

**Міністерство освіти і науки України**

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

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

**Розробка полінаповнених епоксикомпозитів  
триботехнічного призначення / Development of  
polyfilled tribotechnical epoxy composites**

спеціальність 132 Матеріалознавство

освітня програма «Матеріалознавство»

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ПМм – 21  
**Тусь Олександр Васильович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

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

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
к.т.н., доцент  
Гарант освітньої програми:  
Мельничук Микола Дмитрович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2024 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій  
Кафедра матеріалознавства  
Ступінь вищої освіти: магістр  
Галузь знань: 13 Механічна інженерія  
Спеціальність: 132 Матеріалознавство  
Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

Мельничук М.Д.

"02" / вересня 2024 року

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Туся Олександра Васильовича  
(прізвище, ім'я, по батькові)  
1. Тема роботи Розробка полімерових композиційних  
технологічних призначення

керівник роботи к.т.н. доц. Садова Оксана Леонідівна,  
(прізвище, ім'я, по батькові) (науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "23" 10 2024 року № 407/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи  
«03» грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи склад матеріалу, режим ТО

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

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

1 л. ф. А4 - Завдання роботи (слайд 1); 2 л. ф. А4 - Методики досліджень властивостей полімерів (слайди 2, 3); 3 л. ф. А4 - Дослідження властивостей та структури полімерів (слайди 4-6); 3 л. ф. А4 - Дослідження технологічних властивостей та структури полімеркомпозитів (слайди 7-9); 1 л. ф. А4 - Висновки (слайд 10)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Н. контроль	Мисковець С.В., доцент	02.09.2024	03.12.2024

7. Дата видачі завдання « 02 » вересня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Технічне обґрунтування	15.10.2024	Виконано
2	Характеристика досліджувану матеріалів та методики досліджень	05.11.2024	Виконано
3	Експериментальна частина	26.11.2024	Виконано

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ (підпис) Гусь О.В. (прізвище та ініціали)

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

## АНОТАЦІЯ

Тусь О.В. Розробка полінаповнених епоксикомпозитів триботехнічного призначення. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Матеріалознавство» спеціальності 132 Матеріалознавство. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку літератури та додатків.

В даній кваліфікаційній роботі досліджено вплив дисперсних порошків оксидів одно- та двовалентної міді на міцність на стискання епоксикомпозитних матеріалів. Розроблено полінаповнені епоксикомпозитні матеріали триботехнічного призначення. Досліджено їх міцність на стискання та зносостійкість.

Магістерська робота складається з пояснювальної записки та додатків. Пояснювальна записка містить 60 сторінок, 21 рисунок, 1 таблицю та включає список з 40 літературних джерел. Графічна частина складається з 10 листів формату А4, представлених у додатку А.

Ключові слова: епоксикомпозитні матеріали, термічна обробка, міцність на стискання, зносостійкість, структура.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка полінаповнених епоксикомпозитів триботехнічного призначення	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив	Тусь						3	60
Перевірив	Садова							
Н. Контр	Мисковець							
Затв.	Мельничук					ЛНТУ, каф. матеріалознавства гр. ПМм-21		

## ANNOTATION

Tus O.V. Development of polyfilled tribotechnical epoxy composites.  
Manuscript.

Master's qualification work of EP "Materials Science" specialty 132  
Materials Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024.

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

In this qualification work, the effect of dispersed powders of univalent and  
divalent copper oxides on the compressive strength of epoxy composite materials  
was investigated. Poly-filled epoxy composite materials for tribotechnical purposes  
have been developed. Their compressive strength and wear resistance were  
studied.

The master's thesis consists of an explanatory note and appendices. The  
explanatory note contains 60 pages, 21 figures, 1 table and includes a list of 40  
literary sources. The graphic part consists of 10 sheets of A4 format presented in  
Appendix A.

Keywords: epoxy composite materials, heat treatment, compressive strength,  
wear resistance, structure.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	6
1.1. Застосування полімерів для деталей триботехнічного призначення...	6
1.2. Особливості зношування полімерних матеріалів.....	8
1.3. Принципи проектування та випробування полімерних композитів із низьким коефіцієнтом тертя та високою зносостійкістю.....	12
1.4 Висновки та постановка задач досліджень.....	20
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНИХ МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
2.1 Характеристика досліджуваних матеріалів.....	22
2.2 Методи дослідження властивостей та структури епоксикомпозитних матеріалів.....	26
2.3 Методи формування зразків з епоксикомпозитних матеріалів.....	33
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	35
3.1 Дослідження фізико-механічних властивостей епоксикомпозитних матеріалів.....	35
3.2 Дослідження триботехнічних характеристик епоксикомпозитних матеріалів, що містять базальтові волокна різної товщини.....	48
Висновки.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56
ДОДАТКИ	

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудівної галузі не можливий без покращення триботехнічних властивостей матеріалів вузлів тертя, що досягається шляхом модифікації структури та за рахунок створення нових триботехнічних матеріалів. В процесі розробки трибовиробів доцільно використовувати композитні матеріали. Причому важливу роль відіграє вибір зв'язуючого, структура і властивості якого визначають допустимі режими експлуатації матеріалу вцілому. Застосування полімерів дозволяє значно скоротити витрати дорогих матеріалів та знизити енерговитрати, а композити на основі полімерної матриці мають високі антифрикційні властивості і придатні для експлуатації за середніх навантажень та швидкостей ковзання.

Тому перспективними матеріалами для виготовлення підшипників ковзання є полімеркомпозити, зокрема на основі епоксидних смол. Епоксидні смоли широко застосовують для виготовлення деталей вузлів тертя, оскільки мають високу адгезію до металів та інших матеріалів, високу механічну міцність, малу усадку і водопоглинання, вібро- і корозійну стійкість, високі електроізоляційні властивості.

Актуальнішим стає використання самозмащувальних полімеркомпозитних матеріалів у трибовузлах, де небажане або неможливе зовнішнє підведення мастил. Одним із способів реалізації процесу самозмащування є забезпечення фрикційного вибіркового перенесення, тобто генерація в зоні тертя суцільного або фрагментарного прошарку, який відділяє поверхні контакту і активно впливає на характер тертя та зношування. Тому дослідження процесів фрикційного переносу та самоорганізації структури поверхневого шару трибоконтракту у вузлах тертя відкриває новий етап у розвитку триботехніки.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 1

### ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

#### 1.1. Застосування полімерів для деталей триботехнічного призначення

Полімер та його композити знаходять дедалі більше використання для численних промислових застосувань у компонентах ковзання/кочення, таких як підшипники, ролики, ущільнення, шестерні, кулачки, колеса, поршневі кільця, трансмісійні ремені, шліфувальні млини та муфти, де їх самозмащувальні властивості використовуються для уникнути необхідності змащування олією чи жиром із супутніми проблемами забруднення [1]. Однак при наявності контакту між парами ковзання виникає проблема тертя та зносу. Yamaguchi [2], Нооке та ін. [3] і Лоуренс і Столарські [4] повідомили, що коефіцієнт тертя, як правило, можна зменшити, а зносостійкість підвищити шляхом вибору правильних комбінацій матеріалів.

Кілька дослідників [5-7] помітили, що сила тертя та швидкість зношування залежать від шорсткості поверхонь, що труться, відносного руху, типу матеріалу, температури, нормальної сили, ковзання, відносної вологості, змащення та вібрації. Параметри, які визначають трибологічну продуктивність полімеру та його композитів, також включають молекулярну структуру полімеру, обробку та властивості, в'язкопружну поведінку, поверхневу текстуру тощо [1]. Також було проведено низку досліджень, що вивчають вплив тесту умови, геометрія контакту та середовище на тертя та поведінку зношування полімерів та композитів. Ватанабе [8], Танака [9] і Бахадур і Табор [10] повідомили, що на трибологічну поведінку поліаміду, поліетилену високої щільності (HDPE) та їх композитів сильно впливають нормальне навантаження, швидкість ковзання та температура. Піхтілі та Тосун [11, 12] показали, що прикладене навантаження та швидкість ковзання відіграють значну роль у поведінці

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

полімерів і композитів при зношуванні. Вони також показали, що прикладене навантаження більше впливає на знос композитів, ніж швидкість. Кілька авторів помітили, що коефіцієнт тертя полімерів та їх композитів, що стираються об метали, зменшується зі збільшенням навантаження, хоча деякі інші дослідники мають різні. Стюарт та інші дослідники показали, що значення коефіцієнта тертя зростає зі збільшенням навантаження. Коефіцієнт тертя та значення питомої швидкості зношування для різних комбінацій полімеру та його композиту були отримані та порівняні. Для всіх комбінацій матеріалів спостерігалось, що коефіцієнт тертя зменшується лінійно зі збільшенням значень прикладеного тиску. Унал та ін. повідомили, що прикладене навантаження має більший вплив на знос полімеру та його композиту, ніж швидкість ковзання [1].

Було вивчено поведінку армованого скловолокном поліефірного композиту на тертя та зношування, і результати показали, що загалом на тертя та зношування сильно впливають усі параметри випробування, такі як прикладене навантаження, швидкість ковзання, відстань ковзання та орієнтація волокон. Крім того, було виявлено, що прикладене нормальне навантаження, швидкість ковзання та орієнтація волокон мають більш виражений вплив на швидкість зносу, ніж відстань ковзання. Ван і Лі [13] помітили, що швидкість ковзання має більш значний вплив на знос ковзання порівняно з застосованим навантаженням та зміни швидкості зносу з часом роботи можна розрізнити за трьома чіткими періодами. Ці періоди є періодом припрацювання, періодом стаціонарного стану та періодом сильного зношування, відповідно. Tsukizoe і Ohmae [14] показали, що армування волокном або наповнювачем значно покращує трибологічну поведінку полімерного матеріалу, але це не обов'язково вірно для всіх випадків. Suresha і ін. [15] показали, що існує сильна взаємозалежність між коефіцієнтом тертя та втратою на знос по відношенню до прикладених навантажень для контакту сталь-композит.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Процес тертя з вібрацією є важливим практичним явищем, оскільки вплив вібрації може спричинити значні зміни в цьому процесі. Відомо, що вібрація і тертя залежать один від одного. Тертя породжує вібрацію в різних формах, тоді як вібрація по черзі впливає на тертя. Деякі пояснення даються для того, щоб виправдати зменшення коефіцієнта тертя в умовах вібрації, хоча деякі дослідники мають інші погляди. Skare і Stahl [16] стверджували, що середня сила тертя як збільшується, так і зменшується залежно від параметрів вібрації.

## 1.2. Особливості зношування полімерних матеріалів

Композитні матеріали частіше використовуються як конструкційні компоненти, необхідні для підтримки навантажень тертя та зносу під час експлуатації. Багато з цих композитів складаються з коротких волокон, вбудованих у металеву, полімерну або керамічну матрицю. Інші мають структуру, армовану безперервними волокнами, розташовану у формі різноспрямованих ламінатів або тканих матеріалів [17].

Тертя та зношування полімерів та їх композитів створюють додаткові труднощі, оскільки на полімери просто впливають робочі умови та середовище, що ковзає. Розбіжності між тертям у полімерах і тертям металів є результатом змін у пружній і пластичній поведінці металевих матеріалів і в'язкопружних характеристик полімерних матеріалів. Очікується, що в порівнянні з металами полімери легко піддаються пружній деформації при контакті. Механізми зношування описані через широкі категорії: абразивні, адгезивні, поверхнева втома та інші. Впливи, що контролюють тертя та зношування полімерів, широко аргументовані. Існують різні механізми, що регулюють трибологічну поведінку полімеру, що рухається на металевих трибосистемах, включаючи плівку для перенесення, режими зношування та  $pv$ -обмеження [18].

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Самозмащувальні полімерні композитні покриття з адаптованими трибологічними та механічними властивостями широко застосовуються на механічних частинах для зменшення тертя та зносу, що економить енергію та покращує загальну продуктивність для таких застосувань, як деталі аерокосмічних супутників, вали, шестерні та втулки. Додавання функціональних наповнювачів може подолати обмеження однополімерних покриттів і продовжити термін служби покриттів, забезпечуючи поєднання низького тертя, високої зносостійкості, високої несучої навантаження, високої термостійкості та високої адгезії [19].

Завдяки високому відношенню міцності до ваги, чудовій гнучкості конструкції, низькій вартості виробництва та легкості обробки полімери відіграють важливу роль у різноманітних галузях промисловості, включаючи автомобільну, аерокосмічну та інші будівельні галузі. Крім того, завдяки чудовій хімічній стійкості полімерні матеріали також є хорошими ізоляторами, що означає, що вони стають все більш популярними в електроніці, трубопровідній промисловості та будівництві резервуарів. Залежно від нагрівання полімери можна розділити на дві групи: термопласти або полімери, що підлягають переробці, і термореактивні полімери. Доступно багато типів термопластичних полімерів, але поліетилен є найбільш використовуваним, оскільки його можна формувати та використовувати повторно неодноразово. Коли термореактивні полімери піддаються дії високих температур, навіть нижче температури плавлення, їх молекулярна структура незворотно змінюється. Навпаки, термопластичні полімери розм'якшуються під впливом підвищення температури без пошкодження їхньої молекулярної структури. Таким чином, згадані фактори заохочують використання термопластів для заміни металевих компонентів у різних галузях техніки.

Як правило, для сучасного застосування полімерів у такому широкому діапазоні областей, як покриття, тертя, зношування тощо, необхідні особливі

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

властивості поверхні або з'єднання з точки зору міцності, твердості, гідрофільності, зносостійкості, шорсткості та змащувальної здатності. Термопластичні полімери зазвичай не мають бажаних характеристик поверхні для згаданих застосувань. Через цю дилему зростає інтерес до застосування технології інженерії поверхні для зміни складу поверхні та морфології полімерних матеріалів для покращення механічних властивостей та зносостійкості без зміни об'ємних властивостей основного матеріалу. Таким чином, композити з полімерною матрицею (РМС) виготовляються шляхом додавання відповідних металевих, керамічних або полімерних армуючих частинок до поверхні або області з'єднання полімерної матриці. Полімерні композити мають багато переваг перед монолітними (неармованими) полімерами, такими як більш висока жорсткість, співвідношення міцності до ваги, модуль пружності, твердість, ударна міцність і краща стійкість до зношування порівняно з неармованими полімерними матеріалами. Ці унікальні властивості композитів дозволяють інженерам створювати проекти для різних компонентів і для різних застосувань, чого неможливо досягти з традиційними матеріалами.

Тип і розмір частинок наповнювача, розподіл і об'ємний відсоток частинок, а також методи, що використовуються для виробництва композитів, відіграють значну роль у визначенні механічних і фізичних властивостей композитів з армованих матеріалів [20].

Полімерно-матричні композити широко використовуються в системах автомобільного, повітряного та залізничного транспорту як гальмівні накладки. Вони являють собою змінний (розшарований) елемент у парі тертя і зазвичай притираються до перлітно-сірого чавуну, сталі або алюмінієвого матричного композиційного матеріалу. Значні зміни в рецептурі облицювальних матеріалів, які використовуються в США, Європі та Японії за останнє десятиліття відображають вимоги безпечнішого та швидшого транспортування, а також екологічні потреби. Однак взаємозв'язок між

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складом і продуктивністю не є зрозумілим, і складні проблеми, пов'язані з нестабільністю коефіцієнта тертя, надмірним зносом, вібрацією та шумом, супроводжують процеси тертя композиційних матеріалів з полімерною матрицею. Процес тертя завжди супроводжується утворенням фрикційного сміття, яке прилипає до пари тертя. У результаті на тертьових поверхнях утворюється характерний шар тертя, який визначає продуктивність. Через складність явищ тертя в полімерно-матричних композитах механізми утворення фрикційного шару до кінця не вивчені. Ця стаття зосереджена на характеристиці формування фрикційного шару та кореляції властивостей фрикційного шару з характеристиками нещодавно розробленого сімейства полімерних матричних композитів. Механо-хімічна взаємодія, що відбувається в процесі тертя, порівнюється з ситуацією «без тертя», коли до того самого матеріалу застосовуються «еквівалентна» видима температура та навантаження на стиснення відповідно. Фазова стабільність і кінетика взаємодій для умов навантаження «тертя» і «еквівалентне без тертя» істотно відрізняються [21].

