

## ДО ПИТАННЯ ПРО РЕАЛІЗАЦІЮ ЕФЕКТУ ВИБІРКОВОГО ПЕРЕНЕСЕННЯ В ЕПОКСИКОМПОЗИТАХ, ДОДАТКОВО НАПОВНЕНИХ ОКСИДАМИ МІДІ

*Кашицький В.П., Савчук П.П., Будкіна О.Л., Редько Р.Г.,  
Луцький національний технічний університет*

*В статті представлено закономірності виникнення ефекту вибіркового перенесення в епоксикомпозитах, наповнених порошками на основі міді. Проаналізовано результати досліджень та вибрано оптимальний склад епоксикомпозиту, за якого реалізується ефект вибіркового перенесення і стабілізується процес тертя.*

*Ключові слова: вибіркоче перенесення, епоксикомпозити.*

**Вступ.** На сьогодні питання тертя та зношування є досить актуальними, що пов'язано з необхідністю підвищення довговічності функціонування пар тертя, а також потребує створення нових матеріалів з високою зносостійкістю. В результаті зношування виходять з ладу деталі машин і механізмів, що призводить до несправності технічної системи, втрат матеріальних та енергетичних ресурсів.

**Актуальність досліджень.** Актуальним напрямком є розробка композиційних трибоматеріалів на основі полімерних зв'язуючих, зокрема епоксидної смоли, яка характеризується високими технологічністю при формуванні та адгезійною здатністю до багатьох матеріалів [1]. Застосування в даній галузі полімерів дозволяє підвищити корозійну стійкість вузла тертя та знизити його масу, а також відмовитись від використання рідких мастильних матеріалів. Основним завданням при цьому є забезпечення високої конструктивної міцності матеріалу, низького коефіцієнта тертя та високої зносостійкості при відповідних умовах навантаження тертям [2].

Відомо [3-5], що в процесі трибоконтакту при високих швидкостях ковзання відбувається інтенсивне локальне підвищення температури, що призводить до нагріву всієї поверхні та в об'ємі конструкції, через низьку теплопровідність системи. В результаті відбувається інтенсивне зношування матеріалу, що обумовлено процесами термодеструкції полімерної складової [2, 6]. Застосування термостабілізуючих модифікаторів дозволяє підвищити термостійкість системи, однак при цьому втрачається здатність матеріалу чинити опір зовнішнім навантаженням.

Перспективним при цьому є ініціювання процесів самоорганізації, що призводить до формування нових стійких структур в процесі експлуатації підшипника ковзання та сприяє стабілізації фрикційних параметрів [2, 6, 7].

**Постановка задачі.** Основною метою досліджень є розробка матеріалу з високою зносостійкістю на основі епоксидних композитів при складних умовах навантаження тертям за рахунок реалізації ефекту вибіркового перенесення.

**Матеріали і методи досліджень.** В якості полімерної матриці використано композицію з епоксидної смоли ЕД-20, твердника ПЕПА та модифікатора КО-921, до складу яких вводили наповнювачі: лускатий графіт, високодисперсний фторопласт, подрібнене вуглецеве волокно, порошки на основі міді  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Для видалення вологи мінеральні наповнювачі попередньо просушували при температурі  $100^\circ\text{C}$ . Композицію наносили на підготовлену поверхню або заливали у спеціальні форми. Тверднення епоксикомпозитів при нормальних умовах тривало 24 год. Додаткову термічну обробку здійснювали у печі при температурі  $140\dots 180^\circ\text{C}$ , відхилення температури в якій не перевищувало  $\pm 2\text{ K}$ .

Границю адгезійної міцності та міцності при стисканні в умовах нормального відриву визначали за ГОСТ 14759-69. Дослідження проводили на розривній машині марки УММ-5 при швидкості переміщення нижньої траверси 2 мм/хв.

Внутрішні напруження визначали консольним методом за ГОСТ 13036-67.

