

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет митної справи, матеріалів, технологій та гостинності
Кафедра матеріалознавства**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**РОЗРОБКА ТРИБОТЕХНІЧНИХ
ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ З ВИСОКИМ
СТУПЕНЕМ НАПОВНЕННЯ / DEVELOPMENT
OF TRIBOTECHNICAL EPOXY COMPOSITES
WITH A HIGH DEGREE OF FILLING**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМз – 41
ЛЕСКОВЕЦЬ Станіслав Степанович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Садова Оксана Леонідівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.
к.т.н., професор
Гарант освітньої програми:
Кашицький Віталій Павлович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій

Кафедра матеріалознавства

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 132 Матеріалознавство

Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри

ІМБІРОВИЧ Н.Ю.

“___” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Лесковцю Станіславу Степановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка триботехнічних епоксикомпозитів з високим ступенем наповнення

керівник роботи Садова О.Л., к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “31” 12.2025 р. № 540/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи
«23» травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи літературні джерела, властивості вихідних матеріалів, методи досліджень властивостей матеріалів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ; Розділ 1. Технічне обґрунтування; 2. Характеристика вихідних матеріалів та методики досліджень; 3. Експериментальна частина; Висновки; Список використаних джерел; Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайд 1 – Методика триботехнічних досліджень (1 л. ф. А4);

Слайди 2-7 – Дослідження триботехнічних властивостей епоксикомпозитних матеріалів (4 л. ф. А4);

Слайд 8 – Загальні висновки (1 л. ф. А4)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «03» січня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Розділ 1. Технічне обґрунтування	05.05.2026 р.	
2	Розділ 2. Характеристика вихідних матеріалів та методики досліджень	12.05.2026 р.	
3	Розділ 3. Експериментальна частина	19.05.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____ Лесковець С.С.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Садова О.Л.
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Лесковець С.С. Розробка триботехнічних епоксикомпозитів з високим ступенем наповнення. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі даної роботи подано технічне обґрунтування використання полімеркомпозитів на основі епоксидних смол у триботехнічних застосуваннях. Зроблено висновки та поставлено завдання дослідження. У другому розділі подано характеристику використовуваних матеріалів та методику дослідження триботехнічних властивостей епоксикомпозитів. У третьому розділі приведено склад розроблених епоксикомпозитних матеріалів та дослідження їх триботехнічних властивостей, а також аналіз мікроструктури.

Бакалаврська робота складається з пояснювальної записки та додатків. Пояснювальна записка містить 35 сторінок, 9 рисунків, 7 таблиць та включає список з 22 літературних джерел. Графічна частина складається з 8 листів формату А4, представлених у додатку А.

Ключові слова: епоксикомпозит, оксид міді, оксид алюмінію, оксид хрому, мідь, бронза, інтенсивність зношування.

					БР 5326.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка триботехнічних епоксикомпозитів з високим ступенем наповнення	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розробила	Лесковець						3	35	
Перевірив	Садова								
Н. Контр	Мисковець								
Затв.	Імбірович					ЛНТУ, каф. матеріалознавства гр. ПМз-41			

ANNOTATION

Leskovets S.S. Development of tribotechnical epoxy composites with a high degree of filling. Manuscript.

Bachelor's qualification work of EP " Materials Science" specialty 132 Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

Bachelor's qualification work consists of an introduction, three chapters, conclusions, list of references and applications.

The first section of this work presents a technical justification for the use of polymer composites based on epoxy resins in tribotechnical applications. Conclusions are drawn and research tasks are set. The second section presents a description of the materials used and the methodology for studying the tribotechnical properties of epoxy composites. The third section presents the composition of the developed epoxy composite materials and the study of their tribotechnical properties, as well as microstructure analysis.

The bachelor's thesis consists of an explanatory note and appendices. The explanatory note contains 35 pages, 9 figures, 7 tables and includes a list of 22 literary sources. The graphic part consists of 8 A4 sheets, presented in Appendix A.

Keywords: epoxy composite, copper oxide, aluminum oxide, chromium oxide, copper, bronze, wear intensity.

					БП 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	7
1.1. Обґрунтування застосування епоксидних смол для формування полімеркомпозитів	7
1.2. Механізм тертя полімерних композиційних матеріалів.....	10
1.3. Висновки та постановка завдань досліджень	15
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	16
2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів.....	
2.2. Методи дослідження властивостей та структури епоксикомпозитних матеріалів	20
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СТРУКТУРИ ВИСОКОНАПОНЕНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ.....	22
ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Впровадження епоксикомпозитів у триботехнічні системи є критично важливим для підвищення експлуатаційного ресурсу сучасних машин і механізмів. Епоксидна матриця забезпечує унікальне поєднання високої механічної міцності, хімічної стійкості та чудової адгезії до армувальних наповнювачів.

Актуальність використання цих матеріалів зумовлена необхідністю заміни дефіцитних кольорових металів легшими та зносостійкими полімерними аналогами. Завдяки можливості введення твердих мастил, епоксикомпозити здатні ефективно працювати в режимі самозмащування без постійного підводу оливи. Це дозволяє створювати екологічно безпечні вузли тертя, що особливо важливо для харчової, текстильної та фармацевтичної промисловості.

Модифікація епоксидних смол нанонаповнювачами дозволяє точно керувати теплопровідністю матеріалу, запобігаючи термічному руйнуванню зони контакту. Висока технологічність матеріалу забезпечує виготовлення деталей складної форми методом лиття з мінімальними витратами на подальшу обробку. Застосування таких композитів у вузлах тертя суттєво знижує енерговитрати на подолання опору та значно зменшує інтенсивність зношування поверхонь.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту (пошук літературних даних) виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

1.1. Обґрунтування застосування епоксидних смол для формування полімеркомпозитів

Епоксидна смола широко використовується в багатьох областях. Покращення властивості тертя та зносу може ще більше розширити діапазон застосування епоксидної смоли. Модифікація наповнення може покращити трибологічний стан епоксидної смоли та покращити властивість тертя та зносу епоксидної смоли [1]. Механічні властивості композитів з епоксидної смоли зміцнюються шляхом додавання наповнювача до епоксидної смоли для покращення несучої здатності композитів епоксидної смоли під час тертя. У той же час додати наповнювач для зменшення поверхні епоксидної смоли та пари тертя подвійності між властивістю злежування, а в процесі тертя легко утворювати передавальну плівку, передавати плівку для ізоляції прямого контакту поверхні тертя, композитних матеріалів та подвійного тертя між поверхнями в композитні матеріали та передавальну плівку, тертя між покращеним трибологічним станом між парою тертя, зменшити коефіцієнт тертя та швидкість зносу композитних [2].

Експериментальні результати показують [3], що чиста епоксидна смола, попри високу механічну міцність, піддається інтенсивному адгезійному зношуванню та має високий коефіцієнт тертя, що обмежує її трибологічну ефективність. Введення лише частинок SiC дозволило суттєво підвищити зносостійкість завдяки їхній високій твердості, що забезпечило зниження питомої швидкості зношування на 83,3 % при навантаженні 40 Н порівняно з ненаповненою матрицею. Графіт та MoS₂ як індивідуальні наповнювачі забезпечили помірне покращення показників тертя та зносу; зокрема, графіт знизив коефіцієнт тертя на 20,8 %, а MoS₂ сприяв зменшенню

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

міжфазної температури на 33,8 % за умов високих навантажень. Гібридні системи наповнювачів продемонстрували виражені синергетичні ефекти. Так, подвійна комбінація EP + Gr + MoS₂ досягла значення коефіцієнта тертя 0,35 та температури нагріву (ΔT) 29 °C, перевершуючи за ефективністю системи з одним наповнювачем. Композит із потрійним наповнювачем EP + SiC + Gr + MoS₂ продемонстрував найбільш збалансовані характеристики, забезпечуючи стабільно низьку швидкість зношування ($2,5 \dots 5 \times 10^{-5}$ мм³/Н·м), коефіцієнт тертя нижче 0,42 та зростання температури лише на 28 °C навіть під дією максимального навантаження.