Тертя та знос є однією з трьох найпоширеніших промислових проблем, які призводять до заміни компонентів і вузлів у машинобудуванні; дві інші - це втома та корозія. Hutchings і Tewari et al. повідомили, що тертя між полімерами можна пояснити двома основними механізмами, деформацією та адгезією. Механізм деформації передбачає повне розсіювання енергії в зоні контакту. Компонент адгезії відповідає за тертя полімеру і є результатом розриву слабких сил зв'язку між полімерними ланцюгами в об'ємі матеріалу.

Багато вчених вивчали вплив умов випробування, геометрії контакту та навколишнього середовища на поведінку полімерів при зношуванні та терті. Багато дослідників повідомляють, що загалом можна зменшити коефіцієнт тертя та підвищити зносостійкість при ковзанні полімеру по сталі шляхом вибору правильних комбінацій матеріалів. Деякі дослідники спостерігали, що коефіцієнт тертя полімерів, що труться об метали, зменшується зі

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшенням навантаження, тоді як показали, що його значення зростає зі збільшенням навантаження. Ludema і Tabor показали хорошу кореляцію між коефіцієнтом тертя кочення та коефіцієнтом втрат на демпфування полімерних матеріалів у функції температури випробування. Watanabe, Tanaka і Bahadur і Tabor повідомили про трибологічну поведінку поліаміду, HDPE та їх композитів. Вони повідомили, що на їх зносостійкість і коефіцієнт тертя сильно впливають нормальне навантаження, швидкість ковзання і температура. Ни повідомив, що коефіцієнт тертя ПОМ та його композитів при терті об метали та нейлоновий полімер МС зменшується зі збільшенням навантаження [22, 23].

### 1.3. Принципи проектування та випробування полімерних композитів із низьким коефіцієнтом тертя та високою зносостійкістю

Велика увага приділялася вивченню контактної трибології метал/метал і метал/кераміка. Проте полімерні компоненти все частіше замінюють метали в конструкціях, корпусах, згинах і підшипниках, особливо в автомобільних системах зниження ваги. Вони легко формуються шляхом лиття під тиском, лиття або механічної обробки з мінімальними відходами, щоб отримати компоненти, які легші, дешевші, стійкі до корозії, тихіші та не потребують обслуговування. Таким чином, зараз необхідно приділити більше уваги трибоконтактам метал/полімер і полімер/полімер.

Трибологія полімерів, як їх механізми тертя та зношування, є більш складною, ніж для металу, і менш вивчена. У той час як існують добре встановлені «закони тертя» для трибології металевих і керамічних контактів у відносному русі, контакти полімер/метал, як правило, не дотримуються цих законів. Для цього є кілька причин, у тому числі відносна м'якість полімерів порівняно з металами, їх значно нижча теплопровідність, пов'язана з виділенням тепла в контактах, а також значно нижчі точки плавлення. Якщо

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ці проблеми не враховані, застосування полімерів для компонентів кочення, ковзання або підшипників буде «проблематичним». У більшості з наступних обговорюватимуться лише трибо-застосування, у яких використовується гладкий металевий аналог. Це означає, що висновки, зроблені за результатами, не можуть бути автоматично перенесені на більш суворі умови зношування, оскільки вони, наприклад, відбуваються при сильному стиранні або ерозії. Тим не менш, асортимент доступних полімерів, придатних для різноманітних умов експлуатації міцності, діапазону робочих температур, стійкості до погіршення навколишнього середовища, тертя ковзання та зносу, величезний. Такі полімери можна схематично розмістити в піраміду на основі їхніх фізичних властивостей, робочих температурних діапазонів і вартості.

Товарні полімери PS (полістирол), PVC (полівінілхлорид), PP (поліпропілен) і PE (різні форми поліетилену) є відносно слабкими матеріалами з міцністю на розрив  $\sigma_B$  близько 20 МПа. Вони мають великий об'єм (Мт/Па), обмежену температуру (робочі діапазони до 100 °С) і дешеві (<1,13 євро/кг) матеріали, які виробляються на міжнародному рівні.

Полімери «середнього класу», які часто називають «технічними полімерами», як-от зазвичай ПА (поліаміди) та ПЕТ/ПБТ (поліефіри), мають вищу міцність порядку 75 МПа з безперервною робочою температурою до 110/120 °С і діапазон вартості до 11,3 €/кг.

Полімери «високої ефективності», як правило, виробляються в розвинених країнах і мають вищий рівень фізичних властивостей, вищі точки плавлення та дуже гарну стійкість до розкладання. Вони коштують до 113 євро/кг. Вони об'єднуються в «надвисокоефективні полімери» з дуже високими температурами плавлення, вищою міцністю, як-от поліараміди (наприклад, кевлар) і сімейство ПАЕК, яке включає поліефіретеркетон або «ПЕЕК» з  $\sigma_B$  до 100 МПа, плавлення температура близько 343 °С і робочий діапазон температур до 250 °С, вироблені спеціалізованими компаніями, з цінами в районі 113 €/кг і вище. До цієї групи також входить полібензімідазол

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(PBI), термопласт із найвищою термостійкістю, з температурою склування 427 °C [24-26].

Тверді наповнювачі зазвичай збільшують коефіцієнт тертя. Однак швидкість зношування залежить від розміру частинок і твердості, а отже, від загальної природи наповнювача. І коефіцієнти тертя, і швидкості зношування для наповненого полімеру необхідно визначати в реальних робочих умовах навантаження та швидкості, оскільки в деяких випадках вони можуть бути протилежними, наприклад, для РЕЕК:

- $\mu$  для ненаповненого РЕЕК,  $\mu = 0,18$ ;
- РЕЕК + 30% вуглецевих волокон,  $\mu = 0,22$ , але зі зниженою швидкістю зношування;
- тоді як РЕЕК + 30% скловолокна,  $\mu = 0,31$ , але підвищена швидкість зношування.

Основними методами зменшення полімерного тертя є:

- включення твердих (м'яких) наповнювачів;
- зовнішня змазка;
- власне (внутрішнє) змащення.

Включення твердих м'яких наповнювачів у твердіший полімер зменшує коефіцієнти тертя за рахунок використання твердішого полімеру як матриці та м'якшого наповнювача/полімеру як мастила, утворюючи плівку для передачі на межі між наповненим полімером і сталевією поверхнею. Хорошим прикладом є спечені композити РЕЕК/PTFE, співвідношення модулів Юнга,  $E_{РЕЕК} / E_{PTFE}$ , становить 8:1, що дає коефіцієнт тертя 0,14, більше ніж  $\mu$  для PTFE 0,10, але менше ніж  $\mu$  для РЕЕК при 0,18, де в даному випадку:

Для підвищення жорсткості та міцності полімерної системи використовуються безперервні або короткі арамідні, вуглецеві або скляні волокна. Оскільки тертя між двома сполученими поверхнями під час контакту ковзання генерує тепло, яке, у свою чергу, підвищує температуру в

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зоні контакту (пов'язане зі зниженням механічних властивостей полімеру), з точки зору матриці, полімер, стійкий до високих температур, повинен бути використовується. Крім того, трибологічні властивості полімерів і полімерних композитів можна змінити шляхом використання інших теплопровідних наповнювачів, включаючи нанорозмірні частинки або вуглецеві нанотрубки. Однак часто оптимального ефекту для зниження як коефіцієнта тертя, так і інтенсивності зношування можна досягти лише за умови використання нанонаповнювачів у поєднанні з деякими з традиційних трибонаповнювачів, згаданих вище. Зрештою, це призводить до складної мікроструктури композитних матеріалів.

Синергічні ефекти наночастинок і традиційних наповнювачів під час зношування ковзанням різних композитів на полімерній основі. Коли розмір частинок зменшується до субмікронного або нанорозміру, характеристики зношування композитів можуть значно відрізнятися від систем, наповнених мікрочастинками. Однією з причин є те, що абразивність твердих наночастинок помітно зменшується в результаті зменшення кута в порівнянні з мікрочастинками. Це може мати ще одну перевагу, а саме те, що ці нанонаповнювачі, коли вони вільно переміщуються в області контакту між сполученими поверхнями, можуть діяти як тримачі відстані та як нанополірувальні агенти, які згладжують топографії та зменшують коефіцієнт тертя. Це, у свою чергу, також може призвести до зниження температури контактної області. Крім того, можна очікувати, що більш висока теплопровідність керамічних наночастинок, порівняно з полімерною матрицею, також збільшує теплопровідність композиту, що може сприяти зменшенню виділення тепла в зоні контакту ковзання. Загалом менші частинки, здається, краще сприяють покращенню трибологічних властивостей в умовах ковзання, ніж більші частинки. Один із прикладів цього зв'язку був виявлений Xue et al. Вони виявили, що різні види частинок SiC, тобто частинки нано-, мікронного та ниткоподібного типу, можуть

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшити тертя та знос, якщо ввести їх у матрицю РЕЕК із постійним вмістом наповнювача, наприклад 10 мас.% (біля 4 об. %). Однак використання наночастинок призвело до найефективнішого зменшення, що пояснюється їх сприятливим впливом на формування тонкої однорідної та безперервної плівки для перенесення. Wang та ін. досліджували вплив розміру наночастинок  $ZrO_2$ , що варіюється від 10 нм до 100 нм. Ефективне зменшення зносу наповненого РЕЕК наночастинками спостерігалось лише тоді, коли розмір частинок був менше 15 нм. Xing та ін. нещодавно порівнював властивості зношування сферичної епоксидної смоли, наповненої частинками, розмір частинок якої коливався від 120 до 510 нм. Вони також підтвердили подібну тенденцію, а саме те, що чим менші частинки використовувалися як наповнювачі, тим кращою була зносостійкість композитів. Зв'язок між розміром наночастинок і розміром нерівності також вивчався Bahadur et al. Стосовно показників зносу полістиролу, наповненого різними видами та кількістю наночастинок, було виявлено, що 2 об.%  $Al_2O_3$  призводять до оптимального зниження швидкості зношування композитів, коли шорсткість поверхні сталевого аналога була в діапазоні від  $Ra = 60$  до 100 нм. Однак при шорсткості поверхні 27 нм, тобто менше розміру частинок (в середньому 33 нм), будь-яка кількість наночастинок збільшує швидкість зношування.

Хоча в більшості цитованих вище досліджень морфологія дисперсій наночастинок не була детально описана, повинно бути зрозуміло, що високий вміст наноаповнювача призводить до зниження зносостійкості, що може бути пов'язано з тенденцією до агломерації частинок. Загалом необхідно, щоб наночастинки були рівномірно дисперговані, а не агломеровані, щоб отримати хороший профіль властивостей. Агломерація вважається загальною проблемою полімерних нанокомпозитів, особливо при більш високому вмісті наноаповнювача. До теперішнього часу різні неорганічні наночастинки, наприклад  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $ZnO$ ,  $CuO$ ,  $SiC$ ,  $ZrO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $SiO_2$  і  $CaCO_3$ , були

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

включені в PPS, РЕЕК, епоксидна смола і РТФЕ матриць, щоб покращити їх зносостійкість. У більшості випадків можна визначити оптимальний вміст наночастинок наповнювача, при якому спостерігається найвища зносостійкість цих полімерів. Оптимальний вміст наповнювача дрібних частинок був переважно в діапазоні від 1 до 6 об.%. Однак у порівнянні з мікронаповнювачами, такими як короткі волокна, покращення зносостійкості, отримане завдяки використанню наночастинок, є скромним. З іншого боку, критичний об'ємний вміст нанонаповнювачів значно нижчий, ніж у мікронаповнювачів, і, отже, нанокompозити можуть покращувати зносостійкість, зберігаючи або навіть покращуючи інші механічні властивості полімерної матриці [27-29].

Для досягнення високої зносостійкості полімерних композитів традиційним шляхом є інтеграція різних функціональних наповнювачів, включаючи енергопоглинаючі наповнювачі. Однак на сьогодні мало зусиль було спрямовано на розробку гібридних композитів шляхом поєднання неорганічних наночастинок із традиційними наповнювачами. Ветцель та ін. [30] виявили, що комбінація нано- $Al_2O_3$  (13 нм) і мікро- $CaSiO_3$  (4...15 мкм) викликала певний синергічний ефект і покращила як зносостійкість, так і жорсткість епоксидної смоли. Бахадур та ін. [31] повідомили про синергетичну дію на трибологічну поведінку поліфеніленсульфідних композитів, виготовлених з нано- $CuO$  та коротких волокон. Найнижчу стабільну швидкість зношування було отримано з гібридними композитами, що містять як нанорозмірні частинки  $CuO$ , так і армуючі волокна. Чжан та ін. [32] вказав, що введення наночастинок з оптимізованим вмістом може додатково підвищити зносостійкість композитів з вуглецевої тканини. Сприятливий вплив додаткових наночастинок на зносостійкість композитів може бути спричинений підвищеною механічною міцністю тканинних композитів і кращою міцністю зв'язування плівки для перенесення, створеної на металевих поверхнях. Таким чином, очевидно, що введення

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нанорозмірних неорганічних частинок разом із традиційними трибонаповнювачами в полімер може забезпечити синергію з точки зору покращеної зносостійкості.

Щоб повністю сприяти ефекту наночастинок, систематичні дослідження їх комбінованого ефекту з традиційними наповнювачами нещодавно були проведені Zhang et al. [24, 33]. В якості матриць були обрані різні полімери, наприклад епоксидна смола, поліамід 66 (PA 66) і поліефірїмід (PEI). Коротке вуглецеве волокно (SCF) і два твердих мастила, графіт і PTFE, використовувалися як традиційні трибонаповнювачі. Середній діаметр SCF становив близько 14,5 мкм із середньою довжиною волокна близько 90 мкм. Пластівці графіту та порошки PTFE мали близько 20 мкм та близько 4 мкм відповідно. В якості додаткових наповнювачів застосовували нанорозмірні неорганічні частинки  $TiO_2$ . Середній діаметр цих частинок становив 300 нм.

Трибологічні характеристики серії композитів на основі епоксидної смоли були попередньо досліджені при тиску 1 МПа та швидкості ковзання 1 м/с. Результати демонструють синергетичний ефект частинок нано- $TiO_2$  і традиційного трибонаповнювача на зносостійкість композитів на основі епоксидної смоли. Швидкість зношування гібридних композитів, наповнених як наночастинками, так і традиційними наповнювачами, була значно нижчою, ніж значення, лінійно інтерпольовані між значеннями композитів, наповнених лише нано- $TiO_2$  або традиційними наповнювачами. Крім того, додавання наночастинок може ще більше знизити коефіцієнт тертя та швидкість зношування епоксидних композитів, наповнених традиційними наповнювачами, особливо в екстремальних умовах ковзання [24].

В автомобільній промисловості існує багато застосувань, де потрібні гібридні втулки, щоб гарантувати функціонування різних компонентів автомобіля протягом тривалого часу. Компоненти включають двигуни склоочисників, амортизатори, шарніри рульового вала, дверні петлі (рисунки 1.1).