Ступінь отвердіння матеріалів й покриттів визначали за вмістом гель-золь-фракції в екстракторі Сокслета. Екстракцію зразків у формі пластин розміром  $40\times 70$  мм товщиною до 0,5 мм здійснювали в толуолі протягом 8 год з наступним сушінням при температурі 393 К до сталої маси. Масу зразків до і після екстракції визначали на аналітичних вагах з точністю до 0,0001 г.

Зносостійкість визначали на лабораторній установці за схемою «вал-сегмент втулки» ваговим та лінійним методами.

Дослідження макро- та мікроструктури епоксикомпозитів здійснювали на оптичному МБС-9 при збільшенні та металографічному мікроскопі МИМ-10 при збільшенні ( $\times 150\dots 250$ ) методом пластмасографічного аналізу.

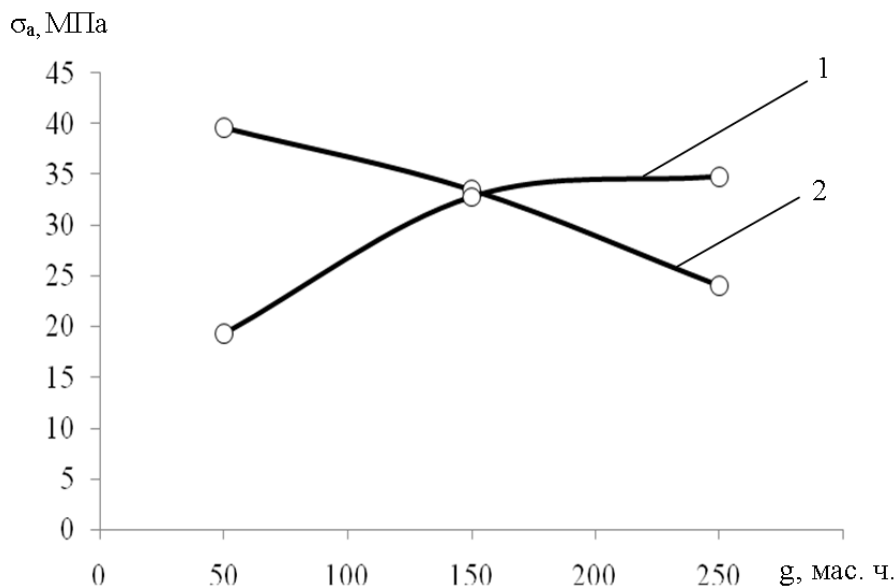


Рисунок 1 – Залежність адгезійної міцності епоксикомпозитів наповнених  $\text{Cu}_2\text{O}$  (1) та  $\text{CuO}$  (2) від кількості наповнювача

**Результати досліджень.** Основним завданням в роботі було створення умов реалізації ефекту вибіркового перенесення в трибосистемі, для чого застосовували наповнювачі  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Важливо було оцінити вміст даних інгредієнтів на фізико-механічні характеристики та степінь структурування системи. Експериментально встановлено, що при збільшенні вмісту порошку  $\text{CuO}$  від 50 мас.ч. до 250 мас.ч. в епоксикомпозитах спостерігається зниження адгезійної міцності (рис. 1). Для систем, наповнених  $\text{Cu}_2\text{O}$  зафіксовано підвищення адгезійної міцності. Це пояснюється кращою взаємодією частинок даної сполуки з епоксидною матрицею, що пов'язано з вищою дисперсністю порошку  $\text{Cu}_2\text{O}$  [1]. При цьому максимальне значення адгезійної міцності 39,67 МПа зафіксовано для епоксикомпозиту із вмістом 50 мас. ч.  $\text{CuO}$ . Такі результати показують, що природа інгредієнтів, зокрема їх хімічна активність, особливості взаємодії на межі розділу фаз зв'язуюче-наповнювач є вагомим чинником впливу на фізико-механічні властивості.