Коефіцієнт зносу корпусу використовується багатьма дослідниками як засіб для прогнозування зносу корпусу, оскільки він забезпечує зручний і відносно простий метод оцінки кількості зносу на основі робочих параметрів. Хоча точні механізми зносу корпусу є складними і включають кілька взаємодіючих факторів, таких як властивості матеріалу, характеристики бурової рідини, контактні сили тощо, коефіцієнт зносу пропонує спрощений підхід до кількісної оцінки ефекту кумулятивного зносу, співвідносячи його з параметрами свердління, такими як контактний тиск, ковзання та швидкість обертання [4]. Полімери та полімерні композити нещодавно отримали визнання в якості заміників металів завдяки відмінній корозійній стійкості. Вони легші, що зменшує витрати на транспортування та обробку та полегшує встановлення глибоких або великих свердловин, де вага має вирішальне значення [5-7]. Незважаючи на свої переваги, ці матеріали стикаються з такими проблемами, як більш високе теплове розширення, коротша довговічність і чутливість до високих температур, що вимагає продуманих зусиль з проектування [8].

Композити на основі епоксидної смоли, армовані вуглецевим волокном, демонструють чудову зносостійкість і довговічність, що дозволяє значно подовжити термін служби конструкцій у складних умовах експлуатації. У цій статті детально вивчено та проаналізовано фрикційну

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поведінку й механізми зносу епоксикомпозитів, армованих вуглецевим волокном, при різних навантаженнях, швидкостях ковзання, робочих температурах та за умов водного змащення.

На трибологічні властивості епоксикомпозитів, армованих вуглецевим волокном, найбільше впливає прикладене навантаження, оскільки тангенціальне зміщення викликає значне напруження зсуву на межі пари тертя. Наступним за вагомістю фактором є робоча температура, тоді як вплив водного змащення виявився мінімальним. Зокрема, при навантаженні 2000 г швидкість зносу та ширина подряпин зразків зросли на 158% та 113% відповідно порівняно з показниками при 500 г. Таке стрімке погіршення характеристик пов'язане з незворотним руйнуванням зв'язку на межі розділу волокно/смола, що призводить до сильного делямінаційного зносу (розшарування). При підвищенні температури до 100 °С та 120 °С швидкість зносу епоксикомпозитів, армованих вуглецевим волокном, зросла на 75% та 112% порівняно з кімнатною температурою. Це зумовлено переходом епоксидної смоли зі склоподібного у високоеластичний стан, що сприяє інтенсивному втомному зносу. Водночас швидкість ковзання та водне змащення продемонстрували незначний вплив на коефіцієнт тертя епоксикомпозитів, армованих вуглецевим волокном. Особливо це помітно за умов водного змащення при 60 °С, де коефіцієнт тертя становив лише 0,15 (15%). Це пояснюється мастильними властивостями та ефективним відведенням тепла молекулами води, що пом'якшує фрикційну взаємодію та зводить знос до незначного абразивного впливу. Натомість швидкість зносу епоксикомпозитів, армованих вуглецевим волокном, при ковзанні зі швидкістю 120 мм/с виявилася на 74% вищою, ніж при 60 мм/с. Таке суттєве зростання зумовлене невідповідністю швидкостей ковзання, що викликає нескоординовану деформацію поверхні та підповерхневих шарів композиту, призводячи до адгезійного зносу [9].

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В роботі [10] досліджено вплив додавання оксидів нанометалів (ZnO , Al_2O_3) до епоксидної смоли. Додавання нанонаповнювача ZnO призвело до більш щільної зшитої мережі в результаті розширеної реакції через зниження енергії активації нанокомпозита. Отже, нанокомпозит демонстрував крихку поведінку, що характеризується великими та загостреними тріщинами, коли піддається тестуванню подряпин. Загартування епоксидного нанокомпозитного покриття з включенням наповнювачів Al_2O_3 було зазначено результатами випробувань на подряпини. Мінімальний вплив наповнювачів Al_2O_3 на епоксидне лікування було зараховано для індукції механізмів посилення, що призводить до менших тріщин.

1.2. Механізм тертя полімерних композиційних матеріалів

Механізм тертя полімерних композиційних матеріалів – це багатофакторний процес, що поєднує фізико-хімічні явища на поверхні та реологічну поведінку об'єму матеріалу. На відміну від металів, полімери мають низький модуль пружності та високу чутливість до температури, що робить їхню трибологічну поведінку унікальною.

Сучасне трибоматеріалознавство розглядає тертя полімеркомпозитних матеріалів як сукупність адгезійної та деформаційної складових, що діють одночасно [11].

Адгезійна складова сили тертя в полімерних композитах визначається термодинамічними процесами взаємодії на межі розділу фаз «полімер - контртіло». Згідно з фундаментальними дослідженнями [11], адгезія виникає через формування міжмолекулярних зв'язків, переважно дисперсійних сил Ван-дер-Ваальса, у зонах фактичного контакту. Природа цих зв'язків тісно пов'язана з вільною поверхневою енергією композиту, яка суттєво змінюється при введенні наповнювачів. Під час ковзання відбувається безперервне руйнування та регенерація цих зв'язків, що супроводжується

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дисипацією енергії [12]. Наукова школа Б. Бріско стверджує, що опір зсуву адгезійного вузла залежить від нормального тиску та швидкості зсуву макромолекул. Для полімеркомпозитів характерним є те, що площа фактичного контакту не є статичною і зростає внаслідок релаксаційних процесів полімерної матриці. Важливим фактором є когезійна міцність приповерхневого шару: якщо адгезія до металу сильніша за внутрішні зв'язки полімеру, відбувається когезійне руйнування матриці. Це призводить до перенесення матеріалу на контрпальне тіло, що є початком формування трансферної плівки [13]. Введення антифрикційних наповнювачів, таких як PTFE, знижує поверхневу енергію, мінімізуючи адгезійну взаємодію. Проте, як зазначає О. Кабат [14], надмірне зниження адгезії може перешкоджати утворенню стабільної захисної плівки. Температура в зоні контакту радикально впливає на адгезію, оскільки при наближенні до температури склування рухливість ланцюгів зростає. Це спричиняє перехід від пружного до високоеластичного контакту, де адгезійна складова стає домінуючою. Математично цей процес описується через молекулярну модель активаційного розриву зв'язків. Сучасні дослідження [15] показують, що нанонаповнювачі здатні локально блокувати сегментальну рухливість ланцюгів, знижуючи адгезійний знос. Таким чином, адгезійна складова є результатом складної рівноваги між хімічною природою матриці, морфологією наповнювача та енергетичним станом поверхні. В умовах сухого тертя саме адгезійні процеси відповідальні за первинне припрацювання вузла. Стабільність адгезійної складової забезпечує прогнозованість коефіцієнта тертя в часі. Експериментальні дані підтверджують, що модифікація поверхні контрпального тіла може керувати адгезійною складовою через зміну щільності активних центрів. У композитах на основі термореактивних смол адгезія часто ускладнюється механохімічною деструкцією. Розрив ланцюгів створює вільні радикали, які вступають в інтенсивну хімічну взаємодію з оксидами металів на

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

контрпальному тілі. Це формує так званий «третій корпус», який за своїми властивостями відрізняється від вихідних матеріалів. Зрештою, адгезійна складова тертя є ключовим параметром, що визначає ефективність самозмащувальних композитів у вакуумі чи інертних середовищах.

Деформаційна складова тертя полімеркомпозитних матеріалів має об'ємний характер і зумовлена дисипацією механічної енергії внаслідок в'язкоеластичної природи полімерів. Коли шорстке контртіло ковзає по поверхні композиту, його мікронерівності впроваджуються в матеріал, спричиняючи локальні напруження. Згідно з моделлю Д. Мура [16], цей процес можна представити як переміщення хвилі деформації через масив полімеру. Через релаксаційні властивості полімерної матриці, деформація стиснення попереду нерівності та відновлення позаду неї відбуваються несинхронно. Це явище, відоме як механічний гістерезис, призводить до того, що частина енергії не повертається контрпальному тілу, а розсіюється у вигляді теплоти. К. Фрідріх [17, 18] підкреслює, що деформаційна складова прямо пропорційна тангенсу кута механічних втрат матеріалу. У полімерних композитах армувальні компоненти (волокна або дисперсні частинки) суттєво модифікують цей механізм, підвищуючи модуль пружності системи. Високий модуль пружності зменшує глибину проникнення інденторів, що автоматично знижує об'єм матеріалу, залученого в деформацію. Проте тверді наповнювачі самі можуть виступати в ролі абразивів, якщо вони відшаровуються від матриці.