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

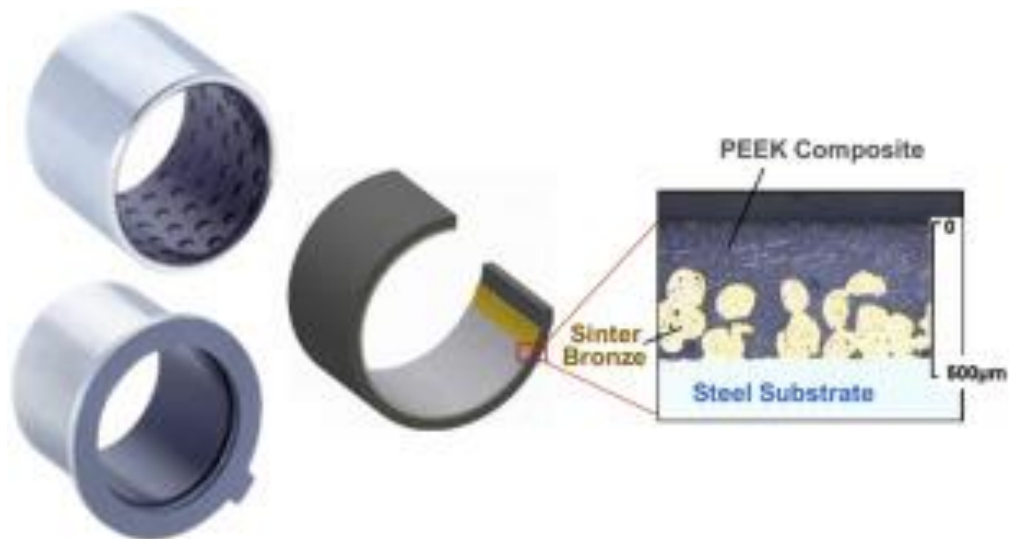


Рисунок 1.1 – Принципова структура гібридних втулок (у центрі праворуч) і реальний вигляд їх використання в різних автомобільних місцях (ліворуч)

Завдяки введенню пластикового матеріалу в пористий бронзовий агломерований шар, нанесений на сталеву задню частину (гібридна структура), виходить матриця з низьким тертям, яка поєднує сприятливі трибологічні властивості з властивостями несучої навантаження та теплопровідністю металів. Використання твердих мастильних матеріалів у пластиковій матриці утворює плівку між поверхнями ковзання і робить можливим використання таких підшипників у додатках без мастила та консистентного мастила. Це також пояснює низьким рівнем шуму при постійних швидкостях і низьким коефіцієнтом тертя протягом усього терміну служби компонента.

Провідні полімери – це новий тип органічного матеріалу, який пропонує величезний потенціал для застосування в області мікросистем. Наприклад, тонкі плівки (товщина 0,1...10 мкм) полі(піролу)/декансульфонату мають як низький коефіцієнт тертя (приблизно 0,1), так і швидкість зношування (приблизно 1 нм см<sup>-1</sup>), які подібні до

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значень, що спостерігаються для PTFE, але мають відносно високі електро- та теплопровідність. Також електропровідні полімери можна легко наносити електроосадженим способом на плоскі або вигнуті кремнієві пластини або інші мікромеханічні структури, такі як мікро-ковзання, мікро-двигуни або мікро-турбіни, щоб отримати матеріал підшипника з кращими характеристиками, ніж стандартні мікротехнічні матеріали (наприклад, полі-Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) і краще оброблюваність, ніж PTFE [24]. Однак великим недоліком є те, що ці матеріали можна виготовляти лише у вигляді тонких плівок .

#### 1.4. Висновки та постановка завдань досліджень

Матеріали на основі полімерів стали популярними в широкому та різноманітному діапазоні трибологічних застосувань завдяки таким важливим характеристикам, як здатність до самозмащення, прийнятна зносостійкість, низька поведінка при терті та хороша стійкість до корозії. Проте значна кількість питань залишається невирішеною як щодо фундаментального розуміння, так і щодо питань інженерного проектування. Однією з причин є величезна кількість різних полімерів і композитів на основі полімерів, які використовуються, а також різноманітність застосувань і труднощі з дотриманням керівних трибомеханізмів.

Додавання волокон і наповнювачів, у тому числі наночастинок, до термореактивних або термопластичних матричних матеріалів сприяє зміцненню поверхні, що призведе до покращення трибологічної поведінки полімерів. Це особливо вірно для умов навантаження адгезивного зносу при сухому контакті. Єдина проблема полягає в тому, що додавання неорганічних наповнювачів до полімерів зазвичай знижує їх плинність і, отже, технологічність . Оскільки цей факт контролює кількість наповнювачів,

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

які можна додавати одночасно, це особливо важливо, якщо ви маєте справу з термопластами, що формуються під тиском, для цілей трибології.

У цьому оглядовому документі обговорюються деякі проблеми, пов'язані з використанням і тестуванням об'ємних і тонкоплівкових трибокомпонентів на основі полімерів, таких як повзун, втулки, сепаратори кулькових підшипників, електропровідний підшипник, шестерні, та покриття. Увага приділяється не тільки основним параметрам впливу, таким як контактний тиск, швидкість ковзання, умови навколишнього середовища, включаючи високі і дуже низькі температури, а також відповідний матеріал. Також нові аспекти виробництва, наприклад, 3D-друк, а також передові методи для кращого самозмащування та самовідновлення трибоматеріалів шляхом включення мікрокапсул розглядаються.

Очевидно, що разом із широким застосуванням полімерних композитів для трибологічних цілей, краще розуміння полімерної трибології стає все більш важливим. І навпаки, краще розуміння полімерної трибології сприятиме трибологічному застосуванню цих матеріалів.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

## РОЗДІЛ 2

### ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНИХ МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Характеристика досліджуваних матеріалів

Як вихідний матеріал використано епоксиду смолу марки ЕД-20, що є високов'язкою прозорою рідиною. «Смола марки ЕД-20 твердне при нормальній або підвищених температурах без зовнішнього тиску, що дозволяє працювати без пресового і термічного обладнання. Можливість тверднення цієї смоли без виділення побічних продуктів забезпечує незначну пористість і високу щільність матеріалів» [34].

Епоксидна смола є термореактивним полімер, що широко використовується в різних галузях техніки завдяки своїм задовільним властивостям. Основні характеристики епоксидної смоли:

- висока адгезійна міцність (епоксидні смоли мають дуже хорошу адгезію до різних матеріалів, таких як метали, скло, деревина, пластмаси, бетон та інші поверхні);
- хімічна стійкість (епоксидні смоли стійкі до багатьох хімічних речовин, таких як кислоти, луги, розчинники, масла та інші агресивні середовища);
- механічна міцність (епоксидні смоли мають високу міцність на розтягування, стиснення та вигин, що робить їх придатними для використання в конструкціях, де важлива механічна стійкість);
- термостійкість (епоксидні смоли здатні витримувати високі температури, не втрачаючи своїх властивостей, що дозволяє використовувати їх у виготовленні високотемпературних матеріалів);
- електрична ізоляція (епоксидні смоли є хорошими ізоляторами, що дозволяє їх використовувати в електроніці та електротехніці);

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– технологічність (завдяки своїй текучості у рідкому стані епоксидні смоли легко піддаються формуванню, тому використовуються для виготовлення деталей будь-якої складності);

– довговічність і стійкість до старіння (епоксидні смоли мають відмінну довговічність, не втрачаючи своїх характеристик навіть під впливом навколишнього середовища);

– простота обробки (епоксидна смола легко піддається обробці особливо композитних матеріалів разом з армуючими волокнами);

– низька усадка при затвердінні (після полімеризації епоксидна смола має мінімальну усадку, що дозволяє отримати високоточні деталі).

Ці властивості роблять епоксидну смолу незамінною в багатьох сферах, від будівництва до електроніки та виробництва авіаційних компонентів [34].

«Для тверднення епоксидних композицій застосовували поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70). Він призначений для структурування епоксидних смол при кімнатній та знижених температурах в умовах підвищеної вологості. На зовнішній вигляд – це рідина від світло-жовтого до темно-бурого кольору без механічних включень» [35].

Поліетиленполіамін (ПЕПА) – це синтетичний полімер, який належить до класу аміносполук і широко застосовується в хімічній та фармацевтичній промисловості. Його властивості залежать від ступеня полімеризації та молекулярної маси. Поліетиленполіамін складається з полімерних ланцюгів, у яких чергуються етингідрогенізовані групи (-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-) і аміногрупи (-NH<sub>2</sub>). Це надає йому високі хімічні реакційні властивості, зокрема здатність до утворення зв'язків з іншими молекулами.

ПЕПА є водорозчинним, завдяки своїм аміногрупам, які можуть утворювати водневі зв'язки з молекулами води. Це робить його зручним для використання в водних розчинах. Завдяки наявності аміногруп, поліетиленполіамін може діяти як основа (базова сполука), реагувати з кислотами і утворювати солі. Це робить його ефективним агентом для

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нейтралізації кислот або використання в якості стабілізаторів у хімічних процесах. Молекулярна маса ПЕПА може варіюватися в залежності від виробничого процесу. Це дозволяє модифікувати його властивості, такі як в'язкість, термостійкість, та інші механічні властивості. Висока молекулярна маса та стійкість полімеру до високих температур дозволяють використовувати його в різноманітних умовах [35].

Як наповнювачі використано комплекс інгредієнтів: базальтові волокна, порошки одно- та двовалентної міді.

Базальтові волокна – це матеріал, що отримується шляхом плавлення базальтових порід (особливо вулканічних), з подальшим формуванням волокон. Ці волокна мають унікальні властивості, завдяки яким вони знаходять широке застосування у різних сферах, від будівництва до авіації.

Види базальтових волокон:

– однопниткові базальтові волокна (отримуються під час прямого витягування матеріалу. Вони мають високу міцність та використовуються в основному в складі композитних матеріалів);

– багатониткові базальтові волокна (утворюються шляхом групування одиничних ниток у пучки; ці волокна застосовуються в промисловості для виготовлення армованих композитів, таких як базальтове армування бетону);

– тканини з базальтових волокон (виготовляються шляхом переплетення волокон в тканину або мат, що використовуються в різних виробках, таких як захисні костюми, покриття для автомобілів, авіаційні деталі).

Базальтові волокна мають високу міцність та висока стійкість до механічних навантажень, що робить їх ідеальними для використання в композитних матеріалах. Базальтові волокна є термостійкими, можуть витримувати високі температури (до 800...1000°C), що робить їх ефективними в жаростійких і вогнестійких матеріалах. Також вони хімічно

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стійкі до впливу більшості кислот, лугів і органічних розчинників. Базальтові волокна є екологічно чистими, оскільки виготовляються з природних матеріалів (вулканічних порід) і не містять шкідливих хімічних сполук. Завдяки своїй легкості і водночас високій міцності, базальтові волокна широко використовуються в виготовленні легких композитних конструкцій. Матеріали на основі базальтових волокон володіють хорошими звукоізоляційними властивостями. Базальтові волокна не схильні до гниття та розкладу у воді [36, 37]. В роботі використано однопіткві базальтові волокна різної товщини.

Порошок оксиду одновалентної міді ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) має кілька важливих фізичних та хімічних властивостей. Порошок оксиду одновалентної міді має червоний або червоно-бурий колір, залежно від розміру часток та умов приготування. Частинки порошку  $\text{Cu}_2\text{O}$  майже не розчиняється у воді, але може реагувати з кислотами (наприклад, з сульфатною кислотою), утворюючи мідь та водень, або розчинятися в аміаку. Оксид міді (I) може бути токсичним при вдиханні або проковтуванні, тому з ним треба працювати обережно. Оксид міді (I) стабільний при кімнатній температурі, але може змінювати свою структуру при високих температурах, перетворюючись на оксид міді (II) ( $\text{CuO}$ ) в результаті окиснення.  $\text{Cu}_2\text{O}$  є сильним відновником у хімічних реакціях, і може відновлювати інші метали або сполуки з більш високими ступенями окиснення [38].

Оксид двовалентної міді, або мідний оксид ( $\text{CuO}$ ), є важливим неорганічним сполукою з кількома корисними властивостями. Колір порошку – чорний або темно-коричневий, що є характерним для багатьох оксидів металів. Температура плавлення близько  $1326\text{ }^\circ\text{C}$ . Погано розчиняється у воді, але добре розчиняється в кислотах, таких як сірчана та соляна.  $\text{CuO}$  є основним оксидом, тому він може реагувати з кислотами, утворюючи солі.  $\text{CuO}$  може бути відновлений до металеві міді при нагріванні з такими відновниками, як водень або вуглець. Оксид (II) міді

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стабільний при високих температурах, не розкладається навіть при сильному нагріванні. Оксид (II) міді має малу токсичність при потраплянні в організм, і тому його слід обережно використовувати в умовах, де можливий контакт з людьми чи навколишнім середовищем [39].

## 2.2 Методи досліджень властивостей та структури епоксикомпозитних матеріалів

Зразки для фізико-механічних досліджень епоксикомпозитних матеріалів зображено на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд зразків для фізико-механічних досліджень епоксикомпозитних матеріалів:

- 1 – ударної міцності;
- 2 – адгезійної міцності;
- 3 – внутрішніх напружень;
- 4 – механічних динамічних характеристик;
- 5 – твердості

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

«Границю адгезійної міцності при нормальному відриві визначали за ГОСТ 14759-69. Досліджуваний матеріал наносили на торцеву поверхню стержнів (грибків). Дослідження проводили на розривній машині марки УММ-5 за швидкості переміщення нижньої траверси 2 мм/хв.

Під час визначення границі міцності на зсув (ГОСТ 14760-69) використовували пластини із сталі 45 розміром 80×10×2 мм. Площа торцевої поверхні склеювання грибків (пластин) складала 2 см<sup>2</sup>.

Межу адгезійної міцності визначали за формулою:

$$\sigma_a = \frac{P}{S}, \quad (2.1)$$

де  $P$  – навантаження, при якому відбулось руйнування клейового з'єднання, Н;

$S$  – площа клейового з'єднання, см<sup>2</sup>».

«Границю міцності на стиск визначали за ГОСТ 4651-82. Зразки у формі циліндрів діаметром 10±0,5 і висотою 15 мм піддавали стиску при рівномірному зростаючому зусиллі з швидкістю наближення площадок 2 мм/хв.

Межу міцності при стиску розраховували за формулою:

$$\sigma_{ст} = \frac{P}{S}, \quad (2.2)$$

де  $P$  – навантаження, при якому зразок зруйнувався, Н;

$S$  – площа поперечного перерізу зразка, см<sup>2</sup>».

«Внутрішні напруження визначали консольним методом за ГОСТ 13036-67. Він базується на вимірюванні відхилення від початкового положення вільного кінця консольно закріпленої пружної металевої пластини. Деформація пластини відбувається під дією внутрішніх напружень, які виникають в покриттях (рисунок 2.2)» [40].

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

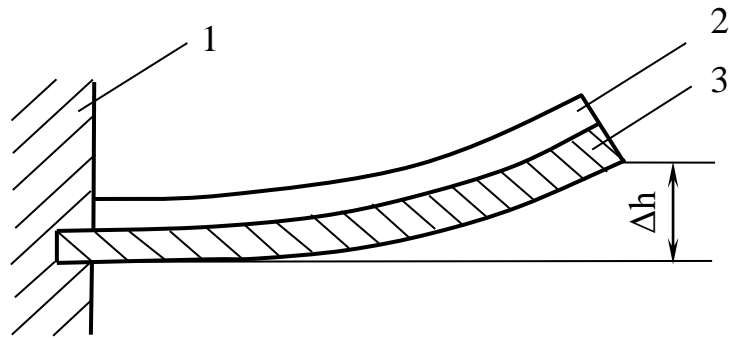


Рисунок 2.2 – Схема виникнення внутрішніх напружень:

1 – основа консолі;

2 – епоксикомпозитне покриття;

3 – пластина-основа;

$\Delta h$  – величина відхилення консолі

«Внутрішні напруження розраховували за формулою:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{\Delta h E t^3}{3l^2 (t + \Delta t) \Delta t}, \quad (2.3)$$

де  $\Delta h$  – відхилення вільного кінця консолі, мм;

$E$  – модуль пружності підложки, МПа;

$t$  – товщина підложки, мм;

$l$  – довжина плівки, мм;

$\Delta t$  – товщина плівки, мм.