Експериментально встановлено, що найвища міцність при стисканні ( $\sigma_{cm} = 135,03$  МПа і  $\sigma_{cm} = 121,02$  МПа) характерна для епоксикомпозитів, наповнених  $\text{CuO}$  і  $\text{Cu}_2\text{O}$  відповідно з вмістом наповнювача 150 мас.ч. (рис. 2). Вміст наповнювачів 50...100 мас.ч. є недостатнім для опору матеріалу статичним навантаженням, які спричиняють деформацію ланцюгів макромолекул епоксидної складової.

При подальшому збільшенні наповнювача міцність при стисканні падає, що обумовлено наявністю агломератів, які утворилися при неповному змочуванні частинок полімером, в результаті чого спостерігається не рівномірне його розподілення в об'ємі композиції.

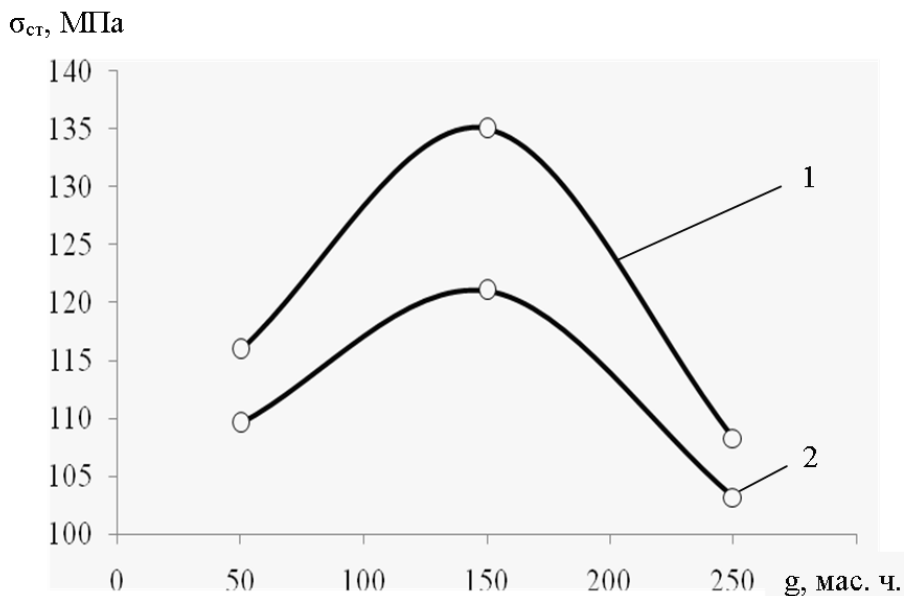


Рисунок 2 – Залежність міцності при стисканні епоксикомпозитів наповнених  $\text{CuO}$  (1) та  $\text{Cu}_2\text{O}$  (2) від вмісту наповнювача

Найвищі значення залишкових напружень ( $\sigma_{вн} = 0,88$  МПа і  $\sigma_{вн} = 1,16$  МПа) зафіксовано для епоксикомпозитів, наповнених порошками  $\text{CuO}$  і  $\text{Cu}_2\text{O}$  в кількості 50 мас.ч (рис. 3). В даному випадку високі залишкові

напруження пов'язані із локальним зшиванням макромолекул матриці, при цьому процес відбувається хаотично та нерівномірно, відповідно, частина системи знаходиться у напруженому стані. Подальше підвищення вмісту наповнювачів супроводжується зменшенням залишкових напружень, що обумовлено підвищенням рухливості конгломератів макромолекул матриці [1].