Наукові праці [11] вказують на важливість масштабного ефекту: деформація відбувається на мікрорівні (нерівності) та на макрорівні (прогин всього елемента). Внесок деформаційної складової зростає зі збільшенням шорсткості контртіла. При високих швидкостях ковзання полімер поводить себе як більш жорстке тіло через високу частоту деформаційних циклів. Навпаки, при підвищенні температури матеріал розм'якшується, що призводить до глибшого впровадження інденторів і зростання гістерезисних втрат. О.

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кабат [14] зазначає, що оптимальне наповнення композиту дозволяє мінімізувати ці втрати шляхом створення жорсткого каркаса. Деформаційна складова також включає енергію, витрачену на мікрорізання поверхні в умовах абразивного зносу. У нанокompозитах частинки з великою питомою площею поверхні створюють зони обмеженої рухливості навколо себе, що змінює спектр механічних втрат. Це дозволяє проектувати матеріали з низьким коефіцієнтом тертя навіть при високих питомих тисках. Експериментально деформаційна складова виділяється шляхом тертя по змащених поверхні, де адгезія зведена до мінімуму. Результати показують, що для жорстких термопластів деформаційний внесок може становити до 30...40% від загальної сили тертя. Математичне моделювання цього процесу вимагає використання нелінійних моделей в'язкоеластичності [16]. Розуміння деформаційного механізму є критичним для розробки триботехнічних деталей, що працюють в умовах циклічних навантажень. Таким чином, деформаційна складова відображає здатність полімеркомпозитів опиратися об'ємному переміщенню матеріалу під дією зовнішніх сил. Вона тісно корелює з втомними характеристиками композиту та його стійкістю до деградації при тривалому контакті.

Формування вторинних структур, які в міжнародній науковій термінології визначаються як «transfer films» або «third body», є складним фізико-хімічним процесом, що докорінно змінює енергетику контактної взаємодії. Згідно з концепцією «третього тіла», висунутою М. Годе [19], тертя в реальних системах відбувається не між двома початковими тілами, а всередині проміжного шару, що складається з деградованої матриці, часток наповнювача та оксидів металу контрпального тіла.

Процес ініціюється механохімічною активацією поверхні полімерного композиту під дією нормальних і тангенціальних напружень. Як зазначають С. Сінха та Б. Бріско, початкова стадія супроводжується мікроскопічним зрізанням поверхневих шарів полімеру та їх адгезійним закріпленням у

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заглибинах мікрорельєфу контрпального тіла [11]. Для полімеркомпозитів критичним є вміст антифрикційних наповнювачів: наприклад, молекули політетрафторетилену або частинки графіту при виході в зону контакту орієнтуються паралельно напрямку ковзання, створюючи ламелярну структуру з низьким опором зсуву [20].

Наукові праці К. Фрідріха підкреслюють роль нанонаповнювачів у стабілізації цих плівок: наночастинки діють як «анкери», що механічно утримують трибоплівку на металевій поверхні, перешкоджаючи її швидкому відшаруванню та перетворенню на вільні продукти зносу [21]. З точки зору термодинаміки, формування вторинних структур веде до зниження вільної енергії поверхні та локалізації деформаційних процесів у надтонкому шарі.

Український дослідник О. Кабат доводить, що стабільність вторинних структур безпосередньо залежить від термохімічної стійкості полімерної матриці; при перевищенні критичної температури відбувається термічна деструкція плівки, що призводить до катастрофічного зношування [14]. Вторинна структура виконує захисну роль, запобігаючи абразивному впливу жорстких армувальних волокон (вуглецевих або скляних) на металеве контртіло. Крім того, трибоплівка сприяє рівномірному розподілу навантаження по площі контакту, нівелюючи вплив початкової шорсткості.

Сучасні дослідження з використанням електронної мікроскопії підтверджують, що ефективні трибоплівки мають товщину від 0,1 до 2 мкм і характеризуються високим ступенем хімічної модифікації порівняно з вихідним композитом [15]. Важливим аспектом є «трибохімічний синтез» – утворення нових сполук (наприклад, металополімерних комплексів) безпосередньо в процесі тертя, що підвищує адгезію плівки до металу [22]. Таким чином, здатність полімеркомпозитів до генерації стійких вторинних структур є головним критерієм їх застосування у вузлах сухого тертя.

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3. Висновки і постановка завдань досліджень

Використання епоксидних матриць у триботехніці є науково обґрунтованим завдяки їхній здатності міцно утримувати модифікуючі наповнювачі в зоні інтенсивного механічного контакту. Введення твердих мастил, таких як графіт або дисульфід молібдену, забезпечує стабільний ефект самозмащування та суттєво знижує коефіцієнт тертя в робочих вузлах. Гібридне наповнення частинками високої твердості у поєднанні з антифрикційними добавками дозволяє одночасно досягти високої зносостійкості та термічної стабільності матеріалу. Застосування таких композитів у вузлах сухого ковзання гарантує тривалу роботу механізмів без потреби у використанні екологічно шкідливих рідких мастил. Завдяки можливості точного проектування складу, модифіковані епоксикомпозити виступають ефективною та легкою альтернативою традиційним антифрикційним сплавам у сучасному машинобудуванні.

З метою покращення властивостей епоксидних композитних матеріалів на основі дрібнодисперсних наповнювачів в бакалаврській роботі необхідно було вирішити такі завдання:

- дослідити триботехнічні властивості високонаповнених епоксикомпозитів;
- дослідити хімічні властивості епоксикомпозитів;
- провести аналіз мікроструктур наповнених епоксисистем;
- розробити технологічний процес формування епоксикомпозитних підшипників ковзання.

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Характеристика досліджуваних матеріалів

Як вихідний матеріал використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ДСТУ 2093-92), що представляє собою високов'язку прозору рідину. Масова доля епоксидних груп складає 20,0...22,5 % летких речовин – 0,2...0,8 %.

Для тверднення епоксидних композицій застосовували поліетилен-поліамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70). Він призначений для структурування епоксидних смол при кімнатній та знижених температурах в умовах підвищеної вологості. Масова частка загального азоту становить не менше 30 %. Основні фізико-хімічні властивості смоли та твердника представлені в таблиці 2.1 [25].

Таблиця 2.1 – Фізико-хімічні властивості смоли марки ЕД-20 та твердника ПЕПА

Показник	Значення показника	
	ЕД-20	ПЕПА
Густина, г/см ³	1,16...1,20	0,95...1,05
Молекулярна маса	390...430	230...250
Вміст епоксидних груп, %	20,0...22,0	–
Вміст летких речовин, %	0,8	–
Умовна в'язкість за кульковим віскозиметром за температури 25 °С, с	65	–
Динамічна в'язкість за температури 25 °С, Па·с	12...25	–
Вміст загального хлору, %	0,8	–
Вміст іону хлору	0,005	–
Масова доля загального азоту, %	–	30
Вміст гідроксильних груп	1,7	–
Вміст води	–	2

В якості наповнювачів використано порошки міді (Cu), оксиду міді (CuO), заліза (Fe), оксиду хрому (Cr₂O₃), оксиду алюмінію (Al₂O₃), високодисперсної бронзи, подрібнені вуглецеві волокна.

Мідь – пластичний метал з густиною 8,940 г/см³, температурою плавлення 1356,6 °С. Має кубічну гранецентровану гратку, хімічно малоактивна. Мідь володіє високою теплопровідністю і електропровідністю. На повітрі швидко покривається оксидною плівкою, яка додає їй характерний інтенсивний жовтувато-червоний відтінок. Мідь є ковким і в'язким металом.

Оксид міді – основний оксид двовалентної міді. Кристали оксиду міді мають чорний колір, в звичайних умовах досить стійкі, практично нерозчинні в воді.