Покриття наносили на пластинку-основу з пружної сталі з відомими фізико-механічними характеристиками розміром 80×15 мм, товщиною 0,25...0,3 мм. Товщину твердого покриття  $\Delta t$  визначили як середнє арифметичне з трьох замірів вздовж довжини консолі».

«Ударну міцність покриттів на сталевих пластинах розміром 60×200 мм визначали згідно методики, суть якої полягає у кількісному визначенні енергії удару, необхідної для наскрізного пошкодження захисних покриттів при падінні з певної висоти ударника з наконечником каліброваного розміру

										Арк.
										29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	MP 1124.00.00.000 ПЗ					

(діаметром 8 мм). Для визначення міцності захисних покриттів застосовували установку, схема якої зображена на рисунку 2.3» [40].

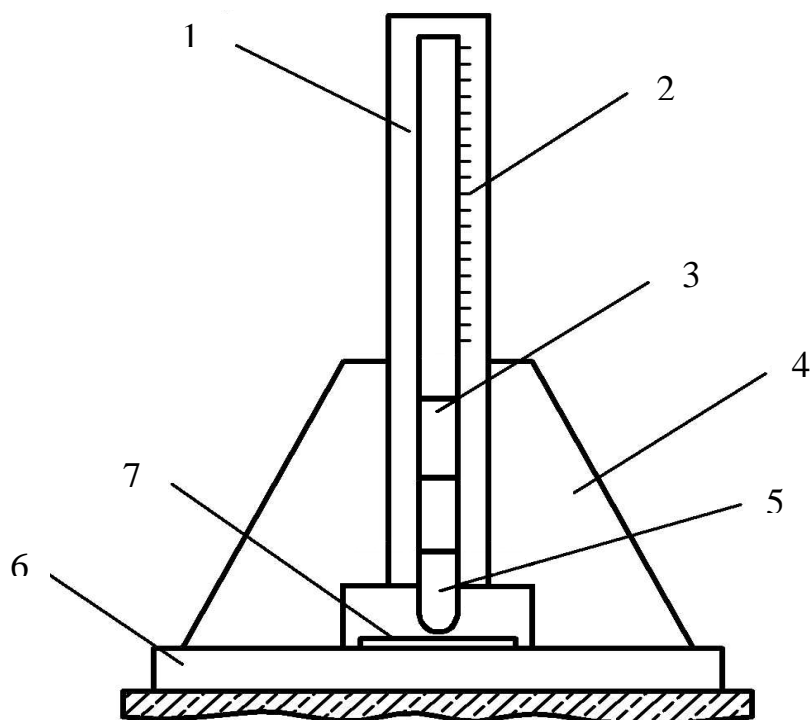


Рисунок 2.3 – Схема установки для досліджень на ударну міцність: 1 – направляюча частина;

2 – шкала;

3 – змінний вантаж;

4 – опора;

5 – бійник;

6 – плита;

7 – досліджуваний зразок

Міцність покриттів при ударі вираховували за формулою:

$$A = mgh, \quad (2.4)$$

де  $m$  – маса ударника, кг;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ ;

$h$  – висота падіння ударника, м.

						MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
							30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

«Ступінь тверднення матеріалів і покриттів визначали за вмістом гель-золь-фракції. Метод оснований на здатності частини матеріалу (плівки), не зв'язаної в полімерну сітку, вимиватися органічним розчинником в екстракторі Сокслета (рисунок 2.4), який працював в автоматичному режимі» [40].



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд екстрактора Сокслета в робочому режимі

«Екстракцію зразків у формі пластин розміром 40×70 мм товщиною до 0,5 мм проводили в толуолі протягом 8 год з наступним сушінням при температурі 393 К до постійної маси. Масу зразків до і після екстракції визначали на аналітичних лабораторних вагах з точністю до 0,0001 г.

Вміст гель-фракції в плівці наповненої дисперсними частинками визначали за формулою:

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G = \frac{100 - (M_1 - M_2) \cdot 100\%}{M_0}, \quad (2.5)$$

де  $M_1, M_2$  – маса патрона з наважкою плівки відповідно до і після екстракції;

$M_0$  – вміст плівкоутворюючої речовини в наважці плівки».

«Твердість матеріалу за методом Брінеля визначали за ГОСТ 1786-80. Дослідження проводили на зразках у формі бруска з гладкою поверхнею товщиною не менше 5 мм і шириною не менше 15 мм. При дослідженні стальну кульку діаметром 10 мм вдавлювали в поверхню досліджуваного матеріалу з навантаженням 2,5 кН протягом 60 с. Розрахунок твердості матеріалу проводили за формулою:

$$HB = \frac{P}{\pi dh}, \quad (2.6)$$

де  $P$  – зусилля, прикладене до кульки, Н;

$d$  – діаметр кульки, мм;

$h$  – глибина відбитку кульки, мм» [40].

«Контртіло виготовляли у формі диска (рисунок 2.5) із сталі 45 (ГОСТ 1050-74) діаметром 50 мм з шорсткістю поверхні  $R_a=3,2$ .

Зразки виготовляли з монолітного матеріалу розміром  $10 \times 10 \times 15$  мм (рисунок 2.6). Шлях тертя становив 3000 м. Масу зразків визначали на аналітичних лабораторних вагах типу ВЛА – 200 з точністю 0,0001 г.

Інтенсивність вагового зношування визначали за формулою:

$$I_g = \frac{m_1 - m_2}{\Delta L}, \quad (2.7)$$

де  $m_1, m_2$  – маса зразків до і після випробувань, г» [40].

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

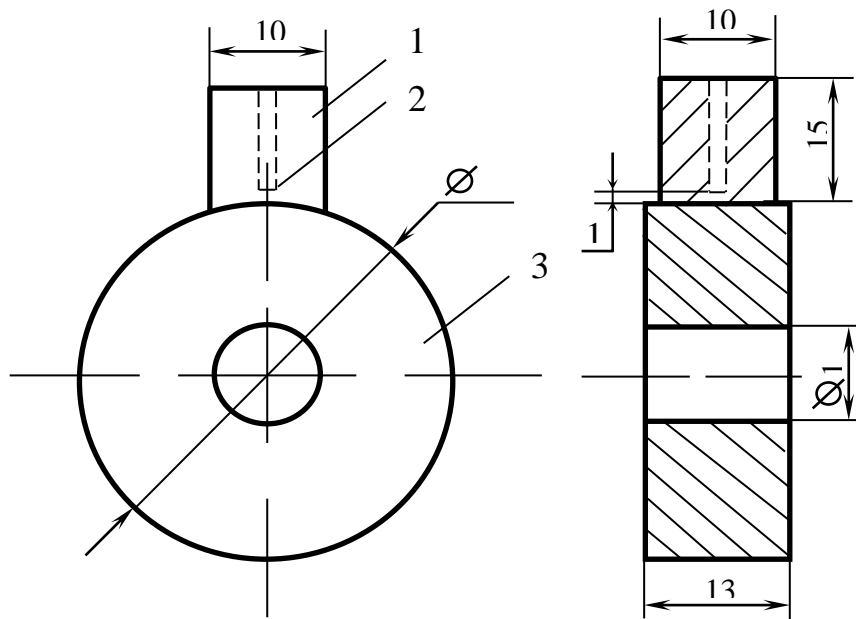


Рисунок 2.5 – Схема тертя і розміри елементів трибопарі:

- 1 – зразок;
- 2 – гніздо для термопар;
- 3 – контргіло



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд зразків для триботехнічних досліджень

Дослідження макро- та мікроструктури матеріалу проводили на оптичному мікроскопі МБС-9 (×30) та металографічному мікроскопі МИМ-10 (×100...600). Площу відновленої міді обчислювали програмою Photom 131» .

### 2.3 Методи формування зразків із епоксикомпозитних матеріалів

Зразки із епоксикомпозитних матеріалів формували шляхом отримання однорідної композиції. До полімерної матриці на основі епоксидної смоли та твердника поліетиленполіамін вводили попередньо підготовлені (просушені з метою видалення вологи і продозовані) наповнювачі. Залежно від об'єму зразків розраховували кількісний вміст компонентів у масових частинах на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20. Сформовану епоксидну композицію наносили на підготовлену поверхню або заливали у спеціальні форми (рисунок 2.7). Тверднення епоксикомпозитів під тиском тривало 24 год.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд прес-форми для отримання зразків

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Для зниження залишкових напружень застосовано ступінчастий режим термічної обробки із загальною тривалістю 6 годин: 1 год – 50 °С; 1 год – 100 °С; 4 год – 120 °С.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

### 3.1. Дослідження фізико-механічних властивостей епоксикомпозитних матеріалів

Створити новий матеріал з новими властивостями можна додавши до в'язучого на основі епоксидної смоли та твердника поліетиленполіамін дисперсних наповнювачів. Для створення полімеркопозитного матеріалу триботехнічного призначення необхідно вибрати наповнювачі, які б відповідали заданим характеристикам, тобто враховували їх фізико-механічні та теплофізичні властивості. Для підвищення теплопровідності епоксикомпозитного матеріалу вибрано металеві порошки міді та бронзи. Базальтові волокна вибрано для підвищення стійкості епоксикомпозитних матеріалів до ударних і вібраційних навантажень.

Підвищення адгезійної міцності на 80% (рисунок 3.1) відбувається для епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошком  $\text{Cu}_2\text{O}$ . У випадку додавання 150 мас. ч. порошку наповнювача адгезійна міцність стрімко підвищується. Додавання порошку наповнювача в кількості 250 мас. ч. призводить до незначного підвищення даної характеристики.

Епоксикомпозитний матеріал, який містить 250 мас. ч. порошку  $\text{Cu}_2\text{O}$ , має максимальне значення адгезійної міцності (35 МПа), що пояснюється кращою взаємодією частинок порошку оксиду одновалентної міді із полімерною матрицею за рахунок вищої дисперсності даного наповнювача. Найменшу адгезійну міцність 19 МПа має епоксикомпозитний матеріал, що містить 50 мас. ч. порошку оксиду одновалентної міді.

Адгезійна міцність епоксикомпозитних матеріалів знижується на 40% у випадку збільшення вмісту порошку оксиду двовалентної міді від 50 мас. ч. до 250 мас. ч. Зниження адгезійної міцності пов'язано з наявністю дефектів різного типу та утворенням меншої кількості фізико-хімічних зв'язків. Дефекти є джерелом виникнення механічних напружень, а тому є причиною

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

початку руйнування. Зазвичай серед таких дефектів зустрічаються тріщини, які під дією навантаження здатні до розростання, що призводить до руйнування. Тріщини викликають критичні значення напружень розтягу, за досягнення яких зароджуються поперечні тріщини на межі розділу. Поперечні тріщини розповсюджуються в матеріалі за механізмом нормального відриву. Спочатку вздовж межі розділу розмір тріщини повільно збільшується, а потім вона швидко розповсюджується в матеріалі до повного його руйнування.

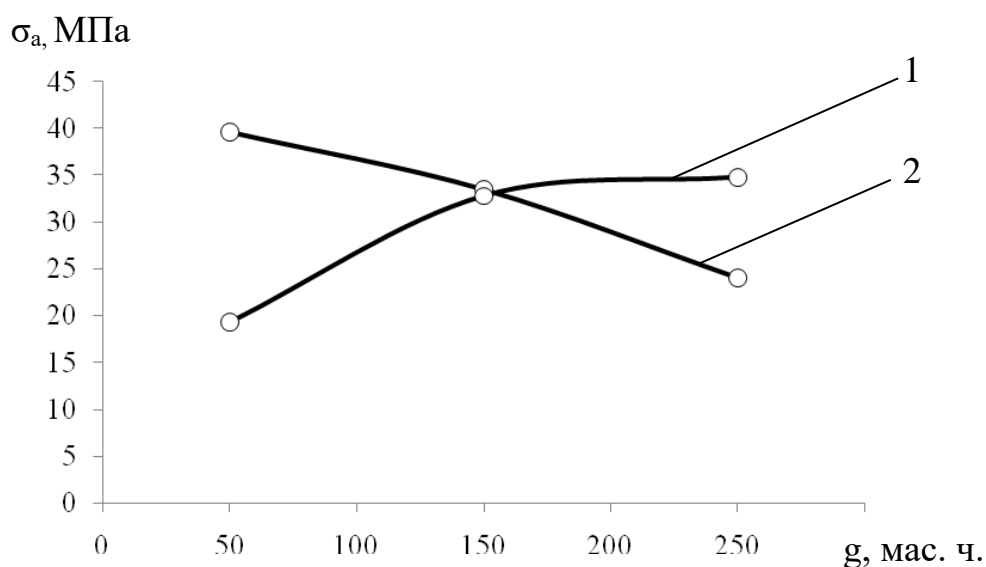
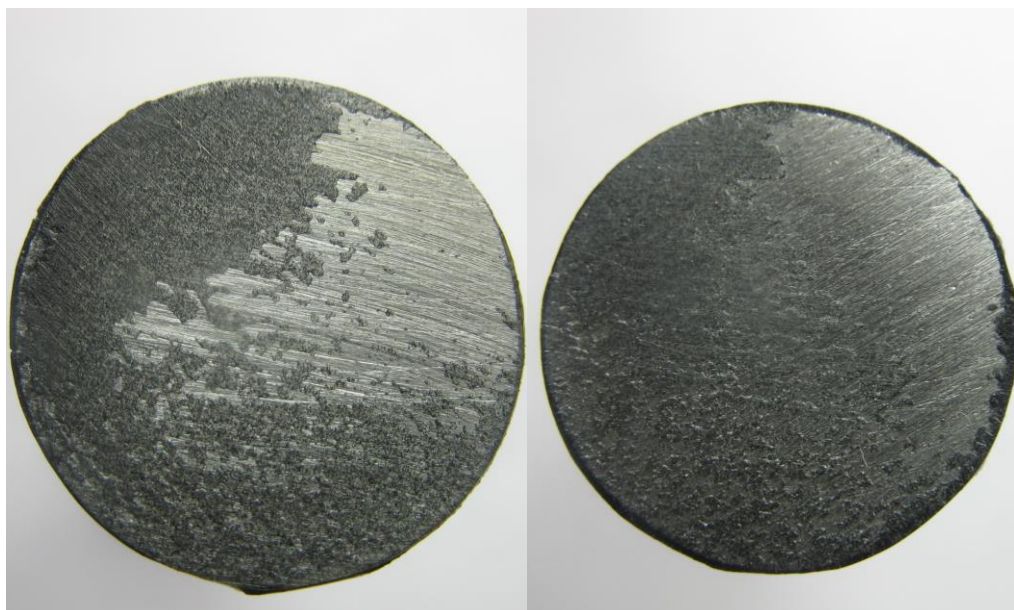


Рисунок 3.1 – Вплив вмісту наповнювачів  $\text{Cu}_2\text{O}$  (1) та  $\text{CuO}$  (2) на адгезійну міцність епоксикомпозитних матеріалів

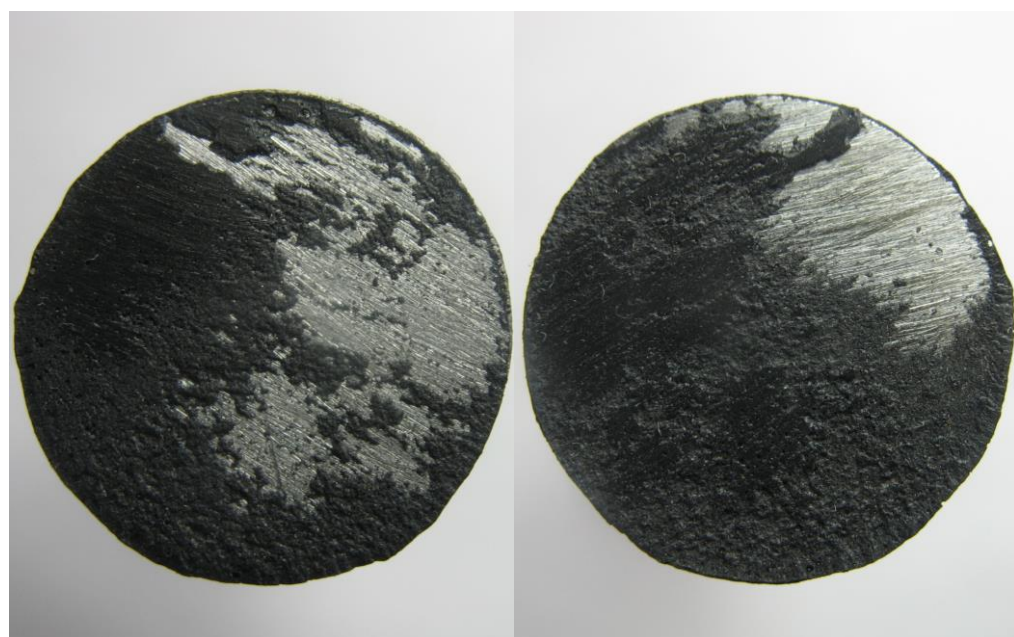
Епоксикомпозитні матеріали, наповнені порошком оксиду двовалентної міді, мають максимальну адгезійну міцність 40 МПа за вмісту порошку в кількості 50 мас. ч. Мінімальне значення адгезійної міцності (24 МПа) зафіксовано для епоксикомпозитного матеріалу з вмістом порошку  $\text{CuO}$  250 мас. ч.