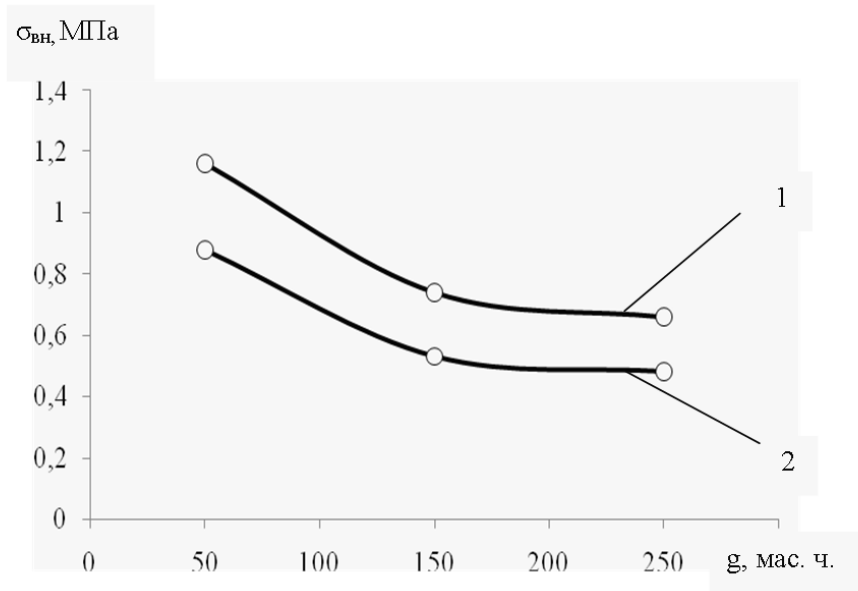


Рисунок 3 – Залежність залишкових напружень епоксикомпозитів, наповнених  $\text{Cu}_2\text{O}$  (1) та  $\text{CuO}$  (2), від кількості наповнювача

Ступінь структурування для епоксикомпозитів наповнених порошками  $\text{CuO}$  і  $\text{Cu}_2\text{O}$  підвищується при збільшенні вмісту наповнювача до 150 мас. ч. (рис. 4), а далі – знижується.

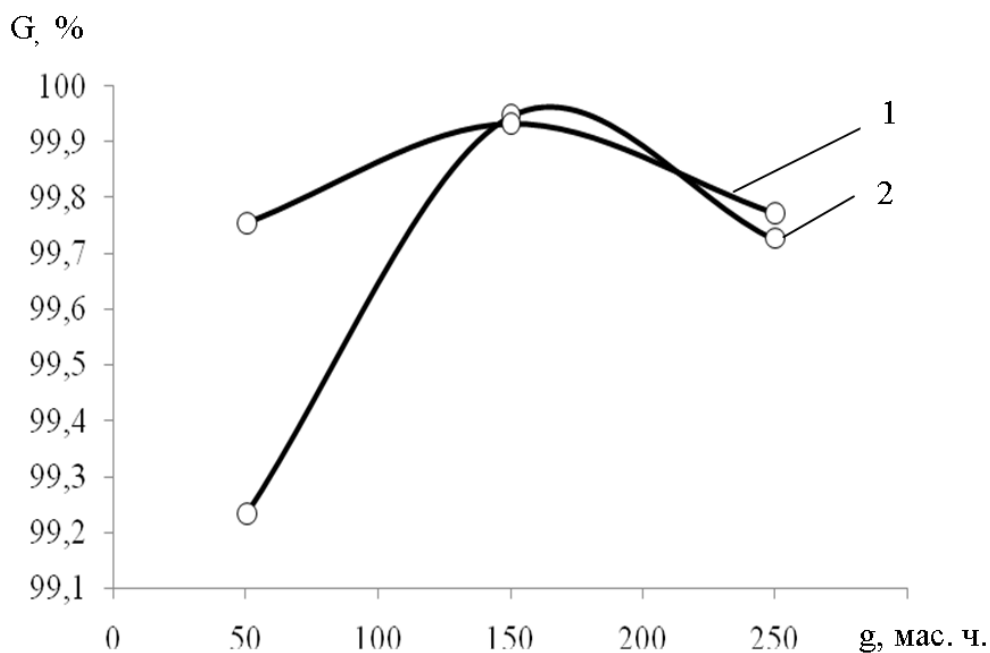


Рисунок 4 – Залежність вмісту гель-фракції епоксикомпозитів, наповнених  $\text{Cu}_2\text{O}$  (1) та  $\text{CuO}$  (2), від кількості наповнювача

Зниження ступеня структурування пов'язане з погіршенням змочування частинок наповнювачів епоксиполімером, що призводить до послаблення взаємодії компонентів системи між собою. Для дослідження триботехнічних характеристик були сформовані епоксикомпозити з комплексним вмістом функціональних наповнювачів.