Залізо – сріблясто-сірий, блискучий, пластичний і ковкий метал, який легко окиснюється. Залізо належить до металів середньої активності. Хімічно чисте залізо стійке до корозії. Однак незначні частки домішок позбавляють його цієї властивості. Використано порошок карбонільного залізо марки Р-20. Він містить частинки сферичної форми шарової структури. Хімічний склад: 0,7...0,9% С, 0,6...0,9% N, 0,8...1,2% O₂, 97,9...97% Fe. Середній діаметр частинок становить 2,5мкм.

Оксид алюмінію – тугоплавкий порошок білого кольору. У природі зустрічається у вигляді корунду та його різновидів У воді кристали оксиду алюмінію не розчиняються і не взаємодіють з нею, хімічно дуже стійкі. Практично не розчинний у кислотах. Розчиняється в гарячих розчинах і розплавах лугів

Оксид хрому – дуже твердий тугоплавкий порошок зеленого кольору, нерозчинний у воді і розбавлених кислотах. Він має гексагональну будову кристалів. Оксид хрому володіє світло-, термо-, атмосферостійкістю і стійкістю до дії агресивних газів. Не токсичний, на відміну від хромових сполук з ступінню окислення +6.

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В роботі застосовано порошок високодисперсної бронзи марки БПК (ТУ 48-21-721-81). Фракція порошку становить 0,1...0,001 мкм. Хімічний склад: 84...85% Cu, 0,2...0,3% Fe. Бронзові порошки характеризуються високою зносостійкістю і застосовуються в порошковій металургії. Температура плавлення бронзи перебуває в межах 990...1190° С, міцність 343...442 МПа, твердість 67...87 НВ [26, 27].

Вуглецеве волокно (вуглеволокно, графітове волокно) – вуглецевий полімер; має форму графіту, в якій атоми вуглецю збудовані в плоскі довгі вузькі графітові полотна. Безліч графітових полотен, переплітаючись, утворюють волокно. Вуглеволокном часто називають також будь-який композитний матеріал, до складу якого входять вуглецеві нитки; найбільш відомим і важливим з них є пластик, посилений вуглеволокном.

Вуглецеві волокна – мають високу механічну міцність та модуль пружності в поєднанні з низькою густиною. Для них властива стійкість до дії високих температур, хімічних реагентів, ультрафіолетового випромінювання, висока теплопровідність та розвинута поверхня (1000...2000 м²/г). Вуглеволокна мають високу хімічну стійкість до більшості агресивних середовищ. Температура експлуатації вуглецевого волокна становить від мінус 300 до 800 °С. Під впливом високої температури волокна змінюють свої механічні властивості. Вуглеволокно має дуже низьку стійкість до ударних навантажень (високу ударну крихкість).

Композицію формували наступним чином: до епоксидної смоли ЕД-20 та твердника (12 мас. ч.) вводили наповнювачі та проводили механічне вимішування композиції для забезпечення високої однорідності системи. Сформовану композицію заливали у спеціальну прес-форму (рисунок 2.1). Поверхню попередньо обробляли абразивом для досягнення необхідної шорсткості і знежирювали ацетоном. Тверднення епоксикомпозитів при нормальних умовах тривало 24 год. Додаткову термічну обробку здійснено у печі за ступінчастим режимом: 1 година при температурі 50 °С, 1 година при

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

100 °С та 4 години при 140 °С. Загальний вигляд зразків для досліджень подано на рисунок 2.2.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд прес-форми



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд зразків для дослідження триботехнічних характеристик

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Методи дослідження властивостей та структури епоксикомпозитних матеріалів

Дослідження зносостійкості проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою “вал–сегмент втулки” в умовах сухого тертя. Зразок встановлювали на циліндричну поверхню металевого контртіла, яке оберталося із заданою швидкістю. Контртіло виготовляли у формі диска (рисунок 2.3) із сталі 45 діаметром 50 мм з шорсткістю поверхні $R_a=3,2$. Зразки виготовляли з монолітного матеріалу з квадратним перерізом розміром 10×10 мм та висотою 15 мм.

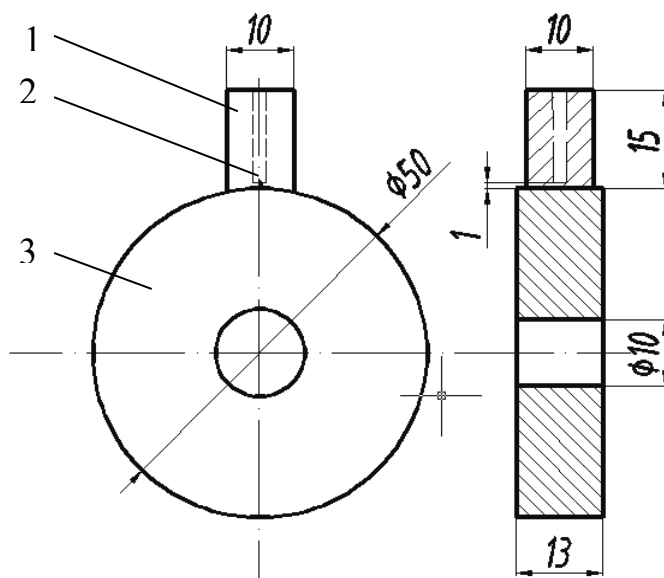


Рисунок 2.3 – Схема тертя “вал–сегмент втулки” і розміри елементів трибопари:

- 1 – зразок;
- 2 – канал для термопари;
- 3 – контртіло

Інтенсивність вагового зношування визначали за формулою:

$$I_g = \frac{m_1 - m_2}{\Delta L},$$

де m_1, m_2 – маса зразків до і після випробувань, г.

Інтенсивність лінійного зношування визначали в лінійних безрозмірних одиницях:

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta L},$$

де Δh – товщина зношеного шару, мм;

ΔL – шлях тертя, м.

Масу зразків визначали на аналітичних лабораторних вагах типу ВЛА – 200 з точністю 0,0001 г.

«Дослідження структури епоксидного композитного матеріалу проводили застосовуючи методи пластмасографії, які дозволили найбільш реально оцінити характер розташування структурних компонентів, особливості взаємодії між ними, зокрема на границі розділу фаз, виявити мікро- та макродефекти структури тощо.»

«Механізм формування поверхні шліфа полягає в наступному: зразок протирають гасом для зменшення зчеплення частинок алмазної пасти з його поверхнею. Після цієї операції проводять полірування зразка на полірувальному верстаті. При цьому на робочу поверхню круга (папір, тканина) наносять алмазну пасту типу АСМ-3/5 (дисперсність частинок 3...5 мкм). Після проведення полірування зразок промивають розчином етилового спирту для зняття залишків алмазної пасти.»

Дослідження макро- та мікроструктури матеріалу проводили на оптичному мікроскопі МБС-9 за збільшення ($\times 30$) та металографічному мікроскопі МПЦ-14 ($\times 100...500$).

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СТРУКТУРИ ВИСОКОНАПОНЕНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

Триботехнічні характеристики розроблених епоксикомпозитних матеріалів досліджували при таких параметрах: питоме навантаження $P = 1$ МПа, швидкість ковзання контртіла $V = 1,21$ м/с, шлях тертя становив $S = 1$ км.

Склад епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошками заліза та оксиду міді подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Склад епоксикомпозитних матеріалів

№ зразка	Вміст наповнювачів, мас. ч.			
	CuO	BB	Cu	Fe
1	50	2	16	50
2	100	2	16	50
3	50	2	16	70
4	100	2	16	70

Експериментально встановлено, що для епоксикомпозиту з вмістом 100 мас. ч. оксиду міді та 70 мас. ч. заліза (зразок № 1) відбувається зростання інтенсивності зношування. Мінімальне значення даної характеристики (26,4 мг/км) зафіксовано для композиції з вмістом наповнювачів 50 мас. ч. При підвищенні порошку оксиду міді до 100 мас. ч. інтенсивність зношування зростає майже у два рази (рисунк 3.1), що пов'язано очевидно з оптимальним вмістом наповнювача, при перевищенні якого відбувається інтенсивне викришування частинок через недостатнє змочування поверхні в'язучою речовиною.

Аналогічне явище відбувається при збільшенні кількості порошку заліза до 70 мас. ч. За максимальних ступенів наповнення поверхневий шар

матеріалу в зоні трибоконтакту найбільше піддається руйнуванню (66,7 мг/км), хоча величина інтенсивності зношування зростає не так різко, як це відбувається на початкових етапах, що вказує на позитивний вплив добавок на триботехнічні характеристики.

