середовищ [1]. Одним зі шляхів її розв'язання є формування на поверхні субстрату двошарових покриттів, де нижній шар забезпечує максимальну адгезію, а верхній – витримує необхідні робочі навантаження. При цьому важливими є спільна материнська природа полімерної основи, а також фактор мультинаповнення, коли інгредієнти наповнення виконують різні функції, в цілому підсилюючи систему [2; 3].

Значний науковий інтерес становить застосування композиційних покриттів на основі полімерів, зокрема епоксидних смол, що обумовлено комплексом їх функціональних та експлуатаційних характеристик [4; 5]. Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є спрямоване регулювання експлуатаційних властивостей композиційних матеріалів науково-обґрунтованим уведенням структурно-активних модифікаторів та наповнювачів (структурна модифікація), а також додаткова активізація процесів фізико-хімічної взаємодії між структурними

елементами композиційної системи шляхом застосування зовнішніх енергетичних полів (фізична модифікація).

**Мета роботи** – проаналізувати трибологічні властивості двошарових епоксидних композиційних покриттів з різними концентраційними співвідношеннями компонентів.

**Матеріали та методи досліджень.** Як матеріал основи використали епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20, твердник поліетиленполіамін (ПЕПА) та кремнієорганічні лаки-модифікатори. Як наповнювачі застосували вуглецеве волокно (ВВ), а також порошки базальту, лускатого графіту (ЛГ), високодисперсного фторопласту (ВДФ) та оксиду міді.

Кількісний вміст інгредієнтів розраховували у масових частках (на 100 масових часток епоксидної смоли ЕД-20). Композиції формували методом гідродинамічного суміщення компонентів з наступною обробкою енергетичними полями. При цьому використовували установки для оброблення епоксикомпозитів на стадії формування ультразвуком та ультрафіолетовим опроміненням.

Композиції наносили методом пневматичного розпилення за допомогою установки високого тиску (7000 Н) для безповітряного формування покриттів.

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) за прискорювальної напруги 25 кВ. Термостійкість композитів оцінювали методом диференціально-термічного аналізу на дериватографі Паулік-Паулік-Ердей.

Фізико-механічні характеристики ЕКП оцінювали за стандартними методиками.

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. Аналіз топографії поверхонь трибоконтакту здійснювали на сканувальному електронному мікроскопі

SUPERPROBE 733 та модульному комплексі Dimic 1000, що являє собою оптичну 3D-систему контролю [6].

**Результати досліджень та їх обговорення.** Вивчення поведінки ЕКМ-систем в умовах прецизійного багатофакторного впливу є важливим для оцінювання їх ресурсних можливостей, прогнозування довговічності функціонування та стабільності задекларованих характеристик. Лише системи, що здатні ефективно реагувати на прикладений фізичний та механічний впливи шляхом мобілізації внутрішніх резервів, структурної переорієнтації, можуть забезпечити кероване функціонування. Аналіз експлуатаційних характеристик ЕКМ-систем з різним ступенем наповнення ґрунтувався на оцінюванні їх триботехнічного потенціалу та здатності протидіяти динамічним навантаженням.

Мінімум на кривих зношування оптимізованих ЕКМ, термічно оброблених за температури 483 К, спостерігається у разі введення 30–35 масових часток кремнієорганічних лаків і пояснюється ефектом самоорганізованого формування плівки перенесення у вузлах тертя за оптимальних умов. Це породжує стабілізацію фрикційних характеристик ЕКМ для такого роду контакту і підтверджено результатами електронної мікроскопії. Оптимум зносостійкості зафіксований при застосуванні термічно обробленого модифікатора ТКОС за рахунок спрацювання ефекту «адаптації» до попереднього термічного впливу в зоні максимальних для епоксикремнієорганічної компоненти температур [8].