Таблиця 1 – Склад та режими формування епоксикомпозитів

№ композиції	Склад полімерного зв'язуючого	Наповнювачі, мас.ч.	Вміст наповнювача, мас.ч.	Кінцева температура термічної обробки
1	ЕД-20 + ПЕПА	лускатий графіт	8,2	140°C
		високодисперсний фторопласт	14,6	
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8	
		CuO	5,4	
2	ЕД-20 + ПЕПА + КО-921	лускатий графіт	8,2	180°C
		високодисперсний фторопласт	14,6	
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8	
		CuO	50	
3	ЕД-20 + ПЕПА	лускатий графіт	8,2	140°C
		високодисперсний фторопласт	14,6	
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8	
		CuO	50	
4	ЕД-20 + ПЕПА	лускатий графіт	8,2	140°C
		високодисперсний фторопласт	14,6	
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8	
		CuO	200	
5	ЕД-20 + ПЕПА	високодисперсний фторопласт	14,6	140°C
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8	
		CuO	200	
6	ЕД-20 + ПЕПА	подрібнене вуглецеве волокно	1,8	140°C
		CuO	200	

Експериментально встановлено, що при заданих режимах навантаження тертям найменша інтенсивність зношування спостерігається для зразка №1 (рис. 5), а найбільша – для зразків № 5 та № 6 при швидкості ковзання  $v = 3,6$  м/с. Велика інтенсивність зношування при цьому пов'язана з надлишковим вмістом порошку оксиду міді в композиті, що супроводжується інтенсивним руйнуванням поверхневого шару в процесі трибозаємодії.

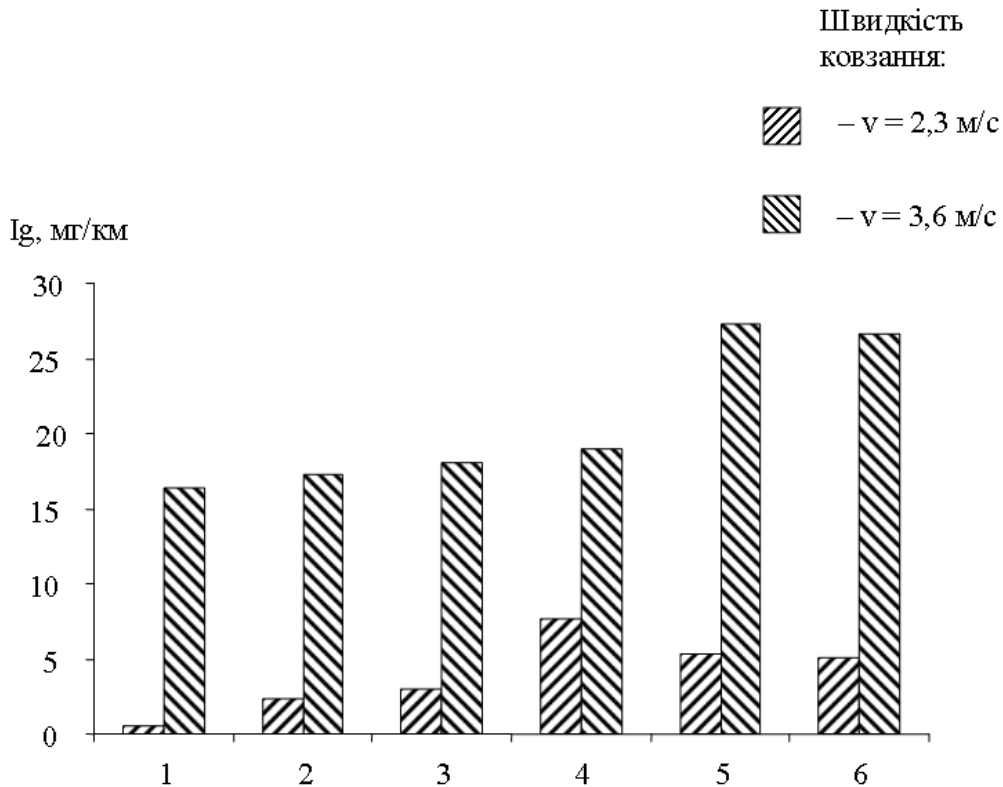


Рисунок 5 – Залежність інтенсивності вагового зношування від складу епоксикомполімерів (табл. 1)

