

Луцький національний технічний університет

П. П. САВЧУК, В. П. КАШИЦЬКИЙ, О. Л. САДОВА

**ФОРМУВАННЯ САМООРГАНІЗОВАНИХ
СТРУКТУР В ПРОЦЕСІ ФРИКЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ
ТРИБОПАРИ ЕПОКСИКОМПОЗИТ-СТАЛЬ**

Колективна монографія

Луцьк
Вежа-Друк
2017

УДК 621.763:620.1 (066)

С 14

*Рекомендовано до друку вченою радою
Луцького національного технічного університету
(протокол № 13 від 29 червня 2016 р.)*

Колектив авторів:

Савчук П. П. – доктор технічних наук, професор (Луцький національний технічний університет);

Кашицький В. П. – кандидат технічних наук, доцент (Луцький національний технічний університет);

Садова О. Л. – кандидат технічних наук, старший викладач (Луцький національний технічний університет).

Рецензенти:

Дядюра К. О. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів Сумського державного університету;

Федосов С. А. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій;

Редько О. І. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій Луцького національного технічного університету.

Савчук П. П.

С 14 Формування самоорганізованих структур в процесі фрикційної взаємодії трибопари епоксикомпозит-сталь : колективна монографія / П. П. Савчук, В. П. Кашицький, О. Л. Садова. – Луцьк : Вежа-Друк, 2017. – 172 с.

ISBN 978-966-940-130-7

У монографії досліджено умови та визначено механізми формування самоорганізованих структур, які забезпечують стабілізацію процесу тертя та знижують інтенсивність зношування епоксикомпозитних матеріалів.

Призначена для студентів, аспірантів, інженерів матеріалознавців, які працюють в галузі розробки та застосування полімерних матеріалів трибо-технічного призначення.

УДК 621.763:667.637.22

© Савчук П. П., Кашицький В. П., Садова О. Л., 2017

ISBN 978-966-940-130-7

© Маліневська І. П. (обкладинка), 2017

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ САМООРГАНІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ В ПОВЕРХНЕВИХ ТРИБОШАРАХ.....	8
1.1. Структурні зміни та трибохімічні перетворення в поверхневих шарах трибоматеріалів.....	8
1.2. Принципи реалізації та практичне застосування ефекту вибіркового перенесення.....	16
1.3. Механізми формування та властивості сервовитної плівки.....	26
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНИХ МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	41
2.1. Характеристика і властивості вихідних матеріалів.....	41
2.2. Методи досліджень властивостей та структури розроблених епоксикомпозитних систем.....	45
2.2.1. Дослідження властивостей епоксикомпозитів.....	46
2.2.2. Методика визначення ударної міцності.....	48
2.2.3. Методика визначення структурування епоксиолімерних систем.....	48
2.2.4. Методи визначення термічної та хімічної стійкості.....	49
2.2.5. Дослідження триботехнічних характеристик.....	50
2.2.6. Дослідження макро- та мікроструктури.....	53
2.3. Методи формування епоксикомпозитів.....	54
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА СТРУКТУРИ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ.....	56
3.1. Дослідження механічних характеристик та ступеня структурування епоксикомпозитних матеріалів.....	56
3.2. Дослідження хімічної стійкості епоксикомпозитів.....	70
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ.....	73
4.1. Зносостійкість епоксикомпозитів, додатково наповнених базальтовими волокнами.....	73

4.2. Зносостійкість епоксикомпозитів, додатково наповнених подрібненим вуглецевим волокном.....	84
4.3. Вплив технології формування та режимів експлуатації на зносостійкість епоксикомпозитів.....	106
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ, СТРУКТУРИ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ.....	129
5.1. Дослідження інтенсивності зношування епоксикомпозитів залежно від шляху фрикційної взаємодії...	129
5.2. Дослідження процесів поглинання, корозійної та атмосферної стійкості епоксикомпозитів.....	131
5.3. Дослідження термічної стійкості полінаповнених епоксикомпозитів.....	137
5.4. Аналіз фрактограм зламу епоксикомпозитного матеріалу.....	139
5.5. Дослідження структури та хімічного аналізу трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу.....	140
5.6. Дослідження структури та хімічного аналізу трибоповерхні контртіла.....	145
5.7. Технологія виготовлення виробів та рекомендації до їх застосування.....	151
ВИСНОВКИ.....	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	155

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 в'язучого, структура і властивості якого визначають допустимі режими експлуатації матеріалу в цілому. 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 в режимі середніх навантажень та швидкостей ковзання.

Перспективними матеріалами для виготовлення підшипників ковзання є полімеркомпозити, зокрема на основі епоксидних смол. Дані олігомери 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.

Науковими школами вітчизняних вчених та науковців ближнього зарубіжжя значний прогрес був досягнутий в створенні нових конкурентоздатних триботехнічних матеріалів на основі епоксидної матриці. Основні дослідження в даному випадку були направлені на встановлення закономірностей взаємодії компонентів у композитній системі та вивчення механізмів деформаційних та структурних перетворень в зоні трибоконтакту. Також встановлено, що висока когезійна міцність матеріалу до різного роду навантажень в значній мірі залежить від природи та властивостей вибраних наповнювачів, які, окрім армування, виконують також мастильну функцію. Це сприяє стабілізації процесу тертя за рахунок формування стійких

поверхневих плівок з низьким опором зсуву та високою адгезією до поверхні контртіла.

Розробка нових епоксикомпозитів пов'язана з врахуванням процесів інтенсифікації швидко-навантажувальних режимів експлуатації машин та механізмів, додаткового впливу агресивних середовищ. Тому важливим є науково обгрунтоване застосування новітніх компонентів у полісистемах (або їх поєднання) та встановлення закономірностей функціонування матеріалу для регулювання його властивостей у широких межах.

Направлене формування полінаповнених епоксикомпозитних матеріалів дозволяє суттєво підсилити їх експлуатаційні характеристики. Тому важливим є аналіз комплексного впливу мінеральних та органічних різнофункціональних наповнювачів на структуроутворюючі процеси, фізико-механічні та теплофізичні характеристики епоксикомпозитів.

Полімеркомпозитні матеріали набули широкого застосування для захисту технологічного устаткування, виготовлення самомастильних матеріалів у трибовузлах, де небажане або неможливе зовнішнє підведення мастил.

Однак створені матеріали не в повній мірі задовільняють споживача через недостатню когезійну міцність, термо- та зносостійкість епоксикомпозитних систем. Використання епоксикомпозитних матеріалів у вузлах тертя без мастила при жорстких навантажувально-швидкісних режимах потребує введення до їх складу термостабілізуючих добавок, які б виступали сповільнювачами деструктивних процесів у випадку виникнення високих температур в зоні трибоконтакту.

Особливістю трибозаємодії модифікованих полімеркомпозитів є процеси, що пов'язані із трансформацією поліфазної структури поверхневих шарів. Тому виникає потреба у детальному вивченні процесів дифузійного перерозподілу елементів, вибіркового масоперенесення та фазових структурних перетворень трибошару, формування якого визначається фазовим складом полімеркомпозиту та навантажувально-швидкісним режимом фрикційної взаємодії

Важливим аспектом є також забезпечення керованості процесів перетворень структури, які відбуваються в зоні трибоконтакту при фрикційній взаємодії, що дозволить підвищити ресурс роботи трибовиробів.

Одним із способів реалізації процесу самозмащування є забезпечення фрикційного вибіркового перенесення, тобто генерації в зоні тертя суцільного або фрагментарного прошарку, який відділяє поверхні контакту і активно впливає на характер тертя та зношування. Захисні плівки, які формуються під час тертя і відрізняються від вихідного матеріалу структурою, хімічним і фазовим складом. Утворенню захисної плівки і зниженню коефіцієнта тертя сприяють дисперсні та волокнисті наповнювачі, що виконують функцію твердих мастильних матеріалів та можуть переноситися на поверхню контртіла. В окремих випадках дані плівки можуть навпаки підвищувати інтенсивність зношування при зміні умов експлуатації.

Ефективне вивчення процесів тертя і зношування композитних матеріалів на основі реакційноздатних полімерів потребує нових знань про закономірності утворення на контактуючих трибоповерхнях плівок перенесеного матеріалу, механізм їх утворення і вплив нових структур на фрикційні характеристики. Тому дослідження процесів фрикційного переносу та самоорганізації структури поверхневого шару трибоконтакту у вузлах тертя відкриває новий етап у розвитку триботехніки.

РОЗДІЛ 1

ПРИНЦИПИ САМООРГАНІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ В ПОВЕРХНЕВИХ ТРИБОШАРАХ

1.1. Структурні зміни та трибохімічні перетворення в поверхневих шарах трибоматеріалів

На теперішній час актуальним є розвиток трибоматеріалознавства в наступних напрямках: розробка нових і вдосконалення існуючих матеріалів та розробка технології поверхневого зміцнення і нанесення захисних покриттів, які мають високі триботехнічні властивості. Вивчення питань тертя, зношування, мащення є основною задачею підвищення довговічності машин та механізмів [1–3].

Тертя є складним процесом взаємодії триботіл, що супроводжується наступними явищами: окиснення внаслідок взаємодії поверхні тертя із навколишнім середовищем; дифузійним перерозподілом елементів в поверхневому шарі; вибірконим масопереносом; фазовими структурними перетвореннями; абсорбційним зниженням міцності поверхневого шару; розподілом напружень в дотичних поверхнях та релаксацією останніх [2, 3].

Водночас під впливом супроводжуючих тертя фізичних, хімічних, електрохімічних і механічних впливів властивості матеріалу, його склад і структура в поверхневих шарах контактної взаємодії піддаються неперервним змінам. В результаті на робочих поверхнях можуть утворюватись продукти зношування і вторинні структури, хімічний склад і структура яких відмінні від складу і структури вихідних речовин пар тертя, що впливає на зносостійкість трибовузла. Опір матеріалу поверхневого шару, сили адгезії і механізм зношування неперервно змінюються під впливом зовнішніх факторів. Тому зміну структури робочого поверхневого шару можна розглядати як деяку послідовність переходу із вихідного стану в характерний для певних умов динамічного контакту

робочий стан. Основна суть даного переходу визначається фізико-хімією поверхневих явищ і закономірностями деформації матеріалів.

Тому під час тертя визначальним є не лише вихідний стан структури матеріалу, а також структура поверхневого шару, виникнення і формування якого характерне для умов, в яких відбувається фрикційна взаємодія [2].

Відкритий П. А. Ребіндером ефект адсорбційного зниження міцності твердих тіл змінив уявлення про вплив мащення на процеси в зоні тертя, пов'язані зі структурною самоорганізацією. Під час взаємодії поверхнево-активних речовин з твердими тілами структура поверхонь тертя зазнає значних змін за рахунок хімічної адсорбції і пластифікування, що впливає на характеристики тертя і зношування.

У сфері триботехнічного матеріалознавства, технологічних методів підвищення зносостійкості деталей машин, створення полімеркомпозитних структур триботехнічного призначення слід відзначити праці В. А. Білого, І. М. Любарського, О. П. Семенова, М. О. Буше, М. М. Дорожкіна, І. М. Федорченка, А. Г. Косторнова, В. І. Тихоновича, М. І. Пашечка, М. В. Кіндрачука, Л. І. Івщенка, В. М. Голубця, В. І. Похмурського, В. Г. Каплуна, П. І. Мельника, В. Ф. Лабунця, В. В. Щепетова, П. Д. Стухляка, Г. О. Сіренка, А. В. Букетова та ін.

Вивченню сумісності матеріалів присвячені праці Б. І. Костецького, Д. М. Гаркунова, М. М. Хрущова, М. О. Буше, Ф. П. Боудена, Д. Тейбора. За твердженням Буше, сумісність матеріалів тертя полягає в їхній здатності пристосовуватися один до одного і до умов тертя, що змінюються, з врахуванням взаємодії матеріалів з мастилом і навколишнім газовим середовищем. Це забезпечує задану довговічність вузла тертя і стійкість його роботи без мащення або в режимі порушення цілісності мастильного шару.

З позиції сучасного розуміння проблеми створення високоефективних триботехнічних матеріалів для заданих і особливо екстремальних умов експлуатації (високі наванта-

ження і швидкості ковзання, глибокий вакуум, знакозмінні температури, великий ресурс роботи і надійність, малий час припрацювання тощо), процес їх розробки і конструювання включає наступні підходи:

- основу матеріалу, яка, як правило, є композитною, вибирають враховуючи відповідність комплексу її фізико-механічних і триботехнічних властивостей заданим навантажувально-швидкісним і температурним режимам роботи;

- для зниження втрат на тертя в основу вводять твердий мастильний компонент, який утворює на трибоповерхнях екрануючі плівки, не взаємодіючи з основою композитного матеріалу;

- за жорстких умов роботи в матрицю вводять тверді тугоплавкі включення, які сприймають основне навантаження під час тертя;

- для підвищення міцності зв'язку між матрицею і тугоплавкими включеннями в склад композиції вводять адгезійно-активні компоненти, які покращують змочування останніх [2–4, 5–9].

Керування процесами тертя і зношування є центральною ланкою у розв'язанні проблем економії енергії, скорочення витрат матеріалів, забезпечення надійності, довговічності та безпеки механічних систем [10, 11].

Зношування високомолекулярних з'єднань залежить, головним чином, від структурної будови полімерної матриці [12–14] та її фізико-механічних властивостей. Фрикційна взаємодія контактуючих поверхонь є сукупністю механічного й температурного впливів на тверді тіла, що приводить до деформаційних і структурних змін матеріалів в зоні тертя, завдяки яким тонкий поверхневий шар насичується киснем та елементами контактного матеріалу. У ньому відбувається розрив хімічних зв'язків та утворення вільних радикалів, що зумовлює фрагментацію поверхневого шару і появу мікропустот [15–19].

В роботах [15, 20] показано, що за низьких швидкостей ковзання (менше 0,1 м/с) і тиску менше 0,5 МПа механічна робота витрачається на деформацію поверхневих шарів. За швидкості ковзання більше 0,1 м/с і незмінному тиску процес зношування в значній мірі визначається інтенсивністю теплових процесів в зонах фрикційного контакту. Тривалість існування, напрямок і швидкість переміщення даних зон по контактній площині пов'язані з механічними властивостями і опором матеріалів пари тертя зношуванню. Високі щільності теплового впливу можуть сприяти переходу матеріалів в контактних мікрооб'ємах з твердого стану в високоеластичний, рідкий, газоподібний і плазмовий, що підвищує роль локального фізико-механічного руйнування [21]. Коли досягається рівність локальної температури і температури деструкції одного з матеріалів, стає можливим перехід до катастрофічного зношування. Температура є головною причиною більшості структурних перетворень на поверхнях тертя, яка активізує утворення мікротріщин, всі трибохімічні реакції та формування «третього тіла».

Інтенсивність формування «третього тіла» визначається трибохімічними процесами, що протікають у зоні фрикційного контакту між поверхнями дотичних тіл. Активним елементом в хімічних реакціях виступає ювенільна поверхня, кількість якої в поверхневих шарах і визначає кінетику трибохімічних реакцій. Оксидна плівка гальмує і в кінцевому рахунку перешкоджає формуванню «третього тіла» у вигляді плівки переносу, про що свідчить збільшення коефіцієнта тертя, за умови збільшення концентрації оксидів на поверхні контртіла. Для підсилення процесів плівкоутворення в зону контакту вводять активні добавки, найефективнішими серед яких є металоорганічні комплекси [22–24].

Прийнято вважати, що класичне поняття тертя полягає в аналізі процесів руйнування і видалення матеріалу з трибоповерхні. Однак, змінюючи зовнішні параметри дії на властивості вузла тертя, можна добитися стану трибосистеми, в

якій умови роботи вузла тертя зміняться в сторону накопичення матеріалу на трибоповерхні. Встановлено, що у відкритих трибосистемах, які постійно отримують із зовнішнього середовища негативну ентропію речовини, можуть виникати стаціонарні нерівноважні стани із високим ступенем організованості. Існує багато різних присадок на основі м'яких металів (молібден, олово, свинець, мідь, срібло тощо), які можна вносити в зону тертя в дрібнодисперсному вигляді або на іонному рівні в результаті хімічних реакцій компонентів мастила з джерелом м'якого металу [25–29].

Багатоваріантність фізико-механічних і триботехнічних властивостей композитів, яка визначається сукупністю характеристик матриці і наповнювача, дозволяє отримувати унікальні матеріали, які можуть бути використані в умовах тертя без мастильного матеріалу [30–32].

Полімери можуть використовуватися як антифрикційні матеріали у чистому вигляді або у вигляді композитних матеріалів з різними наповнювачами. З полімерних матеріалів виготовляють зубчаті колеса, шків, елементи підшипників ковзання, кулачкових механізмів, напрямних, ущільнень, сепаратори підшипників, втулки шарнірів і тощо [4, 33–35]. Для легконавантажувальних вузлів тертя використовують полімерні матеріали, які мають високі триботехнічні характеристики і здатні експлуатуватися без мастильного матеріалу. Однак низька навантажувальна здатність, теплопровідність і теплостійкість потребують модифікування полімерів, зниження товщини виробу або застосування їх для формування тонкого робочого шару, закріпленого на жорсткій основі [36–39].

Підвищення температури в вузлі тертя призводить до деструкції зв'язуючого та структурних перетворень полімерної матриці. Автори роботи [38] використовують тепловий вплив для підвищення триботехнічних характеристик графітопласту, виготовленого на основі епоксикремнійорганічної матриці і графітизованої тканини. Так, наприклад в роботі [40] вказано, що підвищенням швидкості ковзання до 0,4...0,5 м/с, що відповідає

росту температури в зоні тертя до 95...100° С, спостерігається різке зниження коефіцієнта тертя до 0,06. Дані характеристики матеріалу зумовлені впливом полімерної матриці і наявністю в її складі спеціальних органічних присадок. За температури нижчої 80° С тепловий вплив недостатній для початку дії органічних присадок. З ростом температури в зоні контакту стає можливою адсорбція молекул органічних присадок і їх орієнтація вздовж поверхні тертя.

Введення до складу епоксидної матриці антифрикційних дисперсних наповнювачів зумовлює підвищення триботехнічних характеристик композиту [41]. В роботі [42] розглянуто особливості трибозаємодії композиту, наповненого поліетиленом. Під дією температури і великих питомих навантажень пластифікований поліетилен проникає в зону тертя, адсорбуючись на поверхні контртіла, заповнюючи нерівності поверхні і утворюючи резервуари мастильного матеріалу. У цьому випадку тертя відбувається між «третім тілом» і поверхневим шаром композиту. Із підвищенням температури текучість поліетилену збільшується, що приводить до видалення його з зони тертя, зниження зносостійкості матеріалу.

Полімерні матеріали широко застосовують у вузлах тертя сучасних машин і механізмів. Використання пластмас дозволяє збільшити надійність і довговічність машин, поліпшити їх експлуатаційні, техніко-економічні характеристики й технологічність, відмовитися від дефіцитних сплавів кольорових металів і понизити вартість машин [33, 43, 44].

Під час тертя чи механічної обробки поверхневий шар твердого тіла піддається деформуванню, інтенсивній тепловій дії, насичується елементами матеріалу контртіла і зовнішнього середовища. За фрикційного навантаження в поверхневому шарі полімеркомпозитного матеріалу відбуваються структурні зміни, які забезпечують різні властивості полімеркомпозитів на глибині. В результаті деформування і імпульсного нагрівання матеріалу під час тертя відбувається часткова деструкція молекулярних ланцюгів, що супроводжується виділенням

газоподібної фази. Змінюється фазовий склад, подрібнюються надмолекулярні структури і кристалічні області, відбувається локальна аморфізація кристалічного полімеру. Спостерігається орієнтація структури в напрямку дії сил тертя [36, 37, 45].

На зношування композитних матеріалів впливають умови досліджень на тертя – навантаження і швидкість ковзання. Інтенсивність зношування більше залежить від прикладеного тиску, ніж від швидкості ковзання. Так, із збільшенням навантаження в умовах тертя з постійною швидкістю, зношування зростає в середньому в 1,7...2,0 рази. Підвищення швидкості ковзання за постійного навантаження збільшує зношування в 1,4...1,65 рази [46–48].

Особливістю трибопроцесів, які протікають в зоні тертя композитних матеріалів, є утворення захисних поверхневих шарів, які формуються під час тертя і відрізняються від вихідного матеріалу структурою, хімічним і фазовим складом. Але в зв'язку з дією абразивних частинок в початковий період відбувається утворення і руйнування захисних плівок і вихід на поверхню елементів армуючої складової. В цьому випадку найменша швидкість ковзання композитного матеріалу з металевим зв'язуючим пояснюється тим, що термічні напруження, які утворилися за рахунок нерівномірного лінійного розширення (під дією тепла в зоні тертя) компонентів композиції, приводять до виділення деякого об'єму металевої матриці на поверхні тертя у вигляді захисної плівки. Вона має більшу механічну міцність і хімічну стійкість до окиснення. Але з підвищенням питомих навантажень вище 1,2 МПа починає інтенсивно окислюватись поверхня тертя металевого зв'язуючого. Вважають, що підвищення навантаження, а відповідно, і температури в зоні тертя приводить до утворення оксидних плівок із металевого зв'язуючого. З часом дані плівки стають крихкими і руйнуються [48–50].

Однак дослідження даних композитних матеріалів за незмінних умов обумовлені зниженням коефіцієнта тертя і стабілізацією зношування з часом. Очевидно, зниження коефі-

цієнта тертя в даному випадку пов'язане з утворенням стійкої сервовитної плівки із металевого зв'язуючого. Збагачена міддю плівка сприяє зниженню коефіцієнта тертя за рахунок зменшення адгезійної складової сил тертя і, як наслідок, зменшенню продуктів зношування [2, 51].

Утворенню мастильної плівки і зниженню тертя сприяють наповнювачі у вигляді твердих мастильних матеріалів, частинки яких можуть переноситися на поверхню контртіла. Під час тертя полімерних композитів з вуглеграфітовими наповнювачами утворюються плівки, які чутливі до рідин. У випадку потрапляння води під час тертя нержавіючої сталі по епоксидній смолі, наповненій вуглецевими волокнами, спостерігається утворення ювенільної поверхні металу, що призводить до збільшення швидкості зношування в десятки і сотні разів [9, 52, 53].

Доведено, що високі триботехнічні характеристики і їх стабільність для композитних самозмащувальних матеріалів функціонально адаптовані до умов експлуатації. Це додатково підтверджується проведенням триботехнічних досліджень на повітрі. Серед характеристик адаптованої здатності і надійності функціонування трибосистем в екстремальних умовах важливе значення має закладена в композитний матеріал вузла тертя здатність до відновлення експлуатаційних властивостей за відхилення від заданих умов роботи [2].

Під час вивчення тертя і зношування термореактивів (зокрема на основі епоксидних олігомерів) велике значення отримують знання закономірностей утворення на контактуючих поверхнях плівок перенесеного матеріалу, їх механізм і вплив на фрикційні характеристики. На сьогодні існує великий експериментальний матеріал, що стосується різних сторін даного явища [54–59], однак багато питань залишається невирішеними. Тому оцінка кінетики даного процесу, морфології і кількісних характеристик продуктів переносу залежно від структури і властивостей поверхневих шарів, вплив температурно-часових і

навантажувально-швидкісних параметрів, моделювання і аналітичний опис процесу утворення і фрикційної поведінки «третього тіла», а також пошук методів управління фрикційним переносом визначають коло основних задач даного напрямку трибоматеріалознавства [60, 61].

1.2. Принципи реалізації та практичне застосування ефекту вибіркового перенесення

Явище вибіркового перенесення було відкрито Д. М. Гаркуновим і І. В. Крагельським під час дослідження технічного стану вузлів тертя літака. На різних етапах його експлуатації було виявлено явище самовільного утворення тонкої плівки міді на поверхнях деталей важконавантажених вузлів. Під час роботи пари тертя сталь-бронза, змащених спиртогліцериновою сумішшю, утворилась плівка міді, яка покривала бронзу і сталь. Вона різко знижувала зношування пари тертя і зменшувала силу тертя приблизно в 10 разів.

Вибіркове перенесення є складним саморегульованим процесом, який супроводжується фізико-хімічними, електрохімічними та механічними явищами в парах тертя. Під час цього в зоні контакту мимовільно утворюється пластична плівка товщиною 1...2 мкм із постійним числом дислокацій і великою кількістю вакансій. Для процесу вибіркового перенесення характерне перенесення матеріалу з однієї поверхні пари тертя на іншу без зростання сили та коефіцієнту тертя, різке зниження коефіцієнта тертя (0,01...0,005) та зношування (10^{-10} ... 10^{-12}) [62].

Виникаюче під час тертя вибіркове перенесення є явищем, протилежним зношуванню. Під час тертя всі процеси в зоні контакту зводяться до руйнування поверхні, а процеси за вибіркового перенесення – необоротні і відносяться до самоорганізованих процесів неживої природи. На практиці даний ефект проявляється частково через специфічні умови роботи

вузлів тертя. Тому ефект незношування досягається не у всіх випадках. Під ефектом незношування розуміють принцип, на основі якого зменшуються сили тертя і інтенсивність зношування деталей [24].

Б. І. Костецький не підтверджує можливість створення умов незношування тертя, пояснюючи це тим, що зовнішня механічна дія неминуче призводить до руйнування вторинних структур. Переведення вузлів тертя в режим структурного пристосування дозволить знизити зношування вузла тертя і, відповідно, підвищить його довговічність.

Досліджено, що вибіркове перенесення можуть реалізувати наступні метали: Sn, Pb, Cu, Ag, Au, Cr, Fe, Co, Ni. Вони можуть використовуватись в різних парах тертя [62]. Умови, необхідні для реалізації вибіркового перенесення, приведені в табл. 1.1 [30].

Таблиця 1.1

Умови, необхідні для реалізації вибіркового перенесення

Група умов	Елемент системи тертя	Основні вимоги до фрикційних трибопар	Можливі варіанти реалізації
1	2	3	4
Характеристика матеріалу	Трибо-технічна пара	1. Легкість відновлення металу з оксидів. 2. Висока адсорбція мастила. 3. Каталітична дія металевої поверхні на трибохімічні реакції. 4. Відсутність забруднень на робочих поверхнях.	1. Сталь по міді чи її сплавах (латунь, бронза). 2. Сталь по сплавах, що містять срібло. 3. Сталь по золоту і його сплавах. 4. Сталь по платині і її сплавах.

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
	Мастильний матеріал	1. Здатність до утворення метало-органічних полімерних продуктів. 2. Вибіркове розчинення легуючих елементів матеріалів тіл тертя. 3. Мала молекулярна маса. 4. Відновлювальна дія 5. Мала окислювальна здатність. 6. Забезпечення якісного тепловідведення. 7. Висока змащувальна здатність. 8. Стабільність властивостей.	1. Гліцерин (технічно чистий, з малим вмістом води). 2. Різноманітні спирти. 3. Суміші гліцерину зі спиртом. 4. Морська і річкова вода 5. Мастильні пластичні матеріали, (ЦИАТИМ 201, ЦИАТИМ 203, гідравлічне масло АМГ 10), полімерні фторвуглецевмісні змащувальні матеріали для високих температур, гліцерин з добавками аніліну, соляної кислоти тощо; мінеральний мастильний матеріал з добавками стеарату алюмінію (приблизно 1 %)

Закінчення таблиці 1.1

1	2	3	4
Мікро-геометричні характеристики	Триботехнічна пара	Рекомендується приймати шорсткість $R_z \leq 10$ мкм	
Енергетичні умови	Триботехнічна пара	1. Швидкість ковзання $V < 6$ м/с. 2. Контактний тиск не більше $P_a = 40$ МПа. 3. Не дуже високі температури (40-65° С).	Характерні умови для пар тертя, що працюють в режимі граничного мащення
Кінематичні умови	Триботехнічна пара	Знакозмінний рух (переважно)	

Однак аналіз матеріалів, які здатні до самоорганізації (структурного пристосовування) під час фрикційної взаємодії, свідчить про те, що не всі структурні зміни, які відбуваються на поверхнях тертя, сприяють зниженню зношування в умовах тертя за граничного мащення і мащення без мастильного матеріалу [24].

Способи застосування вибіркового перенесення досить різноманітні, що дає можливість широкого використання його не тільки у вузлах тертя бронза-сталь, але і у вузлах пластмаса-сталь і сталь-сталь. Можливі наступні способи використання вибіркового перенесення у вузлах тертя:

- застосування рідких і консистентних мастил, які викликають вибіркове перенесення у вузлах тертя бронза-сталь і бронза-хромове покриття;

- застосування латунювання одного з елементів у вузлах тертя сталь-сталь і використання його з мастилом, яке викликає вибіркове перенесення у латунному шарі;
- застосування металоплакуючих консистентних мастил у вузлах тертя сталь-сталь, які виділяють сервовитний шар на сталевій поверхні;
- застосування композитних (з латунню) матеріалів у вузлах тертя композитний матеріал-сталь;
- застосування пластмас з наповнювачем Cu_2O у вузлах тертя пластмаса-сталь [19, 63].

Вибіркове перенесення використовують у літаках (вузли тертя шасі і планера), автомобілях (вузли передньої підвіски, карданні шарніри), металообробних верстатах (направляючі, пара гвинт-гайка), парових машинах (циліндр-поршневе кільце), редукторах (черв'як-колесо), металопресовому і хімічному обладнанні, механізмах морських суден (підшипники ковзання і кочення, ущільнення), водневих насосах (вузли розвантаження, ущільнюючі пристрої), обладнання магістральних нафтопроводів, електробурах (ущільнюючі пристрої), холодильниках (трибодеталі компресора), гідронасосах (вузли тертя), нафтопромислового обладнанні (вузли тертя насосів). Вибіркове перенесення використовують у приладах (електричні контакти низького струму з благородних металів). Під час різання вибіркове перенесення підвищує стійкість ріжучого інструменту.

Залежно від виду мастильного матеріалу, матеріалів трибопари і умов тертя механізм формування сервовитної плівки на поверхнях тертя різний.

Експериментально встановлено, що мідна плівка в парі бронза-сталь утворюється в результаті анодного розчинення бронзи. Легувальні елементи – цинк, олово, алюміній, залізо переходять в мастильний матеріал, і поверхня збагачується міддю. Після покриття поверхонь бронзи і сталі міддю, розчинення припиняється і встановлюється режим вибіркового перенесення [3, 64]. Наприклад, у вузлах тертя компресора

домашнього холодильника мідна плівка в парі сталь-сталь виникала в результаті розчинення мідних трубок охолоджувача компресора. Іони міді, надходячи в мастильнофреонову суміш, рухалися в зону контакту, де формувалася захисна мідна плівка, тому компресори холодильників можуть працювати без ремонту десятки років.