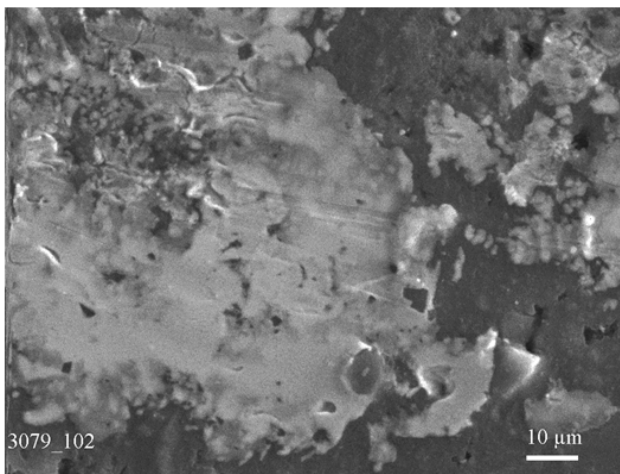
У випадку фрикційної взаємодії модифікованого ЕКМ матриця має вищу термостійкість і це сповільнює процеси термічної деструкції. Відповідно окиснення поверхні контргіла є незначним, забезпечується тривале існування ювенільної поверхні і зростає ймовірність формування фрагментів плівки перенесення як на поверхні металевого контргіла, так і на спряженій поверхні (див. рисунок).

Методом математичного планування експерименту (модель Бокса-Уілсона) оптимізовано трибологічні властивості ЕКМ-покриттів. Оцінено вплив як структурних компонентів, так і фізичних чинників на зносостійкість в умовах сухого тертя ковзання. Зокрема, підбирання порошкових і волокнистого, низько-

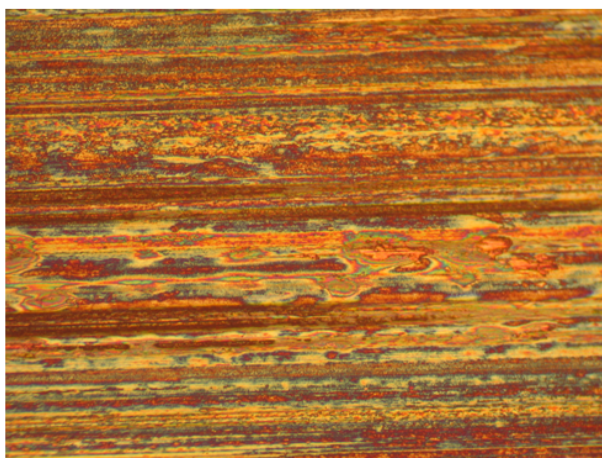
та високодисперсних інгредієнтів за чотирикомпонентного наповнення було досягнуто високої зносостійкості та отримано таку математичну модель:

$$Y = 8,5 - 1,33X_1 + 0,96X_2 - 3,83X_3 - 3,5X_4 + 0,98X_1X_3 + 1,46X_3X_4,$$

де  $X_1$  – ЛГ,  $X_2$  – CuO,  $X_3$  – ВДФ,  $X_4$  – ВВ (масових часток).



*a*



*б*

Структура плівки перенесення на поверхні ЕКП (*a*) та контртіла (*б*) при за оптимальних умов фрикційного контакту

Структурна модифікація та комплексна обробка композицій забезпечила підвищення зносостійкості в 1,6–1,8 разу. Методом ДТА зафіксовано підвищення термостійкості епоксикомпозитів, оскільки кремнієорганічні сполуки виконують функцію поверхневих бар'єрів, уповільнюючи процеси термоокиснювальної деструкції в системі. Для модифікованих композицій характерне існування додаткових екзотермічних піків, які зміщені в напрямі вищих температур на 12–22 °С (з 310 до 350°C), а втрати маси менші на 4–8%.

Установлено кореляцію між триботехнічними і фізико-механічними характеристиками досліджуваних систем, зокрема пропорційне зростання показників зносостійкості, границі міцності при стисканні в разі збільшення температури полімеризації до 483 К, а також їх підвищення у процесі комплексної обробки фізичними полями, що особливо відчутно за жорсткіших режимів фрикційного навантаження ( $P \geq 1$  МПа).