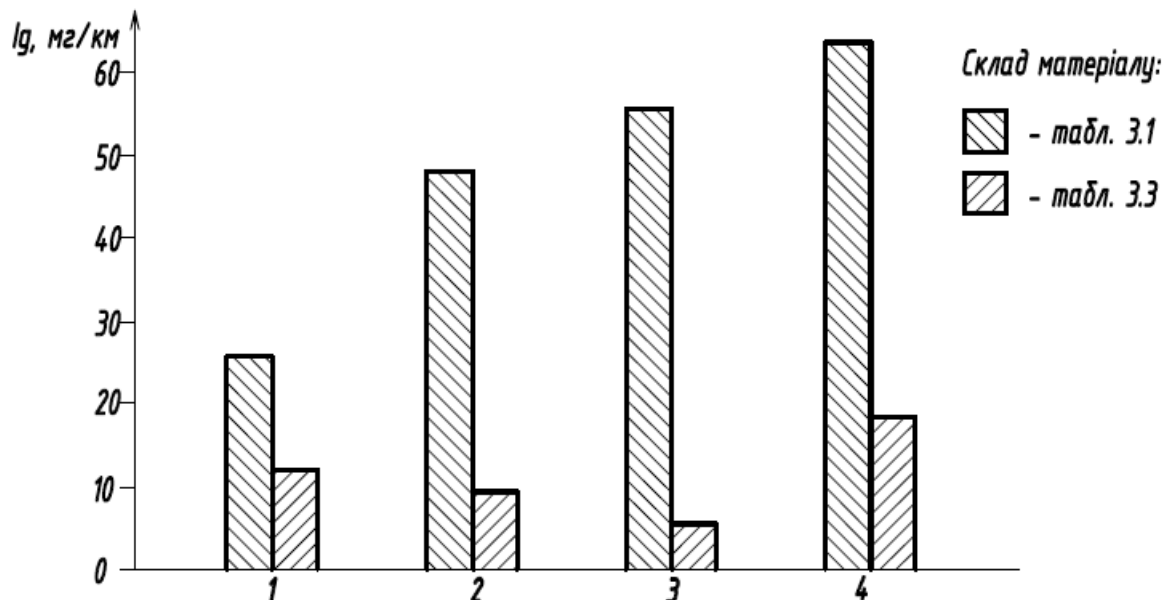


Рисунок 3.1 – Залежність інтенсивності вагового зношування від складу епоксикомпозитів

Необхідно зауважити, що за зростання кількості порошку оксиду міді у два рази інтенсивність зношування має менші значення, ніж за зростання порошку заліза на 40 %. Відповідно можна зробити висновок, що порошок оксиду міді більш позитивно впливає на зносостійкість матеріалу, ніж порошок заліза, який здатний проявляти захоплювання із сталевим контртілом.

Експериментально встановлено, що при заданих режимах тертя найменша інтенсивність зношування спостерігається для зразка № 4, а найбільша – для зразків № 2 та № 3. Введення наповнювачів понад 50 мас.ч. різко погіршує триботехнічні характеристики епоксикомпозитного матеріалу. Велика інтенсивність зношування при цьому пов'язана з

надлишковим вмістом порошку заліза в композиті, що супроводжується інтенсивним руйнуванням поверхневого шару в процесі трибовзаємодії.

Склад епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошками оксидів міді та алюмінію подано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Склад епоксикомпозитних матеріалів

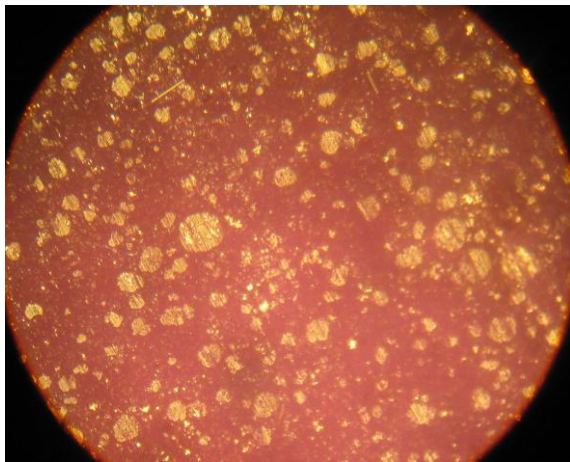
№ зразка	Вміст наповнювачів, мас. ч.			
	CuO	BB	Cu	Al ₂ O ₃
1	50	2	16	30
2	100	2	16	30
3	50	2	16	50
4	100	2	16	50

Введення порошку оксиду алюмінію (зразок № 3, рисунок 3.2) підвищує зносостійкість епоксикомпозитного матеріалу (5,2 мг/км), оскільки дана добавка має вищі механічні характеристики порівняно з порошком заліза і не проявляє схоплювання.

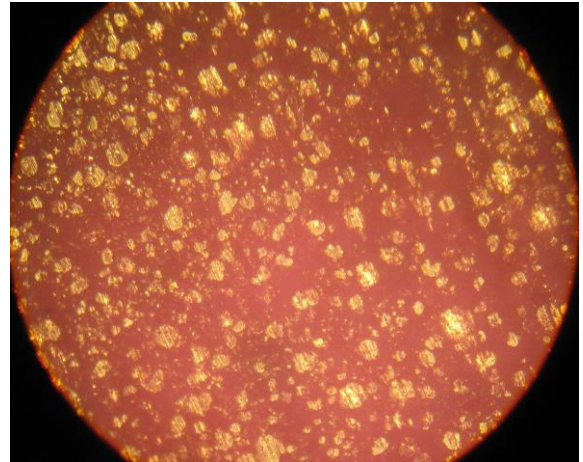
Із збільшенням вмісту оксиду міді до 100 мас. ч. (епоксикомпозит складу № 2) різкої зміни інтенсивності зношування (9,7 мг/км) не відбувається порівняно з епоксикомпозитом складу № 5, що вказує на прийнятність використання даного наповнювача в якості добавки триботехнічного призначення. Введення порошку оксиду алюмінію в кількості 50 мас. ч. (епоксикомпозит складу № 3) призводить до зниження зносостійкості через викришування частинок в процесі трибовзаємодії. Необхідно враховувати, що оксид алюмінію проявляє абразивну дію по відношенню до контртіла, що зумовлює підвищене його зношування. Введення порошку оксиду міді в максимальній кількості (100 мас. ч.) із добавкою 50 мас. ч. оксиду алюмінію (епоксикомпозит складу № 4) призводить до зниження інтенсивності зношування. Стабілізація триботехнічних характеристик під час трибовзаємодії в даному випадку

пов'язана з формуванням тонкої мідної плівки на поверхні композиту в результаті процесу відновлення міді з оксиду і високою адгезійною взаємодією оксиду алюмінію з епоксидною матрицею.

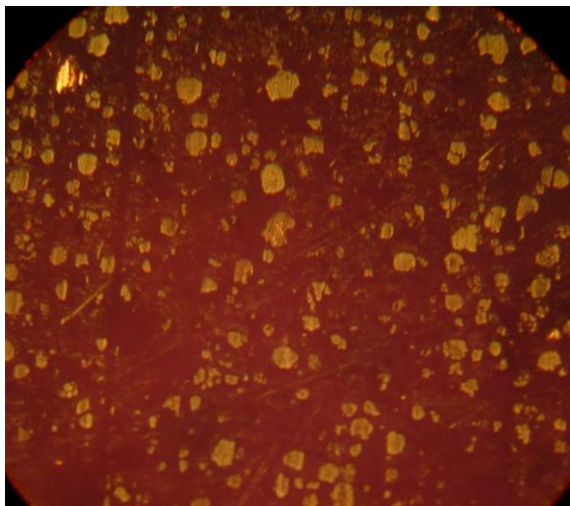
За результатами мікроструктурного аналізу встановлено, що при введенні оксиду міді в структуру спостерігаються дрібні часточки неоднакового розміру, що мають округлу форму та нерівномірно розподіленні по всьому об'єму (рисунок 3.2, а-г).