Сервовитна плівка може утворюватись у вузлі тертя сталь-сталь у процесі роботи з металоплакуючими мастильними матеріалами, які містять дрібні частинки бронзи, міді, свинцю, срібла тощо. У разі використання мастила ЦІАТИМ-201 з домішками порошку міді, бронзи чи латуні, а також свинцю в парі сталь-сталь поверхні деталей покриваються тонкою плівкою, яка складається з металу використаних порошків. В процесі роботи порошки частково розчиняються в мастильному матеріалі і міцно схоплюються із поверхнею сталі за рахунок відновлення оксидних плівок, утворюючи сервоподібну плівку. Такі плівки пластичних металів пористі і містять у порах мастильний матеріал. Коефіцієнт тертя за високих навантажень знижується, а сталеві поверхні майже не зношуються.

У промисловості розроблений ряд порошкових твердоспечених матеріалів, які працюють у режимі вибіркового перенесення. Шихта для таких матеріалів готується з дрібнодисперсних сумішей порошків ВК3, ВК6, ВК8 або із зазначених сумішей із додаванням литого карбиду вольфраму ($WC + W_2C$) – реліту зернистістю 0,1...0,25 мм у відношенні 1:3. Як в'язучий матеріал застосовують сплави, що містять мідь, зокрема мідно-нікелеві сплави, із високою рідкотекучістю, що забезпечує високу міцність зчеплення порошкового матеріалу. Порошкові матеріали можуть працювати в режимі вибіркового перенесення у випадку мащення нафтою, нафтопродуктами і стічними водами. Сервоподібна плівка утворюється на поверхні твердих складових сплаву в результаті механічного витиснення м'якої складової і її наступним розчиненням. Дані сплави здатні працювати в однойменній парі (композитний матеріал по композитному матеріалу). Дане поєднання матеріалів

працездатне лише за рахунок утворення сервовитної плівки, яка забезпечує мащення твердих складових порошкової композиції, оскільки без мідної плівки останні не можуть витримувати велике навантаження – відбувається дряпання поверхонь [3, 65].

Несподіваним було виявлення сервовитної плівки міді на опорних підшипниках ковзання, які застосовуються в турбінах і турбокомпресорах. Підшипник складається з упорного сталевго гребеня, нерухомо закріпленого на обертовому валу, і корпусу, в середині якого розміщені по колу подушки (сегменти), які плавають. До останнього часу сегменти виготовляли з бронзи БрОФ 8,0-0,30, на яку наплавляли бабітовий шар завтовшки кілька міліметрів. Дана конструкція, відома під назвою підшипників Мітчеля, застосовується давно в упорних підшипниках ковзання. Б. П. Кузовкін разом зі співробітниками Інституту проблем матеріалознавства НАН України запропонували наносити на поверхню бронзового сегмента бронзофторопласт через напікання шару порошку олов'янистої бронзи БрОФ 8,0-0,30 з частинками сферичної форми і просочення шару суспензією фторопласту 4Д з наступним калібруванням фторопластового шару. На шарі фторопласту і сталевго поверхні утворюється сервоподібна плівка. Завдяки тривалим промисловим випробовуванням були встановлені велика зносостійкість і надійність роботи таких підшипників.

Сервоподібна плівка може утворитися внаслідок тертя політетрафторетилену (ПТФЕ), наповненого оксидом міді, по сталі у середовищі гліцерину. В даному випадку плівка утвориться в результаті відновлення оксиду до чистої міді. Сталева поверхня покривається шаром міді.

В останні роки виявлено специфічний механізм утворення сервовитної плівки в парі тертя сталь-волокна ПТФЕ, наповненого тонким мідним дротом. За кордоном широко застосовують підшипники ковзання з ПТФЕ, наповненого бронзою. За поєднання таких підшипників в парі зі сталевим валом, їх поверхні збагачуються міддю, формуючи сервоподібну

мідну плівку і металополімерний шар. Однак, механізм роботи таких підшипників з'ясований недостатньо [3, 66–69].

В вищому технічному училищі міста Магдебурга (Німеччина) проведено експериментальне дослідження, результати якого показали, що підшипники ковзання, які працюють в режимі вибіркового перенесення, мають кращі антифрикційні характеристики, ніж підшипники, змащені моторним маслом і поліетиленгліколем.

М. Б. Рубіном і В. М. Зінов'євим проведено дослідження по створенню важконавантажувальних підшипників ковзання, придатних для роботи в морській воді. Для введення необхідних речовин в зону контакту металів ефективним виявилось використання методу ротапринту. Самозмащувальні елементи можуть бути виготовлені з матеріалу на полімерній основі із відповідними наповнювачами. Сервовитний шар, який утворюється під час вибіркового перенесення і забезпечує велику навантажувальну здатність та високу зносостійкість пари тертя, в даному випадку, крім пластичної міді, містить полімер, продукти його деструкції і наповнювачі [24, 70–72].

Б. Д. Воронковим і В. Г. Шадріним розроблена композиція Ф40Б70 на основі фторопласту-40 з добавкою 70 % бронзового шроту. Її використовували для виготовлення сепараторів підшипників кочення електроприводів апаратів з механічним перемішуючим пристроєм. Дослідження в різних мастильних середовищах (кислі електроліти) виявили високу зносостійкість таких кулькових підшипників. Смуги в напрямку тертя підшипників під час роботи покривались тонким шаром міді, що сприяло компенсації зношування, стабілізації зазорів, зниженню рівня шуму і вібрації електродвигуна. Також були проведені роботи по підвищенню довговічності металопластмасових опор ковзання валів хімічних апаратів з використанням вибіркового перенесення. Б. Д. Воронков і В. Г. Шадрін запропонували конструкцію опори, корпус якої виконаний із бронзи БрАЖ9-4, а вставки-протектори – із фторопластової композиції Ф4-К 20; кришки підшипника – із мідних сплавів (бронзи, латуні). Дані

підшипники мають довговічність в 3...4 рази вищу, ніж пластмасові. Особливо ефективним є застосування подібних підшипників ковзання в опорах апаратів, робоче середовище яких містить абразивні суспензії [40, 73, 74].

На думку Л. А. Кольцова, для реалізації вибіркового перенесення під час тертя полімер повинен мати низький коефіцієнт тертя за заданих умов роботи, мінімальний час релаксації в діапазоні експлуатаційних температур, бути еластичним (забезпечувати відновлення деформації поверхневого шару) та містити антифрикційні тверді наповнювачі. Метою досліджень є реалізація процесу вибіркового перенесення під час тертя поліуретанових ущільнень із сталевую поверхнею з формуванням більш стійких полімерних структур в поверхневих шарах. Введення в матеріал мідного порошку надало сталевому валу високої зносостійкості, оскільки на його поверхні утворилась сервовитна мідна плівка, що захищає поверхню вала від зношування і знижує коефіцієнт тертя. Залежно від умов експлуатації пар тертя в композитні поліуретанові системи вводять спеціальні легувальні добавки і присадки. Для ущільнень, які працюють в контакті з водою, присадки повинні надати полімеру гідрофобні властивості, щоб уникнути поглинання ними води. Промислові дослідження ефективності композитних поліуретанових ущільнень, які працюють в режимі вибіркового перенесення, показали значно вищу зносостійкість традиційних.

Вузли тертя бурового і нафтопромислового обладнання (турбобури, насоси внутрішньопромислового перекачування нафти, насоси підтримання пластового тиску) працюють в дуже важких умовах, коли мастилом для пар тертя є робочі середовища, які містять механічні добавки або є хімічно активними. Забезпечення даних умов тертя з герметичною мастильною ванною є неможливим або складним і дорогим процесом, тому необхідно було розробити матеріали з високою зносостійкістю і здатністю працювати в робочих середовищах з добавками абразиву і води. В даному випадку більш доцільно

використовувати композитні матеріали, що пов'язано з можливістю широкого регулювання їх структури та властивостей шляхом поєднання в широкому діапазоні різноманітних компонентів. Однак виготовлення деталей із зносостійких композитних матеріалів, а також інших твердих матеріалів ускладнене, тому що вони складно піддаються механічній обробці. Тому кращим варіантом є отримання комбінованої деталі, в якій зношувана частина виконується з композитного матеріалу, а основна із сталі. Виходячи з даних вимог, М. В. Голуб розробив зносостійкий матеріал ТМ-1, який працює в режимі вибіркового перенесення. Даний матеріал отримують спіканням суміші порошків карбідів вольфраму і кобальту різної зернистості з одночасним просоченням їх мідно-нікелевими сплавами у водневому середовищі. Кобальт і нікель забезпечують міцне зчеплення зерен карбідів вольфраму внаслідок високої розчинності вольфраму в даних металах. Наявна в мікропорах сплаву мідь створює умови для виникнення вибіркового перенесення під час роботи трибопар у нафті і воді. Сплав ТМ-1 першочергово застосували для підвищення строку служби потужних насосів трубопровідного транспорту і насосів закачування води в нафтовий пласт. Він може працювати в забрудненому абразивом середовищі. Висока твердість і антифрикційність пари тертя забезпечує роботу ущільнення без зупинки насосу більше 10000 год, що в 4...5 разів перевищує довговічність ущільнень з парами тертя сталь по вуглеграфіту. Науковий та практичний інтерес представляє пара тертя сплаву ТМ-1 по бронзі БрОЦС5-5-5 за умов роботи на дизельному паливі, яка працює в режимі вибіркового перенесення. Плівка міді в процесі тертя утворюється на контактних поверхнях на бронзовому і твердосплавному кільцях, забезпечуючи низький коефіцієнт тертя (0,05...0,07) і високу навантажувальну здатність трибовузла [24, 75, 76].

1.3. Механізми формування та властивості сервовитної плівки

Системи автокомпенсації процесів зношування та тертя ґрунтуються на фізико-хімічних процесах і явищах, які забезпечують полегшення зсуву під час трибозаємодії або запобігають зношуванню [19]. На практиці у вузлах тертя можуть поєднуватися різні системи зниження зношування і тертя: система зниження адгезії, система збудження кристалічної ґратки, система зниження механічної складової сили тертя, система зниження тиску, система запобігання окислення металу під час тертя, система саморегулювання [77]. Під час тертя за граничного навантаження, спочатку, коли діє підвищене навантаження, коефіцієнт тертя підвищується і відбувається розігрів поверхонь. Після зняття додаткового тиску тертя поступово знижується до початкового рівня.

У режимі вибіркового перенесення після зняття навантаження тертя може різко падати, але потім поступово підвищується до початкового рівня. Суть цієї реакції аналогічна реакції за підвищення температури – перехід від адсорбції до хемосорбції, додаткового розчинення і утворення поверхнево-активних речовин. Утворені на початковій стадії тертя поверхнево-активні речовини інтенсифікують під час тертя процес поверхневого диспергування. Адсорбуючись на диспергованих частинках, поверхнево-активні речовини утворюють стійку дисперсну систему, утворюючи міцели (електрично заряджені частинки, що мають шари адсорбованих молекул поверхнево-активних речовин). Завдяки різниці потенціалів між зоною контакту і іншою поверхнею міцели будуть мати спрямований рух до зони контакту, де будуть розряджатись і створювати мідний шар – сервовитну плівку.

Серовитна плівка знижує адгезію за рахунок просторового розподілу трибоповерхонь. Зниженню адгезії сприяє також радіальне розташування молекул поверхнево-активних речовин в міцелах, а тому під час навантаження їх

взаємодія з основою буде значно слабшою, ніж якби вони були розташовані по площині [77, 78–84].

За вибіркового перенесення протікають різні за своєю природою фізичні, хімічні, електрохімічні, трибофізичні і трибохімічні процеси [85].

Перед початком реалізації явища вибіркового перенесення в парі тертя проходять процеси, які називають підготовчими. До них відносять трибодеструкцію мастила чи присадки, вибіркове розчинення і пасивацію [19, 80].

Одним із основних факторів початкової стадії вибіркового перенесення є незвично велика швидкість протікання корозійного процесу, а потім його повне припинення. Для збудження поверхневих реакцій між мастилом і металом необхідна активація процесу. Деякі гетерогенні реакції можуть протікати самовільно, не потребуючи затрат енергії, однак у випадку вибіркового перенесення такі реакції недопустимі. Навіть інтенсифікація реакцій, які спричиняє тертя, вкінці повинні приводити до пасивації процесів на поверхні до початку стабілізації процесу тертя. В іншому випадку втрати будуть невідомі. Для умови саморегулювання і забезпечення систем можливістю зниження зношування і коефіцієнта тертя необхідно, щоб вибіркове розчинення збуджувалося за низького рівня виділення енергії під час тертя і затухало за умови зниження даного рівня після утворення захисної плівки [54–58, 80–82, 86].

Адсорбційні ефекти і вибіркове перенесення найточніше проявляються під час виникнення на поверхні тертя напружень розтягу. Розтяг поверхневих шарів не є сприятливим для дифузії молекул поверхнево-активних речовин в утворені вакансіями пори ґратки сплаву і для адсорбційного пластифікування металу, що інтенсифікує процеси вибіркового розчинення мідного сплаву і утворення захисної плівки на поверхні тертя.

Для створення мастильних матеріалів, які працюють в режимі вибіркового перенесення, у мастила в якості присадок додають комплексні сполуки, здатні переносити речовини в

умовах вибіркового перенесення. Друга особливість деяких комплексних сполук полягає в тому, що за певних зовнішніх умов (температура, тиск) вони знаходяться частково у вигляді комплексів, а частково в дисоційованому стані. Під час тертя комплекси, які розпалися, поставляють іони металу, які можуть розрядитися на поверхні, завершуючи обмін речовиною і утворюючи плівку. В даному режимі тертя здійснювати складні функції обміну речовиною і змащення можуть комплексні сполуки, які знаходяться в динамічній рівновазі: $ML \leftrightarrow M^+ + L^-$.

Процес трибодеструкції мастила проходить в умовах активації поверхні тертям, що пов'язано з різними механо-, електро- і термохімічними факторами в зоні контакту. В таких умовах високоактивні частинки виконують різні функції, зокрема:

- утворюють хімічні сполуки з поверхневими атомами металу і, десорбуючись, залишають вакансії в металі, які під дією дифузії розповсюджуються вглиб;

- утворюють комплексні сполуки з поверхневими атомами металу, створюючи захисний хемосорбційний шар.

Активація на початковому етапі компонентів майбутніх сполук в процесі їх взаємодії приводить до максимального виділення вільної енергії і утворення стійких кінцевих сполук, які призначені для тривалої роботи в зоні тертя [36, 77, 79].

Вибіркове розчинення в умовах тертя у мастилi має наступні особливості:

- діелектричні властивості мастила змінюються в результаті трибодеструкції та окислення, а мастило стає електропровідним;

- протікання процесу вибіркового розчинення проходить ступінчасто від мікроелементів до макроелементів в міру збільшення електропровідності середовища;

- процес розчинення прискорюється тертям на кілька порядків, що обумовлює його рівномірність розташування на поверхні;

– розчинення відбувається у відновному середовищі, тому продукти окислення у вигляді оксидів і гідрооксидів відсутні;

– тертя інтенсифікує дифузійні процеси, що обумовлює вплив вибіркового розчинення на деяку глибину поверхневого шару.

Процеси анодного розчинення металів в більшості випадків є більш складними, ніж простий електрохімічний перехід іона металу з кристалічної ґратки в розчин. Для розчинення потрібна не тільки сольватація іона, але також і попередня хімічна адсорбція аніону з розчину з утворенням перехідних, а потім стійких комплексів. Отже, швидкість анодного розчинення залежить від концентрації аніонів.

Розчинення за механізмом комплексоутворення, тобто за участю компонентів розчину, в першу чергу аніонів A^- , на елементарних стадіях реакції можна записати наступним чином: $M_e + mA^- \rightarrow [M_eA_m]^{(n-m)+} + ne$.

Комплексні сполуки міді витісняють комплекси інших металів і працюють в сталому режимі тертя, оскільки мають більшу механічну і температурну стійкість.

За нормальних тиску і температури мідь не розчиняється в кислих (але не окисних) розчинах і не витісняє водень. Тому за підвищення температури і тиску під час тертя, розчинення відбуватиметься за рахунок зміни катодного процесу, оскільки зміна вільної енергії в цих умовах стає негативною величиною.

Поява власних іонів міді на поверхні у даному випадку може бути пов'язана з роботою таких мікроскопічних трибопар:

– Cu (кристалічна орієнтація 1) – Cu (кристалічна орієнтація 2);

– Cu (зерно) – Cu (границя зерна);

– Cu (пори в плівці) – Cu (захисна плівка).

Перший випадок розчинення можна спостерігати під час тертя мідного зразка. Дослідження на електронному мікроскопі показали, що під утвореною під час тертя плівкою відбувається травлення, тобто спостерігаються сліди нерівномірного розчинення поверхні [77, 78, 79].

Вибіркове розчинення є фізико-хімічним процесом між продуктами трибодеструкції мастила і компонентами сплаву в тонкому поверхневому шарі зони тертя, яка активізується процесом тертя і тиском під час контакту. В результаті самовільного протікання процесу утворюється металева захисна сервовітна плівка з підвищеним вмістом вакансій (їх утворення має важливе значення під час розчинення), що обумовлює дифузійно-вакансійний механізм її деформації. Плівка виникає із поверхневого шару металу після вибіркового розчинення. Утворена нова металоорганічна сполука – поверхнево-активні речовини – продукт реакції між легуючими елементами сплаву і продуктами деструкції. Адсорбуючись на плівці на місці свого утворення, поверхнево-активні речовини знижують її міцність, що сприяє зниженню опору зсуву [78, 82, 86].

Наступним процесом, який настає автоматично, є пасивація, яка обумовлює закінчення вибіркового розчинення, початок роботи плівки і захист основного металу від деформування. В режимі вибіркового перенесення гальмування корозійного процесу досягається в основному за допомогою сервовітної плівки, тобто збільшенням омичного опору проходженню іонів і гальмуванням дифузійного характеру. В даному випадку захисні плівки виконують подвійну захисну функцію.

Механізм пасивації наступний: на пасивуючій поверхні відбувається розряд і виділення доданого в мастильне середовище катіона металу з електропозитивним потенціалом за реакцією: $M^{n+} + ne^- \rightarrow M$.

Виділений на поверхні метал з електропозитивним потенціалом, який є ефективним катодом, може істотно змістити загальний потенціал системи в позитивну сторону. Даний потенціал за активації плівки процесом тертя досягне потенціалу пасивації, а плівка отримає надійний контакт з основою.

Введені в розчин добавки позитивно зарядженого металу можуть перебувати у вигляді комплексних аніонів, які легко

розряджаються на катоді з виділенням металу, тобто вони можуть утворювати плівку в зоні тертя, наприклад, в парі сталь-сталь.

Аналіз результатів вивчення фрикційного переносу дозволяє виділити основні елементи даного процесу, які забезпечують механізм самозмащування із наступною їх послідовністю: контакт – адгезійна взаємодія – зсув поверхневого шару – багаторазова пластична деформація відділення частинок матеріалу із меншою щільністю когезійної енергії – перенесення на контрповерхню – багаторазове деформування перенесеного шару – зношування-втома – диспергування та винесення із зони тертя. Даний процес (або його окремі елементи) мають циклічний характер [60, 61].

В умовах вибіркового перенесення процес тертя розділяють на два періоди: накопичення міді на поверхнях тертя сталі і мідного сплаву і сталий режим тертя утвореної пари мідь-мідь без окиснення [19].

Фізико-хімічні дослідження структури сервовитної плівки дозволили припустити, що матеріал плівки перебуває в стані, подібному до розплавленого. Вона не здатна до наклепу, має малі зсувні зусилля і є пористою. Плівка у верхній частині не має оксидів, здатна до схоплювання, під час тертя її частинки можуть переходити з однієї поверхні тертя на іншу, тобто схоплюватися без утворення пошкоджень і збільшення сил тертя. Тертя бронзи по сталі в умовах вибіркового перенесення порівнюють із ковзанням тіла по льоду, в якому низький коефіцієнт тертя замість води забезпечує плівка розплавленого металу [3, 60].

Фізичними основами зменшення зношування і сил тертя за вибіркового перенесення є: здійснення контакту поверхонь тертя через пластично-деформовані м'який і тонкий шари міді, запобігання процесу окислювання металу на поверхні тертя, реалізація ефекту Ребіндера, перенесення частинок з однієї поверхні тертя на іншу й утримання їх у зоні контакту електричним полем, утворення продуктів полімеризації

мастильного матеріалу на поверхні сервовитної плівки, захист поверхонь тертя від водню.

1. Здійснення контакту поверхонь тертя через пластично-деформовані м'який і тонкий шари міді. За звичайного тертя без мастильного матеріалу чи за наявності граничної мастильної плівки, деталі контактують на дуже малій площі, що становить $0,01 \dots 0,0001$ номінальної площі дотичних поверхонь. В результаті ділянки фактичного контакту піддаються дуже високим напруженням, що призводить до їх взаємного проникнення, пластичної деформації і в результаті до інтенсифікації зношування.

З рис. 1.1 видно, що за граничного мащення контакт дотичних поверхонь сталевोї і бронзової деталей відбувається тільки в окремих точках. В умовах вибіркового перенесення він здійснюється через пластично деформований м'який і тонкий шари міді. Внаслідок цього площа фактичного контакту збільшується в десятки разів, а матеріал деталей тертя піддається лише пружній деформації. Сервовитна плівка товщиною $1 \dots 2$ мкм перекриває розміри нерівностей більшості деталей машинобудування. За граничного мащення взаємодія нерівностей поверхонь викликає втомне зношування. За вибіркового перенесення тертя неперервне, а площини контакту є плоскими.

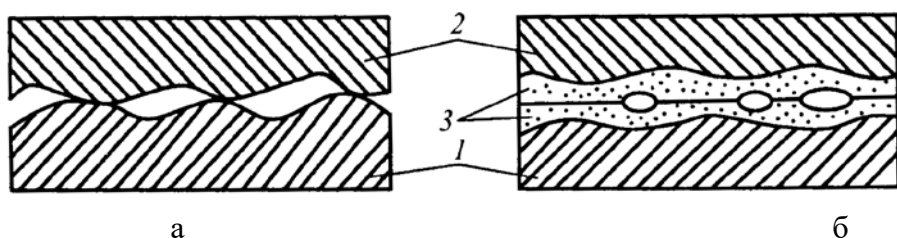


Рис. 1.1. Схема контакту деталей за граничного мащення (а) і вибіркового перенесення (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – мідна плівка

2. Запобігання процесу окиснювання металу на поверхні тертя. В процесах тертя без мастильного матеріалу та з граничним мащенням поверхні деталей завжди покриті оксидними плівками (рис. 1.2). Вони запобігають безпосередньому контактуванню металевих поверхонь та їх схоплюванню. Оксидні плівки є крихкими і не здатними до багаторазового деформування. Тому в процесі тертя вони руйнуються, внаслідок чого їх захисна дія слабшає.

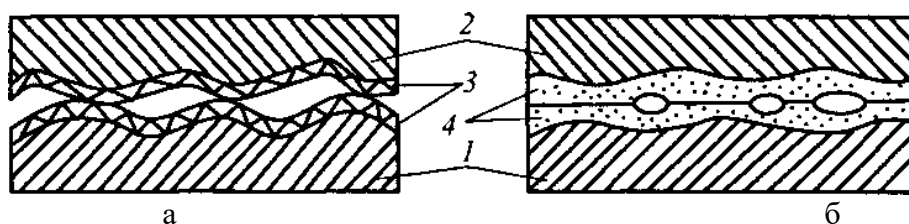


Рис. 1.2. Утворення оксидних плівок на поверхні контакту деталей за граничного мащення (а) і вибіркового перенесення (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – оксидні плівки; 4 – серовитні плівки

В режимі вибіркового перенесення утворення оксидних плівок на поверхнях не спостерігається, оскільки їх від окиснювання захищають щільні шари позитивно заряджених адсорбованих ПАР, які утворюються в процесі тертя і запобігають надходженню кисню до серовитної плівки. Відсутність оксидних плівок зменшує роботу виходу електронів і сприяє перебігу хемосорбційних процесів, завдяки чому створюється додатковий захист від зношування.

Оксидні плівки, які утворюються під час тертя без мастильного матеріалу та за граничного мащення, перешкоджають виходу дислокацій на поверхню. Це прискорює наклеп поверхневого шару і його руйнування. Сервоподібна плівка не наклепується і може багаторазово деформуватися без руйнування, оскільки за відсутності оксидних плівок зменшується густина дислокацій.

3. Реалізація ефекту Ребіндера. Майже всі мастильні матеріали містять ПАР, в результаті чого стає можливою пластифікація поверхневих шарів матеріалу деталей за рахунок ефекту Ребіндера і зниження сил тертя між ними. В умовах звичайного тертя оксидні плівки перешкоджають проникненню середовища (в тому числі ПАР) до металу, чим знижують ефект Ребіндера, внаслідок чого пластичні деформації ділянок контакту охоплюють глибші шари (рис. 1.3, а).

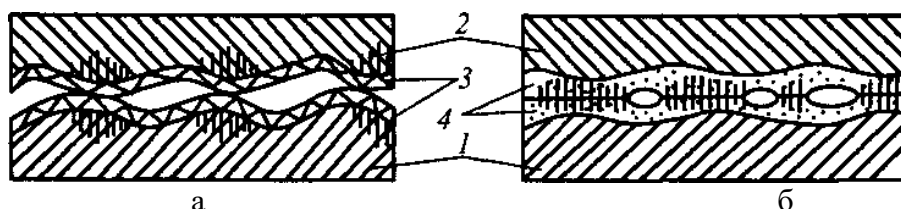


Рис. 1.3. Схема поширення деформацій у місцях контакту за граничного мащення (а) і вибіркового перенесення (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – оксидні плівки; 4 – сервопитні плівки

В режимі вибіркового перенесення оксидних плівок немає, тому дія ефекту Ребіндера реалізується повною мірою. В результаті відбувається деформація лише сервопитної плівки, а підповерхневі шари металу їй не зазнають (рис. 1.3, б). Молекули ПАР містяться в порах плівки, що уможливорює ковзання всередині плівки за принципом дифузійно-вакансійного механізму, але з малою витратою енергії. Всі описані процеси значно знижують тертя і зношування.

4. Перенесення частинок з однієї поверхні тертя на іншу й утримання їх у зоні контакту електричним полем. Продуктами зношування при терті з граничним мащенням переважно є оксиди, які не мають електричного заряду. Вони вільно виносяться із зони тертя і, переміщуючись між поверхнями контактної взаємодії, абразивно діють на них (рис. 1.4, а). Тому продукти зношування потрібно видаляти з мастильної системи.

За наявності на поверхнях тертя сервовитної плівки продукти зношування складаються з частинок міді. Їх поверхня пориста і дуже активна, тому частинки покриваються адсорбційним шаром ПАР. Такі частинки (міцели) мають електричний заряд і під його дією зосереджуються у зазорах (рис. 1.4, б). Крім того, у випадку вибіркового перенесення частинки зношування можуть переноситися з однієї поверхні тертя на іншу і схоплюватися, не спричиняючи пошкодження даних поверхонь. Тому в режимі вибіркового перенесення процеси схоплювання матеріалу сервовитної плівки з основою є не шкідливими, ніж в умовах звичайного тертя.

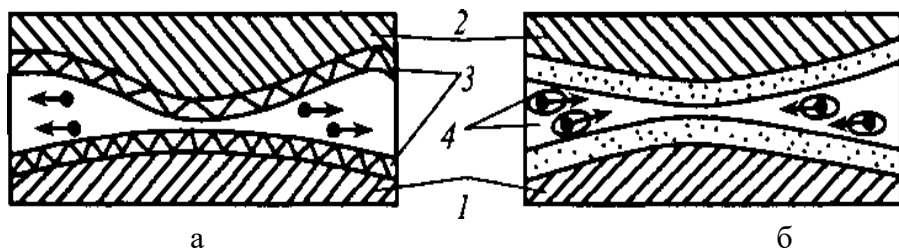


Рис. 1.4. Схема руху частинок зношування в зоні контакту за граничного мащення (а) і вибіркового перенесення (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – оксидні плівки; 4 – сервовитні плівки

5. Утворення продуктів полімеризації мастильного матеріалу на поверхні сервовитної плівки

Для підвищення несучої здатності мастильної плівки під час тертя в мастильний матеріал вводять спеціальні домішки (наприклад, суміш метилового ефіру багатоосновної кислоти і поліамінів), які в процесі полімеризуються і створюють на поверхнях тертя додатковий захисний шар, який запобігає їх безпосередньому контактуванню. Однак в умовах граничного мащення утворенню такої плівки перешкоджає оксидна плівка (рис. 1.5, а).

В режимі вибіркового перенесення сервовитна плівка є потужним каталізатором полімеризації. Полімерна плівка

утворюється з вільних радикалів органічних речовин, які виникають у процесі трибодеструкції мастильного матеріалу (рис. 1.5, б). Вона запобігає безпосередньому контакту металевих поверхонь і знижує високі тиски.

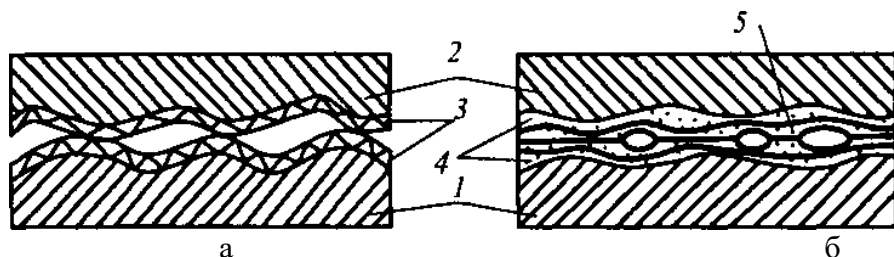


Рис. 1.5. Схема контакту деталей за наявності мастильного матеріалу зі спеціальними присадками за граничного мащення (а) і вибіркового перенесення (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – оксидні плівки; 4 – сервовитні плівки; 5 – полімерні плівки

6. Захист поверхонь тертя від водню.

Водневе зношування за масштабами прояву займає одне з перших місць серед усіх видів зношування. Водень утворюється в процесі тертя як продукт розкладання водяної пари, палива, мастильних матеріалів, мастильно-охолоджувальних рідин, а також внаслідок деструкції полімерів в зоні контакту. Він легко дифундує вглиб металу, сприяє утворенню зародків тріщин в результаті молізації в дефектах гратки і зрештою спричиняє руйнування поверхневого шару деталі (рис. 1.6, а). Водневе зношування протікає при корозійно-механічному та абразивному зношуванні.

Оскільки вивчення водневого зношування тільки почалося, методи захисту від нього для багатьох деталей ще не розроблені, тому поки найефективнішим захистом є вибіркове перенесення. Утворена при вибірковому перенесенні мідна плівка знижує навантаження до рівня, за якого утворення водню майже не відбувається; крім того, мідна плівка – надійний захист від проникнення водню в сталь (рис. 1.6, б).