Розроблені епоксидні композиційні матеріали і технологію їх отримання захищено патентами України [7]. Порівняльна оцінка властивостей композиційних матеріалів показала переваги створених матеріалів порівняно з їх аналогами.

У результаті експлуатації розроблених матеріалів установлено, що їх використання особливо ефективно як захисних двошарових покриттів днища та надколісних ніш автомобільної техніки, зносо- і корозієстійких покриттів для захисту газотранспортного обладнання, а також для герметизації корпусних елементів витратомірів води.

### **Висновки.**

Уведення в полімерну матрицю модифікаторів та в композиційну систему інгредієнтів, які виконують армувальну функцію, дозволило отримати матеріали зі стабільними фізико-механічними характеристиками, а застосування функціональних домішок – досягнути відповідних триботехнічних характеристик на завершальному етапі їх створення.

У результаті комплексних досліджень нами запропоновано модифіковане двошарове покриття на епоксиполімерній основі. В процесі структурної та фізичної модифікації систем зафіксовано підвищення фізико-механічних, теплофізичних характеристик та

зносостійкості композицій за рахунок досягнення оптимальної щільності структурної сітки полімерної матриці, необхідної взаємодії на межі фаз та між складовими системи.

При цьому інтенсивність вагового зношування для даних композицій перебуває в межах 0,59–0,8 мг/км (якщо  $P = 1\text{МПа}$ ;  $v = 1\text{м/с}$  в умовах сухого тертя ковзання).

### Список літератури

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

2. *Зносостійкість* мультинаповнених полімерматричних двошарових покриттів / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, І.С. Сміян, Є.М. Кальба // Сучасні проблеми трибології : тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції, 19-21 травня 2010 р. – К., 2010. – С. 54.

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

4. *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.

5. *Букетов А.В.* Закономірності впливу обробки енергетичними полями зв'язуючого і наповнювачів на властивості епоксикомпозитних матеріалів для захисних покриттів: дис... д-ра техн. наук: 05.02.01 – Тернопіль: ТДТУ, 2007. – 337 с.

6. <http://www.video-microscope.com.ua/htm/dimic1000.php>.

7. *Пат. 34752 Україна*, МПК<sup>6</sup> C08K3/00, C09D163/00, C23C14/00. Спосіб одержання двошарового епоксидного композиційного покриття / Савчук П. П., Косторнов А. Г., Кашицький В. П.; заявник і патентовласник Луцький державний технічний ун-т. – № u200802352 ; заявл. 25.02.08 ; опубл. 26.08.08, Бюл. № 16.

8. *Савчук П. П.* Закономерности регулирования структуры и свойств защитных оксидных композиционных покрытий / П. П. Савчук, А. Г. Косторнов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск № 7. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. – 2008. – С. 453–456.

*Савчук П.П., Кашицкий В.П., Киселюк А.П., Смян И.С.*  
**Износостойкость эпоксикомпозитных двоярочных покрытий**//  
Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ  
«НАУ-друк», 2010. – Вип. 53. – С.226–232.

Проанализированы триботехнические характеристики эпоксидных композиционных покрытий, которые содержат адгезионный и рабочий износостойкий слои. Показаны оптимальные режимы функционирования созданной трибосистемы. Обоснованы пути достижения необходимых характеристик и обеспечения стабильности работы защитных покрытий на основе эпоксидных композитов

Рис. 1, список лит.: 8 наим.

### **Wear resistance of epoxy composition two-layer coverings**

Tribotechnical characteristics of epoxy composition coverings, which contains adhesion and working wear resistance layers, are analyzed. The optimum functioning modes of created tribosystem are shown. Achievement of necessary characteristics and providing work stability of epoxy composition defensive coverings is established.

Стаття надійшла до редакції 06.06.10