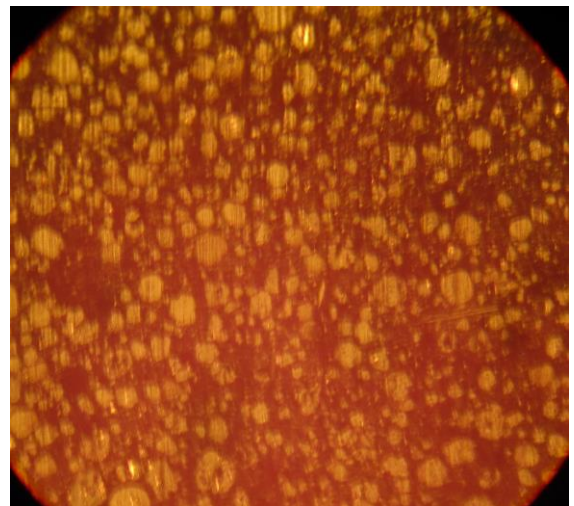
а



б



в



г

Рисунок 3.2 – Мікроструктура трибоповерхні епоксикомпозитів, $\times 250$:

а – № 1 (табл. 3.1);

б – № 2 (табл. 3.1);

в – № 1 (табл. 3.2);

г – № 2 (табл. 3.2)

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для епоксикомпозитних зразків характерне утворення повздовжніх подряпин по всій поверхні контакту в напрямку руху ковзання. Поява таких подряпин вказує на механізм абразивного зношування та мікрорізання при терті.

Для композитів з високим вмістом оксиду міді (рисунок 3.2, б, г) крім подряпин характерним є викришування поверхні, яке проявляється ямками довільної форми із рваними краями, що вказує на підвищення інтенсивності зношування, що вказує на втрату поверхневим шаром міцності в процесі тертя.

Склад епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошками оксидів міді та хрому подано в таблиці 3.3.

Аналогічна ситуація до отриманих попередніх досліджень композитів, наповнених оксидами міді та алюмінію, спостерігається із використанням порошку оксиду хрому, коли із підвищенням вмісту оксиду міді інтенсивність зношування знижується з 11,2 мг/км (зразок складу № 3, рисунок 3.3) до 6,9 мг/км (зразок складу № 1) за рахунок прояву мастильної функції мідної плівки.

Таблиця 3.3 – Склад епоксикомпозитних матеріалів

№ зразка	Вміст наповнювачів, мас ч			
	CuO	BB	Cu	Cr ₂ O ₃
1	50	2	16	30
2	100	2	16	30
3	50	2	16	50
4	100	2	16	50

Мінімальне значення досліджуваної характеристики (6,8 мг/км) зафіксовано із підвищенням вмісту оксиду хрому (зразок складу № 4). Очевидно це пов'язано з високою дисперсністю наповнювача, який рівномірно розподіляється в об'ємі полімерної матриці та не піддається викришуванню в процесі трибо взаємодії.

Однак зростання інтенсивності зношування матеріалу з максимальним вмістом оксиду міді (епоксикомпозит складу № 2) викликане надлишковим вмістом порошку оксиду міді, який недостатньо змочується епоксидним полімером.

Склад епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошками заліза та оксиду алюмінію подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Склад епоксикомпозитних матеріалів

№ зразка	Хімічний склад, мас.ч.			
	Al ₂ O ₃	BB	Cu	Fe
1	50	2	16	100
2	30	2	16	100
3	30	2	16	50
4	50	2	16	50

Експериментально встановлено, що при заданих режимах тертям найменша інтенсивність зношування спостерігається для зразка № 3 (рисунок 3.3), який містить 50 мас. ч. заліза і максимальну кількість оксиду алюмінію 50 мас. ч., найбільша – для зразка № 4.

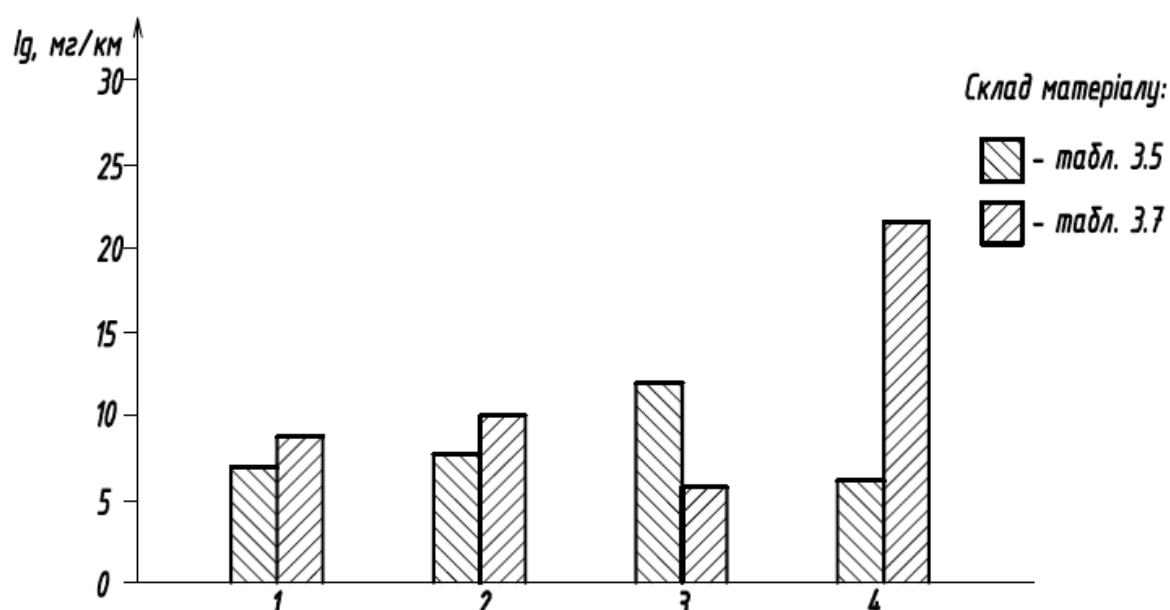


Рисунок 3.3 – Залежність інтенсивності вагового зношування від складу епоксикомпозитів

Введення оксиду алюмінію менше 50 мас. ч. різко погіршує триботехнічні характеристики епоксикомпозитного матеріалу. Велика інтенсивність зношування при цьому пов'язана з малим вмістом оксиду алюмінію в композиті, що супроводжується інтенсивним руйнуванням поверхневого шару в процесі трибозаємодії.

Зображення мікроструктури матеріалу (рисунок 3.4 а-г) на основі епоксидного олігомеру та функціональних наповнювачів характеризують отриману систему з позицій її однорідності, просторової орієнтації структурних елементів, взаємодії та взаємовпливу представлених інгредієнтів, дефектності тощо.

Введення полімерного наповнювача CuO призвело до формування структурних елементів, які мають різні за розмірами включення круглої форми. Для зразків № 1 (рисунок 3.4, а) ці включення рівномірно розподіленні по всьому об'єму зразка, для зразків № 3 (рисунок 3.4, б) - нерівномірно. Аналізуючи отримані зображення поверхонь трибоконтакту, ми побачили механізм зношування мікрорізнанням, для якого характерним є наявність подряпин по всій поверхні контакту.

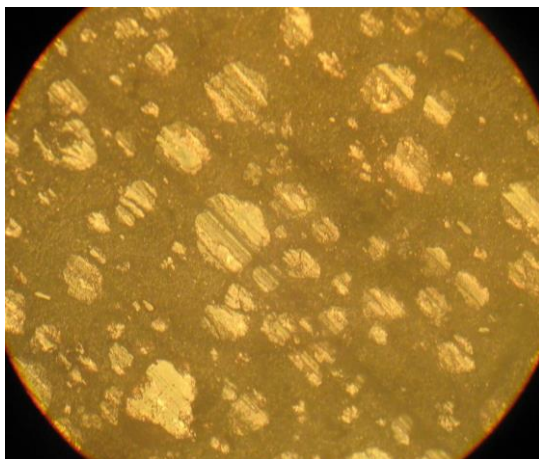
При вмісті порошку CuO в кількості 50 мас.ч. (зразок № 4) при терті спостерігається найменша кількість подряпин що вказує на найменшу інтенсивність зношення зразка. Збільшення порошку оксиду хрому (зразки № 1 та № 2) знижує інтенсивність зношування в процесі тертя.