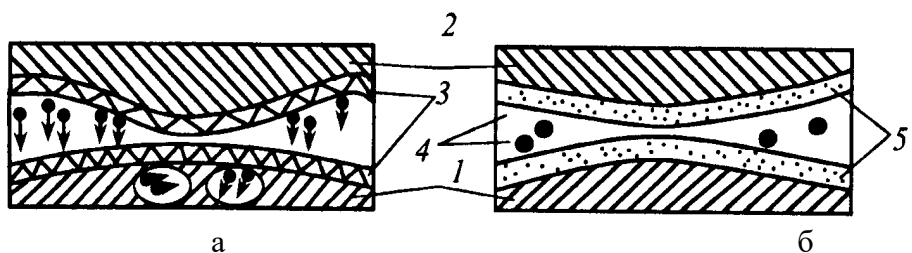


Рис. 1.6. Схеми руху водню в зоні контакту за граничного мащення (а) і вибіркового перенесення (б): 1 – сталь; 2 – бронза; 3 – оксидні плівки; 4 – скупчення іонів водню і їх мобілізація; 5 – серовитні плівки

Особлива структура і специфічні властивості сервовитної плівки (мала густина дислокацій, велика кількість вакансій) також забезпечують зменшення сил тертя та інтенсивність зношування [3, 79, 87].

За широкого використання вибіркового перенесення в промисловості виникає питання про розхід свинцю, міді і мідних сплавів у випадку використання металоплакуючих мастильних матеріалів, солей міді для приготування металоплакуючих добавок до мастил, робочих рідин гідросистем і промивних розчинів та латуні чи бронзи під час фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО) поверхонь тертя. Дане питання актуальне навіть за значного підвищення ресурсу машин (в 2...3 рази) [77, 78].

Самовільне утворення сервовитної плівки в зоні контакту в парі бронза-сталь, у випадку мащення рідинами, які забезпечують режим вибіркового перенесення, відбувається з мінімальними витратами металу. Після утворення плівки обох поверхнях тертя розхід металу припиняється. Продукти зношування плівки утримуються в зоні контакту, а мідні частинки переносяться з однієї поверхні тертя на іншу. Надалі розхід металу на утворення сервовитної плівки буде відбуватись лише тоді, коли вона з деяких причин може зруйнуватися.

Товщина плівки залежить від складу мідного сплаву і властивостей мастильного матеріалу.

Розхід пластичного металу в режимі вибіркового перенесення можна скоротити штучно, подаючи невелику кількість (десяті чи соті долі відсотка) плівкоутворюючої присадки в мастильний матеріал. В даному випадку сервовитну плівку можна побачити тільки під електронним мікроскопом, а її ефект зменшення тертя і зниження зношування досить значний [77, 78, 79].

Матеріал плівки істотно відрізняється від матеріалу основного металу за складом і властивостями. Новоутворена сервовитна плівка є продуктом вибіркового розчинення. Її поведінка під час навантаження процесом тертя залежить від величини номінального тиску і температури, в яких вона виникла. В результаті виділення вільної енергії після протікання хімічних реакцій вибіркового розчинення плівка стає термодинамічно стабільною під час тертя, якщо рівень навантаження не перевищує номінальний рівень, який існував в підготовчому процесі. Перевищення даного рівня призведе до порушення хімічної реакції утворення комплексних сполук, що проходить з поглинанням тепла [60, 77, 78].

Властивості мідної плівки, утвореної в процесі тертя, істотно відрізняються від властивостей звичайної міді, що зумовлено умовами її утворення. Хоча механізм формування плівки ще недостатньо з'ясований, однак властивості досліджені багатьма сучасними методами.

За допомогою електронного мікроскопа встановлено, що плівка має високу мікропористість, причому деякі пори мають огранювання. Це так звані негативні кристали, які утворюються в результаті коагуляції вакансій і в місцях надлишку вакансій у плівці. Товщина плівки становить 1...2 мкм [3, 60, 89].

Параметр ґратки сервовитної плівки менший, ніж параметр ґратки бронзи. В міру наближення до поверхні він може зменшуватись аж до значення 0,0354 нм, а на більшій глибині наближається до параметра основного металу. Зміна параметра

гратки свідчить про перерозподіл легуючих елементів у поверхневих шарах сплаву під час тертя. Дифузійні процеси, зумовлені тертям, сприяють глибоким структурним перетворенням у поверхневих шарах твердих тіл і є одними з основних в механізмі контактної взаємодії. Закономірності кінетики дифузійних процесів є основою під час вибору сплаву для досягнення режиму вибіркового перенесення.

Радіоізотопний аналіз і метод оже-спектроскопії підтвердили дані про перерозподіл легуючих елементів сплаву в процесі тертя. Дані методи вказали на різке розходження вмісту легуючих елементів у поверхневих шарах (аж до повного їх розчинення під час формування сервовитної мідної плівки) за різних умов тертя, зокрема, за використання мастильних середовищ. Встановлено наявність на рентгенограмах двох систем дифракційних ліній, які відповідають матеріалам з дуже різними періодами кристалічних ґраток. Це свідчить про існування міжфазної межі, яка розділяє основний матеріал зразка із прилеглим до нього сервоподібним шаром. Пошаровим емісійним мікроспектральним аналізом виявлено, що під сервоподібною плівкою на межі зі сталлю є шар оксидів міді легувальних елементів чи домішок товщиною близько 0,1 мкм.

Також структуру плівки вивчали за допомогою спеціально розробленого методу “ковзного пучка” рентгенівських променів. Промінь направляли до поверхні під малим кутом (не більше ніж 1°), що давало змогу досліджувати поверхневі шари завтовшки 0,1...0,01 мкм. Дослідження показали, що верхній шар плівки має значні структурні зміни порівняно з нижчими шарами. За критерій структурних змін брали істинну (фізичну) ширину ліній на рентгенограмах β , яка для чистих металів і рівноважних твердих розчинів є результуючою середньою величиною блоків і дисперсій пружної деформації кристалічної ґратки (мікроспотворень) і служить характеристикою густини дислокацій, які містяться в металі. Встановлено, що ширина інтерференційних ліній (200) і (311) міді в глибині зразків після випробувань на тертя змінюється, а в шарі завтовшки 0,3 мкм з

часом зменшується. Максимальна ширина ліній спостерігається не на самій поверхні, а в глибшому шарі міді. Отже, можна стверджувати, що під час вибіркового перенесення в поверхневому шарі немає скупчення дислокацій, тобто не нагромаджуються пошкодження, які призводять до руйнування поверхні. В процесі тертя зразків міді зі сталлю в неактивному мастильному матеріалі (вазелиновому маслі) крива зміни фізичної ширини рентгенівської лінії міді за глибиною зони деформації не має спаду у верхніх шарах. Отже, тут немає розрідження дислокацій, а тому відбувається нагромадження пошкоджень і, як наслідок, руйнування поверхні [3].

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ДОСЛІДЖУВАНИХ МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика і властивості вихідних матеріалів

Як вихідний матеріал використано епоксидно-діанову смолу марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84), яка являє собою високов'язку прозору рідину, що твердне за нормальної або підвищеної температури без зовнішнього тиску [90–94]. Для тверднення епоксидних композицій застосовували поліетиленполіамін – ПЕПА (ТУ 6-02-594-70), що призначений для структурування епоксидних смол за кімнатної та зниженої температури в умовах підвищеної вологості. Основні фізико-хімічні властивості смоли та твердника представлені в табл. 2.1.

Епоксидні полімери широко застосовують для виготовлення деталей вузлів тертя. Вони мають високу адгезію до металів та інших матеріалів, механічну міцність, малу усадку і водопоглинання, вібро- і лугостійкість, високі електроізоляційні властивості. Введення в епоксидні смоли спеціальних добавок збільшує твердість, навантажувальну здатність і зносостійкість.

Композитні матеріали на основі епоксидних смол застосовують для виготовлення деталей вузлів тертя, що працюють в агресивних середовищах і у вакуумі за температур від мінус 100° С до плюс 200° С, у воді, гасі та інших середовищах. На сьогодні розроблені і використовуються полімерні самозмащувальні матеріали – трибополімери [95].

Одним із найефективніших методів керування трибо-технічними характеристиками композитів є оптимальний вибір типу, кількості і фракційного складу наповнювачів. Застосування наповнювачів дозволяє на 2...3 порядки підвищити зносостійкість та варіювати коефіцієнт тертя, фізико-механічні і теплофізичні властивості в широкому діапазоні [67]. Введення до складу епоксиолімерної основи дисперсних наповнювачів приводить до формування композиту з якісно новими

властивостями. Для отримання матеріалу з високими триботехнічними характеристиками вибір наповнювачів проведено, враховуючи їх фізико-механічні та теплофізичні характеристики.

Таблиця 2.1

Фізико-хімічні властивості епоксидної 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 роботі як наповнювачі використано комплекс інгредієнтів, що призначені для підвищення довговічності трибопар.

Графіт – природний мінерал на основі вуглецю. Має високу тепло- і електропровідність, є ефективним твердим мастилом в системах з полімерами [95]. Твердість графіту за шкалою Мооса складає 1, густина – 2,09...2,23 г/см³. Введення графіту в епоксидні композитні матеріали збільшує стабільність їх розмірів, хімічну стійкість, антифрикційні характеристики,

тепло- і електропровідність [47, 103]. Графіт дозволяє покращити триботехнічні характеристики композитного матеріалу без суттєвого зниження когезійної міцності [55]. Лускаті графіти за діаметром кристалів розподіляються на крупнолускаті (0,1...1,0 мм) та дрібнолускаті (0,001...0,1 мм). В роботі застосовано крупнолускатий графіт.

Фторопласт – синтетичний атомовмісний поліолефін. Має низький коефіцієнт тертя та високу хімічну стійкість до дії кислот й лугів, сильних окисників [95, 105]. Фторопласт може застосовуватися за температур від мінус 269 до 260° С і короткочасно до 400° С. Твердість за Брінелем становить 29,4-39,2 МПа, густина 2,19-2,21 г/см³ [103, 104]. Використання фторопластів в композитних матеріалах дозволяє знизити коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування багатьох вузлів тертя [103]. Використано порошок фторопласту-4ПН-20 (ТУ 2213-021-13693708-2005), середній розмір частинок якого становить 6-20 мкм.

Вуглецеві волокна – мають високу міцність та модуль пружності в поєднанні з низькою густиною (1,8 г/см³). Вуглеволокно має високу стійкість до ударних навантажень, погано переносить навантаження на зсув, тому його поверхню необхідно захищати від абразивної дії. Для даних волокон властива стійкість до дії високих температур, хімічних реагентів, ультрафіолетового випромінювання, висока теплопровідність та розвинута поверхня (1000-2000 м²/г). Температура експлуатації вуглецевого волокна становить від мінус 300 до плюс 800° С. В роботі використано подрібнене механічним способом вуглецеве волокно діаметром 5-15 мкм та довжиною 2-6 мм.

Базальтові волокна одержують з природних мінералів шляхом їх розплаву із наступним формуванням волокон без використання хімічних добавок. Вони характеризуються стабільністю властивостей під час тривалої експлуатації в різних умовах, вібростійкі, довговічність не менше 100 років, мають

високі фізико-механічні і хімічні характеристики, підвищену стійкість в агресивних середовищах, достатню адгезією до зв'язуючих, тобто є перспективним матеріалом для створення нових композитних матеріалів. Матеріали на основі базальтового волокна є пористими, паропроникними, температуро-, і хімічно стійкими. Температура застосування базальтового волокна становить від мінус 250° С до плюс 900° С [106-107]. В роботі використано товсте (діаметр 150-500 мкм, довжина 30-150 мм) та супертонке (діаметр 1-3 мкм, довжина 50-70 мм) базальтоне волокно. Хімічний склад базальтового волокна: 48,2-54,6 % SiO₂, 0,2-2,75 % TiO₂, 12,59-15,0 % Al₂O₃, 1,9-8,47 % Fe₂O₃, 6,39-10,15 % FeO, 4,44-8,34 % CaO, 5,13-5,56 % MgO, 1,5-2,34 % Na₂O, 0,66-1,31 % K₂O.

Порошок чистої міді (Cu) марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), який є пожежо-, вибухобезпечний та нетоксичний, не має сторонніх включень та грудок. Насипна густина порошку становить 1,25...1,9 г/см³. Твердість за Моосом – 2,5-3. Хімічно малоактивна [103]. Використано мідний порошок, фракція якого становить 30...100 мкм.

Порошок оксиду міді (CuO) – основний оксид двовалентної міді, токсичний (ГОСТ 16539-79). Густина CuO становить 6,31 г/см³, температура плавлення 1447 °С. Кристали порошку оксиду міді в звичайних умовах досить стійкі, практично нерозчинні в воді, спирті, але розчиняються в кислотах. Середній діаметр частинок порошку оксиду міді 60-80 мкм.

Порошок оксиду міді (Cu₂O) – тверда речовина густиною 6,0 г/см³ та температурою плавлення – 1235° С. Він є дуже слабкою основою і має слабкі амфотерні властивості (розчиняється в концентрованих розчинах лугів, в мінеральних кислотах). Порошок оксиду міді є токсичним [108]. Середній діаметр частинок порошку оксиду міді 5-15 мкм.

Порошок бронзи марки ПР-БРА7Н6Ф з середнім діаметром частинок 0,14 мм. Хімічний склад: 76,5 % Cu, 7 % Al, 5,5 % Ni, 1 % P. Фосфор надає бронзам додаткової пружності, твердості та збільшує корозостійкість. Температура плавлення бронзи перебуває в межах 990-1190° С, міцність 343-442 МПа, твердість 67-87 НВ [103, 109].

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.

Порошок карбонільного заліза марки Р-20 (ГОСТ 13610-79). Містить частинки сферичної форми пошарової структури. Хімічний склад: 0,7-0,9 % C, 0,6-0,9 % N, 0,8-1,2 % O₂, 97,9-97 % Fe. Середній діаметр частинок становить 2,5 мкм.

Оксид алюмінію (Al₂O₃) – тугоплавкий порошок (ТУ 6-09-426-75) з температурою плавлення 2044 °С та густиною 3,97 г/см³. За твердістю близький до алмазу. Середній діаметр частинок порошку становить 60-80 мкм.

Оксид хрому (Cr₂O₃) – дуже твердий тугоплавкий порошок (ГОСТ 2912-79), нерозчинний у воді і розбавлених кислотах. Температура плавлення – 2435 °С, густина – 5,21 г/см³. За твердістю близький до корунду. Середній діаметр частинок порошку становить 5-15 мкм.

2.2 Методи досліджень властивостей та структури розроблених епоксикомпозитних систем

Для забезпечення високої конструкційної міцності та визначення впливу температур використано механічні, теплофізичні та хімічні методи досліджень та методи визначення ступеня структурування епоксикомпозитних систем. Загальний вигляд зразків для досліджень зображено на рис. 2.1.

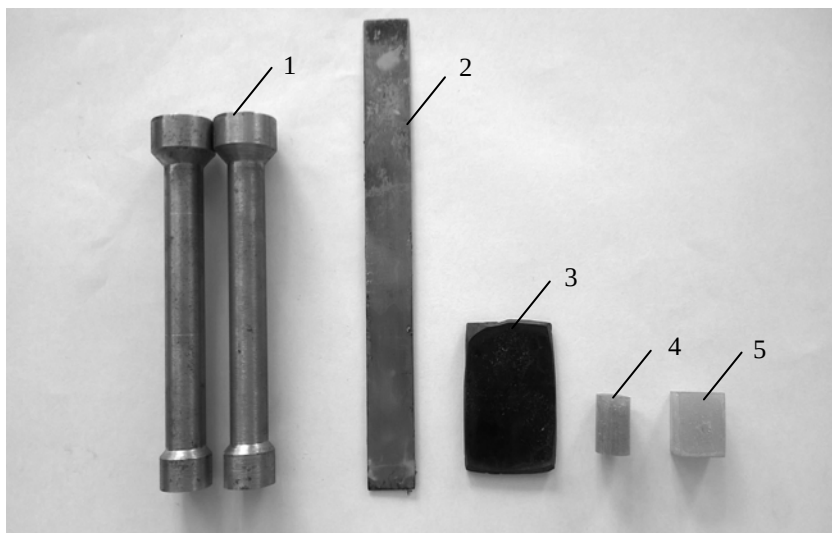


Рис. 2.1. Загальний вигляд зразків для досліджень: 1 – адгезійної міцності; 2 – внутрішніх напружень; 3 – ступеня структурування; 4 – межі міцності при стисненні; 5 – твердості

2.2.1 Дослідження властивостей епоксикомпозитів

Границю адгезійної міцності за нормального відриву визначали за ГОСТ 14759-69. Досліджуваний матеріал наносили на торцеву поверхню стержнів (грибків) з конічним виступом у місці захватів для самоцентрування. Дослідження проводили на розривній машині марки УММ-5 із швидкістю переміщення нижньої траверси 2 мм/хв [110].

Межу адгезійної міцності визначали за формулою:

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

де P – навантаження, за якого відбулось руйнування клейового з'єднання, Н;

S – площа клейового з'єднання, см^2 .

Границю міцності при стисненні визначали за ГОСТ 4651-82. Зразки у формі циліндрів діаметром $10 \pm 0,5$ і висотою 15 мм піддавали стисненню за рівномірно зростаючого зусилля з швидкістю наближення площинок 2 мм/хв.

Межу міцності при стисненні розраховували за формулою:

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

де P – навантаження, за якого зразок зруйнувався, Н;

S – площа поперечного перерізу зразка, см^2 .

Твердість матеріалу за методом Брінеля визначали за ГОСТ 9012-59. Дослідження проводили на зразках у формі бруска з гладкою поверхнею товщиною не менше 5 мм і шириною не менше 15 мм. Під час дослідження сталеву кульку діаметром 10 мм втискували в поверхню досліджуваного матеріалу з навантаженням 2,5 кН протягом 60 с. Розрахунок твердості матеріалу проводили за формулою:

$$HB = \frac{P}{\pi dh}, \quad (2.3)$$

де P – зусилля, прикладене до кульки, Н;

d – діаметр кульки, мм;

h – глибина відбитку кульки, мм.

Внутрішні напруження визначали консольним методом [110, 112] за ГОСТ 13036-67. Метод базується на вимірюванні відхилення від початкового положення вільного кінця консольно закріпленої пружної металевої пластини. Деформація пластини відбувається під дією внутрішніх напружень, які виникають в полімеркомпозитних покриттях.

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

Δt визначити як середнє арифметичне з трьох замірів вздовж довжини консолі.

Внутрішні напруження розраховували за формулою:

$$\sigma_{\text{вн}} = \frac{\Delta h E t^3}{3l^2(t + \Delta t)\Delta t}, \quad (2.4)$$

де Δh – відхилення вільного кінця консолі, мм;

E – модуль пружності підложки, МПа;

t – товщина підложки, мм;

l – довжина плівки, мм;

Δt – товщина плівки, мм.

2.2.2 Методика визначення ударної міцності епоксикомпозитів

Ударну міцність покриттів на сталевих пластинах розміром 60×200 мм визначали згідно методики [71], суть якої полягає у кількісному визначенні енергії удару, необхідної для наскрізного пошкодження захисних покриттів при падінні з певної висоти ударника з наконечником каліброваного розміру (діаметром 8 мм). Для визначення міцності захисних покриттів застосовували установку. Міцність покриттів при ударі вираховували за формулою:

$$A = mgh, \quad (2.5)$$

де m – маса ударника, кг;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – висота падіння ударника, м.

2.2.3 Методика визначення структурування епоксиолімерних систем

Ступінь тверднення матеріалів і покриттів визначали за вмістом гель-золь-фракції. Метод заснований на здатності частини матеріалу (плівки), не зв'язаної в полімерну сітку, вимиватися органічним розчинником в екстракторі Сокслета, який працював в автоматичному режимі [110].

Екстракцію зразків у формі пластин розміром 40×70 мм товщиною до 0,5 мм проводили в толуолі протягом 8 год з наступним сушінням за температури 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:

$$G = 100 - \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

де M_1 , M_2 – маса патрона з наважкою композитного матеріалу до і після екстракції відповідно, г.

2.2.4 Методи визначення термічної та хімічної стійкості

Корозійну стійкість отриманих матеріалів визначали шляхом занурення зразків у воду, гліцерин, а також 10 % розчини H_2SO_4 , HNO_3 , HCl , $NaCl$, $NaOH$ [110–112]. Розмір зразків становив 60×10×10 мм. Зразки зважували до і після витримки в агресивному середовищі на аналітичних вагах марки ВЛР – 200 з точністю до 0,0001 г.

У колбу вносять 50 мл досліджуваного розчину та наважку адсорбенту. Через певний проміжок часу (24, 68, 120 год) зразки виймали та поміщали на паперовий фільтр. Зразки разом із фільтром поміщали у сушильну шафу за температур 80-100°C. Зміну маси зразків визначали за формулою:

$$x = \frac{(m_a) - m_o}{m_o} \cdot 100\%, \quad (2.7)$$

де m_o – початкова маса зразка, мг;

m_a – маса після експозиції у розчині, мг.

Дослідження кліматичного впливу проводили шляхом впливу атмосферних погодніх умов на полімеркомпозитні матеріали. Зважування зразків проводили після 720 годин досліджень.

Для дослідження впливу природи зв'язуючого і наповнювача на термічні перетворення композитів застосовували метод термогравіметричного аналізу, використовуючи дериватограф «Thermoscan-2».

Метод термогравіметричного аналізу полягає у вимірі втрат ваги зразком у міру його безперервного нагрівання, за якого відбуваються фазові переходи і хімічні реакції в полімерному матеріалі. Таким чином одержують термогравіметричні залежності $m(T)$. Сучасні дослідження теплових ефектів ґрунтуються на диференціальній (дериватній) термогравіметрії.

Дослідження проводили у температурному діапазоні $\Delta T = 298-773$ К, використовуючи кварцові тиглі для зразків об'ємом $V = 0,5$ см³. Під час дослідження швидкість підйому температури становила $v = 5$ К/хв, причому як еталонну речовину використовували Al_2O_3 ($m = 0,5$ г), наважка досліджуваного зразка становила – $m = 0,3$ г. Похибка визначення температури становила $\Delta T = \pm 1$ К. Точність визначення теплових ефектів – 3 Дж/г. Точність визначення зміни ваги зразка – $\Delta m = 0,02$ г. Зразки в процесі проведення дериватографічного аналізу нагрівали до температури 773 К [115–118].

2.2.5 Методи дослідження триботехнічних характеристик

Дослідження зносостійкості проводили на машині тертя СМЦ-2 за схемою «вал–сегмент втулки» в умовах сухого тертя [67]. Зразок встановлювали на циліндричну поверхню металевого контртіла, яке оберталося із заданою швидкістю. Контртіло виготовляли у формі диска (рис. 2.2) із сталі 45 (ГОСТ 1050-74) 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.

Дослідження зносостійкості епоксикомпозитів також проводили за схемою «диск–палець» (рис. 2.3). За даною

схемою реалізується контакт плоскої поверхні контртіла і торця циліндричного зразка діаметром 8 мм в режимі сухого тертя. Контртіло виготовлене із сталі У9 [67, 119–121]. Загальний вигляд зразків для проведення триботехнічних досліджень поданий на рис. 2.4.

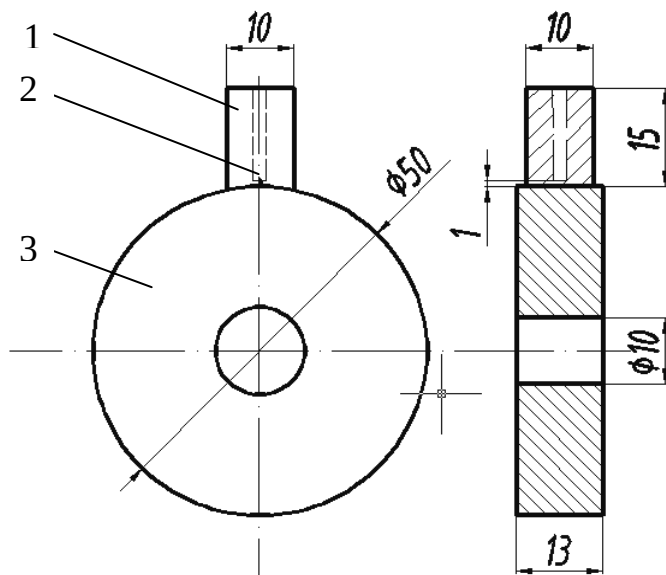


Рис. 2.2. Схема тертя «вал–сегмент втулки» і розміри елементів трибопари: 1 – зразок; 2 – канал для термопари; 3 – контртіло

Інтенсивність вагового зношування визначали за формулою:

$$I_g = \frac{m_1 - m_2}{\Delta L}, \quad (2.8)$$

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

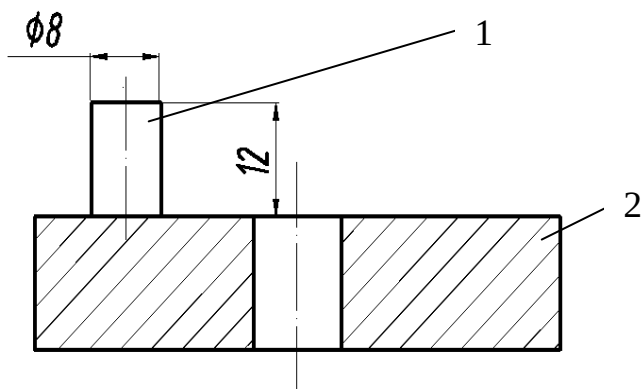


Рис. 2.3. Схема тертя “диск - палець” і розміри елементів трибопари: 1 – зразок; 2 – контртіло

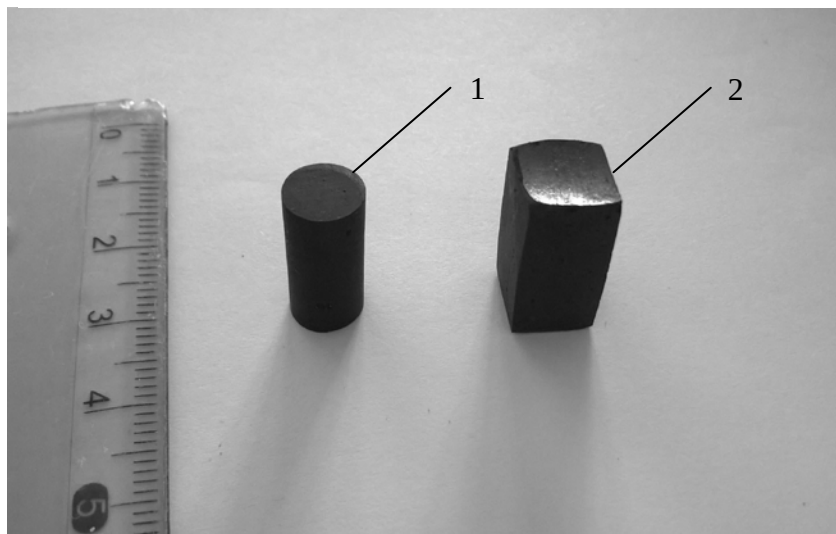


Рис. 2.4. Загальний вигляд зразків для триботехнічних досліджень за схемами тертя: 1 – “вал–сегмент втулки”; 2 – “диск–палець”

Інтенсивність лінійного зношування визначали в лінійних безрозмірних одиницях:

$$I = \frac{\Delta h}{\Delta L}, \quad (2.9)$$

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.

Визначення температури в зоні тертя здійснювали введенням термопари «хромель–копель» у дослідний зразок на відстані 0,5-1 мм від поверхні тертя за методикою [67, 111].

2.2.6 Дослідження макро- та мікроструктури

Загальний вигляд трибоповерхонь епоксикомпозитного зразка та контртіла для дослідження структури та хімічного аналізу подано на рис. 2.5.

Дослідження макро- та мікроструктури матеріалу проводили на оптичному мікроскопі МБС-9 за збільшення ($\times 30$) та металографічному мікроскопі МИМ-10 ($\times 100-600$). Дослідження загального характеру структури поверхні зразків полімеркомпозитів за малих збільшень та детальне вивчення ділянки поверхні за великих проводили на растровому електронному мікроскопі (РЕМ-106 И) за збільшення ($\times 100-1000$).

За допомогою РЕМ-106 И одержували хімічний склад поверхні матеріалу, вивчали морфологію наповнювачів, дисперсність та протяжність меж останніх, а також визначали однорідність їх розміщення в полімерній матриці. Для дослідження в РЕМ зразки були ретельно очищені у відповідних розчинниках із використанням ультразвуку. Шліфи з композитних матеріалів, а також їх поверхні досліджували за допомогою РЕМ без попередньої підготовки [120, 122]. Площу відновленої міді обчислювали програмою Photom 131.

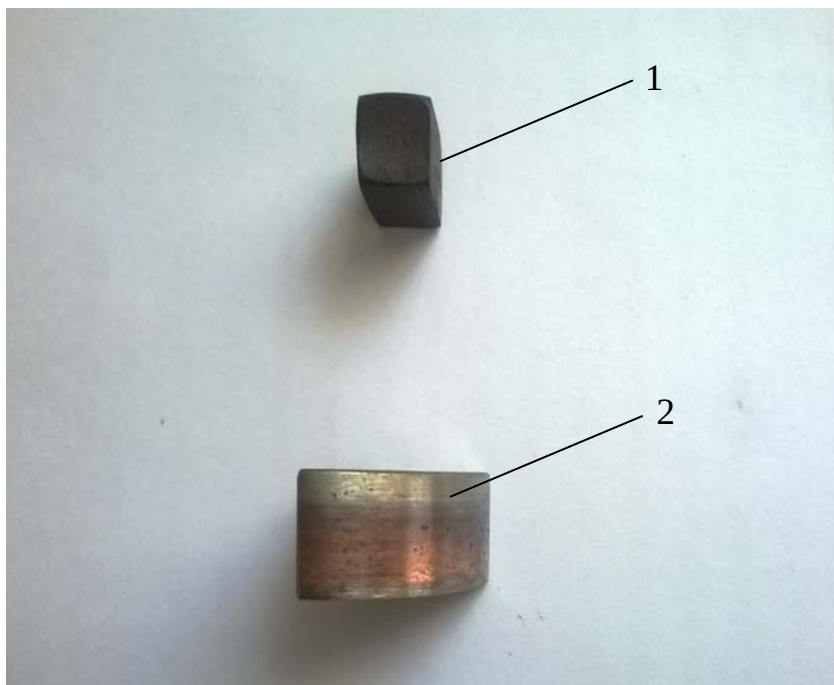


Рис. 2.5. Загальний вигляд зразків для дослідження структури та хімічного аналізу: 1 – епоксикомпозит, 2 – сегмент контртіла

Фрактограми зламу досліджували на скануючому електронному мікроскопі SUPERPROBE 733 (фірми JEOL, Японія) за прискорюючої напруги 25 кВ. Перед дослідженням структури мікрошліфи вивчались за допомогою оптичного мікроскопа, під час чого на поверхні помічались характерні місця.