Для епоксикомпозитних матеріалів, які містять порошковий наповнювач в кількості 50 мас. ч.  $\text{CuO}$ , 250 мас. ч.  $\text{CuO}$ , 50 мас. ч.  $\text{Cu}_2\text{O}$  характерний адгезійно-когезійний характер руйнування після дослідження адгезійної міцності зразків (рис. 3.2, а, б, в). Для епоксикомпозитних

матеріалів, які містять порошковий наповнювач в кількості 250 мас. ч.  $\text{Cu}_2\text{O}$ , характерний когезійний характер руйнування (рисунок 3.2, г).



а



б

Рисунок 3.2 – Вигляд поверхні епоксикомпозитних матеріалів після проведення досліджень на адгезійну міцність з вмістом наповнювача:

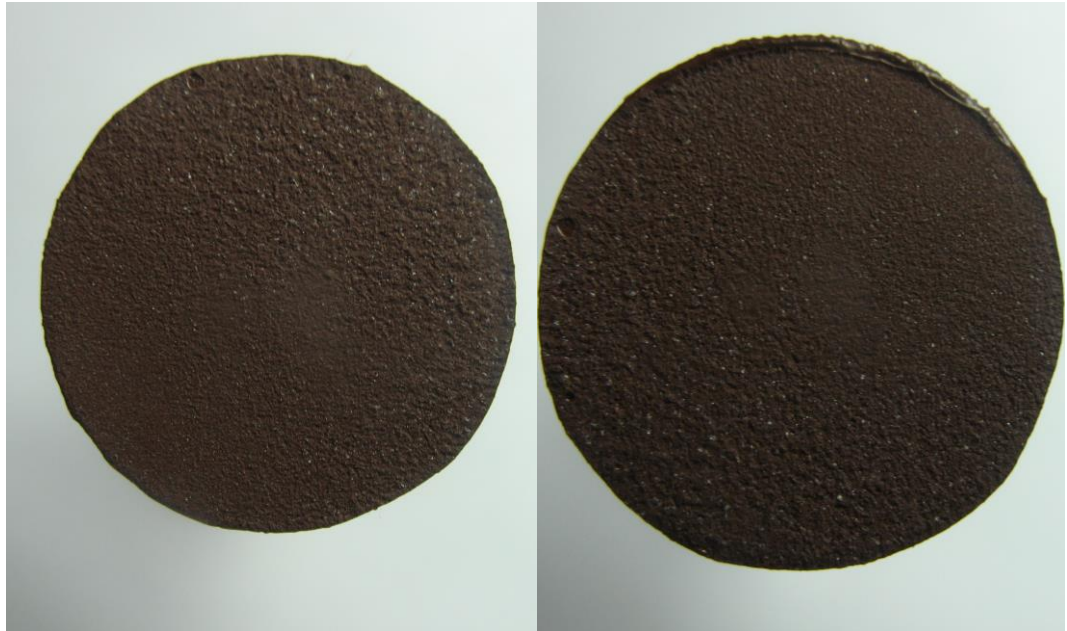
а – 50 мас. ч.  $\text{CuO}$ ;

б – 250 мас. ч.  $\text{CuO}$

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



В



Г

Рисунок 3.2, лист 2

в – 50 мас. ч.  $\text{Cu}_2\text{O}$ ;

г – 250 мас. ч.  $\text{Cu}_2\text{O}$

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Епоксикомпозитні матеріали, які містять порошки  $\text{CuO}$  і  $\text{Cu}_2\text{O}$  в кількості 150 мас. ч. мають найвищу міцність на стискання 135 МПа і 121 МПа (рисунок 3.3) відповідно. Епоксикомпозитних матеріал немає недостатнього опору статичним навантаженням за меншого вмісту наповнювача (150 мас. ч.), тому відбувається руйнування. Міцність на стискання епоксикомпозитних матеріалів зростає на 16% і 10% за збільшення вмісту порошкових наповнювачів до 150 мас. ч.  $\text{CuO}$  та  $\text{Cu}_2\text{O}$  відповідно. Зростання міцності на стискання в даному випадку пов'язано зі зменшенням внутрішніх напружень епоксинаповненої системи та підвищення ступеня структурування.

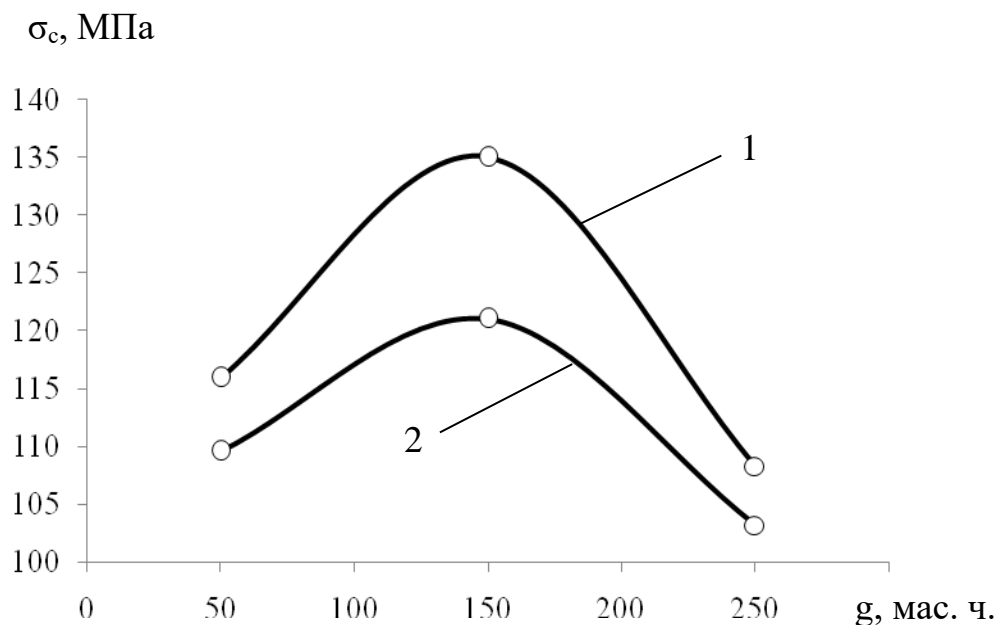


Рисунок 3.3 – Вплив вмісту наповнювачів  $\text{Cu}_2\text{O}$  (1) та  $\text{CuO}$  (2) на міцність на стискання епоксикомпозитних матеріалів

Підвищення вмісту порошкових наповнювачів оксидів одно- та двовалентної міді вище 150 мас. ч. призводить до зниження міцності на стискання. Зниження міцності на стискання відбувається внаслідок утворення агломератів за неповного змочування частинок порошоків епоксидним в'язучим. Внаслідок цього порошкові наповнювачі оксидів міді нерівномірно

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розподіляються в об'ємі матриці на основі епоксидної смоли та твердника поліетиленполіамін. Наявність різних дефектів в реальних полімерних матеріалах, зазвичай у вигляді мікро- та макропор, мікротріщин тощо, також знижують теоретично можливу міцність на стискання. Руйнування полімеркомпозитного матеріалу відбувається в дефектному місці.

Епоксикомпозитні матеріали, які наповнені порошками  $\text{CuO}$  і  $\text{Cu}_2\text{O}$  в кількості 50 мас. ч., мають найвищі значення внутрішніх напружень – 0,9 МПа і 1,2 МПа відповідно (рисунок 3.4). У цьому випадку високі внутрішні напруження зумовлені нерівномірним локальним зшиванням макромолекул епоксиполімерної матриці, внаслідок чого частина системи знаходиться в напруженому стані. Підвищення вмісту порошкових наповнювачів вище 50 мас. ч. призводить до зниження на 45 % та 43 % внутрішніх напружень епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошками  $\text{CuO}$  і  $\text{Cu}_2\text{O}$  відповідно.

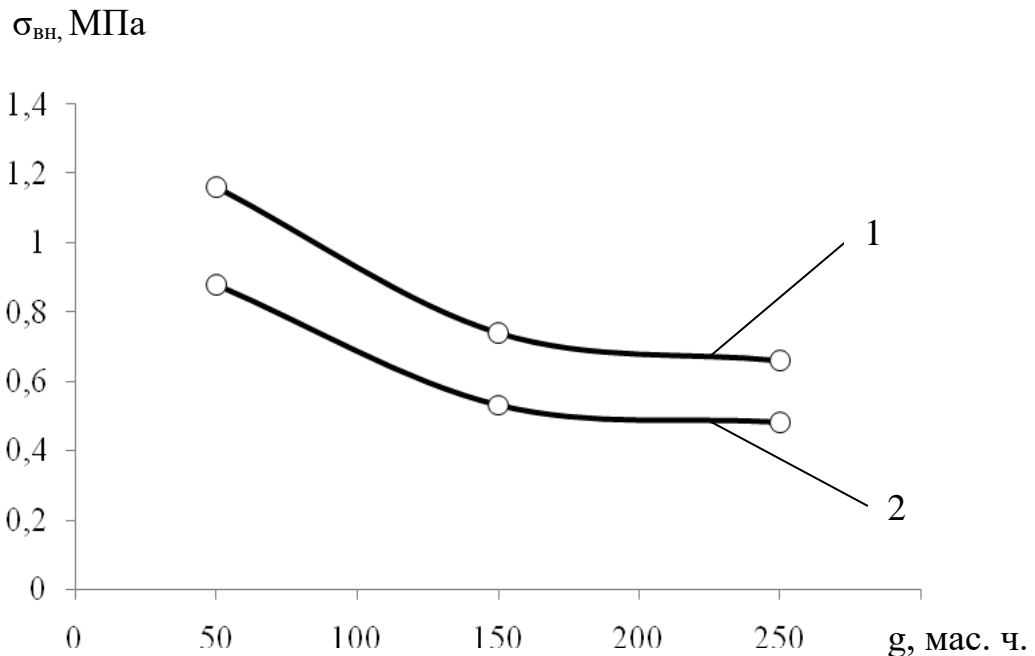


Рисунок 3.4 – Вплив вмісту наповнювачів  $\text{Cu}_2\text{O}$  (1) та  $\text{CuO}$  (2) на внутрішні напруження епоксикомпозитних матеріалів

Дані результати корелюють із результатами ступеня структурування. Оскільки ступінь структурування епоксикомпозитних матеріалів за вищого вмісту також знижується, що вказує на формування систем з меншою кількістю зв'язків, а, отже, рівень внутрішніх напружень також знижується. Зниження внутрішніх напружень.

Ступінь структурування епоксикомпозитних матеріалів із вмістом порошку  $\text{CuO}$  підвищується на 0,7 % за умови підвищення вмісту наповнювача від 50 мас. ч. до 150 мас. ч. (рисунок 3.5). За підвищення наповнювача до 250 мас. ч. ступінь структурування знижується на 0,2 %.

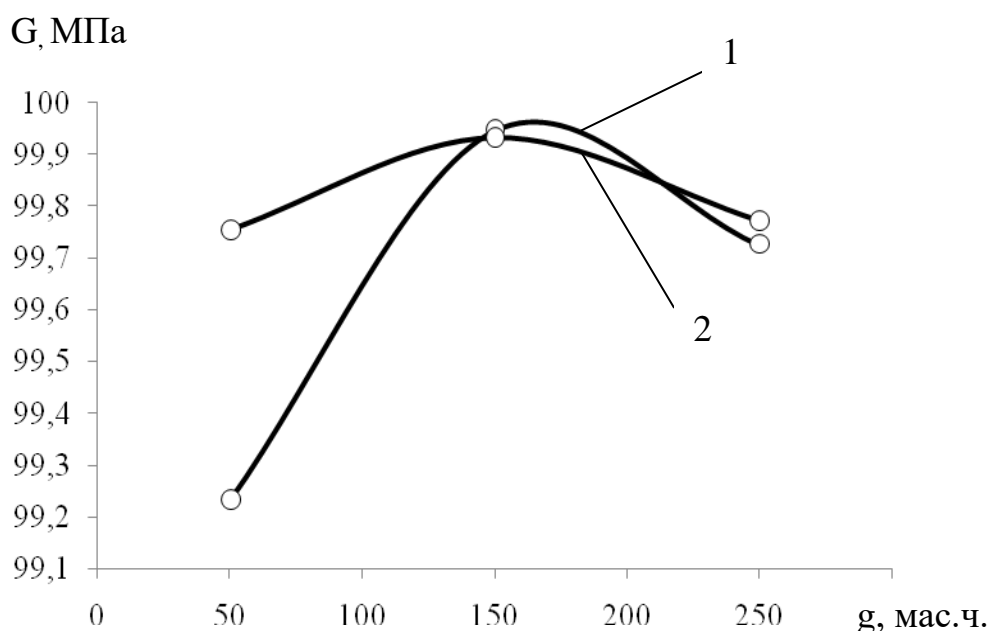


Рисунок 3.5 – Вплив вмісту наповнювачів  $\text{Cu}_2\text{O}$  (1) та  $\text{CuO}$  (2) на ступінь структурування епоксикомпозитних матеріалів

Для епоксикомпозитних матеріалів, які містять порошок  $\text{Cu}_2\text{O}$  в меншій кількості до 150 мас. ч., ступінь структурування поступово підвищується на 0,2 %. Це свідчить про зростання ступеня зшивання матриці (хімічного зв'язування молекул в полімерній матриці) у зовнішніх поверхневих шарах навколо наповнювача, що підвищує експлуатаційні

характеристики, зменшенню впливу негативних зовнішніх факторів та покращенню довговічності матеріалу в цілому даних епоксикомпозитних матеріалів.

Ступінь структування епоксикомпозитних матеріалів дещо знижується на 0,2 % у випадку збільшення вмісту порошкового наповнювача до 250 мас. ч. Зниження ступеня структування відбувається внаслідок поганого змочування епоксиполімером частинок порошоків оксидів одно- та двовалентної міді, що послаблює взаємодію компонентів епоксисистеми.

Твердість епоксикомпозитних матеріалів збільшується із підвищення вмісту порошкових наповнювачів (рисунок 3.6). Епоксикомпозитні матеріали, які наповнені порошками  $\text{CuO}$  і  $\text{Cu}_2\text{O}$ , мають найвищі значення твердості 248 МПа і 347 МПа відповідно. Це можна пояснити утворенням додаткових хімічних зв'язків, які підвищують механічні властивості матеріалу, покращують його стійкість до навантажень, агресивних середовищ та термічних змін.