За результатами мікроструктурного аналізу встановлено, що при введенні заліза в структурі спостерігаються дрібні часточки неоднакового розміру, що мають округлу форму та нерівномірно розподіленні по всьому об'єму зразка (рисунок 3.4, в, г).

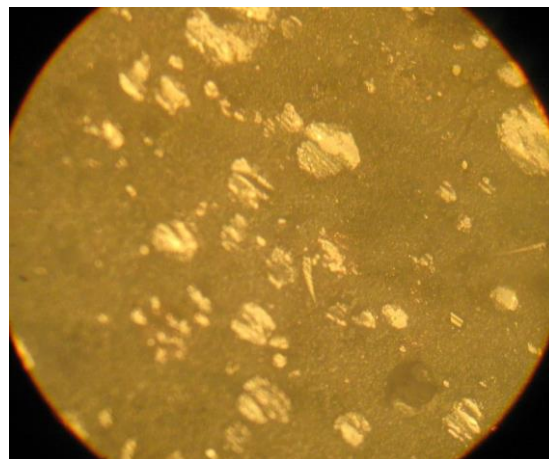
При вмісті компонентів: 50 мас.ч. Fe , 50 мас.ч. Al_2O_3 (зразок № 3), при терті спостерігається найменша кількість подряпин, що вказує на найменшу інтенсивність зношення зразка. На мікроструктурі зразка № 1 (рисунок 3.4, в) помітна наявність часток заліза великих розмірів, також помітні сліди у

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

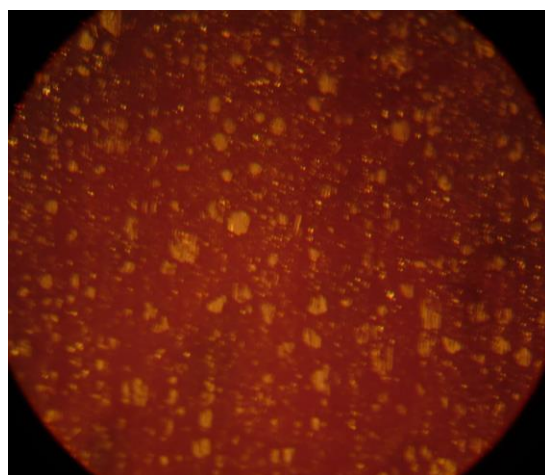
вигляді рисок, в напрямку руху ковзання. На мікроструктурі зразка № 4 (рисунок 3.4, г) чітко помітні подряпини, які свідчать про механізм абразивного зношування



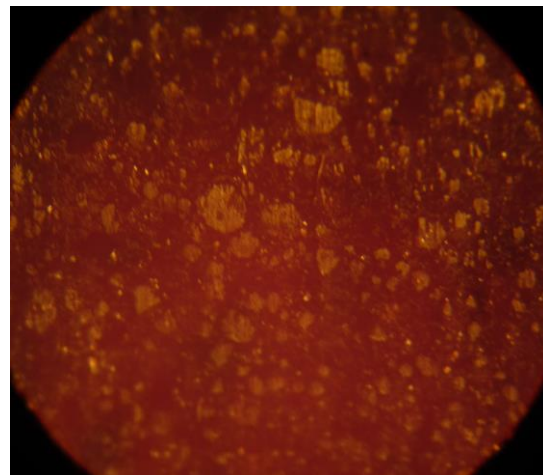
а



б



в



г

Рисунок 3.4 – Мікроструктура поверхні трибоконтакту епоксикомпозитів складу, $\times 250$:

а – зразок № 1 (табл. 3.3);

б – зразок № 3 (табл. 3.3);

в – зразок № 1 (табл. 3.4);

г – зразок № 4 (табл. 3.4)

Склад епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошками оксиду міді та високодисперсної бронзи подано в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 – Склад епоксикомпозитних матеріалів

№ зразка	Вміст наповнювачів, мас. ч.			
	Бронза	ВВ	Cu	CuO
1	8	2	16	100
2	4	2	16	100
3	8	2	16	50
4	4	2	16	50

Експериментально встановлено, що із введенням порошку високодисперсної бронзи найменшу інтенсивність зношування має епоксикомозит за комплексного наповнення 100 мас. ч. CuO та 8 мас. ч. бронзи (зразок № 1, рисунок 3.5).

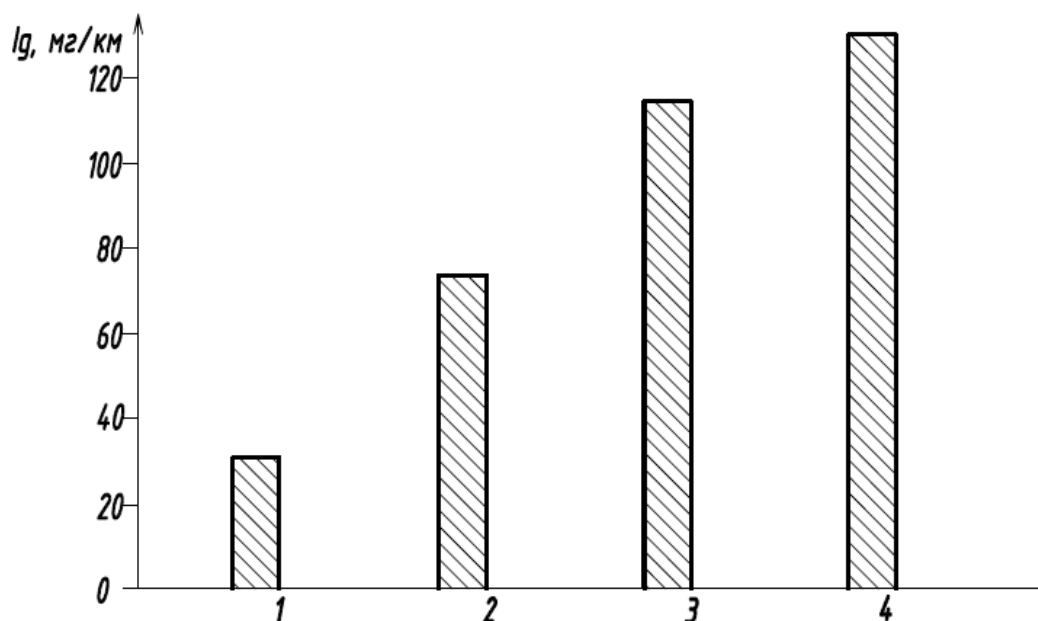
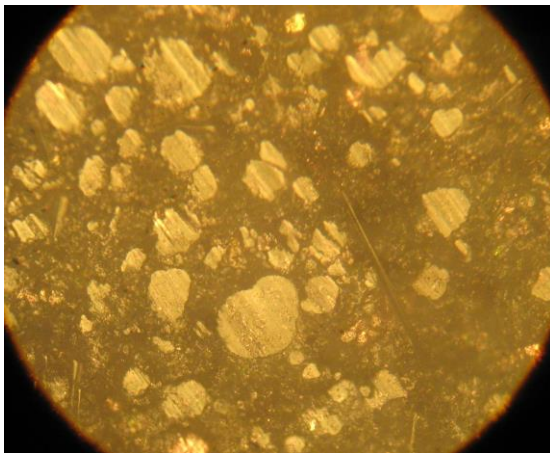


Рисунок 3.5 – Залежність інтенсивності вагового зношування від складу епоксикомпозитів (табл. 2.10)

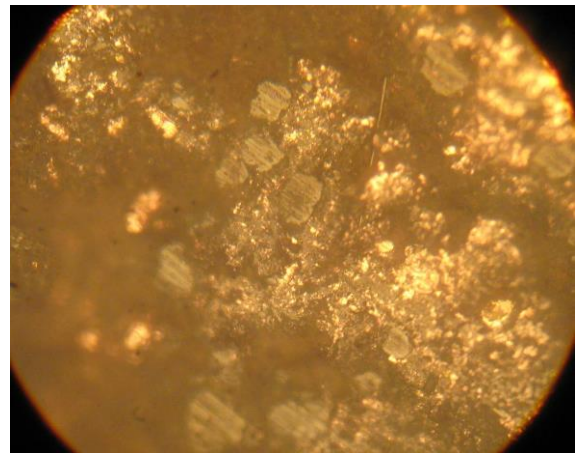
Отримані високі значення інтенсивності вагового зношування за інших кількісних поєднань наповнювачів (епоксикомпозит складів № 2, № 3, № 4) пояснюється недостатнім наповненням епоксиполімерної системи, що не

забезпечує необхідну конструкційну міцність епоксикомпозитів під час фрикційної взаємодії. Тому під час трибовзаємодії епоксикомпозити не витримують прикладеного фрикційного навантаження і відбувається руйнування поверхневих шарів, що призводить до зростання інтенсивності зношування.