2.3. Методи формування епоксикомпозитів

Залежно від об'єму зразків розраховували кількісний вміст інгредієнтів у масових частинах на 100 мас. ч. епоксидної смоли ЕД-20. Формування композиції починалося із

механічного вимішування попередньо просушених наповнювачів з епоксидною смолою та твердником у вибраному стехіометричному співвідношенні. Сформовану композицію наносили на підготовлену поверхню або заливали у спеціальні форми. Поверхню епоксикомпозитних зразків попередньо обробляли абразивом для досягнення необхідної шорсткості і знежирювали ацетоном. Формування і тверднення зразків для триботехнічних досліджень виконувалось в прес-формі (рис. 2.6) під тиском.

Тверднення епоксикомпозитів за нормальних умов тривало 24 год. Для уникнення високих залишкових напружень для зразків застосовано попередню термічну обробку та ступінчастий режим основної термічної обробки: 1 год за температури 50° С, 1 год – 100° С, 4 год – 120° С.

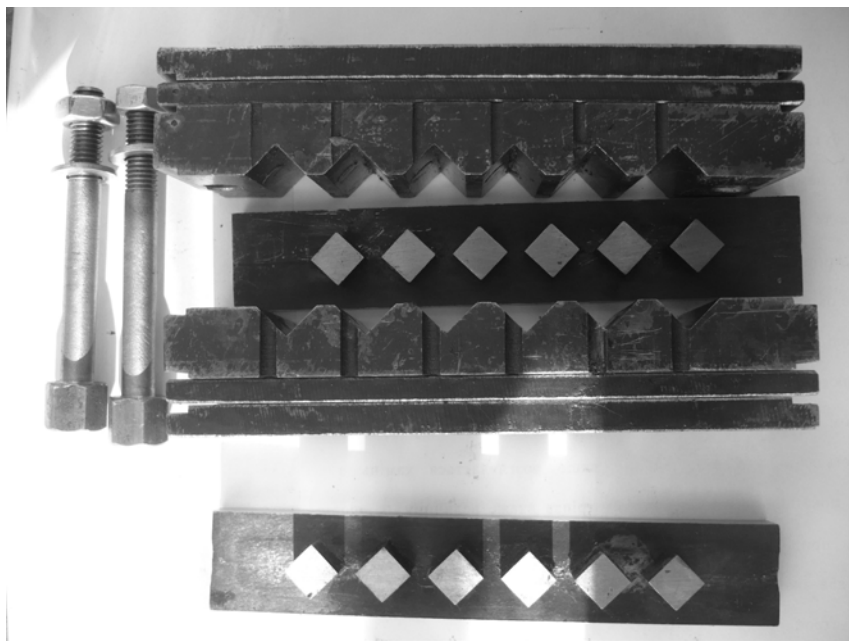


Рис. 2.6. Загальний вигляд прес-форми для формування епоксикомпозитних зразків

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА СТРУКТУРИ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

3.1. Дослідження механічних характеристик та ступеня структуривання епоксикомпозитних матеріалів

Для створення епоксикомпозитного матеріалу трибо-технічного призначення застосовано порошкові наповнювачі Cu , CuO , Cu_2O , які здатні забезпечити режим вибіркового перенесення. При цьому важливо було оцінити вплив даних компонентів на механічні характеристики композитів [123].

Для систем, наповнених порошком Cu_2O , відбувається підвищення адгезійної міцності (рис. 3.1) на 80,18 %: спочатку спостерігається стрімке підвищення (за вмісту наповнювача до 150 мас. ч.), подальше зростання (за вмісту наповнювача до 250 мас. ч.) є незначним. Максимальне значення даної характеристики 34,83 МПа зафіксовано для епоксикомпозиту із вмістом 250 мас. ч. Cu_2O . Це можна пояснити більшою площею взаємодії частинок із епоксидною матрицею, що пов'язано з вищою дисперсністю порошку Cu_2O , ніж CuO [124].

Із збільшенням вмісту порошку CuO від 50 мас. ч. до 250 мас. ч. в епоксикомпозитах спостерігається зниження адгезійної міцності на 39,50 %, що пов'язано з утворенням меншої кількості хімічних та фізичних вузлів зшивання матриці із наповнювачами та наявністю різноманітних дефектів, які є концентраторами механічних напружень і, відповідно, визначають початок руйнування. Серед таких дефектів часто зустрічаються макро- та мікротріщини, які мають тенденцію розростатися під дією навантаження. Вони призводять до виникнення напружень розтягу, з досягненням критичної величини яких, на межі розділу зароджуються поперечні тріщини, які розповсюджуються за механізмом нормального відриву. Спочатку проходить відносно повільний ріст тріщини вздовж межі розділу, а згодом відбувається її швидке

поширення під кутом до межі розділу до повного руйнування [125, 126]. Максимальне значення адгезійної міцності для епоксикомпозиту, наповненого 50 мас. ч. CuO , становить 39,67 МПа.

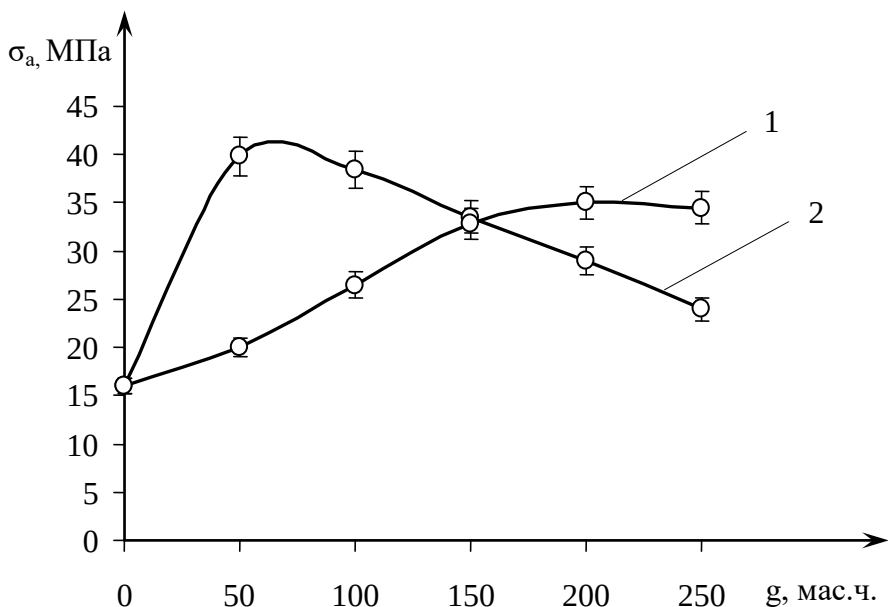


Рис. 3.1 Залежність адгезійної міцності епоксикомпозитів, наповнених порошками Cu_2O (1) та CuO (2), від вмісту наповнювача

Епоксикомпозитам з вмістом наповнювача 50 мас. ч. і 250 мас. ч. CuO та 50 мас. ч. Cu_2O характерний адгезійно-когезійний вид руйнування поверхні після дослідження на розрив (рис. 3.2, а, б, в). Для епоксикомпозитів наповнених 250 мас. ч. Cu_2O характерний когезійний вид руйнування (рис. 3.2, г). Адгезійно-когезійний характер руйнування можна пояснити високими внутрішніми напруженнями, а когезійний – високими значеннями ступеня структурування та адгезійної міцності.

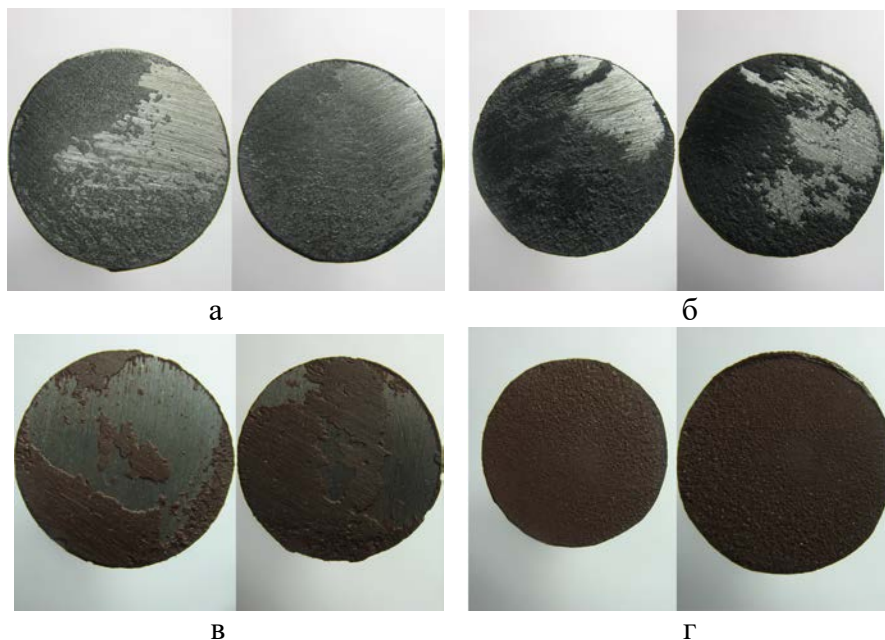


Рис. 3.2 Загальний вигляд поверхні епоксикомпозитів після досліджень на адгезійну міцність, наповнених: а – 50 мас. ч. CuO ; б – 250 мас. ч. CuO ; в – 50 мас. ч. Cu_2O ; г – 250 мас. ч. Cu_2O

Експериментально встановлено, що найвища межа міцності при стисненні ($\sigma_{\text{ст}}=135,03$ МПа і $\sigma_{\text{ст}}=121,02$ МПа) характерна для епоксикомпозитів, наповнених CuO і Cu_2O відповідно, з вмістом наповнювача 150 мас. ч. (рис. 3.3).

Вміст наповнювачів 50...100 мас. ч. є недостатнім для опору матеріалу статичним навантаженням, які спричиняють деформацію ланцюгів макромолекул епоксидної складової. Розрив суцільності полімерних систем не потребує прикладання значних напружень. Величина опору розриву залежить від часу дії сили [127]. Із збільшенням ступеня наповнення до 150 мас. ч. спостерігається зростання межі міцності при стисненні на 16,48 % і 10,47 % для CuO та Cu_2O відповідно, що пов'язано зі

зменшенням величини внутрішніх напружень та підвищенням ступеня структуривання і твердості.

Із подальшим збільшенням вмісту наповнювача

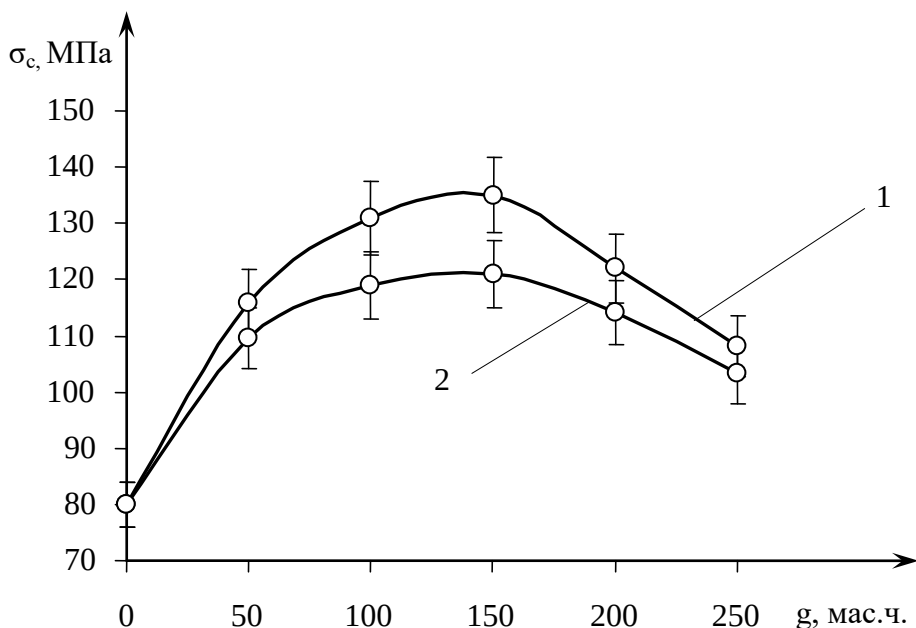


Рис. 3.3 Залежність межі міцності при стисненні епоксикомпозитів, наповнених Cu_2O (1) та CuO (2), від вмісту наповнювача

досліджувана характеристика має спадний характер, що обумовлено наявністю конгломератів, які утворилися за неповного змочування частинок полімером, в результаті чого спостерігається нерівномірний розподіл його в об'ємі матриці. Зниження межі міцності при стисненні також пояснюється дефектною будовою реальних полімерних систем, наявністю в кожному матеріалі великої кількості дефектних місць і тріщин. Розрив суцільності полімеркомпозиту відбувається в найбільш небезпечному (дефектному) місці [128].

Найвищі значення внутрішніх напружень ($\sigma_{\text{вн}}=0,88$ МПа і $\sigma_{\text{вн}}=1,16$ МПа) зафіксовано для епоксикомпозитів, наповнених порошками CuO і Cu_2O відповідно в кількості 50 мас. ч. В даному випадку високі внутрішні напруження пов'язані із локальним зшиванням макромолекул матриці, причому процес відбувається хаотично та нерівномірно, відповідно, частина системи знаходиться у напруженому стані.

Подальше підвищення вмісту наповнювачів супроводжується спадом величини внутрішніх напружень (рис. 3.4), що обумовлено зниженням ступеня структування [129]. Зниження значень внутрішніх напружень на 45,45 % та 43,10 % спостерігається для CuO і Cu_2O .

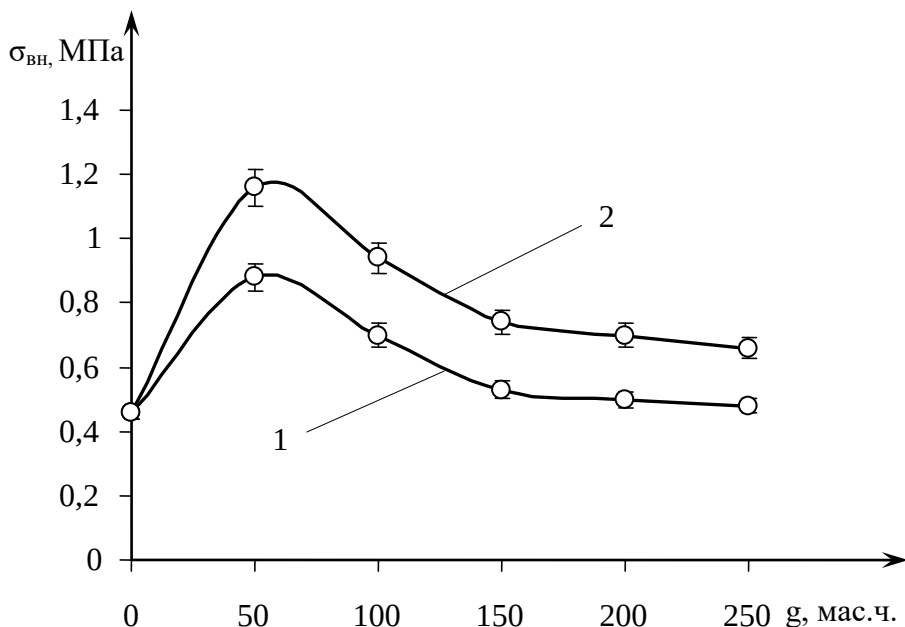


Рис. 3.4. Залежність внутрішніх напружень епоксикомпозитів, наповнених Cu_2O (1) та CuO (2), від вмісту наповнювача

При наповненні епоксиполімерної системи порошками CuO та Cu_2O в невеликих кількостях (50 мас. ч.) спостерігаються невисокі значення ударної міцності (рис. 3.5) через недостатню адгезійну складову взаємодії частинок з епоксидною матрицею. При підвищеному вмісті наповнювача (150...250 мас. ч.) зафіксовано ріст значень досліджуваної характеристики на 130,0 % та 50,0 % для CuO та Cu_2O відповідно, оскільки ступінь наповнення зростає і існує вища кількість бар'єрів, які перешкоджають поширенню тріщин.

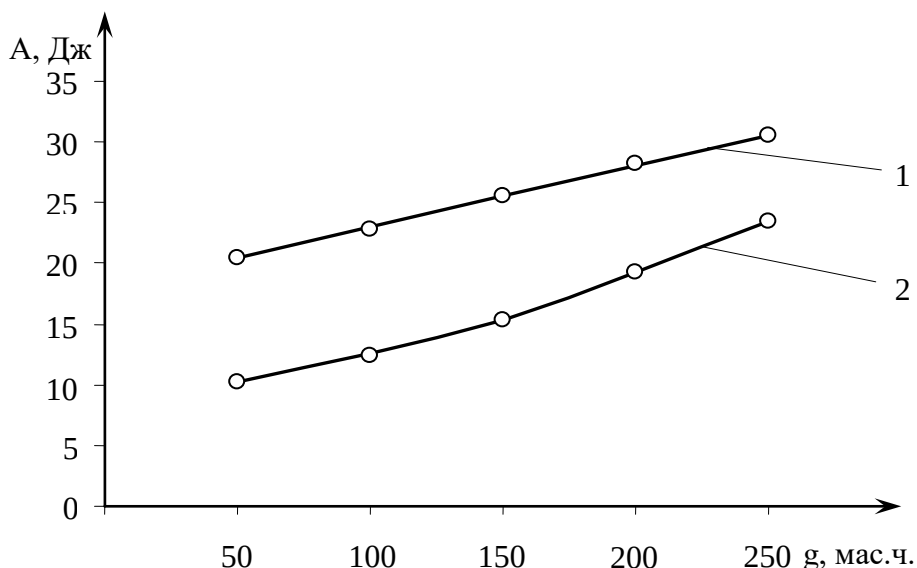


Рис. 3.5. Залежність ударної міцності епоксикомпозитів наповнених Cu_2O (1) та CuO (2) від вмісту наповнювача

Саме введення оптимального вмісту наповнювача забезпечує утворення максимальної кількості фізичних і хімічних зв'язків між дисперсними частками та олігомерами, які, в свою чергу, гарантують високі експлуатаційні характеристики [124].

Досліджено, що найвищу ударну міцність (30,60 Дж) має епоксикомпозит, наповнений Cu_2O в кількості 250 мас. ч. за рахунок збільшення загальної кількості активних центрів. Вигляд епоксикомпозитних зразків після дослідження на ударну міцність подано на рисунку 3.6. З рисунків видно, що більшу міцність має покриття з наповненням Cu_2O порівняно з CuO .

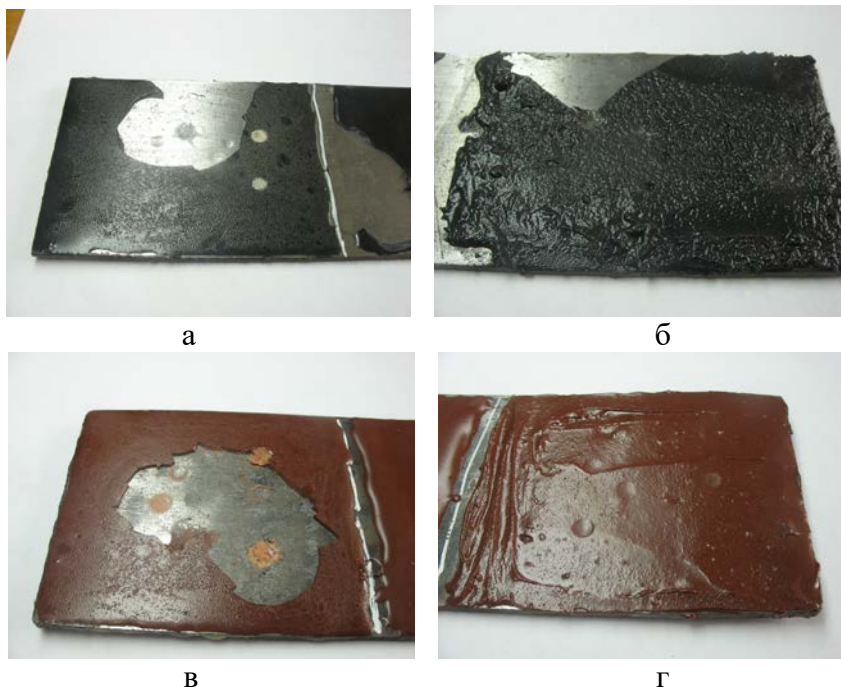


Рис. 3.6. Загальний вигляд епоксикомпозитних зразків після дослідження на ударну міцність, наповнених: а – 50 мас. ч. CuO ; б – 250 мас. ч. CuO ; в – 50 мас. ч. Cu_2O ; г – 250 мас. ч. Cu_2O

Експериментально встановлено, що твердість епоксикомпозитів підвищується із збільшенням ступеня наповнення (рис. 3.7). Найвищі значення твердості зафіксовано 248,4 МПа і 346,6 МПа для епоксикомпозитів наповнених CuO і Cu_2O відповідно. Це можна пояснити утворенням додаткових вузлів

зшивання між активними групами на поверхні наповнювача та функціональними групами епоксидної компоненти.

Для епоксикомпозитів, наповнених Cu_2O , спостерігається більш різке (на 43,16 %) підвищення твердості, ніж для епоксикомпозитів, наповнених CuO (на 29,31 %), яке пов'язане із збільшенням вмісту твердого наповнювача і низькими внутрішніми напруженнями системи.

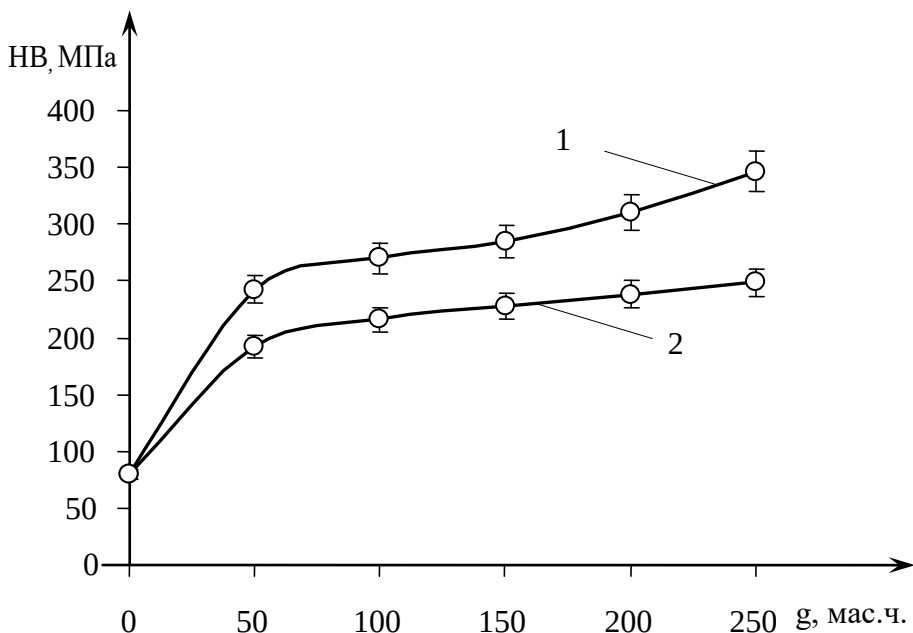


Рис. 3.7 Залежність твердості епоксикомпозитів, наповнених Cu_2O (1) та CuO (2), від вмісту наповнювача

Ступінь структурування для епоксикомпозитів, наповнених порошком CuO , стрімко підвищується на 0,73 % із збільшенням вмісту наповнювача до 165 мас.ч. (рис. 3.8), а далі – дещо знижується на 0,22 %. Для епоксикомпозитів наповнених Cu_2O в кількості до 150 мас. ч. спостерігається поступове підвищення на 0,18 % даної характеристики.

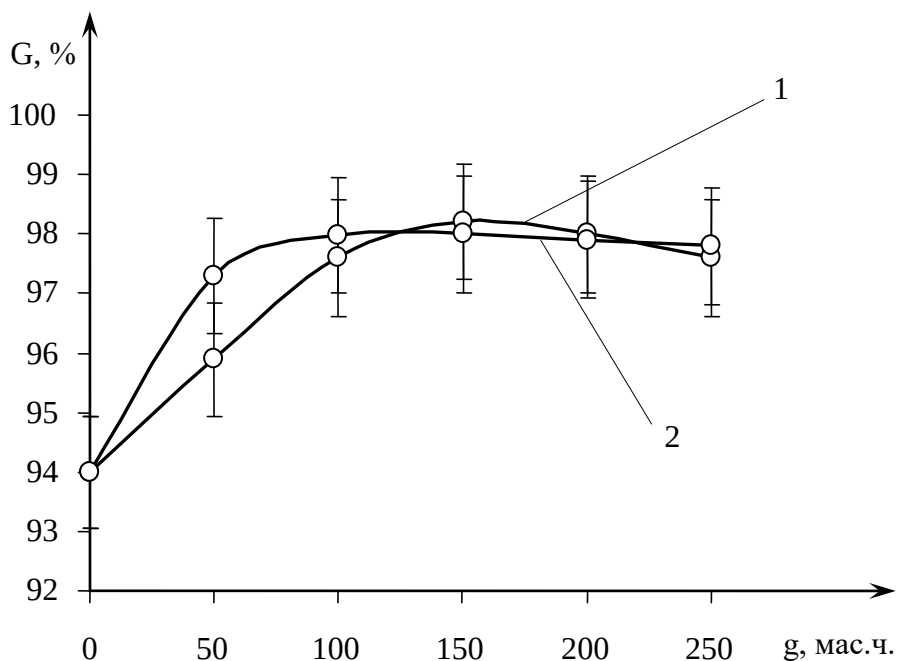


Рис. 3.8. Залежність вмісту гель-фракції епоксикомпозитів, наповнених Cu_2O (1) та CuO (2), від вмісту наповнювача

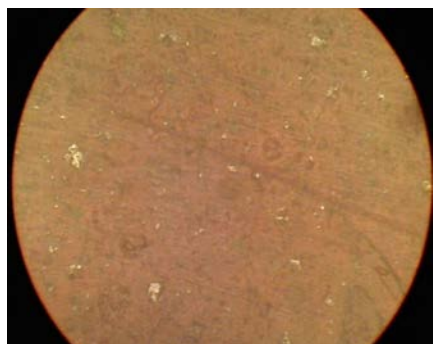
Це свідчить про зростання ступеня зшивання матриці у зовнішніх поверхневих шарах навколо наповнювача, що підвищує експлуатаційні характеристики даних епоксикомпозитних систем. Ступінь зшивання визначається кількістю фізичних та хімічних зв'язків між макромолекулами полімеру і поверхнею дисперсних часток [125].

Подальше підвищення вмісту наповнювача до 250 мас. ч. призводить до поступового зниження ступеня структурування на 0,16 %. Зниження ступеня структурування пов'язане з погіршенням змочуваності частинок наповнювачів епоксиполімером, що призводить до послаблення взаємодії компонентів системи між собою [126].

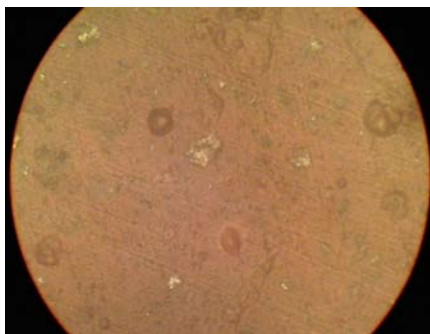
Мікроструктуру епоксикомпозитних матеріалів, наповнених CuO та Cu_2O , зображено на рисунку 3.9. З рис. 3.9, а-в видно, що розподіл частинок порошку CuO в епоксиполімерній матриці є нерівномірним, що призводить до скупчення частинок, які виступають концентраторами напружень і призводять до руйнування системи. Рівномірне розподілення частинок порошку спостерігається для наповнювача Cu_2O за вмісту 50-150 мас. ч. (рис. 3.9, г, д). Однак встановлено, що із збільшенням ступеня наповнення до 250 мас. ч., в епоксисистемі виникають конгломерати. Це пояснюється неповною взаємодією епоксидного зв'язуючого із наповнювачем, що пов'язано вищою дисперсністю порошку. Наявність мікропор в епоксикомпозитах знижує міцність і твердість даних матеріалів. При цьому розмір пор та їх кількість зменшується із збільшенням вмісту наповнювачів [124].

З метою підсилення ефекту вибіркового перенесення до складу епоксикомпозитного матеріалу вибрано наступні наповнювачі: порошки чистої міді, дрібно- та високодисперсної бронзи. Вміст наповнювачів вибрано невисоким (до 24 мас. ч.), оскільки вони виступають як добавки в складі високонаповненого епоксикомпозитного матеріалу триботехнічного призначення. Для оптимізації складу важливо було оцінити вплив вмісту даних наповнювачів на механічні характеристики матеріалу.

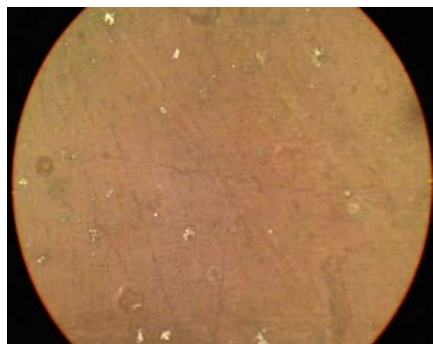
Експериментально встановлено, що із збільшенням вмісту порошків бронзи до 8 мас. ч., а чистої міді до 16 мас. ч. в епоксикомпозитах спостерігається підвищення адгезійної міцності (рис. 3.10). Максимальні значення становлять $\sigma_a = 23,68 \text{ МПа}$ і $\sigma_a = 13,90 \text{ МПа}$ із наповненням порошками чистої міді (16 мас. ч.) та високодисперсної бронзи (8 мас. ч.) відповідно. Дані ступені наповнення добавок вибрано оптимальними під час подальшого формування триботехнічних епоксикомпозитних матеріалів.