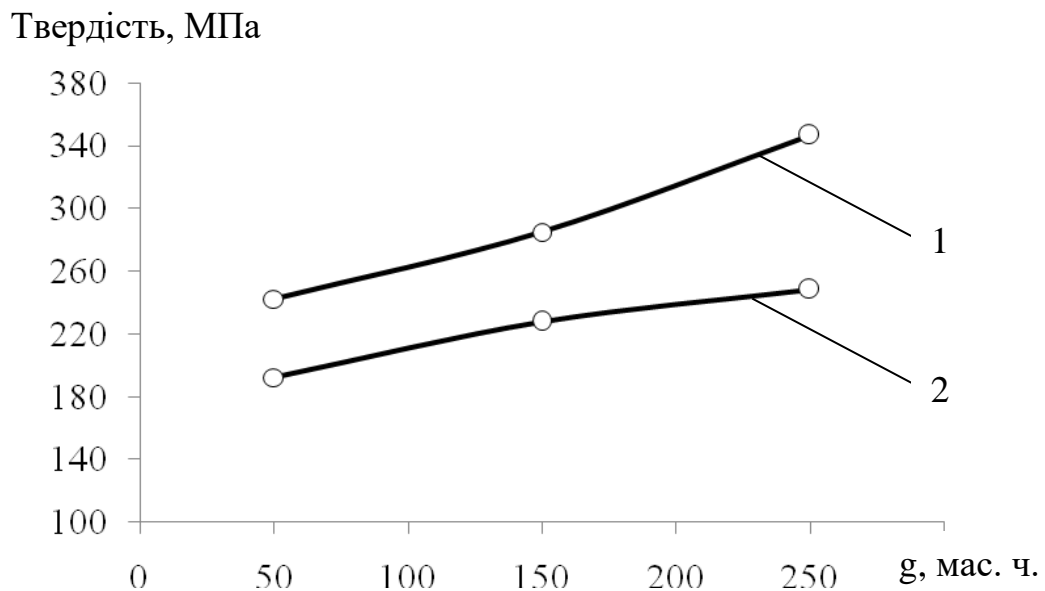


Рисунок 3.6 – Вплив вмісту порошкових наповнювачів  $\text{Cu}_2\text{O}$  (1) та  $\text{CuO}$  (2) на твердість епоксикомпозитів

Твердість епоксикомпозитних матеріалів, які містять дрібнодисперсний порошок оксиду одновалентної міді  $\text{Cu}_2\text{O}$ , значно підвищується на 43 % із збільшенням вмісту наповнювача від 50 мас. ч. до 25 мас. ч. Для епоксикомпозитних матеріалів, які наповнені порошком оксиду двовалентної міді  $\text{CuO}$  твердість підвищується на 29 % за збільшення вмісту наповнювача. Підвищення значення твердості із збільшенням вмісту наповнювачів можна пояснити вищим вмістом твердих наповнювачів в епоксикомпозитах і низькими внутрішніми напруженнями епоксиполімерної системи.

Епоксикомпозитні матеріали за вмісту даних порошкових наповнювачів ( $\text{CuO}$  та  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) в кількості 50 мас. ч. мають невисокі значення ударної міцності (рисунок 3.7) 10,1 Дж та 19,9 Дж відповідно. За високого вмісту наповнювачів (250 мас. ч.) значення ударної міцності зростає на 130 % та 50 % для  $\text{CuO}$  та  $\text{Cu}_2\text{O}$  відповідно. Ріст значень даної характеристики можна пояснити вищим ступенем наповнення епоксисистеми та відповідно вищою кількістю перешкод для поширення тріщин. Найвищу ударну міцність (31 Дж) має епоксикомпозит, наповнений  $\text{Cu}_2\text{O}$  в кількості 250 мас. ч.

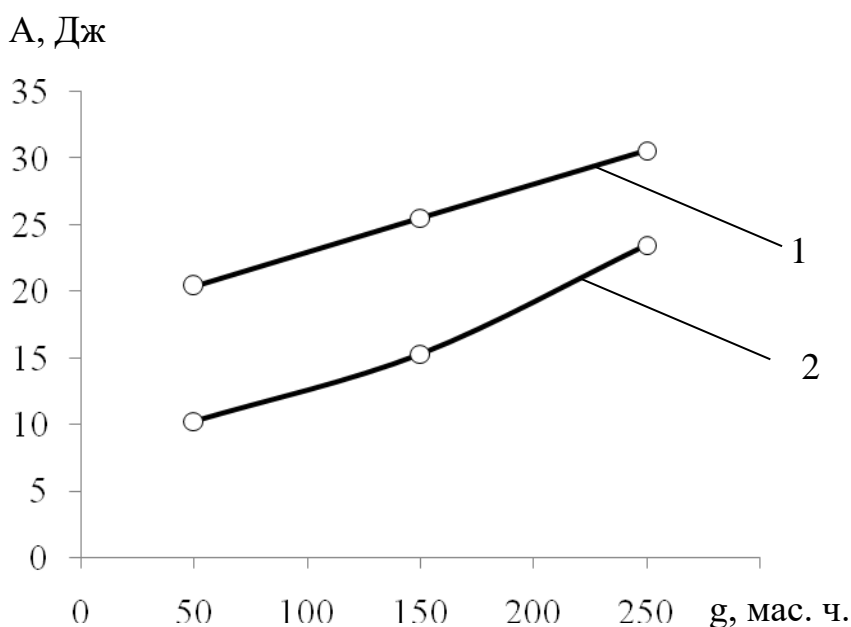
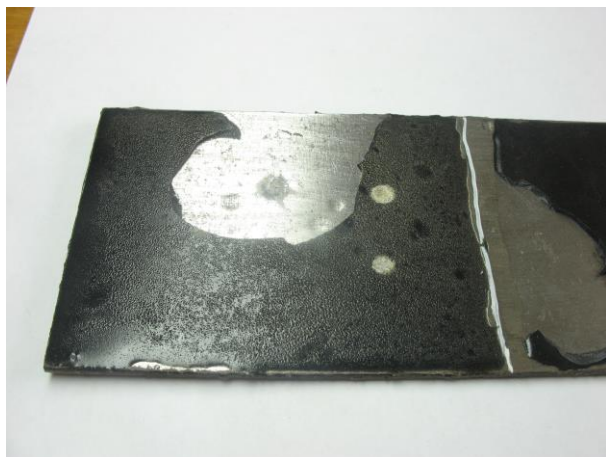


Рисунок 3.7 – Вплив вмісту наповнювачів  $\text{Cu}_2\text{O}$  (1) та  $\text{CuO}$  (2) на ударну міцність епоксикомпозитних матеріалів

Загальний вигляд епоксикомпозитних покриттів після дослідження на ударну міцність подано на рисунок 3.8. Вищу міцність має епоксикомпозитне покриття, що містить порошок  $\text{Cu}_2\text{O}$  порівняно з наповнювачем  $\text{CuO}$ .



а



б



в



г

Рисунок 3.8 – Вигляд епоксикомпозитних покриттів після дослідження на ударну міцність з вмістом наповнювача в кількості:

а – 50 мас. ч.  $\text{CuO}$ ;

б – 250 мас. ч.  $\text{CuO}$ ;

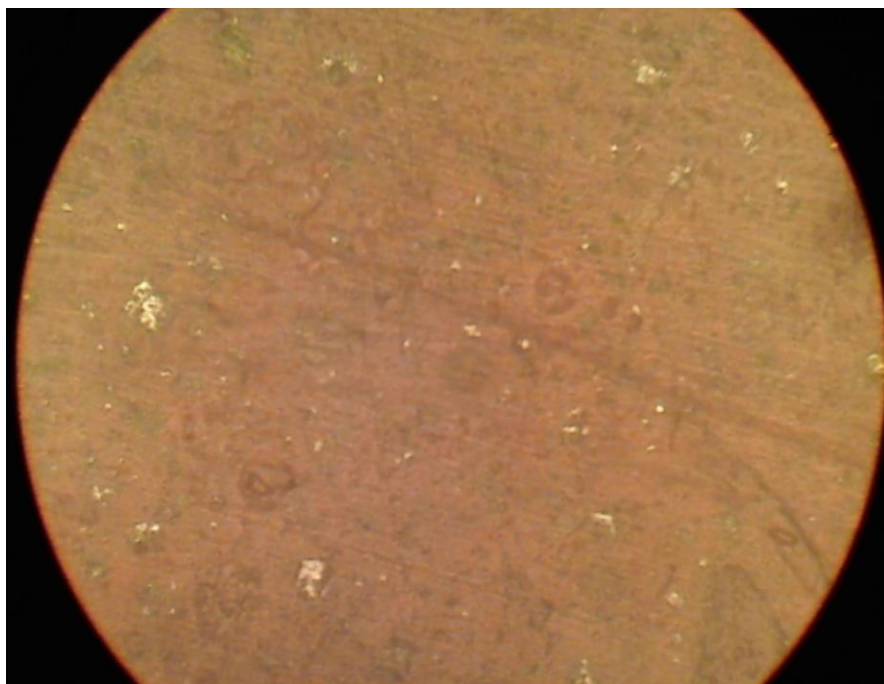
в – 50 мас. ч.  $\text{Cu}_2\text{O}$ ;

г – 250 мас. ч.  $\text{Cu}_2\text{O}$

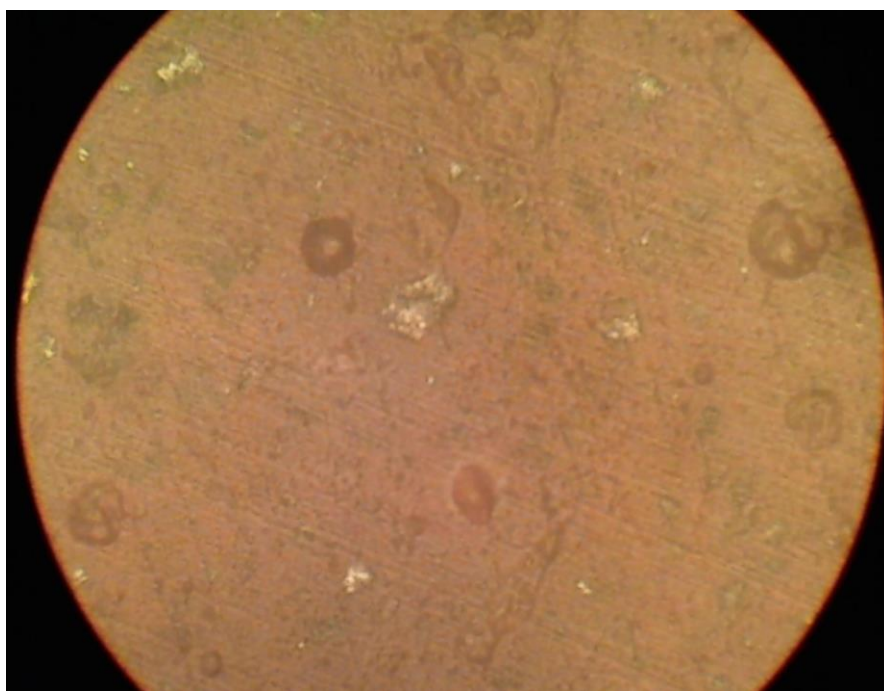
Мікроструктуру епоксикомпозитних матеріалів, наповнених порошками  $\text{CuO}$  та  $\text{Cu}_2\text{O}$  зподано на рисунок 3.9. З рисунків видно, що

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

епоксикомпозитні матеріали мають пори різного розміру. Розподіл наповнювачів в епоксиполімерній матриці є нерівномірним.



а



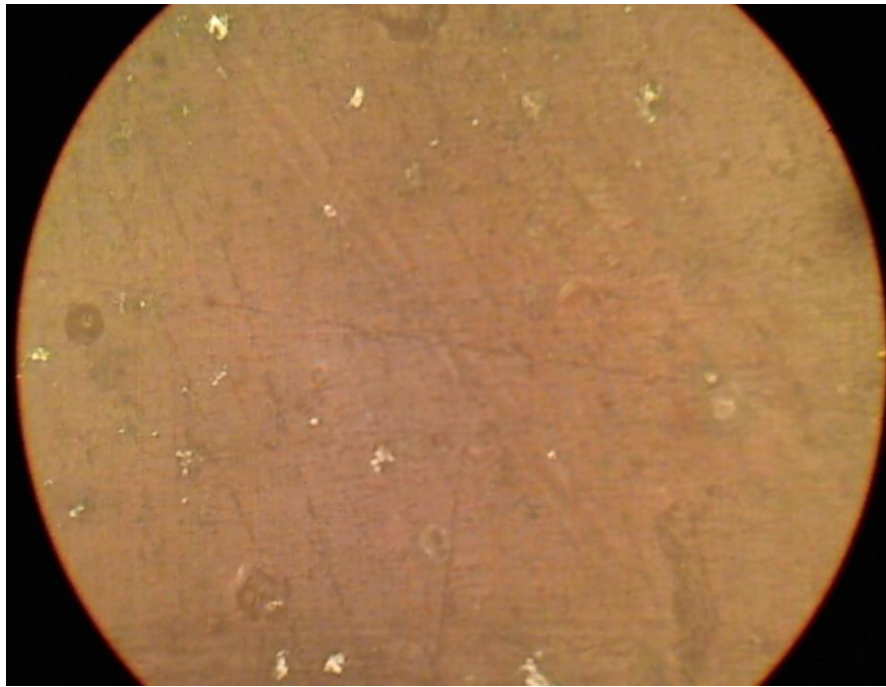
б

Рисунок 3.9 – Мікроструктура епоксикомпозитних матеріалів з вмістом наповнювача:

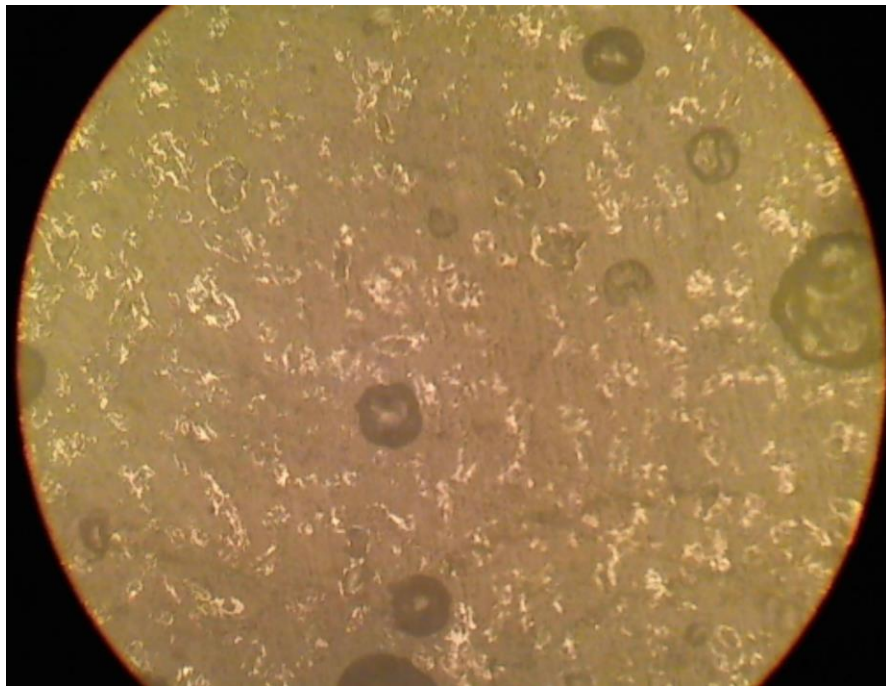
а – 50 мас. ч.  $\text{CuO}$ ;