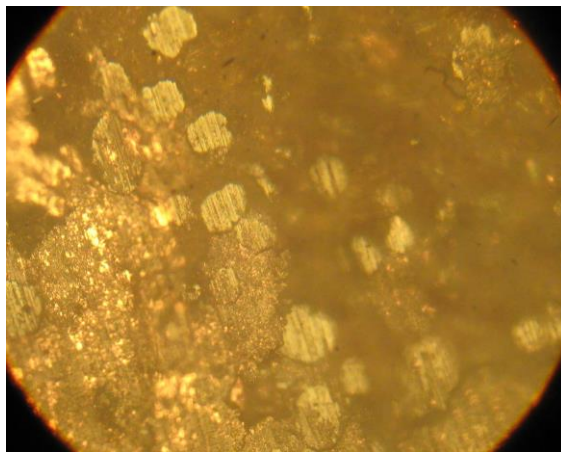
З мікроструктури епоксикомпозитів (рисунок 3.6) видно, що зразок має дефекти, а саме пористість на поверхні у вигляді ямок. Також спостерігаються подряпини, які утворилися в результаті тертя.



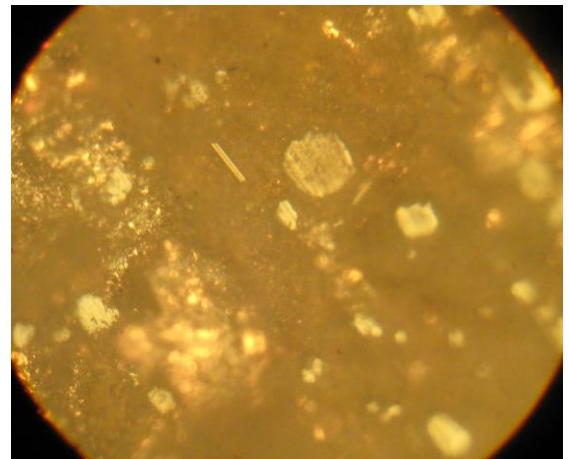
а



б



в



г

Рисунок 3.5 – Мікроструктура поверхні трибоконтакту епоксикомпозитів (таблиця 3.5) , $\times 250$:

а – зразок № 1;

б – зразок № 2;

в – зразок № 3;

г – зразок № 4

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зразок №1 (рисунок 3.5, а) має рівномірні включення бронзи, які мають округлу форму різної величини, він і зазнав найменшого зношування. А зразки № 2, № 3, № 4 мають не рівномірне розташування частинок високодисперсної бронзи.

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

В роботі приведені результати досліджень впливу природи та розміру частинок наповнювача на триботехнічні епоксикомпозиційних матеріалів. Проаналізовано структуру високонаповнених епоксикомполімерів.

Встановлено, що позитивний вплив на триботехнічні характеристики здійснює порошок оксиду міді, при підвищенні вмісту якого (до 100 мас.ч.) відбувається в основному підвищення зносостійкості епоксикомполімерних матеріалів. Це пов'язано із можливістю забезпечувати високу конструкційну міцність матеріалу через достатню твердість частинок порошку та здатність формувати на поверхні контакту мідну плівку в процесі трибозаємодії. Використання порошку заліза є недоцільне, оскільки він проявляє здатність до захоплювання з сталевим контртілом.

Порошки оксидів алюмінію та хрому можливо застосовувати в невеликих кількостях (30...50 мас.ч.) для підвищення конструкційної міцності матеріалу.

					БР 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cao J., Luo Y. Study on tribological properties of epoxy resin composites. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2256, iss. 1. 012014.
2. Study on tribological properties of epoxy resin composites / J. Lu et al. *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 10. P. 1957.
3. Enhancing the tribological performance of epoxy composites under dry sliding conditions through synergetic effects of binary and ternary fillers / J. Lu et al. *Polymer Testing*. 2025. Vol. 143. 108960.
4. Osman, O.A.; Merah, N.; Samad, M.A.; Baig, M.M.A.; Samuel, R.; Alshalan, M.; Alshaarawi, A. Casing Wear and Wear Factors: New Experimental Study and Analysis. *Materials* 2022, 15, 6544.
5. Alabtah, F.G.; Mahdi, E.; Eliyan, F.F. The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review. *Compos. Struct.* 2021, 276, 114595.
6. de Leon, A.C.C.; da Silva, Í.G.M.; Pangilinan, K.D.; Chen, Q.; Caldon, E.B.; Advincula, R.C. High performance polymers for oil and gas applications. *React. Funct. Polym.* **2021**, 162, 104878.
7. Chernova, M.; Kuntsyak, Y.; Ratov, B.; Sudakov, A.; Nuranbayeva, B. Substantiation of the Use of Polymer-Composite Materials, Which Reduce the Influence of Dynamic Friction Forces of Macrostructural Surfaces, When Drilling Wells. *Int. Multidiscip. Sci. GeoConference SGEM 2022*, 22, 417–428.
8. Deleanu, L.; Botan, M.; Georgescu, C. Tribological Behavior of Polymers and Polymer Composites. In *Tribology in Materials and Manufacturing—Wear, Friction and Lubrication*; Patnaik, A., Singh, T., Kukshal, V., Eds.; IntechOpen: London, UK, 2021.
9. Friction and Wear Behavior of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites under Different Conditions / H. S. S. Al-Rashed, M. Alade, H. M. Al-Yami et al. *Polymers*. 2024. Vol. 16, no. 23. Art. 3446.

					БП 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Karasinski, E.N.; Da Luz, M.G.; Lepienski, C.M.; Coelho, L.A.F. Nanostructured coating based on epoxy/metal oxides: Kinetic curing and mechanical properties. *Thermochim. Acta* **2013**, *569*, 167–176.
11. Sinha S. K., Briscoe B. J. *Polymer tribology*. London: Imperial College Press, 2009. 540 p.
12. Briscoe B. J., Stolarski T. A. The friction and wear of polymers. *Tribology International*. 1985. Vol. 18, Iss. 4. P. 211–216.
13. Burris D. L., Sawyer W. G. A low friction and ultra low wear polymer composite. *Wear*. 2006. Vol. 261, Iss. 3-4. P. 410–418.
14. Kabat O. S. Polymer composite materials of tribotechnical purpose. *Chemical & Chemical Technology*. 2021. Vol. 15, No. 1. P. 138–144. DOI: 10.23939/chcht15.01.138.
15. Menezes P. L., Nosonovsky M., Ingole S. P. et al. *Tribology for Scientists and Engineers*. New York : Springer, 2013. 637 p.
16. Moore D. F. *The Friction and Lubrication of Elastomers*. Oxford : Pergamon Press, 1975. 316 p.
17. *Friction and Wear of Polymer Composites* / ed. by K. Friedrich. Amsterdam : Elsevier, 1986. 465 p.
18. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2018. Vol. 1, iss. 1. P. 1–39.
19. Godet M. The third-body approach: A mechanical view of wear. *Wear*. 1984. Vol. 100, Iss. 1-3. P. 437–463.
20. Bahadur S. The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *Wear*. 2000. Vol. 245, Iss. 1-2. P. 92–99.
21. Friedrich K., Schlarb A. K. *Tribology of Polymeric Nanocomposites*. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2013. 714 p.
22. Zhang G., Schlarb A. K. Correlation of the tribological behaviors with the transfer film properties of PEEK (polyetheretherketone) composites. *Wear*. 2009. Vol. 266, Iss. 7-8. P. 714–721.

					БП 5326.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35