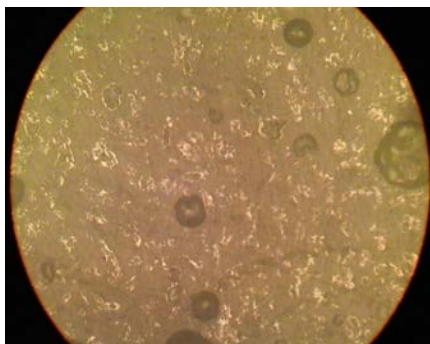
а



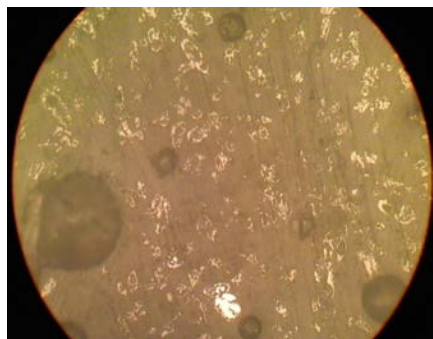
б



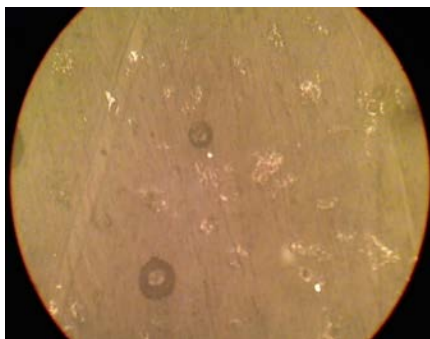
в



г



д



е

Рис. 3.9. Мікроструктура епоксикомпозитів наповнених:
а – 50 мас. ч. CuO ; б – 150 мас. ч. CuO ; в – 250 мас. ч. CuO ;
г – 50 мас. ч. Cu_2O ; д – 150 мас. ч. Cu_2O ; е – 250 мас. ч. Cu_2O

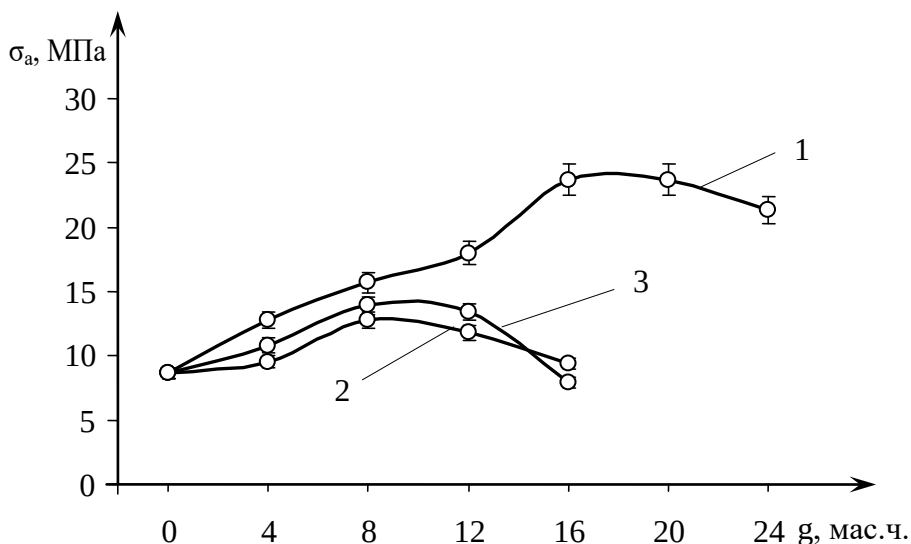


Рис. 3.10. Залежність адгезійної міцності епоксикомпозитів, наповнених порошками чистої міді (1), високодисперсної (2) та дрібнодисперсної (3) бронзи

За вищих ступенів наповнення системи відбувається зниження даної характеристики. Низькі значення адгезійної міцності за менших ступенів наповнення пояснюються недостатнім армуючим впливом наповнювача на матрицю, а за більших ступенів – утворенням конгломератів, які є концентраторами напружень, що полегшує руйнування епоксикомпозитної системи [130]. Для композитів наповнених менш дисперсною бронзою максимальне значення адгезійної міцності $\sigma_a = 12,80$ МПа зафіксовано із вмістом порошку в кількості 8 мас. ч.

Експериментально встановлено, що найвища межа міцності при стисненні характерна для епоксикомпозитів, наповнених порошками бронзи із вмістом наповнювача 8 мас. ч. (рис. 3.11) і складає 94,01 МПа для високодисперсної бронзи і 86,62 МПа для дрібнодисперсної. Менші ступені наповнення є

недостатніми для опору матеріалу статичним навантаженням, а більші – призводять до утворення конгломератів в епоксисистемі, що погіршує змочування частинок наповнювача та, відповідно, ефективність взаємодії на межі розділу фаз [131].

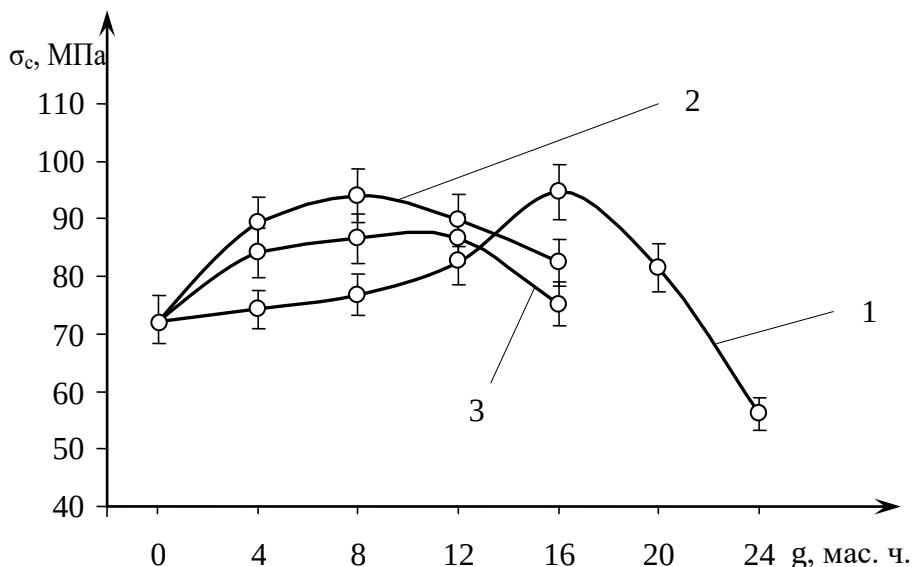


Рис. 3.11. Залежність межі міцності при стисненні епоксикомпозитів, наповнених порошками чистої міді (1), вискодисперсної (2) та дрібнодисперсної (3) бронзи

Для композицій, наповнених порошком Cu , спостерігається підвищення даної характеристики із збільшенням його вмісту, що свідчить про збільшення активності взаємодії полімерної матриці з наповнювачем. Межа міцності при стисненні композиту із вмістом 16 мас. ч. Cu становить 95,54 МПа. Однак із подальшим збільшенням вмісту даного наповнювача до 24 мас. ч. також відбувається зниження межі міцності при стисненні [132].

З метою покращення триботехнічних властивостей епоксикомпозитів та підвищення їх динамічних характеристик досліджено вплив довжини та вмісту подрібненого вуглецевого волокна на межу міцності при стисненні та адгезійну міцність. Подрібнені вуглецеві волокна підвищують стійкість до ударних і вібраційних навантажень, розташовуючись хаотично під різними кутами, що забезпечує однорідність системи та ізотропію властивостей [98–102].

Виявлено, що максимальну межу міцності при стисненні ($\sigma_{\text{ст}} = 72,61$ МПа) мають епоксикомпозити з вмістом волокна 1,5 мас.ч. та довжиною 4 мм, а найменшу – з вмістом 2,5 мас.ч. та довжиною 6 мм (рис. 3.12).

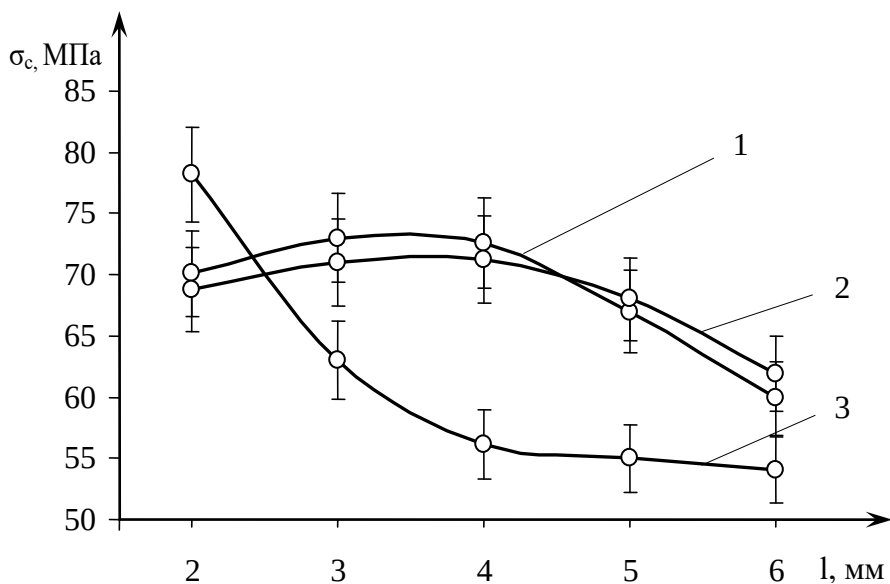


Рис. 3.12. Залежність межі міцності при стисненні епоксикомпозитів від довжини та вмісту вуглецевого волокна: 1 – 1,5 мас. ч., 2 – 2 мас. ч, 3 – 2,5 мас. ч.

Введення вуглецевих волокон оптимальної довжини (2 мм) забезпечує формування структури композиту, в об'ємі якого волокна рівномірно розподілені та мають достатню поверхневу енергію для підвищення адгезійної міцності та межі міцності при стисненні епоксикомпозитних трибоматеріалів [133].

Адгезійна міцність для епоксикомпозитів з ступенями наповнення 1,5 мас. ч. і 2,5 мас. ч. зростає із збільшенням довжини волокна від 2 до 6 мм (рис. 3.13). Для епоксикомпозитів із наповненням 2 мас.ч. спостерігається антибатна залежність. Максимальне значення ($\sigma_a = 32,0$ МПа) за даного вмісту зафіксовано для довжини 2 мм. Встановлено, що для даних епоксикомпозитів переважає адгезійно-когезійний характер руйнування [131].

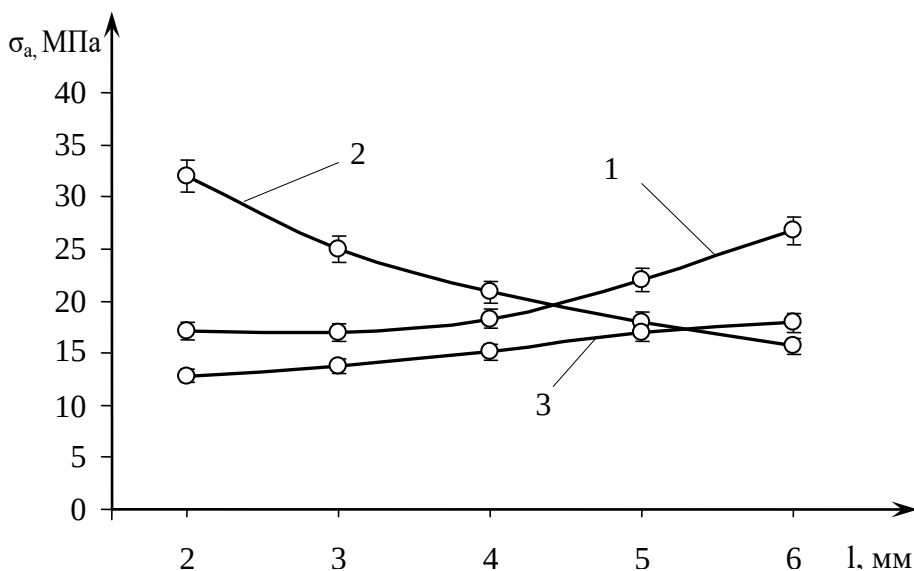


Рис. 3.13. Залежність адгезійної міцності епоксикомпозитів від довжини та вмісту вуглецевого волокна: 1 – 1,5 мас. ч., 2 – 2 мас. ч, 3 – 2,5 мас. ч.

3.2. Дослідження хімічної стійкості епоксикомпозитів

Дослідження хімічної стійкості проведено для епоксикомпозитних матеріалів, наповнених дрібнодисперсними порошками міді, оксиду міді, бронзи і заліза, які підвищують стійкість до зношування полімерної системи (табл. 3.1). Вибраний оптимальний вміст даних наповнювачів обумовлено попередніми дослідженнями їх механічних характеристик.

Для більшості епоксикомпозитів зафіксовано збільшення маси внаслідок переважання процесів водопоглинання. Встановлено, що найменшу хімічну стійкість мають епоксикомпозити, наповнені залізом (табл. 3.2). Це можна пояснити достатньо високою хімічною активністю заліза порівняно із міддю.

Таблиця 3.1

Склад епоксикомпозитів

Полімерна матриця	Твердник	Наповнювач	Вміст наповнювача, мас. ч.
ЕД-20 100 м. ч.	ПЕПА 12 м. ч.	Cu	16
		CuO	100
		Бронза	8
		Fe	50

Під час перебування епоксикомпозитів, наповнених залізом у розчинах хлоридної і сульфатної кислот на поверхні спостерігається виділення бульбашок газу (H_2), який негативно впливає на триботехнічні властивості виробу та його корозійну

стійкість. Тому використання такого наповнювача обмежує застосування трибоматеріалів в нейтральному або лужному середовищі. Часткове розчинення спостерігали також для епоксикомпозитів, наповнених оксидом міді, однак виділення газу в даному випадку не відбувається.

Загалом отримані епоксикомпозити характеризуються високою хімічною стійкістю, зміна маси у середньому становить 0,9-1,5 % після 500 год експозиції. Зовнішній вигляд епоксикомпозитів (колір, прозорість, наявність пошкоджень поверхні чи тріщин) практично не змінився [134].

Таблиця 3.2

Хімічна стійкість епоксикомпозитів

середовище наповнювач	H ₂ O	HNO ₃	HCl	H ₂ SO ₄	NaOH	NaCl
—	+0,90	+1,05	+1,25	+1,65	+1,60	+1,10
Cu	+0,70	+1,45	+0,84	+1,35	+0,92	+1,02
CuO	+1,35	-0,42	-2,15	-0,28	+1,55	+1,42
бронза	+0,48	+0,72	+1,40	+1,52	+1,10	+1,05
Fe	+0,32	+1,15	-2,25	-0,10	+1,65	+1,25

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

4.1. Дослідження зносостійкості епоксикомпозитів, додатково наповнених базальтовими волокнами

Для забезпечення реалізації ефекту вибіркового перенесення та покращення теплофізичних характеристик матеріалу триботехнічного призначення застосовано порошок оксиду міді. Порошки оксидів міді (CuO , Cu_2O) виконують армувальну функцію, підвищують твердість та міцність полімерної системи. Частинки оксидів міді мають сферичну форму і незалежно від розташування в матриці однаково сприймають навантаження. Введення даних наповнювачів (50...150 мас. ч.) обумовлено підвищенням показників механічних характеристик та інтенсифікацією процесів, пов'язаних із самоорганізацією. За вищого вмісту наповнювачів полімерна система є не технологічною.

Використання базальтових волокон дозволяє підвищити температуру експлуатації та хімічну стійкість композитних матеріалів. Вміст товстого (2...150 мас. ч.) та супертонкого (2...50 мас. ч.) базальтового волокна обґрунтовано їх показниками адгезійної міцності та межі міцності при стисненні [99, 107].

Таким чином, негативний вплив механічного та теплового полів під час тертя компенсується процесами структурного пристосування матеріалу за рахунок введення в систему добавок, які із підвищенням температури здатні виконувати мастильну функцію або ініціюють утворення плівок переносу з низьким опором зсуву, що в загальному покращує триботехнічні характеристики композиту [135].

Для епоксикомпозитів (табл. 4.1), наповнених товстим базальтовим волокном (50...500 мкм), спостерігається підвищення межі міцності при стисненні на 13,17 % із

збільшенням його вмісту від 2 мас. ч. до 100 мас. ч. (епоксикомпозити складів № 1-5). Із подальшим підвищенням вмісту базальтового волокна до 150 мас. ч. (№ 6) відбувається зниження межі міцності при стисненні на 6,56 %.

Таблиця 4.1

Склад епоксикомпозитів

№ зразка	Матриця	Вміст базальтового волокна, мас. ч.		Вміст CuO, мас. ч.
		товсте	супертонке	
1	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	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

За наповнення епоксидних систем супертонким базальтовим волокном (1...3 мкм) в кількості 2 мас. ч. і збільшенням вмісту порошку CuO від 50 мас. ч. до 100 мас. ч. (№ 7, 8) спостерігається підвищення межі міцності при стисненні на 13,30 %. За подальшого збільшення вмісту супертонкого базальтового волокна і порошку CuO (№ 9, 10) відбувається значне зниження даної характеристики. Максимальне значення межі міцності при стисненні $\sigma_{\text{с}}=134,39$ МПа зафіксовано для високонаповненого епоксикомпозитного матеріалу складу № 5, який містить 150 мас. ч. порошку оксиду міді та 100 мас. ч. базальтового волокна.

Очевидно, підвищення межі міцності при стисненні даних епоксикомпозитів пояснюється високою взаємодією наповнювачів із матрицею, що призводить до максимального зшивання епоксиполімеру. Зниження характеристики пов'язане

із утворенням недостатньої кількості хімічних і фізичних вузлів через низьке змочування наповнювачів матрицею [124].

Для епоксикомпозитних матеріалів складів № 1, 2, 7, 8 зафіксовано катастрофічне зношування, що пов'язано із нижчими показниками межі міцності при стисненні та низьким ступенем наповнення полімерної системи, яка є нездатною протидіяти руйнуванню поверхневого шару (рис. 4.1). Збільшення швидкості ковзання за питомого навантаження $P=1,8$ МПа призводить до зростання інтенсивності зношування в 1,7...3,5 рази.

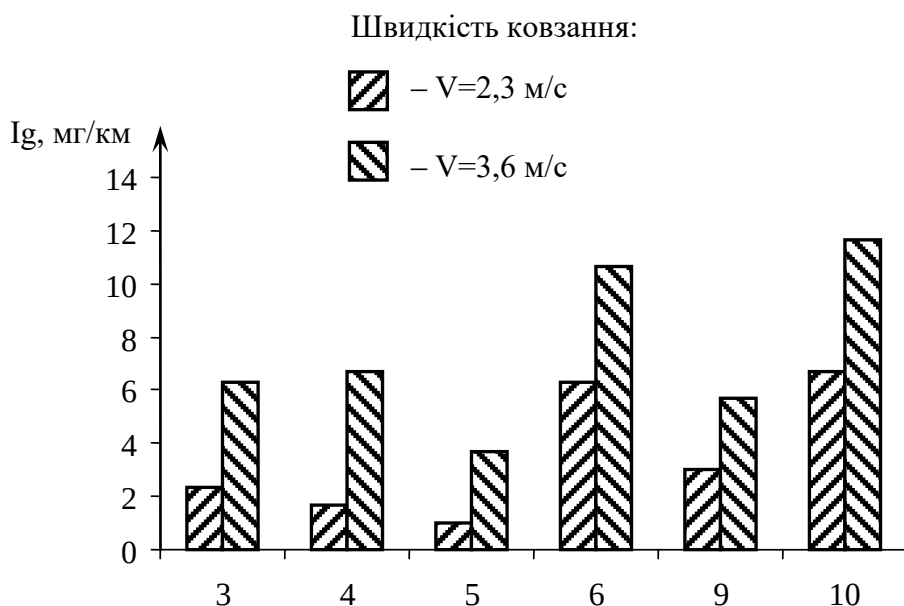


Рис. 4.1. Інтенсивність зношування епоксикомпозитів, додатково наповнених базальтовим волокном, за різних швидкостей ковзання

Експериментально встановлено, що найменша інтенсивність зношування за даних режимів навантаження тертям спостерігається для епоксикомпозиту, наповненого 100 мас. ч.

товстим базальтовим волокном та 150 мас. ч. порошком оксиду міді (епоксикомпозит складу № 5). Це досягається в результаті стабілізації трибовзаємодії за рахунок формування фрагментів мідної плівки на поверхні епоксикомпозиту та перенесення її на поверхню контртіла.

Для даного епоксикомпозитного матеріалу в процесі тертя спостерігається зменшення інтенсивності зношування за рахунок вибіркового перенесення відновленої міді з трибоповерхні епоксикомпозиту на сталеву поверхню контртіла. В результаті даного ефекту на поверхнях епоксикомпозитних зразків (рис. 4.2, а, в, д) та контртіла починають утворюватись фрагменти плівки, яка характеризується низьким опором зсуву та легко відновлюється в процесі трибовзаємодії [3, 19]. На мікроструктурах трибоповерхонь епоксикомпозитів зафіксовано пористість утвореної мідної плівки. Після формування на трибоповерхні мідної плівки пара тертя композитний матеріал-сталь стає локально парою мідь-мідь. В утвореній трибопарі процеси перенесення міді сповільнюються [77], що підтверджується результатами дослідження інтенсивності зношування.

Обчислено, що найбільша площа фрагментів утворення мідної плівки 32,54 % відповідає трибоповерхні епоксикомпозиту наповненого 100 мас. ч. товстого базальтового волокна та 150 мас. ч. оксиду міді (епоксикомпозит складу № 5), а найменша 18,97 % – епоксикомпозиту складу № 4, який містить вдвічі менше базальтового волокна. Дані розрахунки підтверджуються отриманими попередніми результатами інтенсивності зношування даних матеріалів (рис. 4.1), де найвищими показниками зносостійкості характеризується епоксикомпозит складу № 5. Для епоксикомпозитного матеріалу, наповненого 150 мас. ч. оксиду міді та базальтового волокна (епоксикомпозит складу № 6), площа утворених фрагментів плівки становить 26,57 %.

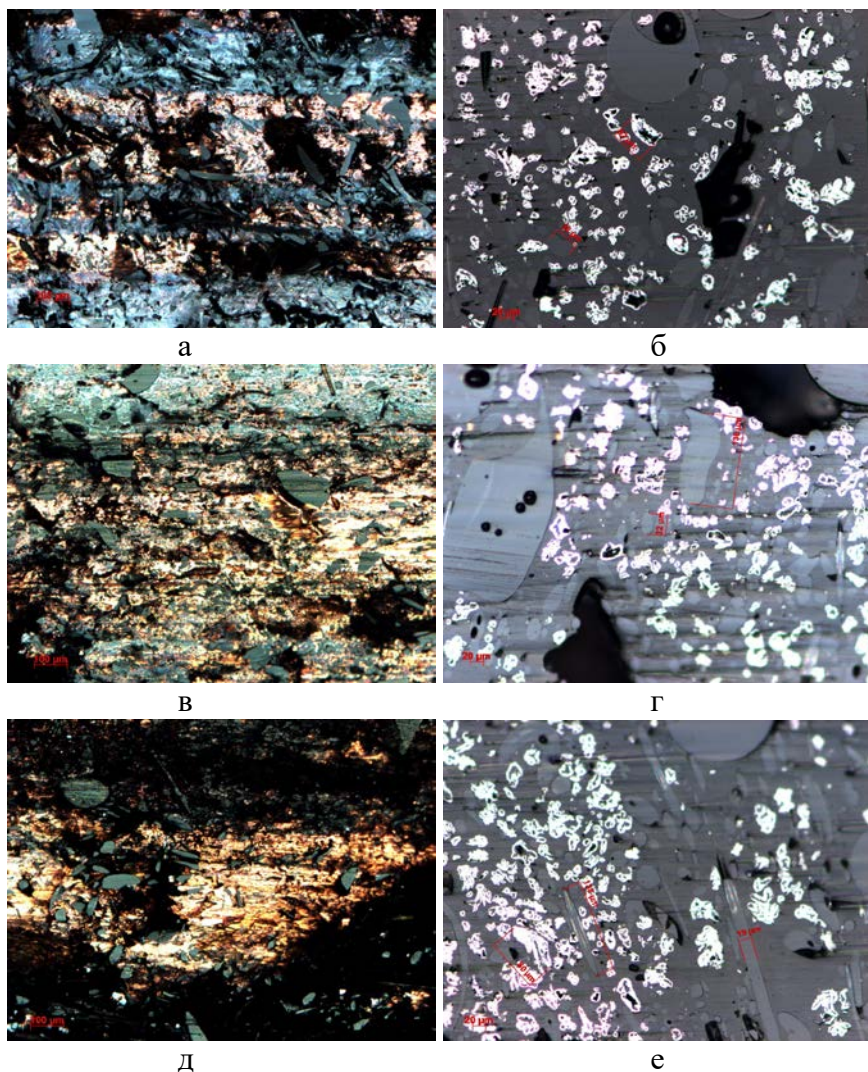


Рис. 4.2. Мікроструктура епоксикомпозитних матеріалів:
а – трибоповерхня зразка № 4; б – мікроструктура зразка № 4;
в – трибоповерхня зразка № 5; г – мікроструктура зразка № 5;
д – трибоповерхня зразка № 6; е – мікроструктура зразка № 6

Аналіз мікрошліфів епоксикомпозитів вказує на досить рівномірний розподіл частинок оксиду міді (рис. 4.2, б, г, е). Їх середній розмір становить 24-85 мкм. Базальтові волокна в процесі вимішування та формування епоксикомпозитних матеріалів зазнають руйнування, тому мають різну довжину. Середня товщина волокон становить 6-19 мкм.

Для наступних досліджень вибрано епоксикомпозити складів № 4, № 5 та № 6, які характеризуються найбільшою площею фрагментів сервовитної мідної плівки серед досліджуваних матеріалів. Дослідження епоксикомпозиту складу № 5, наповненого 100 мас. ч базальтового волокна, показали підвищену інтенсивність зношування на початковому проміжку 3000 м (рис. 4.3). Однак на наступному етапі проведення експерименту ($L = 6000$ м) зафіксовано різке зниження даної характеристики майже вдвічі. Це можна пояснити протіканням процесів вибіркового перенесення частинок з поверхневого шару епоксикомпозитного матеріалу на контртіло на початковому етапі досліджень та формуванням плівки на останньому.

Для епоксикомпозитів наповнених, товстим базальтовим волокном в кількості 50 мас. ч. (№ 4) та 150 мас. ч. (№ 6), спостерігається незначне підвищення інтенсивності зношування на шостому та дев'ятому кілометрі відповідно, що можна пояснити інтенсифікацією протікання фізико-хімічних процесів пов'язаних із вибіркоким перенесенням та припрацюванням трибовузла. Встановлено, що із збільшенням тривалості досліджень (9000 м, 12000 м, 15000 м) інтенсивність зношування поступово знижується для досліджуваних епоксикомпозитних матеріалів, оскільки відбувається формування плівки, яка забезпечує стабільність трибопараметрів.

Проведено хімічний аналіз трибоповерхні епоксикомпозиту складу № 5 (рис. 4.4), який має найнижчу інтенсивність зношування та найбільшу площу фрагментів мідної плівки. На трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу вибрано п'ять структурно різних точок. Точки 1 і 3 відповідають включенням оксиду міді, що підтверджується отриманими результатами

(табл. 4.2). В даних точках зафіксовано високий вміст міді, що становить 52,79 % та 50,66 % відповідно.

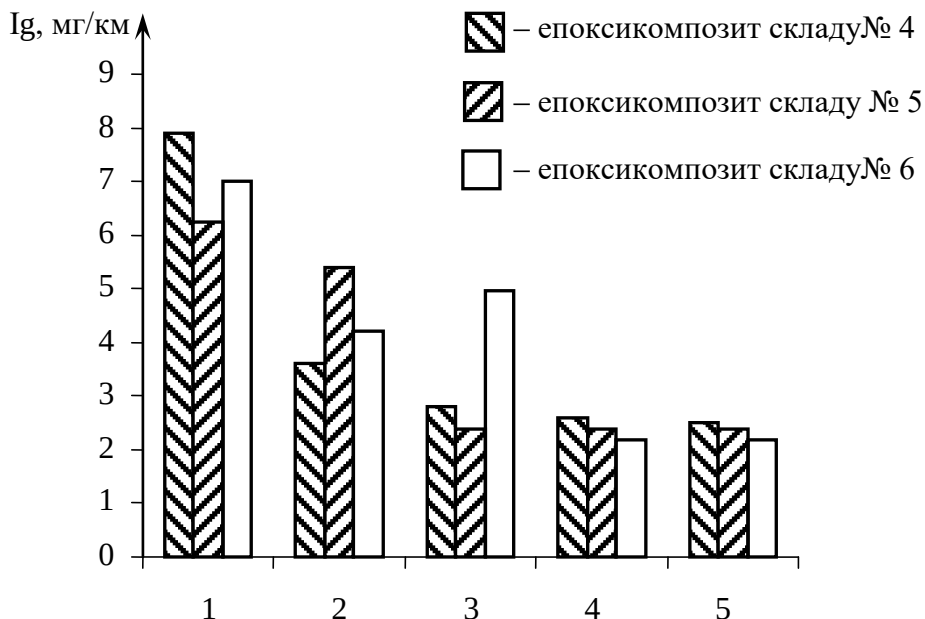
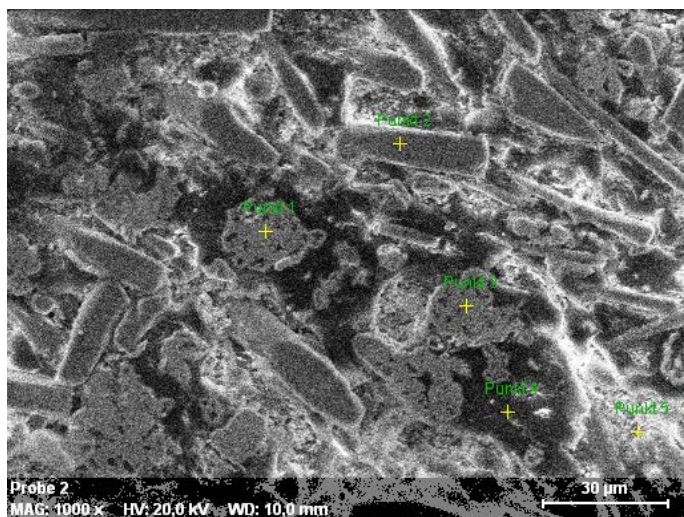


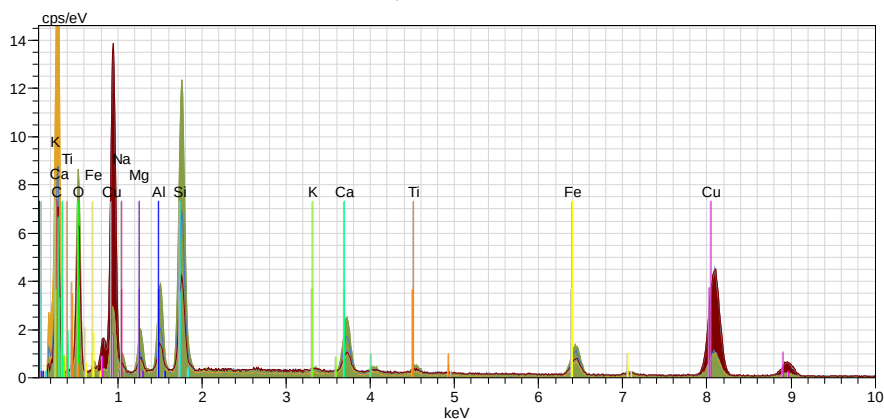
Рис. 4.3. Залежність інтенсивності зношування епоксикомпозитів від тривалості фрикційної взаємодії за режиму тертя $V=2,3$ м/с, $P=1,5$ МПа: 1 – 3000 м, 2 – 6000 м, 3 – 9000 м, 4 – 12000 м, 5 – 15000 м

Вміст кисню є найнижчими серед вибраних точок. Присутність інших елементів можна пояснити частковим перенесенням останніх з іншої структурної одиниці під час виготовлення мікрошліфа та взаємодією компонентів із матрицею.