Для композиту з низьким вмістом оксиду міді (рис. 6) при збільшенні тривалості випробувань характерне підвищення інтенсивності зношування, що вказує на втрату поверхневим шаром міцності в процесі тривалої експлуатації. При максимально можливому вмісті порошку  $\text{CuO}$  при терті пари композит–сталь спостерігається зменшення інтенсивності зношування, в тому числі і за рахунок вибіркового перенесення відновленої міді з епоксикомполімеру на сталю поверхню контртіла. В результаті даного ефекту на поверхні контртіла починають утворюватись фрагменти плівки, яка характеризується низьким опором зсуву та легко відновлюється в процесі трибозаємодії [2]. Після того, як поверхні тертя покриються мідною плівкою, пара тертя полімеркомполімер–сталь стає парою мідь–мідь і процес перенесення міді сповільнюється. З рисунку 7 видно, що поверхня досліджуваного зразка має включення на основі міді (рис. 7, а), а на поверхні контртіла присутні утворення самоорганізованої плівки переносу (рис. 7, б).

Часткове зниження інтенсивності зношування для композитів №5 та №6 пов'язано з відсутністю лускатого графіту, який підвищує крихкість системи та знижує міцність.

Дослідження при вищій швидкості ковзання показали, що інтенсивність зношування зростає у декілька разів, особливо для композицій, у яких відсутній лускатий графіт. При даному режимі навантаження графіт виконує функцію твердого мастила та більш стійкий до підвищених температурах.

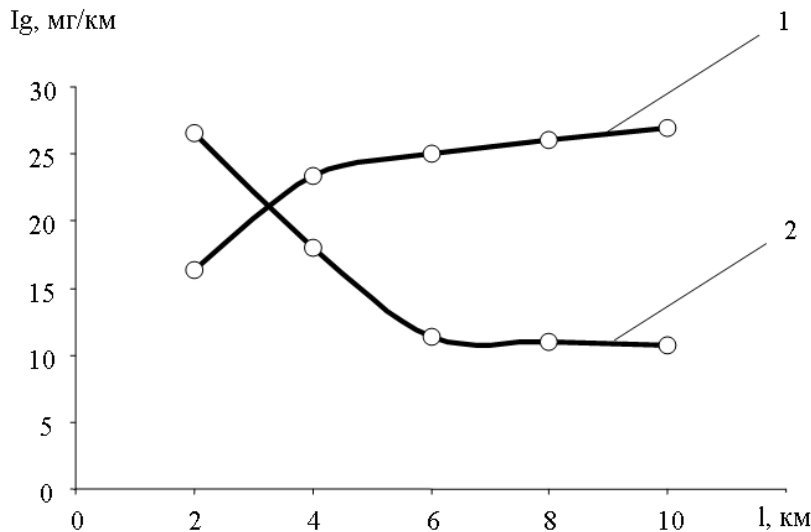
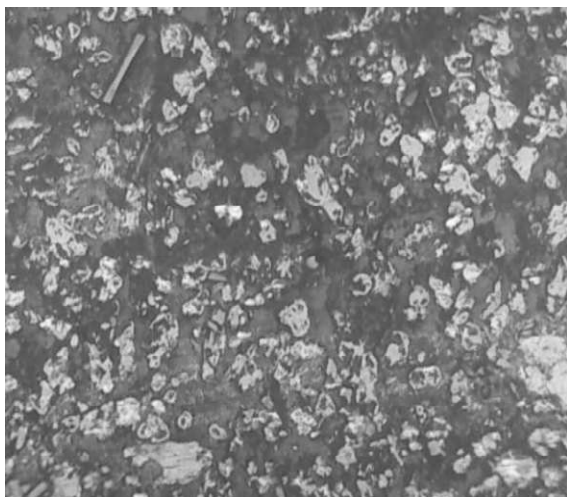
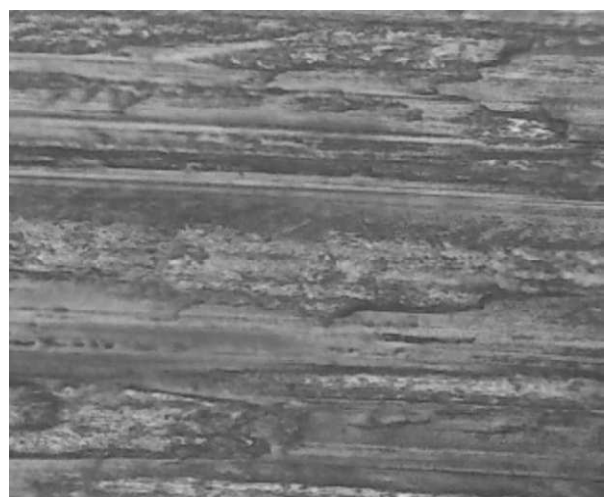