б – 150 мас. ч.  $\text{CuO}$

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



В



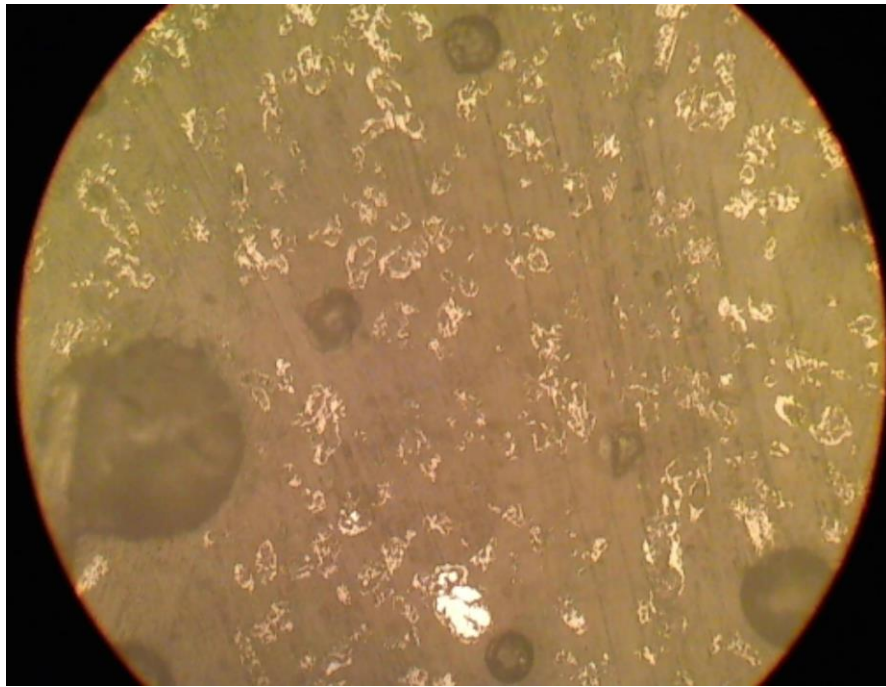
Г

Рисунок 3.9, лист 2

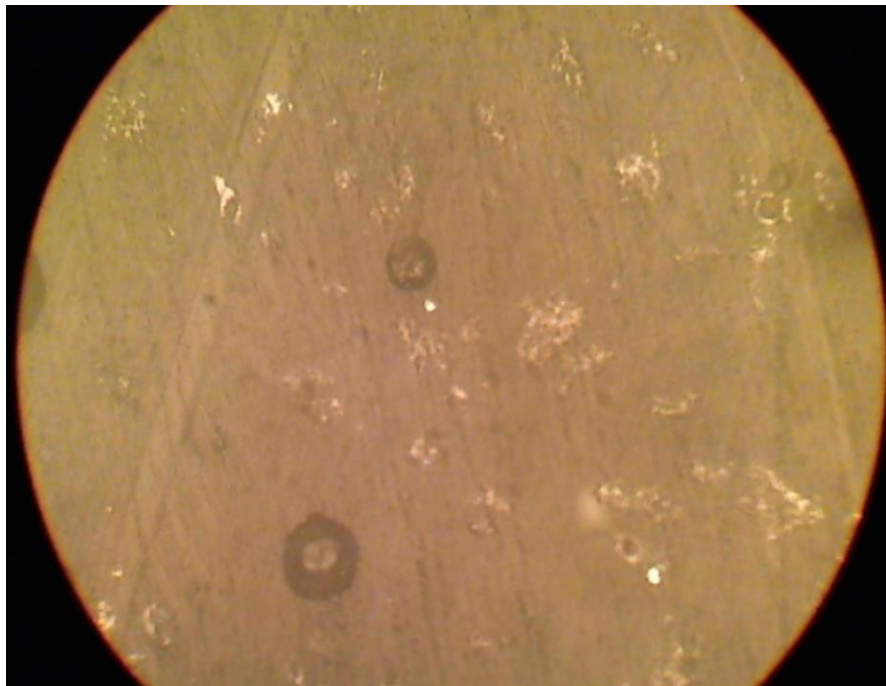
в – 250 мас. ч.  $\text{CuO}$ ;

г – 50 мас. ч.  $\text{Cu}_2\text{O}$

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



д



е

Рисунок 3.9, лист 3

д – 150 мас. ч.  $\text{Cu}_2\text{O}$ ;

е – 250 мас. ч.  $\text{Cu}_2\text{O}$

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.2 Дослідження триботехнічних характеристик епоксикомпозитних матеріалів, що містять базальтові волокна різної товщини

Максимальне значення міцності на стискання серед розроблених епоксикомпозитних матеріалів 134 МПа виявлено для епоксикомпозитного матеріалу складу № 5 (рисунок 3.10). Міцність на стискання епоксикомпозитних матеріалів, що містять базальтові волокна товщиною 100-200 мкм, підвищується на 13 % із збільшенням вмісту від 2 мас. ч. до 100 мас. ч., а вмісту порошку оксиду двовалентної міді (CuO) – від 50 мас. ч. до 150 мас. ч (таблиця 3.1). Збільшення вмісту базальтового волокна до 150 мас. ч. призводить до зниження даної характеристики на 7 %.

У випадку наповнення епоксикомпозитних матеріалів базальтовим волокном товщиною 10 мкм в кількості 2 мас. ч. міцність на стискання епоксикомпозитних матеріалів зростає на 13% за збільшення вмісту порошку оксиду двовалентної міді CuO від 50 мас. ч. до 100 мас. ч. підвищується на 13 %. Подальше збільшення вмісту базальтового волокна меншої товщини і порошку оксиду двовалентної міді відбувається різке зниження міцності на стискання на 67%.

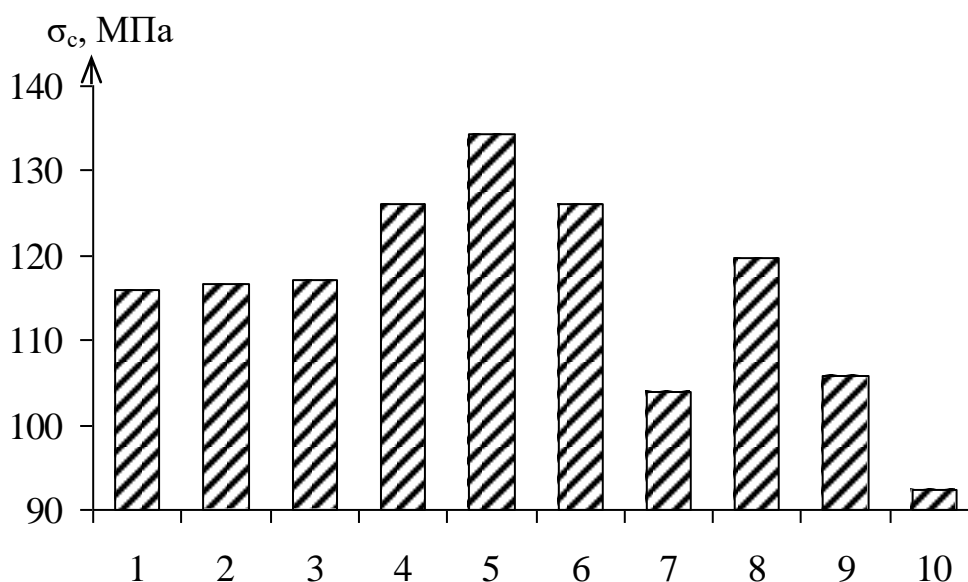


Рисунок 3.10 – Вплив вмісту та природи наповнювачів на міцність на стискання епоксикомпозитних матеріалів

Таблиця 3.1 – Склад епоксикомпозитних матеріалів

№ зразка	Вміст базальтового волокна, мас. ч.		Вміст порошку CuO, мас. ч.
	100-200 мкм	3-5 мкм	
1	2	–	50
2	2	–	100
3	2	–	150
4	50	–	150
5	100	–	150
6	150	–	150
7	–	2	50
8	–	2	100
9	–	2	150
10	–	50	150

Інтенсивність вагового зношування зростає в 1,7...3,5 рази із збільшенням швидкості ковзання (рисунок 3.11) за питомого навантаження  $P=1,8$  МПа. Встановлено експериментальним шляхом, що найменша інтенсивність вагового зношування за заданих режимах фрикційної взаємодії спостерігається для епоксикомпозитного матеріалу складу № 5 із вмістом 150 мас. ч. порошку CuO і становить 1,15 мг/км. Для даного епоксикомпозитного зразка спостерігається стабілізація процесу тертя за рахунок відновлення міді на трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу наступного перенесення її частинок на поверхню сталюого контртіла. Внаслідок такого процесу перенесення частинок міді обидві трибоповерхні (контртіла і епоксикомпозитного матеріалу) починають утворюватись фрагменти мідної плівки, яка характеризується низьким опором зсуву та легко відновлюється в разі пошкодження під час фрикційної взаємодії. Після покриття трибоповерхонь плівкою з мідних частинок, трибопара епоксикомпозитний матеріал - сталь стає трибопарою мідь-мідь (рис. 3.12) і процес перенесення міді сповільнюється.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

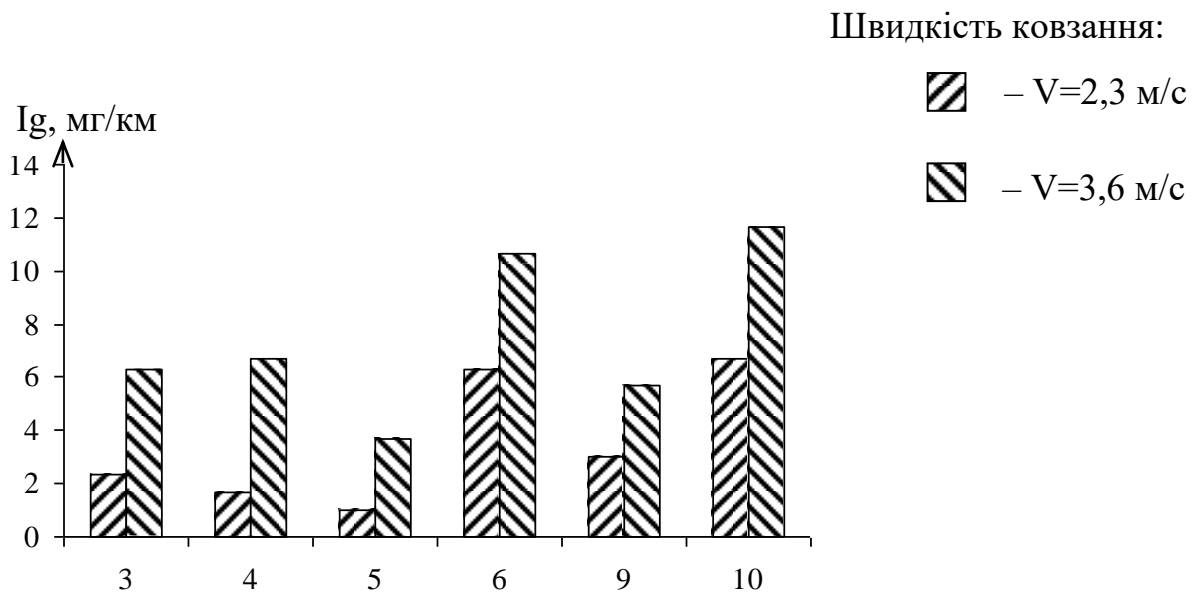


Рисунок 3.11 – Залежність інтенсивності зношування епоксикомпозитних матеріалів від швидкості ковзання

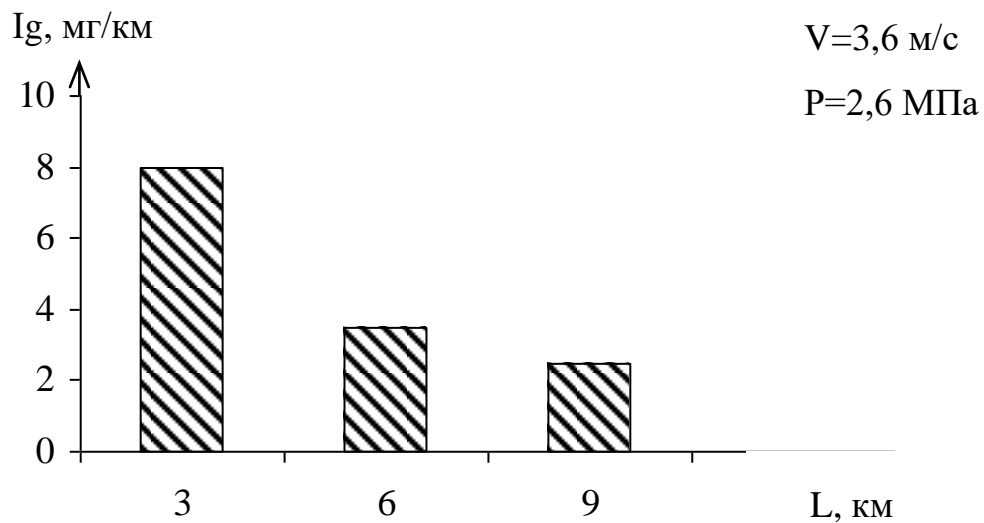
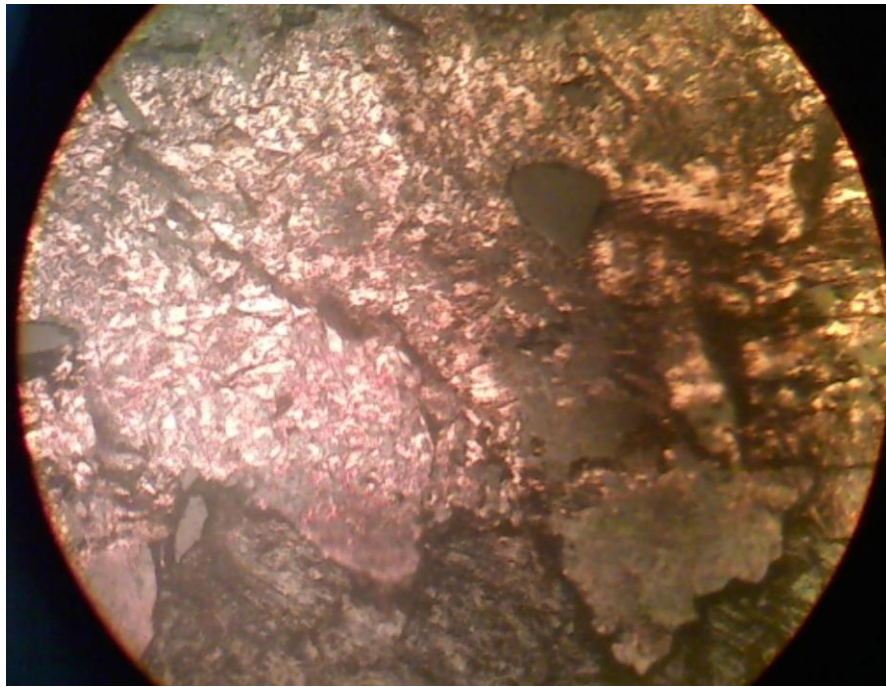
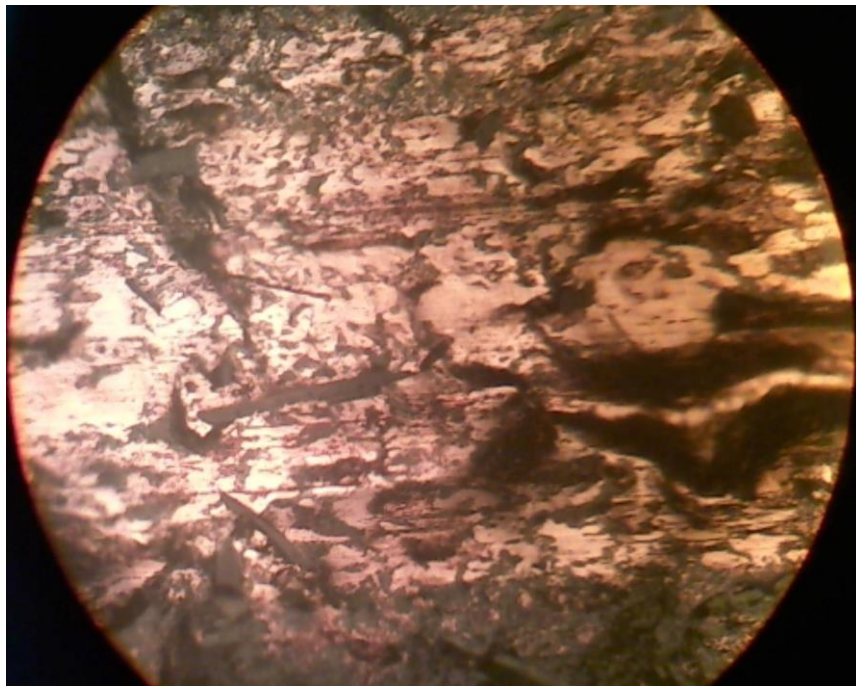


Рисунок 3.12 – Залежність інтенсивності зношування епоксикомпозитного матеріалу складу № 5 від шляху тертя

Мікроструктуру трибоповерхонь досліджуваних епоксикомпозитних матеріалів різного складу № 3, № 4, № 5 та № 6 представлено на рисунку 3.13.