Точка 2 відповідає включенню базальтового волокна, де встановлено присутність таких хімічних елементів, як Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Fe. Отримані значення концентрацій останніх в даній точці та високий вміст кисню 37,54 % обумовлено хімічним складом базальтових волокон (див. табл. 2.2 та 4.2).



a, $\times 1000$



б

Рис. 4.4. Хімічний спектр трибоповерхні епоксикомпозиту складу № 5: а – мікроструктура; б – хімічний спектр в точці 1

Хімічний аналіз точок 4 і 5 найбільше відповідають комплексній взаємодії структурних складових полінаповненої епоксисистеми (епоксидна смола, твердник, оксид міді, базальтове волокно), оскільки містить високу концентрацію вуглецю (34,69 % та 20,07 % відповідно) та кисню (29,11 % та

26,60 відповідно), що характерне для складу даної полімерної матриці. Вміст міді є в 3-3,5 разів нижчим, ніж в точках включень оксиду міді 1 і 3, однак дещо вищим, ніж в точці 2, яка відповідає вмісту базальтового волокна. Концентрації решти елементів знаходяться в межах 0,25-14,64 %.

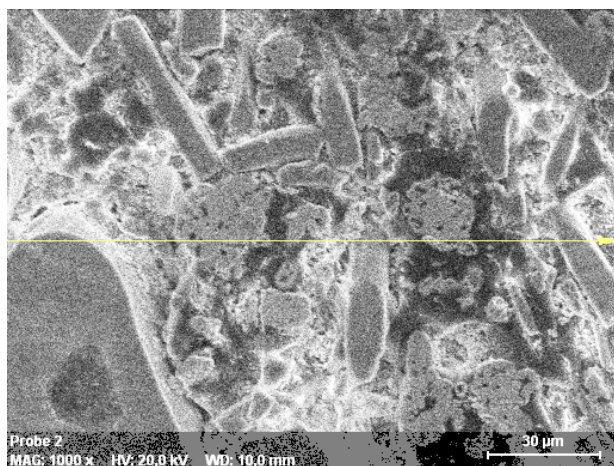
Таблиця 4.2

Хімічний склад трибоповерхні епоксикомпозиту складу № 5

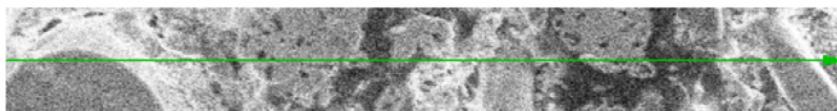
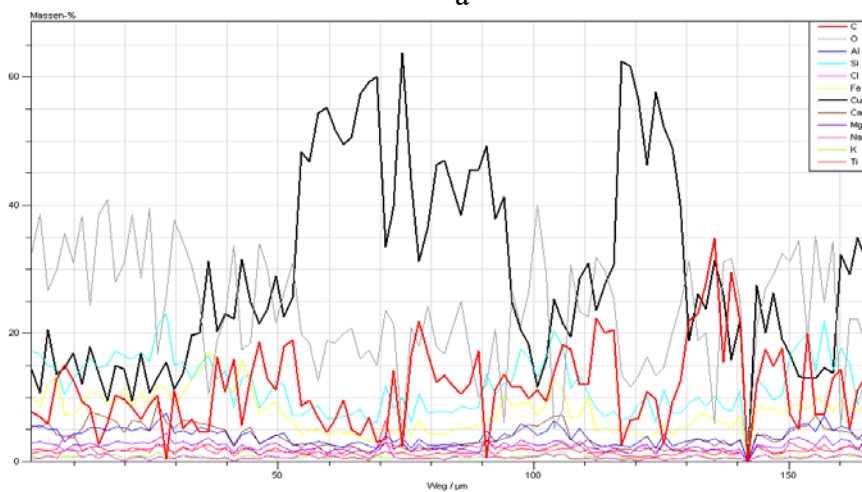
Спектр, %	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
C	11,38	13,78	11,13	34,69	20,07
O	19,86	37,54	18,91	29,11	26,60
Na	0,72	1,58	1,40	1,18	1,65
Mg	1,13	2,54	2,12	1,61	1,67
Al	1,89	4,56	2,81	2,64	3,71
Si	6,04	14,64	6,87	6,97	12,60
K	0,30	0,59	0,26	0,25	0,54
Ca	1,76	5,07	1,77	2,32	4,56
Ti	0,75	1,40	0,65	0,82	1,16
Fe	3,37	7,00	3,41	4,49	9,46
Cu	52,79	11,32	50,66	15,91	17,98

Розподіл хімічних елементів в перерізі епоксикомпозитного матеріалу представлено на рис. 4.5. Встановлено, що зміни вмісту таких елементів, як Na, Mg, Al, K, Ca, Ti в перерізі епоксикомпозитного матеріалу є незначним; зміна їх концентрацій не перевищує 7 %. Тому можна стверджувати про рівномірний розподіл даних елементів в композитному матеріалі. Дещо вищим є вміст силіцію та заліза (5...23 % та 4...18 % відповідно), що обумовлено їх вищим вмістом в епоксикомпозитному матеріалі. Різниця значень кисню в матеріалі коливається в межах 6-41 %.

Цікавими є зміни концентрації вуглецю і міді в досліджуваному епоксикомпозитному матеріалі. Встановлено, що для них характерна симбатна залежність. Зниження кількості кисню та вуглецю пов'язане із відновленням міді з оксиду.



a



б

Рис. 4.5. Зміна хімічного складу в перерізі епоксикомпозитного матеріалу складу № 5: а – мікроструктура; б – зміна хімічного складу

Оскільки вуглець, взаємодіючи із оксидом міді, відновлює мідь із наступним її видаленням у вигляді монооксиду. Тому для даних хімічних елементів характерний механізм перерозподілу, за якого ріст концентрації одного елемента супроводжується зниженням другого. Зміна концентрації міді має різкі перепади та знаходиться в межах від 9 % до 64 %. Вміст вуглецю коливається в межах до 35 %.

Обчислено, що трибоповерхні епоксикомпозитів (рис. 4.6) мають включення відновленої міді, які займають 58,13 %, 64,84 %, 54,17 % і 40,86 % від загальної площі поверхні епоксикомпозитів складу № 3, 4, 5, 6 відповідно.

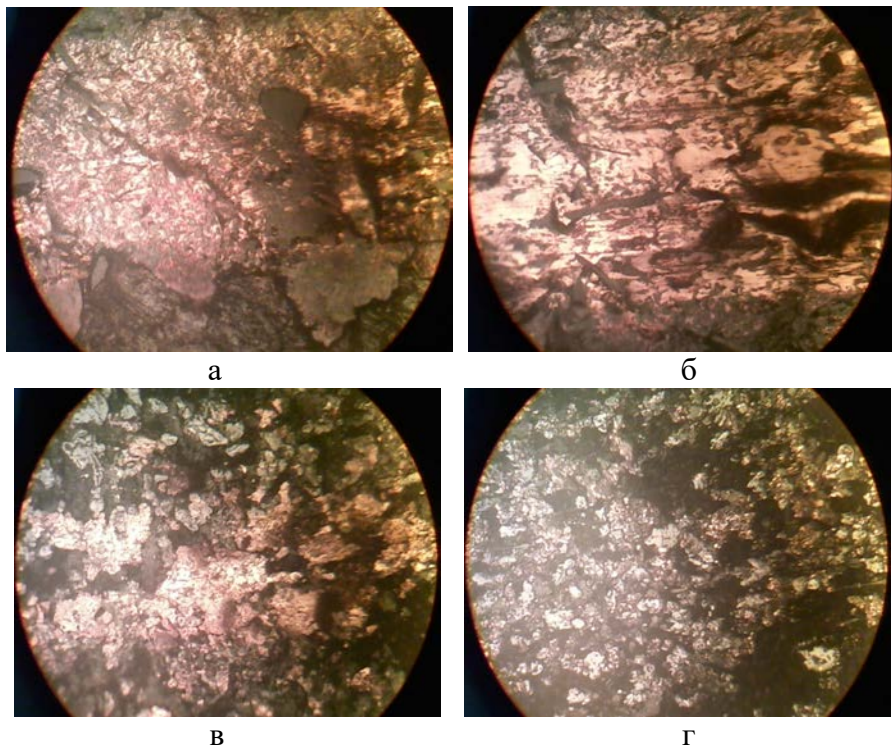


Рис. 4.6. Мікроструктура трибоповерхонь епоксикомпозитів, $\times 250$: а – № 3; б – № 4; в – № 5; г – № 6

Виявлено, що встановлення режиму вибіркового перенесення в трибопарі «епоксикомпозит-сталь» відбувається у випадку формування мідної плівки на поверхні епоксикомпозиту та перенесенням частинок міді на поверхню контртіла. Даний процес відбувається за умови збільшення тривалості фрикційної взаємодії. Зафіксовані високі концентрації міді на трибоповерхні епоксикомпозиту свідчать про наявність фрагментів мідної плівки, а отримані низькі значення інтенсивності зношування вказують на здатність матеріалу до самоорганізації під час фрикційної взаємодії.

4.2. Зносостійкість епоксикомпозитів, додатково наповнених подрібненим вуглецевим волокном

Для дослідження триботехнічних характеристик сформовано епоксикомпозити, які комплексно наповнені функціональними наповнювачами (табл. 4.3). Аналогом був вибраний епоксикомпозитний матеріал вихідного складу № 1 [99]. Для інтенсифікації реалізації вибіркового перенесення та порівняння результатів досліджень з матеріалом вихідного складу в розроблених епоксикомпозитних матеріалах збільшено вміст порошку оксиду міді до 50 мас. ч. (№ 2) та 200 мас. ч. (№ 3). Введення порошку в кількості 50 мас. ч. оксиду міді обумовлено високими механічними характеристиками епоксикомпозиту. Вміст 200 мас. ч. є максимальним за додаткового введення інших наповнювачів, оскільки за вищого вмісту порошку система стає не технологічною.

Особливий вплив на триботехнічні характеристики має лускатий графіт, який знижує коефіцієнт тертя епоксидної матриці, зменшуючи вплив адгезійної складової. Порошок фторопласту виконує аналогічну функцію разом з лускатим графітом, тому його присутність в композиті не є обов'язковою (№ 4). Тому сформовано епоксикомпозитний матеріал відповідно до вихідного складу без вмісту лускатого графіту, оскільки він підвищує крихкість системи до руйнування (№ 5).

Для порівняння сформовано також епоксикомпозитний матеріал без фторопласту та лускатого графіту (№ 6).

Таблиця 4.3

Склад епоксикомпозитних матеріалів

№ складу епоксикомпозитного зразка	Матриця	Наповнювачі, мас. ч.	Вміст наповнювача, мас. ч.
1	2	3	4
1	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	лускатий графіт	8,2
		порошок фторопласту	14,6
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8
		порошок CuO	5,4
2	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	лускатий графіт	8,2
		порошок фторопласту	14,6
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8
		порошок CuO	50
3	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	лускатий графіт	8,2
		порошок фторопласту	14,6
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8
		порошок CuO	200

Закінчення таблиці 4.3

1	2	3	4
4	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	лускатий графіт	8,2
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8
		порошок CuO	200
5	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	порошок фторопласту	14,6
		подрібнене вуглецеве волокно	1,8
		порошок CuO	200
6	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	подрібнене вуглецеве волокно	1,8
		порошок CuO	200

Подрібнене вуглецеве волокно вводиться в систему для підвищення ударної в'язкості, оскільки наповнювач у вигляді волокна є перешкодою поширенню тріщини. Для інтенсифікації процесів формування сервовитний мідних плівок на трибоповерхнях, як додатковий наповнювач, використано порошок чистої міді.

Низькі значення межі міцності при стисненні ($\sigma_c = 93,2$ МПа та $\sigma_c = 105,3$ МПа) зафіксовано для епоксикомпозитних матеріалів складів № 1 та № 2 відповідно (див. табл. 4.3), що можна пояснити наявністю лускатого графіту і порошку фторопласту, які знижують здатність системи протистояти руйнуванню, оскільки мають низькі значення даної характеристики порівняно з епоксиполімерами, а також низьким вмістом порошку CuO, що в результаті не забезпечує необхідну міцність епоксикомпозитного матеріалу [124].

Більші значення межі міцності при стисненні на 12,4-14,1 % ($\sigma_c = 111,5$ МПа та $\sigma_c = 119,6$ МПа) мають епоксикомпозити складів № 3 і № 4 порівняно зі складом № 1, оскільки дані матеріали містять більшу кількість порошку CuO.

Встановлено, що матеріал складу № 5 має вищі значення межі міцності при стисненні ($\sigma_c = 123,5$ МПа) порівняно з попередніми на 14,7-21,5 %, оскільки даний матеріал не містить лускатого графіту, що підвищує здатність епоксикомпозитної системи до крихкого руйнування та має вищий вміст порошку CuO. Найвищі значення даної характеристики ($\sigma_c = 140,1$ МПа) серед досліджених епоксикомпозитів зафіксовано для епоксикомпозитного матеріалу складу № 6, що на 33,5 % більше порівняно з складом № 1, так як він не містить лускатого графіту та порошку фторопласту, за рахунок чого значно знижується кількість концентраторів напружень.

Експериментально встановлено, що за заданих режимів трибонавантаження найменша інтенсивність зношування спостерігається для вихідного [99] епоксикомпозитного матеріалу складу № 1 (рис. 4.7). Незначне зниження інтенсивності зношування для композитів, в складі яких відсутній лускатий графіт чи фторопласт, за нижчої швидкості ковзання (2,3 м/с) пов'язано з відсутністю даних наповнювачів, які підвищують крихкість системи та знижують міцність.

Дослідження за вищої швидкості ковзання $V = 3,6$ м/с показали, що інтенсивність зношування зростає у декілька разів, особливо для композитів, в яких відсутній лускатий графіт. За даного режиму навантаження графіт виконує функцію твердого мастила та більш стійкий до підвищених температур. Велику інтенсивність зношування можна пояснити надлишковим вмістом порошку оксиду міді в композиті, що супроводжується інтенсивним руйнуванням поверхневого шару в процесі трибозаємодії [135].

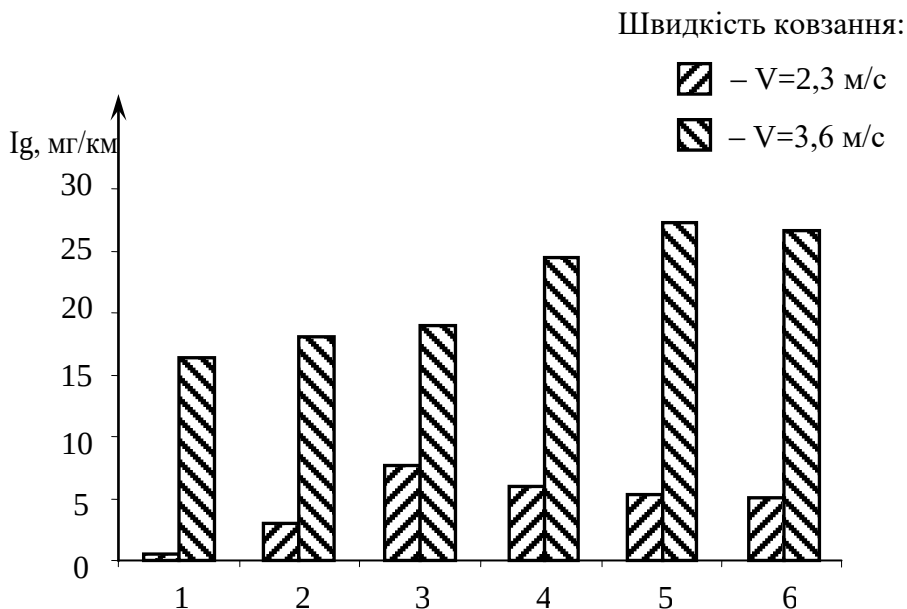


Рис. 4.7. Інтенсивність вагового зношування епоксикомпозитів (склад див. табл. 4.2), $P = 1,4$ МПа

Надалі дослідження епоксикомпозитів [136] на зносостійкість проводили за швидкості ковзання $V = 3,6$ м/с, збільшуючи лише навантаження (рис. 4.8). Із збільшенням навантаження для епоксикомпозиту складу № 1 інтенсивність зношування зросла майже в 3 рази, а для складу № 3 – в 1,5 рази. Це можна пояснити тим, що за вибіркового перенесення відбувається тертя без окиснення, тому в місцях фактичного контакту поверхонь композит-сталь виникає контактна різниця потенціалів.

Згідно ряду Вольта в місцях контакту сталеве контртіло матиме від'ємний потенціал, а композит, який містить оксид міді, – позитивний. В тих місцях, де відсутні контактуючі ділянки, завдяки електрохімічній дії проходять окисно-відновні реакції. Рух електронів відбувається від від'ємно зарядженого матеріалу пари тертя (сталь) до позитивно зарядженого

(композит). Одночасно розпочинається рух іонів міді, які переходять на поверхню контртіла та адгезійно з'єднуються з нею [19, 77]. Даний саморегулюючий процес відбувається до моменту покриття суцільною плівкою з відновленої міді трибоповерхні контртіла.

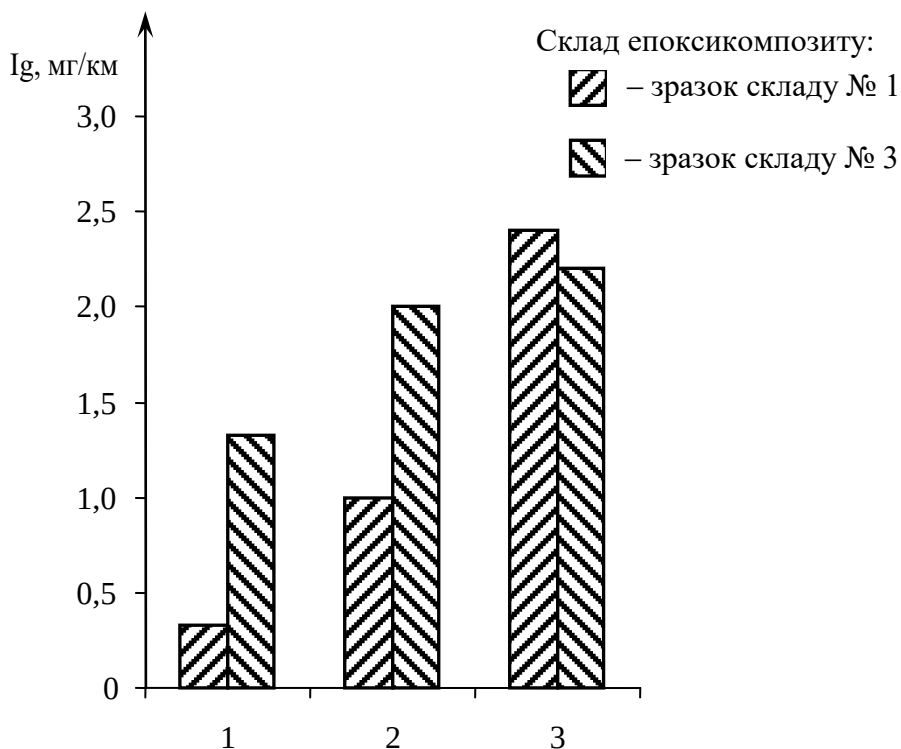


Рис. 4.8. Залежність інтенсивності вагового зношування епоксикомпозитів від питомого навантаження фрикційної взаємодії: 1 – 1 МПа, 2 – 2 МПа, 3 – 3 МПа

Трибоповерхня епоксикомпозитного матеріалу покривається лише фрагментами мідної плівки, що пов'язано із природою неметалевої матриці. Процес відновлення міді та інтенсивне перенесення її в більший мірі на контртіло зафіксовано для епоксикомпозиту складу №3 порівняно із

складом № 1, оскільки він має більший вміст порошку оксиду міді. В результаті цього відбувається стабілізація процесу тертя, що супроводжується зменшенням інтенсивності зношування [124].

Формування фрагментів мідної плівки на трибоповерхні епоксикомпозитів спостерігається для епоксикомпозитних матеріалів різного складу (рис. 4.9, а, в, д). На зображеннях можна виявити пористу структуру трибоповерхні епоксикомпозитів, яка виникає під час формування плівки, що вказує на проходження фізико-хімічних процесів під час фрикційної взаємодії, зокрема пов'язаних із відновленням міді та формуванням фрагментів мідної плівки. Встановлено, що на фрагментах мідної плівки присутні частинки оксиду міді та вуглецеві волокна.

Найменшу площу утвореної плівки 12,09 % (рис. 4.9, а) представлено на поверхні композитного матеріалу складу № 1, що пов'язано із низьким вмістом оксиду міді (5,4 мас. ч.). Для матеріалу, наповненого лускатим графітом, порошками фторопласту і оксиду міді та подрібненим вуглецевим волокном (епоксикомпозитних матеріал складу № 3), площа утворених фрагментів мідної плівки становить 37,78 % (рис. 4.9, б) від загальної площі трибоповерхні. Для епоксикомпозиту складу № 6 (рис. 4.9, в), наповненого порошком оксиду міді та подрібненим вуглецевим волокном, площа мідної плівки є меншою (21,84 %), що підтверджується невисокими показниками зносостійкості даного епоксикомпозиту (див. рис. 4.7). З аналізу мікроструктури (рис. 4.9, г) полінаповненого композиту складу № 3 можна зробити висновок про нерівномірний розподіл компонентів в епоксикомпозиті. Середня довжина вуглецевих волокон становить 210-220 мкм. Розмір частинок оксиду міді знаходиться в межах 5-39 мкм, що вказує на утворення конгломератів в епоксидній матриці під час його формування. Для епоксикомпозитів, які містять лускатий графіт, спостерігається його незначний розподіл на поверхні мікрошліфа (рис. 4.9, б). Розмір частинок порошку фторопласту становить 5-15 мкм.

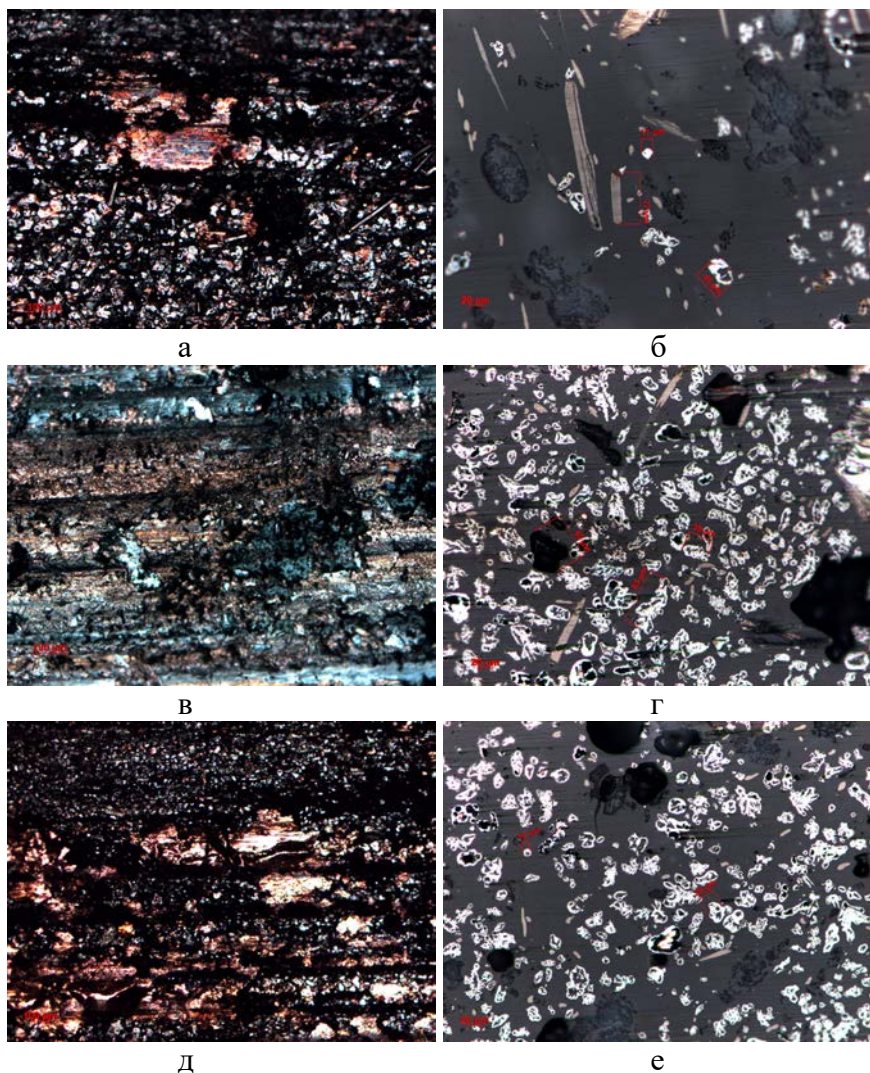


Рис. 4.9. Мікроструктура епоксикомпозитних матеріалів:
а – трибоповерхня зразка № 1; б – мікроструктура зразка № 1;
в – трибоповерхня зразка № 3; г – мікроструктура зразка № 3;
д – трибоповерхня зразка № 6; е – мікроструктура зразка № 6

З метою ідентифікації компонентів проведено хімічний аналіз трибоповерхні епоксикомпозиту в п'яти різних точках. Для зменшення впливу різнофункціональних наповнювачів на утворену структуру вибрано епоксикомпозитних матеріал складу № 6, який містить 200 мас. ч. оксиду міді та 1,8 мас. ч. подрібнених вуглецевих волокон.

В точках 1 та 2 (табл. 4.4, рис. 4.10) зафіксовано досить високі значення вуглецю (43,87 % та 47,56 % відповідно) та міді (33,81 % та 30,25 % відповідно). Вміст кисню є найвищим серед досліджуваних точок. Отримані проміжні значення концентрацій хімічних елементів в даних точках імовірно відповідають найкращій взаємодії компонентів між собою та з матрицею.

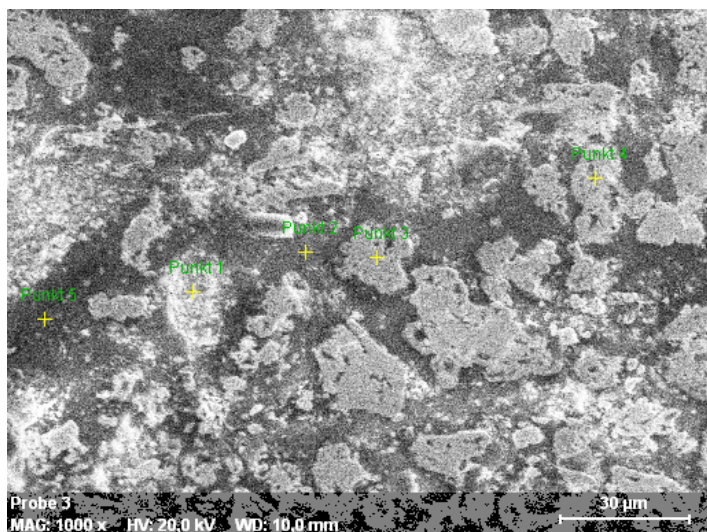
Таблиця 4.4

Хімічний аналіз трибоповерхні епоксикомпозитного зразка № 6

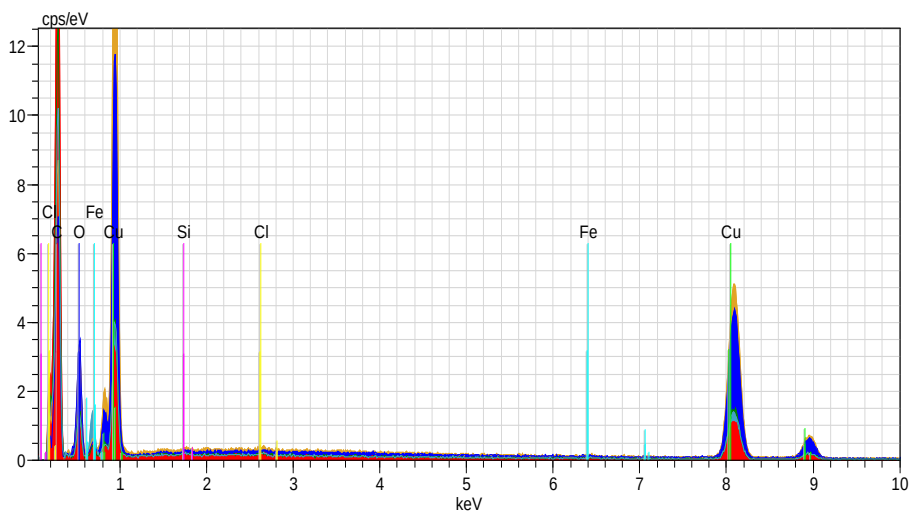
Спектр, %	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5
C	43,87	47,56	20,13	21,39	56,71
O	21,16	20,99	17,93	14,86	17,59
Si	0,22	0,24	0,22	0,23	0,32
Cl	0,36	0,31	0,19	0,27	0,25
Fe	0,58	0,65	0,69	0,68	0,66
Cu	33,81	30,25	60,83	62,56	24,47

Точки 3 і 4 знаходяться на включеннях оксиду міді. Це відповідає отриманим результатам високої концентрації міді – 60,83 % та 62,56 % відповідно. Вміст кисню є невисокими, а вуглецю – найнижчий серед досліджуваних точок.