Рисунок 6 – Залежність інтенсивності вагового зношування від шляху тертя для композицій № 1 (1) та № 6 (2)



а



б

Рисунок 7 – Мікроструктура поверхні трибоконтакту (а) і контртіла (б).  $\times 250$

**Висновки.** Отже, оптимізовано триботехнічні характеристики мультинаповнених епоксидних композитів. Визначено оптимальні режими функціонування досліджуваних систем. Показано доцільність використання

зносостійких епоксикомпозитів, наповнених порошками на основі міді у вузлах триботехнічного призначення.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Букетов А. В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / А. В. Букетов, П. Д. Стухляк, Є. М. Кальба. – Тернопіль : Збруч, 2005. – 182 с.
2. Савчук П. П. Наукові і технологічні основи створення та керованого функціонування епоксидних композитів з різним ступенем наповнення : дис... д-ра техн. наук : 05.02.01 – Київ : ІПМ, 2010. – 320 с.
3. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / [Под ред. Д. Н. Гаркунова]. – М. : Машиностроение, 1982. – 207 с.
4. Трибологія : Підручник / [М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко, Є. В. Корбут]. – К. : НАУ-друк., 2009. – 392 с.
5. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) : Учебник. – М. : Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
6. Трение на основе самоорганизации / А. А. Поляков, Ф. И. Рузанов. – М. : Наука, 1992. – 135 с.

**Кашицкий В.П., Савчук П.П., Будкина О.Л., Редько Р.Г.** К ВОПРОСУ О РЕАЛИЗАЦИИ ЭФФЕКТА ВЫБОРОЧНОГО ПЕРЕНОСА В ЭПОКСИКОМПОЗИТАХ, ДОПОЛНИТЕЛЬНО НАПОЛНЕННЫХ НА ОСНОВЕ МЕДИ

*В статье представлены закономерности возникновения эффекта избирательного переноса в эпоксикомпозитах, наполненных порошками на основе меди. Проанализированы результаты исследований и выбран оптимальный состав эпоксикомпозитов, при котором реализуется эффект избирательного переноса и стабилизируется процесс трения.*

*Ключевые слова: выборочный п, эпоксикомпозиты.*

**Kashitskiy V.P., Savchuk P.P., Budkina O.L., Redko P.G.** TO THE QUESTION ABOUT REALIZATION OF SELECTIVE TRANSFER EFFECT IN EPOXY COMPOSITES, ADDITIONALLY FILLED WITH COPPER OXIDE

*This paper presents patterns of reduction in selective transfer epoxy composites filled with powders based on copper. Analyzes results of the research and selects the optimum composition of epoxy composites when the selective transfer effect is realized and the friction process is stabilized.*

*Key words: selective transfer, epoxy composites.*