а



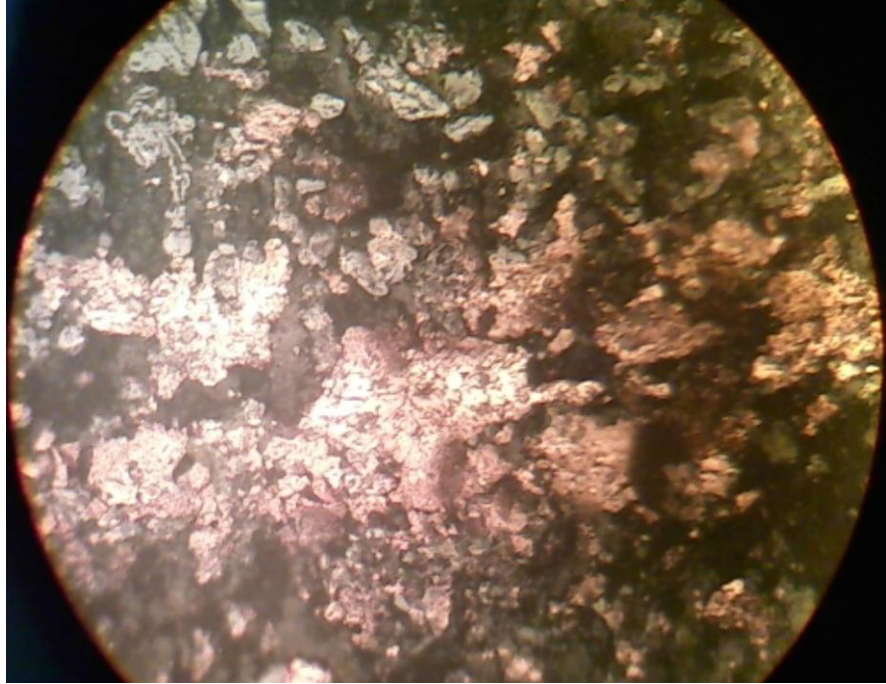
б

Рисунок 3.13 – Мікроструктура поверхні епоксикомпозитних матеріалів після фрикційної взаємодії,  $\times 250$ :

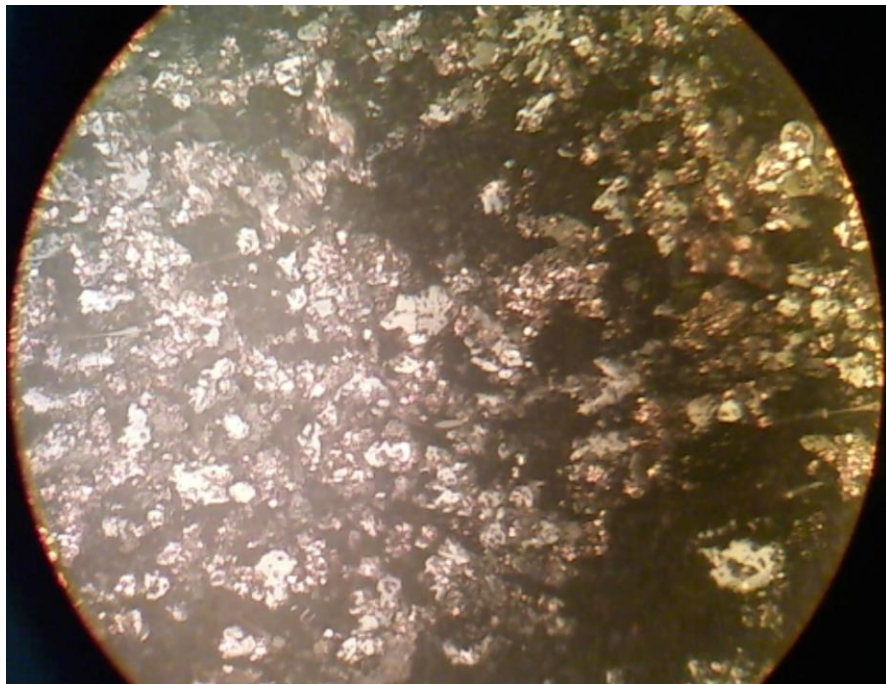
а – № 3;

б – № 4

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



В



Г

Рисунок 3.13, лист 2

в – № 5;

г – № 6

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Програмою Photom131 обчислено скільки відсотків площі трибоповерхні займають фрагменти утвореної мідної плівки. На трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 3, що містить 2 мас. ч. базальтових волокон товщиною 100...200 мкм та 150 мас. ч. порошку оксиду міді CuO, фрагменти мідної займають 58%. На трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 4, що містить 50 мас. ч. базальтових волокон товщиною 100-200 мкм та 150 мас. ч. порошку оксиду міді CuO, фрагменти мідної займають 65%. На трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 5, що містить 100 мас. ч. базальтових волокон товщиною 100-200 мкм та 150 мас. ч. порошку оксиду міді CuO, фрагменти мідної займають 54%. На трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 6, що містить 150 мас. ч. базальтових волокон товщиною 100...200 мкм та 150 мас. ч. порошку оксиду міді CuO, фрагменти мідної займають 41%. Наявність фрагментів мідної плівки вказує на виникнення ефекту вибіркового перенесення під час фрикційної взаємодії трибопари епоксикомпаозитний матеріал – сталь. Частинки відновленої міді з епоксикомпозитного матеріалу переносяться на стальну поверхню контртіла, формуючи мідну плівку. Після покриття трибоповерхонь частинками міді відбувається стабілізація тертя, тобто зменшується інтенсивність зношування.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

Епоксикомпозити знаходять широке застосування в різних трибовузлах завдяки їх чудовим механічним, хімічним і термостійким властивостям. Вони є ефективними матеріалами для виготовлення елементів, які працюють при високих навантаженнях і в умовах високих температур, що характерно для багатьох трибових систем (наприклад, в автомобільній, авіаційній та енергетичній промисловості). Трибовузол (або контакт тертя) є зоною, де два матеріали взаємодіють один з одним, і тут важливою є здатність матеріалу витримувати сили тертя, зношування та нагрівання.

В епоксикомпозитах ефект вибіркового перенесення є важливою характеристикою, оскільки створюється мікрошар з матеріалу композиту на поверхні контртіла, що знижує тертя та покращує зносостійкість. Цей ефект дозволяє мінімізувати безпосереднє зношування самих матеріалів і забезпечує більш ефективну роботу трибовузлів в довготривалій експлуатації.

Загалом, застосування епоксикомпозитів в трибовузлах дозволяє значно підвищити ефективність і довговічність механізмів, зменшуючи зношування та енерговитрати при їх експлуатації.

В даній магістерській роботі:

- досліджено вплив наповнювачів на основі міді на фізико-механічні властивості (адгезійну міцність, міцність на стискання, ударну міцність, твердість, внутрішні напруження) та структурування епоксиполімерних матеріалів;
- проаналізовано мікроструктури епоксикомпозитів, наповнених порошками оксидів одно- та двовалентної міді;
- розроблено склади епоксикомпозитних матеріалів, наповнених базальтовими волокнами різної товщини та оксидом двовалентної міді;

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- визначено міцність на стискання та інтенсивність вагового зношування епоксикомпозитних матеріалів, що містять базальтові волокна;
- проаналізовано мікроструктуру трибоповерхонь епоксикомпозитних матеріалів та визначено площу утворених фрагментів мідної плівки.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dewan Muhammad Nuruzzaman, Mohammad Asaduzzaman Chowdhury. Friction and Wear of Polymer and Composites. 2012. DOI: 10.5772/48246
2. Yamaguchi Y., Tribology of plastic materials: their characteristics and applications to sliding components. Amsterdam: Elsevier 1990
3. Hooke C. J. Kukureka S. N. Liao P. Rao M. Chen Y. K. The friction and wear of polymers in non-conformal contacts. Wear 1996 2008394
4. Lawrence C. C. Stolarski T. A. Rolling contact wear of polymers: a preliminary study. Wear 1989 1328391
5. J.F. Archard, Wear theory and mechanisms. Wear Control Handbook, ASME, New York, 1980
6. Tabor D. Friction wear-development over the last. Years key note. Address Proceedings. International Conference of Friction Tribology. Lubrication Wear yearson London. Institute of Mechanical Engineering. 1987.
7. Chowdhury M.A., Helali M.M. The effect of frequency of vibration and humidity on the coefficient of friction. TribolInt 2006 3995862
8. Watanabe M. The friction and wear Properties of nylon. Wear 1968 110379388
9. Tanaka K. Transfer of semicrystalline polymers sliding against smooth steel surface. Wear 1982 75183199
10. Bahadur S. Tabor D. Role of fillers in the friction and wear behavior of high-density polyethylene. In: Lee LH, editor. Polymer wear and its control. ACS Symposium Series, Washington DC 1985 287253268
11. Pihtili H. Tosun N. Investigation of the wear behavior of a glass fiber-reinforced composite and plain polyester resin. Composites Science and Technology, 2002 62367370

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Pihtili H. Tosun N. Effect of load and speed on the wear behavior of woven glass fabrics and aramid fiber-reinforced composites. *Wear*, 2002252979984

13. Wang Y. Q. Li J. Sliding wear behavior and mechanism of ultra-high molecular weight polyethylene. *Materials Science and Engineering*, 1999266155160

14. Tsukizoe T. Ohmae N. Friction and wear of advanced composite materials. *Fiber Science and Technology*, 1983184265286

15. Suresha B. Chandramohan G. Samapthkumaran P. Seetharamu S. Vynatheya S. Friction and wear characteristics of carbon-epoxy and glass-epoxy woven roving fiber composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 200625771782

16. Skare T. Stahl J. 1992Static and dynamic friction processes under the influence of external vibrations”, *Wear*, 154177192

17. K. Friedrich, Z. Lu, A.M. Häger. Overview on polymer composites for friction and wear application heoretical and *Applied Fracture Mechanics*. 19(1), 1993, PP. 1-11.

18. Jena H., Katiyar J.K., Patnaik A. (2021). Friction and Wear of Polymer and Polymer Composites. pp 33–54.

19. Yilong Ren, Lin Zhang, Guoxin Xie, Zhanbo Li, Hao Chen, Hanjun Gong, Wenhui Xu, Dan Guo & Jianbin Luo. A review on tribology of polymer composite coatings. 2021. 9, PP. 429–470.

20. Abdulbasit Abdulqadir Hamza, Shawnam Rashied Jalal. A review on manufacturing the polymer composites by friction stir processing. *European Polymer Journal*. 178, 5. 2022. 111495.

21. Peter Filip, Zdenek Weiss, David Rafaja. On friction layer formation in polymer matrix composite materials for brake applications. *Wear*. 252(3–4), 2002, PP. 189-198.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

22. H. Unal, A. Mimaroglu, T. Arda. Friction and wear performance of some thermoplastic polymers and polymer composites against unsaturated polyester. *Applied Surface Science*. 252(23), 2006, PP. 8139-8146.

23. B.J. Briscoe. Chapter 2 - Interfacial Friction of Polymer Composites. *General Fundamental Principles. Composite Materials Series*. 1, 1986, PP. 25-59.

24. K. Friedrich. Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 1(1), 2018, PP. 3-39.

25. K. Holmberg, A. Erdemir. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5 (2017), pp. 263-284

26. M. Fox. *Polymer Tribology*, vol. 135, *Lube Magazine* (2016), pp. 32-37.

27. W.G. Sawyer, K.D. Freudenberg, P. Bhimaraj, L.S. Schadler. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with alumina nanoparticles. *Wear*, 254 (2003), pp. 573-580.

28. M.S. Sreekala, C. Eger. Property improvements of an epoxy resin by nanosilica particle reinforcement. K. Friedrich, S. Fakirov, Z. Zhang (Eds.), *Polymer Composites: from Nano- to Macro- Scale*, Springer, New York (2005), pp. 91-105.

29. F. Li, K. Hu, J. Li, B. Zhao. The friction and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene. *Wear*, 249 (2002), pp. 877-882.

30. B. Wetzel, F. Hauptert, K. Friedrich, M.Q. Zhang, M.Z. Rong. Impact and wear resistance of polymer nanocomposites at low filler content. *Polym. Eng. Sci.*, 42 (2002), pp. 1919-1927.

31. M.H. Cho, S. Bahadur. Study of the tribological synergistic effects in CuO-filled and fiber reinforced polyphenylenesulfide composites. *Wear*, 258 (2005), pp. 835-845.

32. Z.Z. Zhang, F.H. Su, K. Wang, W. Jiang, X.H. Men, W.M. Liu. Study on the friction and wear properties of carbon fabric composites reinforced with micro- and nano-particles. *Mater. Sci. Eng. A*, 404 (2005), pp. 251-258

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

33. F.H. Su, Z.Z. Zhang, K. Wang, W. Jiang, X.H. Men, W.M. Liu. Friction and wear properties of carbon fabric composites filled with nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf., 37 (2006), pp. 1351-1357.

34. Електронний ресурс. Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BF%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4%D0%BD%D1%96\\_%D1%81%D0%BC%D0%BE%D0%BB%D0%B8](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%95%D0%BF%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4%D0%BD%D1%96_%D1%81%D0%BC%D0%BE%D0%BB%D0%B8)

35. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://3316547.com.ua/ua/p1291356-otverditel-pepa-polietilenpoliamin.html>

36. Електронний ресурс. Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B5\\_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BD%D0%BE](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%BD%D0%BE)

37. Пугачевський Г. Властивості базальтових волокон / Г. Пугачевський, О. Швець // Товари і ринки. - 2012. - № 1. - С. 151-156. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/tovary\\_2012\\_1\\_21](http://nbuv.gov.ua/UJRN/tovary_2012_1_21)

38. Електронний ресурс. Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4%D0%BC%D1%96%D0%B4%D1%96\(I\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4%D0%BC%D1%96%D0%B4%D1%96(I))

39. Електронний ресурс. Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%BC\(II\)\\_%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%BC(II)_%D0%BE%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4)

40. Дисперсні та композитні матеріали: Методичні вказівки до виконання практичних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм «Матеріалознавство», «Індустріальний інжиніринг та менеджмент» галузь знань 13 Механічна інженерія спеціальності 132 Матеріалознавство денної та заочної форм навчання / уклад. О.Л. Садова – Луцьк : Луцький НТУ, 2024. – 26 с.

					MP 1124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		