Точка 5 відповідає найвищому вмісту вуглецю (56,71 %) та найнижчій концентрації міді, що становить 24,47 %. Вміст кисню займає проміжне значення порівняно з іншими точками. Присутність інших хімічних елементів є випадковою на поверхні тертя, куди вони могли потрапити із контртіла або продуктів зношування. Для всіх точок концентрації даних елементів є стабільно низькими, що не робить впливу на дослідження.



a



б

Рис. 4.10. Хімічний спектр трибоповерхні епоксикомпозитного зразка № 6: а – мікроструктура; б – хімічний спектр в точці 1

З рисунка 4.11 видно, що вміст вуглецю в епоксикомпозитному матеріалі, наповненому оксидом міді та вуглецевим волокном, коливається в межах 26...36 %, а кисню – 19-28 %. Мідь присутня в найбільшій кількості, що насамперед обумовлено її високим вмістом в наповненні системи.

Концентрація міді в матеріалі має більш різкі перепади від 34 % до 56 %. Аналогічно до епоксикомпозитів наповнених базальтовим волокном, збільшення відсоткового вмісту міді супроводжується зниженням вмісту вуглецю і, навпаки.

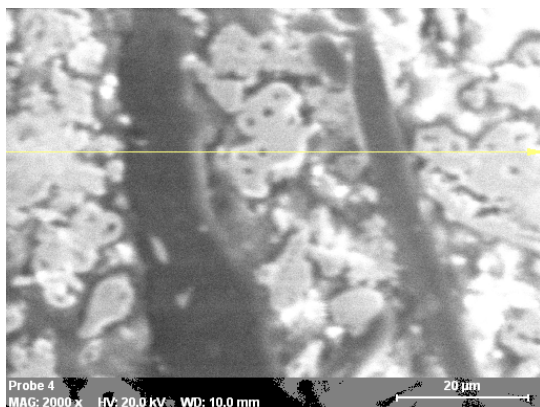
Вміст інших хімічних елементів, які могли потрапити із продуктів зношування на трибоповерхню епоксикомпозиту, є мінімальним та не перевищує 5 %, що практично не робить впливу на структуру поверхневого шару поверхні і, відповідно, формування стійкої плівки.

На трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 6 присутні сліди ковзання після фрикційної взаємодії 3000 м (рис. 4.12). Хімічний аналіз трибоповерхні даного епоксикомпозиту (табл. 4.5 і 4.6) показав, що в точках 1, 2 і 3 (рис. 4.12, а) та в точках 1 і 2 (рис. 4.12, б) присутній у великій кількості вуглець – 61,49 %, 66,03 %, 63,98 % та 66,92 %, 67,47 % відповідно. Це вказує на те, що лускатий графіт (твердий мастильний матеріал), який міститься в складі даного матеріалу, намазується на трибоповерхні епоксикомпозиту під час фрикційної взаємодії, чим додатково знижує зношування.

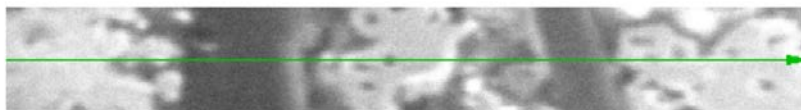
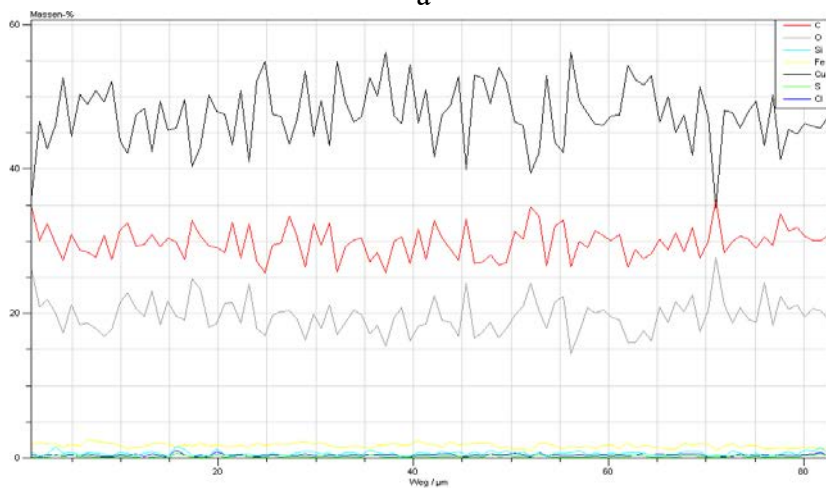
Точка 3 (рис. 4.12, б) відповідає включенню оксиду міді, що підтверджується отриманими даними хімічного аналізу даної точки (табл. 4.6). Вміст вуглецю в точці 3 є в два рази нижчим, порівняно з попередніми точками і становить 34,12 %. Кількість міді є високою, що становить 42,27 %, а кисню (21,27 %) – нижчою порівняно з іншими точками.

Вміст решти хімічних елементів, що на трибоповерхню потрапили із контртіла, продуктів зношування та повітря є незначним і знаходяться в межах 0,15-2,48 %, що не робить

суттєвого впливу на формування структури під час трибозасмодії.

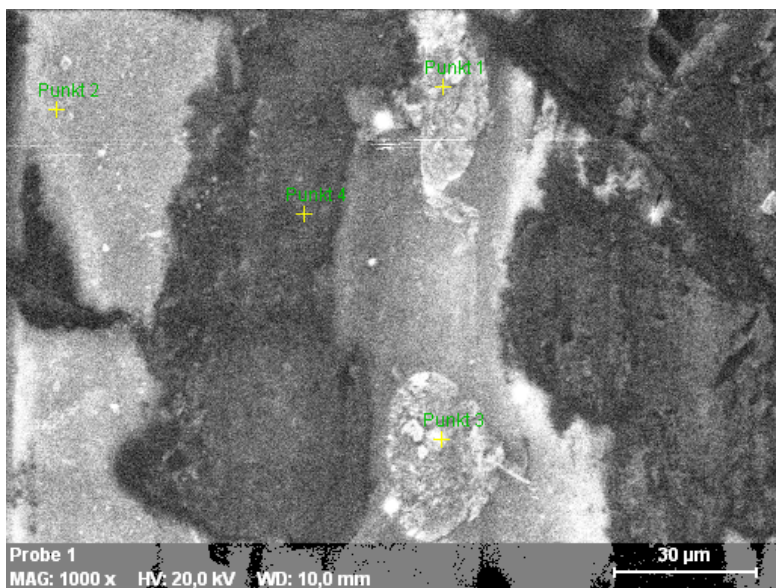


а

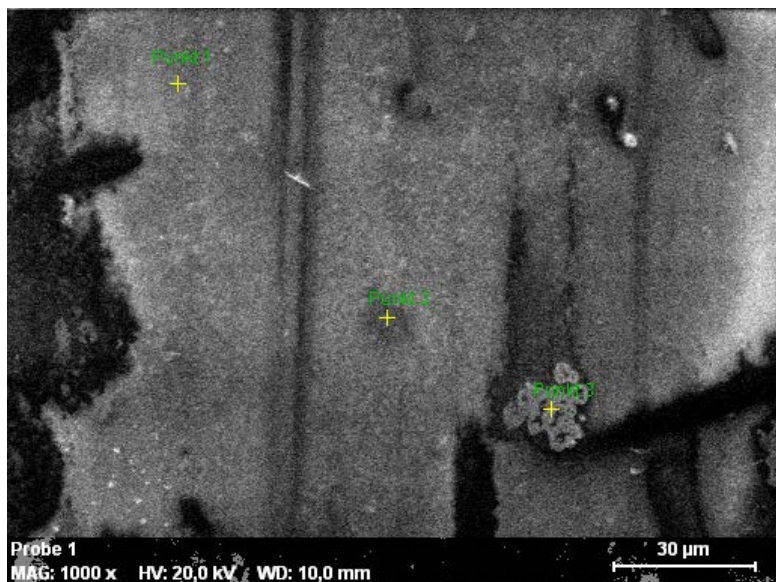


б

Рис. 4.11. Зміна хімічного складу в перерізі епоксикомпозитного матеріалу складу № 6: а – мікроструктура поверхні; б – зміна хімічного складу



a



б

Рис. 4.12. Мікроструктура трибоповерхні епоксикомпозиту складу № 5

Таблиця 4.5

Хімічний аналіз трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 6 після 3000 м фрикційної взаємодії

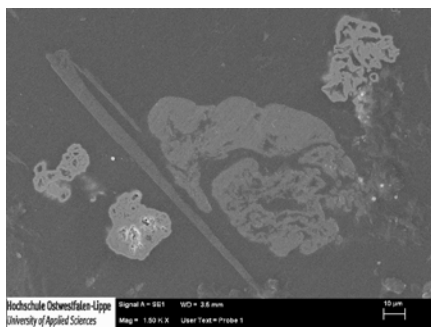
Спектр, %	C	O	Al	Si	Cl	Fe	Cu
Точка 1	61,49	32,74	0,42	0,53	0,20	1,31	3,32
Точка 2	66,03	28,72	0,38	0,35	0,29	0,69	3,54
Точка 3	63,98	30,92	0,41	0,55	0,19	1,07	2,88
Точка 4	59,58	29,86	0,28	0,70	0,18	2,48	6,92

Таблиця 4.6

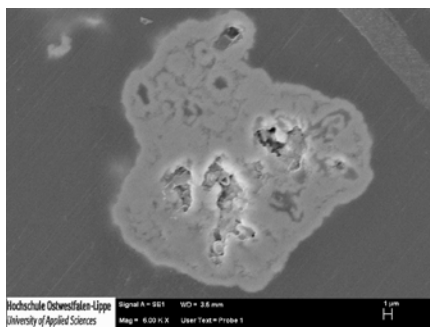
Хімічний аналіз трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 6 після 3000 м фрикційної взаємодії

Спектр, %	C	O	Al	Si	Cl	Fe	Cu
Точка 1	66,92	29,03	0,15	0,23	0,23	0,77	2,68
Точка 2	67,47	28,60	0,25	0,27	0,22	0,65	2,54
Точка 3	34,12	21,27	1,06	0,62	0,27	0,39	42,27

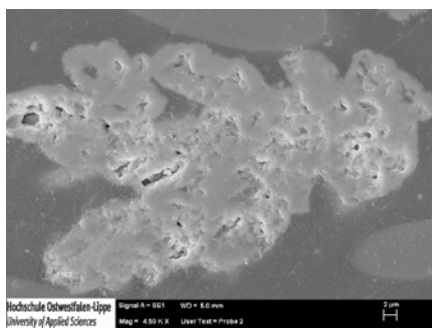
На поверхні шліфа епоксикомпозитного матеріалу даного складу видно включення оксидів міді (рис. 4.13, а-г), які мають пористу структуру, та сліди розмазаного по поверхні епоксикомпозитного зразка графіту (рис. 4.13, а).



а



б



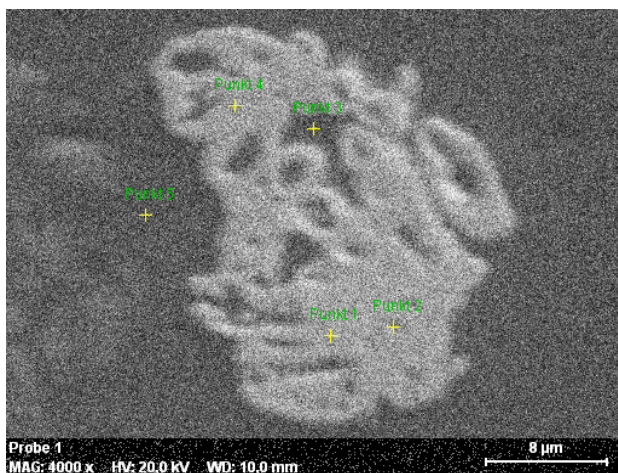
В



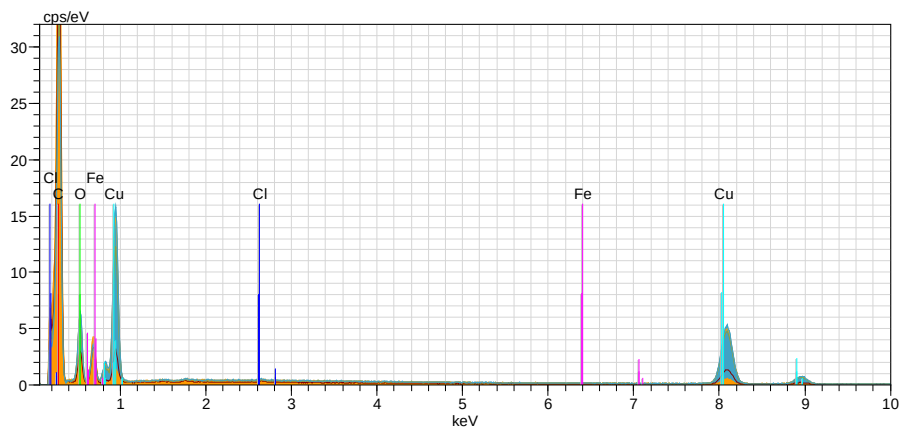
Г

Рис. 4.13. Мікроструктура поверхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 6

Розглянемо детальніше включення оксиду міді на поверхні епоксикомпозитного матеріалу (рис. 4.14), провівши хімічний аналіз. Встановлено, що точки 1, 2, 4 містять високу концентрацію міді (табл. 4.7), що становить 42,67 %, 36,50 % та 38,46 % відповідно.



а



б

Рис. 4.14. Хімічний спектр включення оксиду міді на трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу

Точки 3 і 5 належать вуглецю, вміст якого в них зафіксовано 60,43 % та 67,04 % відповідно. Концентрація кисню в даних точках є вищою (25,80 %, 26,62 %) порівняно із попередніми (20,95...22,58 %), що вказує належність даних точок епоксиполімерній матриці та вуглецевому волокну, яке входить до складу матеріалу.

Таблиця 4.7

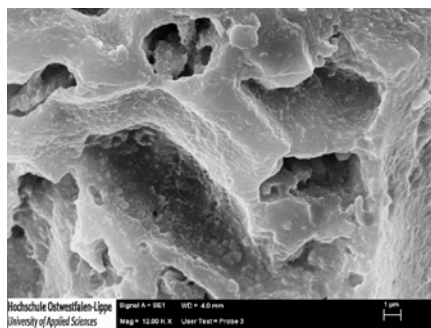
Хімічний аналіз включення оксиду міді на трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу

Спектр, %	C	O	Cl	Fe	Cu
Точка 1	35,87	20,95	0,16	0,35	42,67
Точка 2	41,93	21,04	0,18	0,35	36,50
Точка 3	60,43	25,80	0,23	0,29	13,25
Точка 4	38,42	22,58	0,22	0,32	38,46
Точка 5	67,04	26,62	0,20	0,39	5,76

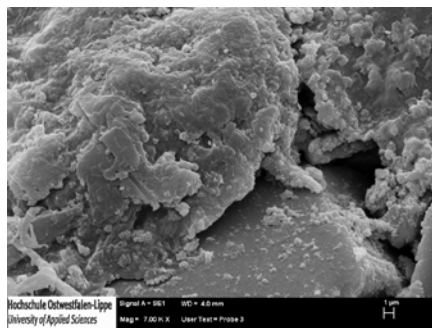
Мікроструктуру трибоповерхонь епоксикомпозитних матеріалів після фрикційної взаємодії подано на рис. 4.15 (а-ж).



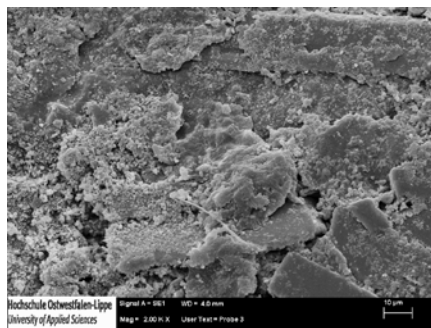
а



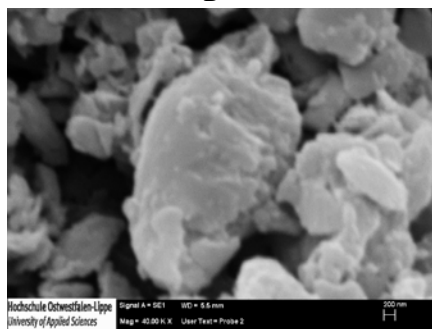
б



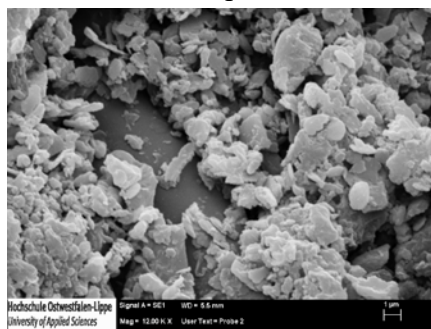
в



г



д



е

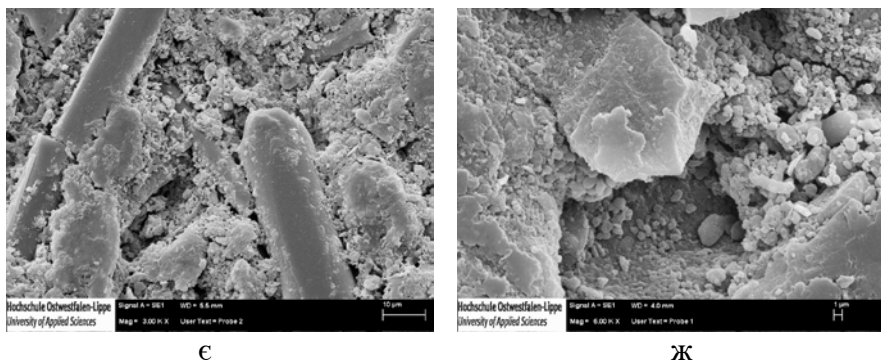


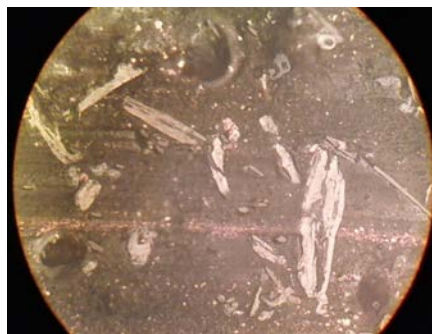
Рис. 4.16. Мікроструктура трибоповерхонь епоксикомпозитних матеріалів

Поверхні досліджуваних епоксиполімерних матеріалів № 1 і № 3 мають включення відновленої міді (рис. 4.16), які займають 5,96 % і 52,65 % від загальної площі поверхні відповідно. На поверхні контртіла також присутні сліди утворення стійкої мідної плівки, яка займає 6,18 % і 41,62 % трибоповерхні після фрикційної взаємодії в трибопарах із досліджуваними матеріалами складів № 1 та № 3 відповідно.

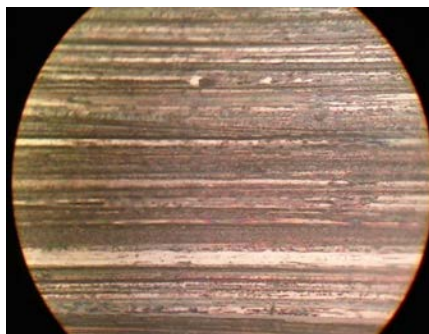
З метою підвищення конструкційної міцності розроблених епоксикомпозитних матеріалів було проведено часткову заміну порошку оксиду міді на порошки заліза (Fe), оксиду алюмінію (Al_2O_3) та оксиду хрому (Cr_2O_3). Кожен епоксикомпозит додатково містить 16 мас. ч. Si та 2 мас. ч. вуглецевих волокон (табл. 4.8). Трибодослідження проводили за наступним режимом: швидкість ковзання – 1,2 м/с, питоме навантаження – 1,0 МПа. Шлях тертя становив 3000 м.

Експериментально встановлено, що для епоксикомпозиту з вмістом 100 мас. ч. оксиду міді та 70 мас. ч. заліза (епоксикомпозит складу № 1) відбувається зростання інтенсивності зношування. Мінімальне значення даної характеристики (28,4 мг/км) зафіксовано для композитів з вмістом наповнювачів 50 мас. ч.. Із підвищенням вмісту порошку оксиду міді до 100 мас. ч. інтенсивність зношування

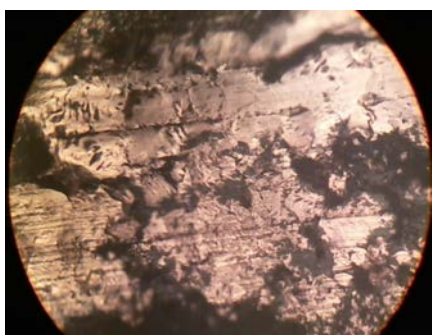
зростає майже у два рази, що пов'язано очевидно з оптимальним вмістом наповнювача, перевищення якого призводить до інтенсивного викришування частинок через недостатнє змочування поверхні полімерним в'язучим.



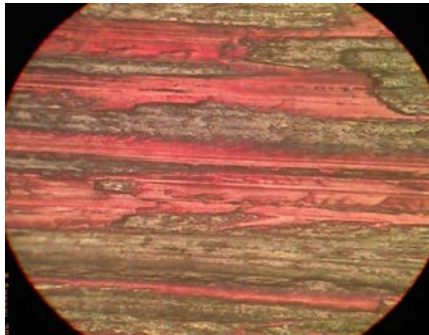
а



б



в



г

Рис. 4.16. Мікроструктура поверхонь трибоконтакту епоксикомпозитів і контртіла, $\times 250$: а – зразок № 1; б – контртіло в трибопарі з епоксикомпозитом складу № 1; в – зразок № 3; г – контртіло в трибопарі з епоксикомпозитом складу № 3

Аналогічні процеси відбуваються із збільшенням 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.

Таблиця 4.8

Склад та інтенсивність зношування епоксикомпозитів

№ композиції	Наповнювачі, мас. ч.	Вміст наповнювача, мас. ч.	Інтенсивність вагового зношування, мг/км
1	2	3	4
1	CuO	50	28,4
	Fe	50	
2	CuO	100	50,2
	Fe	50	
3	CuO	50	56,5
	Fe	70	
4	CuO	100	66,7
	Fe	70	
5	CuO	50	7,2
	Al ₂ O ₃	30	
6	CuO	100	8,1
	Al ₂ O ₃	30	
7	CuO	50	11,2
	Al ₂ O ₃	50	
8	CuO	100	7,1
	Al ₂ O ₃	50	
9	CuO	50	12,4
	Cr ₂ O ₃	30	
10	CuO	100	10,8
	Cr ₂ O ₃	30	
11	CuO	50	5,7
	Cr ₂ O ₃	50	
12	CuO	100	17,2
	Cr ₂ O ₃	50	

закінчення таблиці

1	2	3	4
13	CuO	100	32,0
	високодисперсна бронза	8	
14	CuO	100	85,0
	високодисперсна бронза	4	
15	CuO	50	115,0
	високодисперсна бронза	8	
16	CuO	50	137,0
	високодисперсна бронза	4	

Примітка 1. Матриця: 100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА.

Примітка 2. Кожен зразок в складі додатково містить 16 мас. ч. Si та 2 мас. ч. подрібненого вуглецевого волокна.

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 [137].

Введення порошку оксиду алюмінію (епоксикомпозит складу № 5) підвищує зносостійкість епоксикомпозитного матеріалу (7,2 мг/км), оскільки даний наповнювач має вищі механічні характеристики порівняно з порошком заліза і не проявляє здатності захоплювання до сталевого контртіла [138].

Із збільшенням вмісту оксиду міді до 100 мас. ч. (епоксикомпозит складу № 6, додаток А) різкої зміни інтенсивності зношування (8,1 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 № 7) 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 № 8) 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 [24, 137].

Аналогічна ситуація спостерігається із використанням порошку оксиду хрому, коли із підвищенням вмісту оксиду міді інтенсивність зношування знижується з 12,4 мг/км (епоксикомпозит складу № 9) до 10,8 мг/км (епоксикомпозит складу № 10) за рахунок прояву мастильної функції мідної плівки. Мінімальне значення досліджуваної характеристики (5,7 мг/км) зафіксовано із підвищенням вмісту оксиду хрому (епоксикомпозит складу № 11). Очевидно це пов'язано з високою дисперсністю наповнювача, який рівномірно розподіляється в об'ємі полімерної матриці та не піддається викришуванню в процесі трибовзаємодії [138]. Однак зростання інтенсивності зношування матеріалу з максимальним вмістом оксиду міді (епоксикомпозит складу № 12) викликане надлишковим вмістом порошку оксиду міді, який недостатньо змочується епоксидним полімером.

Експериментально встановлено, що із введенням порошку високодисперсної бронзи найменшу інтенсивність зношування має епоксикомозит у випадку комплексного наповнення 100 мас. ч. CuO та 8 мас. ч. бронзи (епоксикомпозит складу № 13, додаток А). Отримані високі значення інтенсивності вагового зношування за інших кількісних поєднань наповнювачів (епоксикомпозит складу № 14-16) пояснюється недостатнім наповненням епоксикомпозитної системи, що не

забезпечує необхідну конструкційну міцність епоксикомпозитів під час фрикційної взаємодії. Тому під час трибозаємодії епоксикомпозити не витримують прикладеного фрикційного навантаження і відбувається руйнування поверхневих шарів, що призводить до зростання інтенсивності зношування [139].

4.3. Вплив технології формування та режимів експлуатації на зносостійкість епоксикомпозитів

З метою підвищення зносостійкості сформовано епоксикомпозитні матеріали під тиском і за нормальних умов. На основі попередніх досліджень встановлено, що оптимальним є наступний вміст наповнювачів: CuO (100 мас. ч.), Cu (16 мас. ч), BB (2 мас. ч.).

Експериментально встановлено, що за режиму тертя ($P = 0,9 \text{ МПа}$, $V = 1,21 \text{ м/с}$, $L = 3 \text{ км}$) інтенсивність зношування епоксикомпозиту, сформованого під тиском пресування 150 МПа , є нижчою в 2,3 рази порівняно із епоксикомпозитним матеріалом, сформованим без тиску. За питомого навантаження $P = 1,2 \text{ МПа}$, зафіксовано, що дана характеристика знижується в 3,5-4,2 рази, що пов'язано з формуванням щільної структури, вільної від пустот та пор.

Для зменшення залишкових напружень запропоновано дослідити вплив наступних режимів термічної обробки: 1 год за температури 20°C , 3 год – 20°C , 1 год – 40°C , 3 год – 40°C . Для порівняння триботехнічних параметрів були сформовані епоксикомпозитні матеріали під різним тиском пресування (без тиску, 150 МПа , 500 МПа). Триботехнічні дослідження проводили за питомого навантаження $P = 1,2 \text{ МПа}$. Експериментально встановлено, що найнижчі показники інтенсивності зношування мають епоксикомпозити, сформовані з витримкою протягом 3 год за температури 40°C . Це пов'язано із зниженням залишкових напружень матеріалу та формуванням структурної сітки з високим ступенем зшивання матриці [124].

Для дослідження залежності інтенсивності зношування від швидкості ковзання та питомого навантаження сформовано епоксикомпозитні матеріали, режими термічної обробки і тиску пресування яких подано в табл. 4.9.

Таблиця 4.9

Технологічні режими формування епоксикомпозитів

№ зразка	Тиск пресування, МПа	Режим ТО	Режим попередньої ТО
1	250	1 год 50° С 1 год 100° С 4 год 120° С	3 год за температури 40° С
2	500		

Експериментально встановлено, що епоксикомпозит сформований під тиском 500 МПа має в 14,5 разів нижчу інтенсивність зношування порівняно із епоксикомпозитом складу № 1 за питомого навантаження 0,9 МПа (рис. 4.17). Це пояснюється вищою щільністю системи та можливістю підвищити ступінь зшивання полімерної матриці, що забезпечує високу конструкційну міцність епоксикомпозиту.

Із збільшенням тиску фрикційної взаємодії до 2,0 МПа за сталої швидкості ковзання 0,9 м/с інтенсивність зношування зростає, що вказує на зниження здатності матеріалу чинити опір значним питомим навантаженням в процесі трибозаємодії через часткову термодеструкцію полімерної матриці [140].

Із поступовим збільшенням швидкості ковзання (рис. 4.18) від 0,9 м/с до 2,3 м/с для епоксикомпозитів складів № 1 і № 2 спостерігається підвищення інтенсивності зношування в 1,3 і 5 разів відповідно, оскільки за вищої швидкості ковзання зростає температура в зоні контакту, що пов'язано з домінуванням процесів руйнування поверхневого шару над процесами формування стійкої структури на поверхні контртіла.

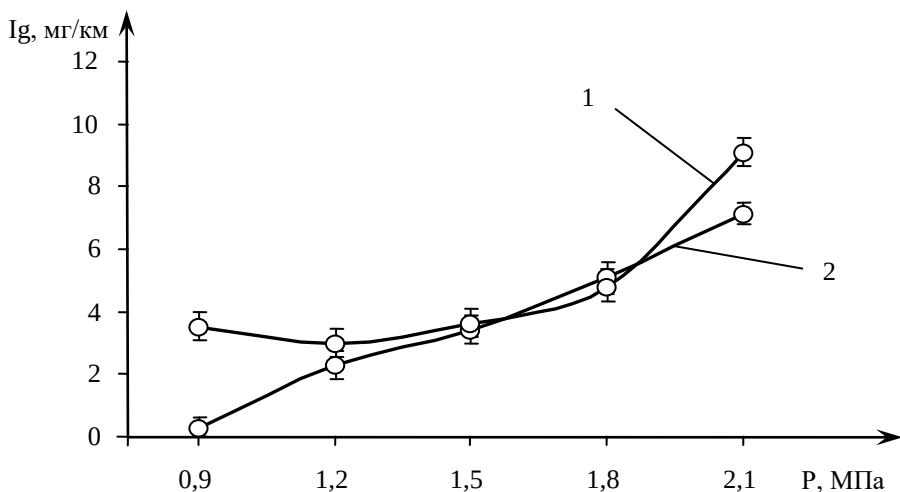


Рис. 4.17. Вплив питомого навантаження фрикційної взаємодії на інтенсивність зношування епоксикомпозиту, сформованого під тиском: 1 – 250 МПа, 2 – 500 МПа

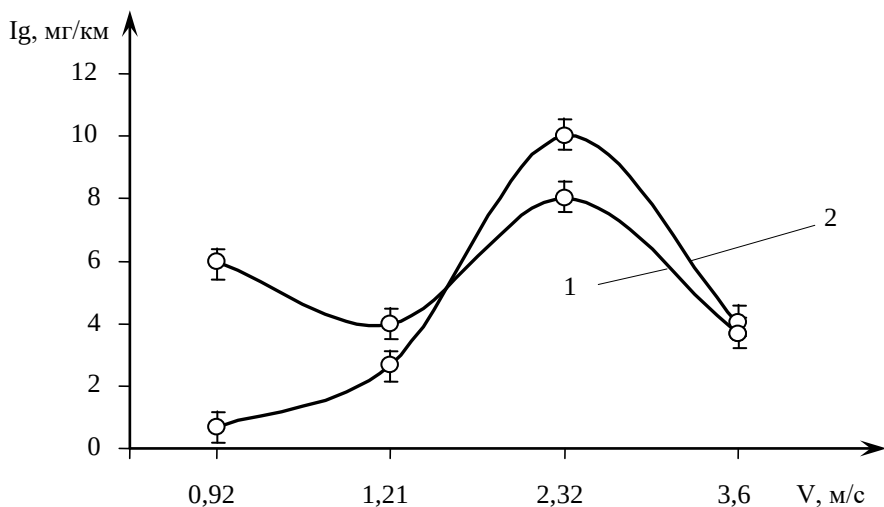


Рис. 4.18. Вплив швидкості ковзання на інтенсивність зношування епоксикомпозиту, сформованого під тиском: 1 – 250 МПа, 2 – 500 МПа

Із наступним збільшенням швидкості до 3,6 м/с відбувається зниження даної характеристики в 2,1 і 2,7 раз відповідно. Це пояснюється тим, що із збільшенням швидкості ковзання відбувається інтенсивне відновлення міді на поверхні епоксикомпозиту і її часткове перенесення на сталеве контртіло, в результаті чого поверхні покриваються міддю, що стабілізує процес тертя [135].

Дослідження епоксикомпозитів на зносостійкість паралельно проводили за схемою “диск-палець”, які полягали у реалізації контакту плоскої поверхні контртіла (сталі У9) і торця циліндричного зразка діаметром 8 мм в режимі тертя без мащення. За помірних швидкостей (1...3 м/с) і питомих навантажень (1...2 МПа) зношування матеріалів є невисоким (рис. 4.19), оскільки відбувається поступове формування мідної плівки і її перенесення на контртіло, що пов’язано з реалізацією процесів самоорганізації у вузлах тертя.

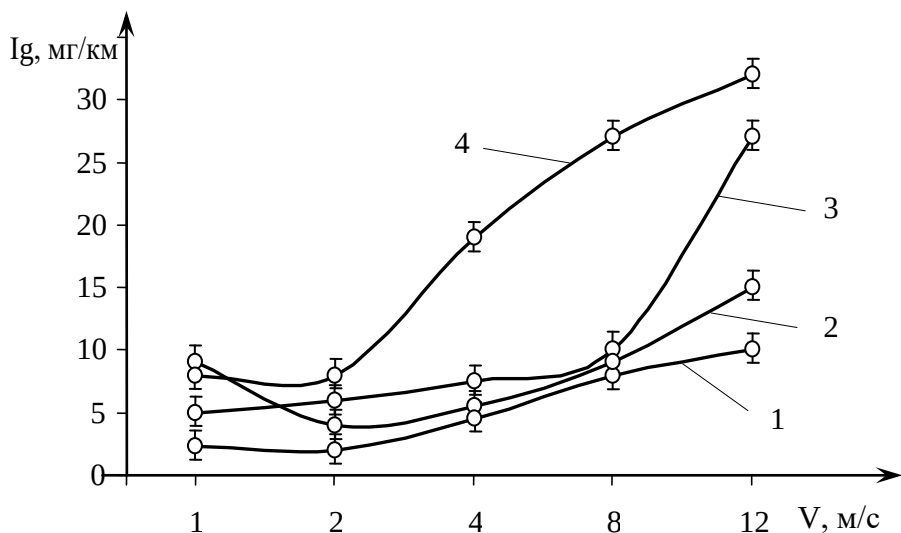


Рис. 4.19. Залежність інтенсивності зношування епоксикомпозиту від швидкості ковзання за питомого навантаження: 1 – 1,0 МПа, 2 – 2,0 МПа, 3 – 3,0 МПа, 4 – 4,0 МПа

Однак дослідження за жорсткіших умов (швидкість ковзання 5...12 М/с та питоме навантаження 3...4 МПа) трибовзаємодії призводить до катастрофічного руйнування поверхневого шару епоксикомпозитів, що пов'язано із різким підвищенням температури в зоні трибоконтакту та зниженням межі міцності при стисненні. Дані фактори не дозволяють проходити в повній мірі напрямленим фізико-хімічним перетворенням, пов'язаних з формуванням на трибоповерхнях сервовитної плівки, яка стабілізує процеси трибовзаємодії [141, 142].

З метою підвищення конструкційної міцності поверхневого шару епоксикомпозитного матеріалу триботехнічного призначення проведено заміну порошку чистої міді на порошок високодисперсної бронзи, що пов'язано із вищою дисперсністю порошку бронзи та можливістю перенесення дрібніших частинок міді, яка необхідна для формування сервовитної плівки. Граничний вміст високодисперсної бронзи (8 мас. ч.) обумовлено її високими показниками міцності при стисненні (табл. 4.10) [142]. Тверднення епоксикомпозиту складу № 3 відбувалось у прес-формі під тиском 500 МПа протягом 24 год. Епоксикомпозит був підданий попередній термічній обробці, яка полягала у витримці у печі протягом 3 год за температури 40 °С [140, 143].

Експериментально встановлено, що введення наповнювачів на основі міді в епоксикомпозит призводить в основному до зниження інтенсивності зношування із підвищенням швидкості ковзання за сталого питомого навантаження 0,9 МПа. Дослідження матеріалу складу №1 показали, що інтенсивність зношування майже не змінюється за невеликих швидкостей (0,9 м/с та 1,2 м/с) та різко зростає за швидкості 2,3 м/с (рис. 4.20). Це пов'язано із інтенсифікацією фізико-хімічних процесів в зоні трибоконтакту, які призводять до насичення поверхні частинками міді та сприяють їх перенесенню з поверхні епоксикомпозитного матеріалу на поверхню контртіла (рис. 4.21, а).

Із подальшим збільшенням швидкості ковзання відбувається стабілізація процесів і інтенсивність зношування досягає мінімального значення (5,5 мг/км).

Таблиця 4.10

Склад та режими формування епоксикомпозитних зразків

№ складу епоксикомпозиту	Матриця	Наповнювачі	Вміст наповнювача, мас. ч.	Тиск пресування, МПа	Попередня ТО
1	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч . ПЕПА	CuO	150	—	—
		подрібнене вуглецеве волокно	2		
		Cu	16		
2	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч . ПЕПА	CuO	100	—	—
		подрібнене вуглецеве волокно	2		
		високодисперсна бронза	8		
3	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч . ПЕПА	CuO	150	500	+
		подрібнене вуглецеве волокно	2		
		Cu	16		

Інтенсивність зношування матеріалу складу № 2 монотонно зменшується із збільшенням швидкості ковзання. Це пояснюється тим, що невисоке питоме навантаження і поступове збільшенні швидкості ковзання є сприятливими умовами для покриття поверхонь епоксикомпозитів міддю і перенесенням її частинок на контртіло (рис. 4.21, б), що приводить до стабілізації фрикційних процесів [29, 141].

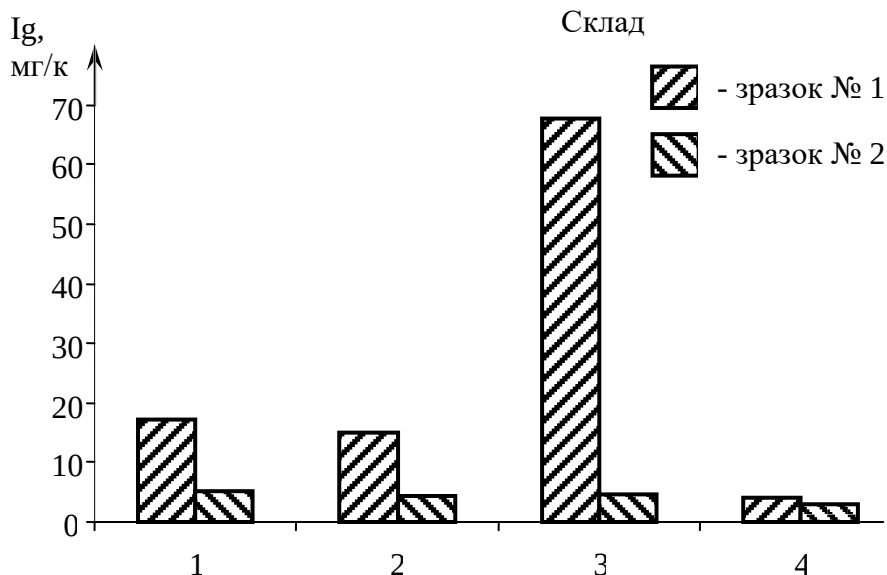
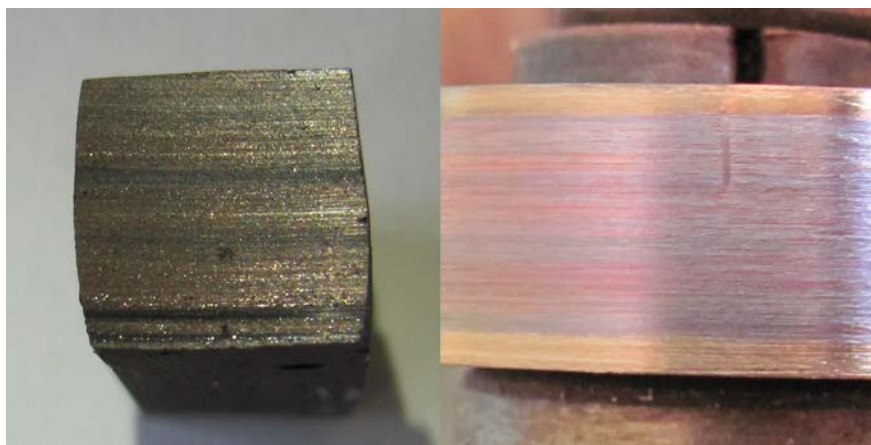
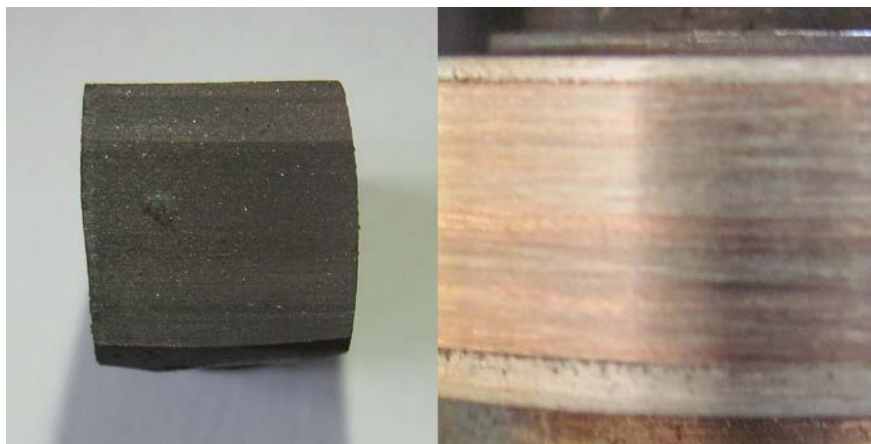


Рис 4.20. Залежність інтенсивності зношування епоксикомпозитів від швидкості ковзання: 1 – 0,9 м/с; 2 – 1,2 м/с; 3 – 2,3 м/с; 4 – 3,6 м/с

Відсутність екстремального значення інтенсивності зношування за швидкості ковзання 2,3 м/с для матеріалу складу № 2 пов'язано із зміною хімічного складу наповнювача, оскільки в даному випадку використано сплав міді, а також зменшено вміст оксиду міді. Відповідно виділення частинок міді із сплаву не відбувається так інтенсивно як для частинок міді і втрати маси епоксикомпозитного матеріалу за рахунок перенесення міді на контртіло за заданої швидкості ковзання є мінімальними. Швидкість ковзання 2,3 м/с для матеріалу складу № 1 виявилася визначальною, оскільки на даному інтервалі шляху відбуваються інтенсивні зміни та перетворення в поверхневому шарі матеріалу, що викликає різку тимчасову втрату маси.



а



б

Рис. 4.21. Загальний вигляд трибоповерхні зразка і контртіла:
а – зразок складу № 1; б – зразок складу № 2

Надалі проводили визначення залежності інтенсивності зношування від шляху тертя за різних швидкостей і сталого питомого навантаження (0,9 МПа). Для цього шлях тертя у

3000 м розбивали на рівномірні проміжки (300 м, 600 м, 900 м) і фіксували значення параметру. Перед дослідженням інтенсивності зношування за інших швидкостей ковзання поверхню контртіла попередньо очищували від мідної плівки.

Аналіз залежностей інтенсивності зношування від шляху тертя (рис. 4.22, 4.23) показав, що підвищення тривалості трибозаємодії призводить до зменшення інтенсивності зношування для матеріалів складу № 1 та № 2. Це пов'язано із завершенням процесів вирівнювання шорсткості поверхневого шару та формування структури, стійкої до зношування.

Поведінка матеріалу складу № 2 є більш стабільна, без появи різко виражених екстремальних значень досліджуваної характеристики. Однак, на початковому етапі досліджень матеріал складу № 2 піддається більш інтенсивному зношуванню, порівняно з матеріалом складу № 1, що вказує на його здатність ефективніше формувати структуру стійку до зношування.

Для обох епоксикомпозитів характерною є поява екстремуму інтенсивності зношування за швидкості ковзання 1,2 м/с. Очевидно, що дана швидкість не забезпечує необхідних умов для протікання структурних перетворень, які формують зносостійкий шар.

Крім того відбувається руйнування поверхні трибоконтакту на початковій стадії, що характерно для процесів припрацювання на першому кілометрі шляху тертя. На даному проміжку матеріал наповнений порошком бронзи є більш стабільним і не піддається різкій зміні інтенсивності зношування, порівняно з епоксидним композитом наповненим порошком міді, що пов'язано з його вищою конструкційною міцністю.

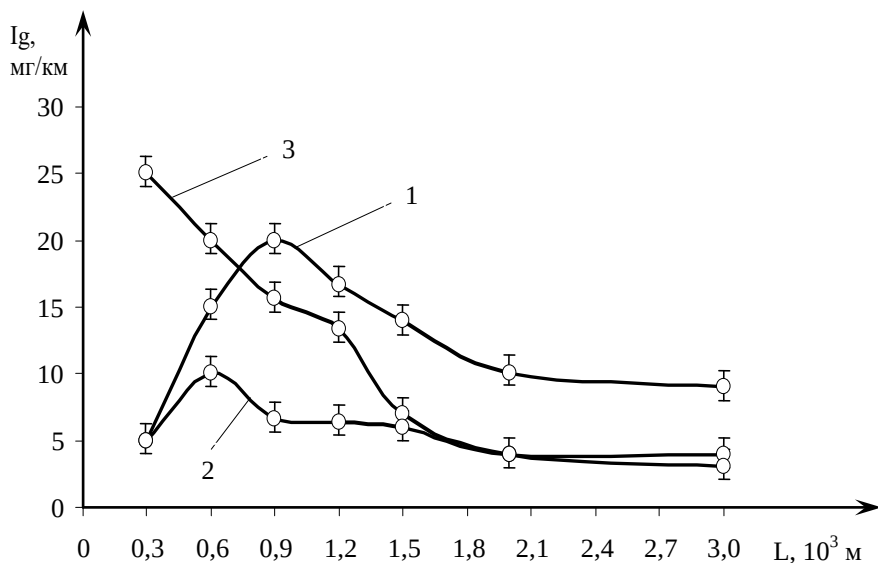


Рис. 4.22. Динаміка зміни інтенсивності зношування епоксикомпозиту складу № 1 на різних шляхових відрізках за швидкості ковзання: 1 – 1,2 м/с; 2 – 2,3 м/с; 3 – 3,6 м/с

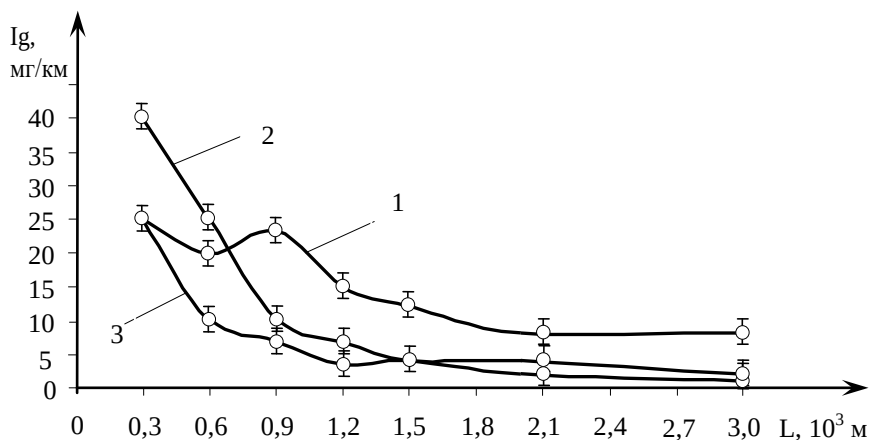


Рис. 4.23. Динаміка зміни інтенсивності зношування епоксикомпозиту складу № 2 за швидкості ковзання: 1 – 1,2 м/с; 2 – 2,3 м/с; 3 – 3,6 м/с

Стабілізація триботехнічних характеристик для матеріалу складу № 1 характерна на відрізку 1800 м, а для матеріалу складу № 2 на відрізку 1200 м. Це пов'язано із вищим вмістом порошку оксиду міді в зразку № 1: для завершення процесів відновлення чистої міді необхідно більше часу.

Експериментально встановлено, що епоксикомпозитний матеріал на відрізку шляху понад 2000 м за швидкостей вищих 2 м/с має підвищену зносостійкість за рахунок формування стійкого до зношування поверхневого шару в процесі фізичних та хімічних перетворень, які мають місце за даних умов досліджень, а також формування на поверхні контртіла перехідної плівки з частинок міді, які виконують в триботехнічній системі функцію твердого мастила.

Дослідження показали, що інтенсивність зношування матеріалу складу № 1 зменшується (рис. 4.24) із поступовим збільшенням навантаження за сталої швидкості ковзання 0,9 м/с. Аналіз поверхні тертя вказує на здатність матеріалу чинити опір значним навантаженням в процесі трибовзаємодії (рис. 4.25, а), оскільки сумарний ступінь наповнення для даного матеріалу вищий. Також необхідно відмітити, що вищий вміст оксиду міді забезпечує вищу конструкційну міцність матеріалу через формування достатньої кількості зв'язків епоксиполімерної матриці з поверхнею частинок оксиду міді, а також за рахунок вищих механічних характеристик наповнювача. Для матеріалу складу № 2 спостерігається незначне зниження інтенсивності зношування до досягнення граничного значення питомого навантаження 1,5 МПа.

Подальше підвищення даної характеристики призводить до катастрофічного зношування системи, що пов'язано з втратою конструкційної міцності матеріалу із меншим вмістом оксиду міді (рис. 4.25, б). Зниження межі міцності при стисненні та відсутність частинок міді погіршує тепловідведення із зони трибоконтакту, що не забезпечує в повній мірі формування плівки перенесення на поверхні контртіла [143].

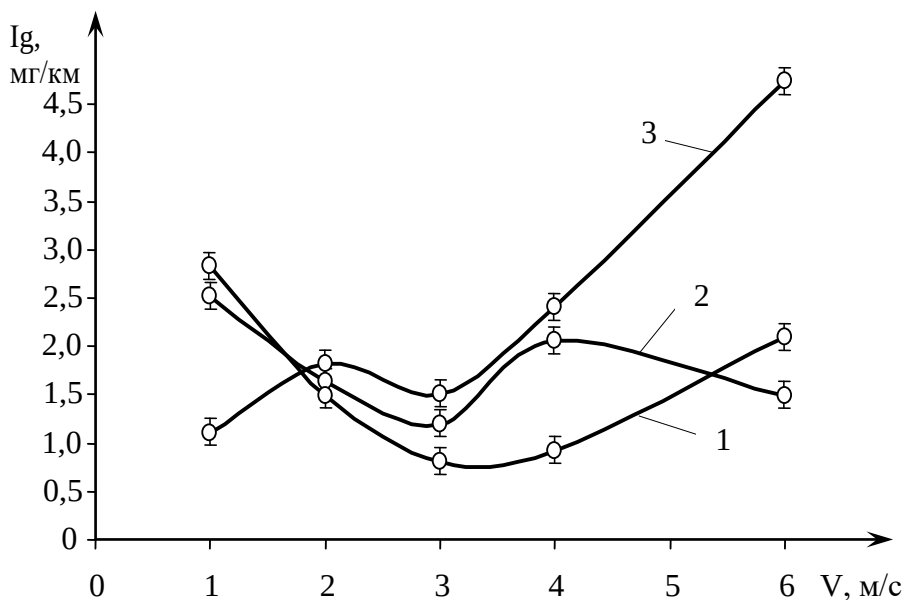


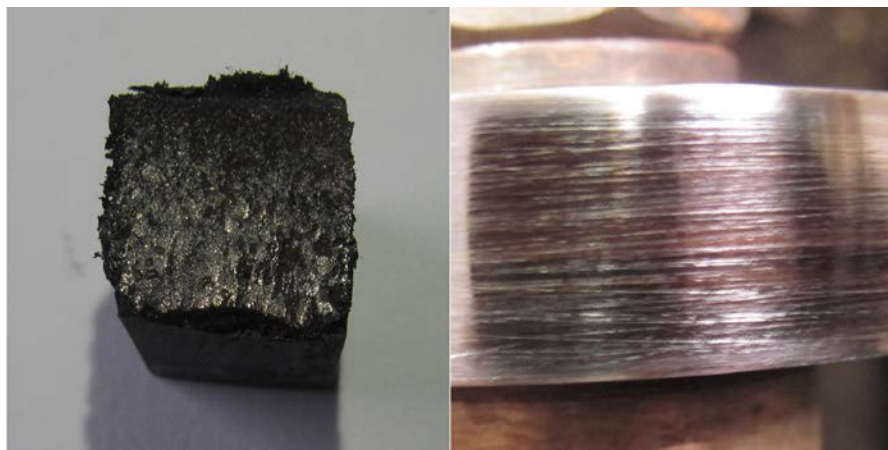
Рис. 4.26. Залежність зношування матеріалу складу № 3 від швидкості ковзання за питомого навантаження: 1 – 0,9 МПа; 2 – 1,2 МПа; 3 – 1,5 МПа

Експериментально встановлено, що зниження вмісту оксиду міді та заміна порошку міді на порошок бронзи не сприяє підвищенню зносостійкості епоксикомпозитного матеріалу.

Для підвищення зносостійкості матеріалу далі досліджували триботехнічні характеристики епоксикомпозиту аналогічного стехіометричного складу № 1, сформованого під тиском 500 МПа. Для підвищення точності досліджень шлях тертя збільшили до 5000 м.

З рис. 4.26 видно, що за питомих навантажень 0,9 МПа та 1,2 МПа в інтервалі швидкостей ковзання 1-3 м/с відбувається зниження інтенсивності зношування в 1,8-2,5 раз. Це пояснюється тим, що температура в даному швидкісному інтервалі знаходиться в діапазоні 70-110° С, що сприяє протіканню фізико-хімічних перетворень під час формування

стійкої плівки переносу та не викликає деградації епоксиполімерної матриці (рис. 4.27).



а



б

Рис. 4.25. Загальний вигляд трибоповерхні зразка і контртіла:
а – зразок складу № 1; б – зразок складу № 2

Дана плівка забезпечує стабільність процесу тертя за рахунок самоорганізації структури поверхневих шарів трибопари. За швидкості ковзання 3,0 м/с на поверхні контртіла зафіксовано ділянки, сформовані в результаті перенесення частинок міді, а із збільшенням швидкості до 4,0 м/с поверхня епоксикомпозиту насичується в більшій мірі міддю і перенесення матеріалу на поверхню контртіла відбувається інтенсивніше.

Подальше підвищення швидкості ковзання за питомого навантаження 0,9 МПа зумовлює підвищення інтенсивності зношування матеріалу в 1,8 раз ($I_g = 2 \text{ мг/км}$), оскільки відбувається різке підвищення температури до 200°C та коефіцієнта тертя до 0,44 (рис. 4.28), що перешкоджає утворенню та руйнує вже наявну на поверхнях епоксикомпозиту і контртіла плівку переносу [29]. Таким чином, за даних умов тертя не відбулися перетворення, пов'язані з утворенням стійкої до зношування структури.

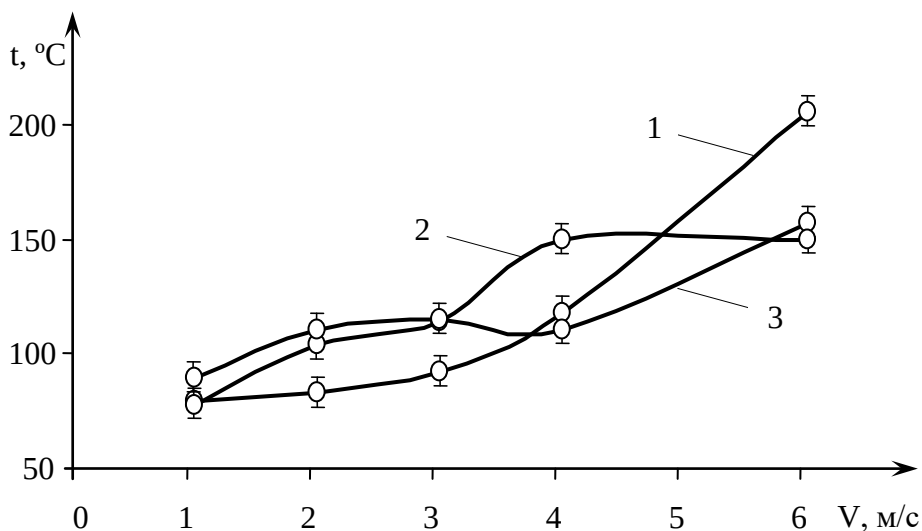


Рис. 4.27. Залежність температури на поверхні трибоконтакту матеріалу складу № 3 від швидкості ковзання за питомого навантаження фрикційної взаємодії: 1 – 0,9 МПа; 2 – 1,2 МПа; 3 – 1,5 МПа

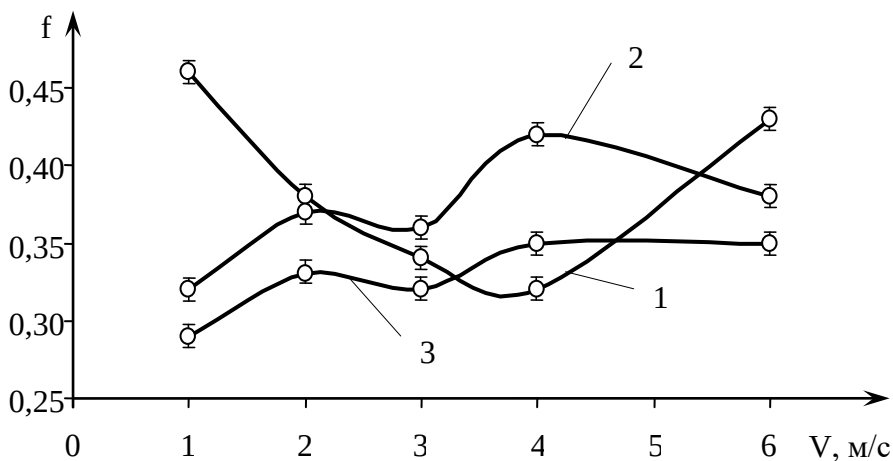


Рис. 4.28. Залежність коефіцієнта тертя матеріалу складу № 3 від швидкості ковзання за питомого навантаження: 1 – 0,9 МПа; 2 – 1,2 МПа; 3 – 1,5 МПа

Дослідження за питомого навантаження 1,2 МПа показали, що підвищення швидкості ковзання до 6,0 м/с призводить до стабілізації триботехнічних характеристик, оскільки відбувається незначне зниження інтенсивності вагового зношування та коефіцієнта тертя. Це вказує на те, що за даних умов (температура 140-160° С) відбуваються позитивні фізико-хімічні перетворення з утворенням частинок міді, які здатні дифундувати на поверхню контртіла та формувати плівку перенесення, не руйнуючи її [142]. Підвищення питомого навантаження до 1,5 МПа приводить до різкого зростання інтенсивності зношування у 3 рази, що вказує на домінування процесів механічного руйнування епоксиполімерної матриці порівняно з процесами формування плівки перенесення. Дане твердження можна зробити з аналізу температури на поверхні тертя та коефіцієнта тертя, які вказують на стабільність протікання процесів, пов'язаних з формуванням стійкої

структури. Очевидно різке підвищення інтенсивності вагового зношування пов'язано із значною втратою на поверхні епоксикомпозитного матеріалу частинок міді, утворених в процесі фізико-хімічних перетворень [143, 144].

Аналіз рис. 4.27 та 4.28 показав, що стабілізація температури ($70-110^{\circ}\text{C}$) в зоні трибоконтакту відбувається в діапазоні швидкостей ковзання $1...3$ м/с, що забезпечує зниження коефіцієнта тертя до 0,32 та інтенсивності вагового зношування до 0,8 мг/км. За даних умов відбувається інтенсивне формування плівки перенесення, яка стабілізує триботехнічні характеристики. За вищих швидкостей ковзання починають переважати процеси деструкції, оскільки значення температури зростає до 170°C , що зумовлює руйнування сегментів макромолекул епоксидного полімеру і інтенсифікує термодеструкцію полімеру [135].

З рис. 4.29 видно, що інтенсивність зношування епоксикомпозитного матеріалу в інтервалі навантажень 1,2-1,8 МПа є стабільною, а із збільшенням навантаження до 2,1 МПа зростає за сталої швидкості ковзання 1,0 м/с. Поступове збільшення навантаження до 1,8 МПа сприяє формуванню мідної плівки переносу, про що вказує зниження інтенсивності зношування в 1,4 рази.

При подальших дослідженнях виявлено смуги, які вказують на формування плівок перенесення. За питомих навантажень 1,5 та 1,8 МПа спостерігається інтенсивне протікання фізико-хімічних процесів (відбувається перенесення міді в великій кількості), в результаті яких утворюються вторинні структури на трибоповерхнях [141, 145]. Подальше підвищення даної характеристики до 2,1 МПа призводить до зниження зносостійкості системи, що пов'язано з втратою конструкційної міцності матеріалу.

Виявлено, що крива залежності інтенсивності зношування контртіла та епоксикомпозитного матеріалу має особливість, за якої зниження маси епоксикомпозитного зразка пов'язане із

перенесенням матеріалу на контртіло та формуванням стійкої структури на обох поверхнях та встановленням режиму вибіркового перенесення [144]. Аналіз динаміки зміни триботехнічних характеристик (рис. 4.30) вказує на особливість моменту, що за кожної зміни умов тертя спочатку спостерігається незначне підвищення коефіцієнта тертя та температури в зоні трибоконтакту.

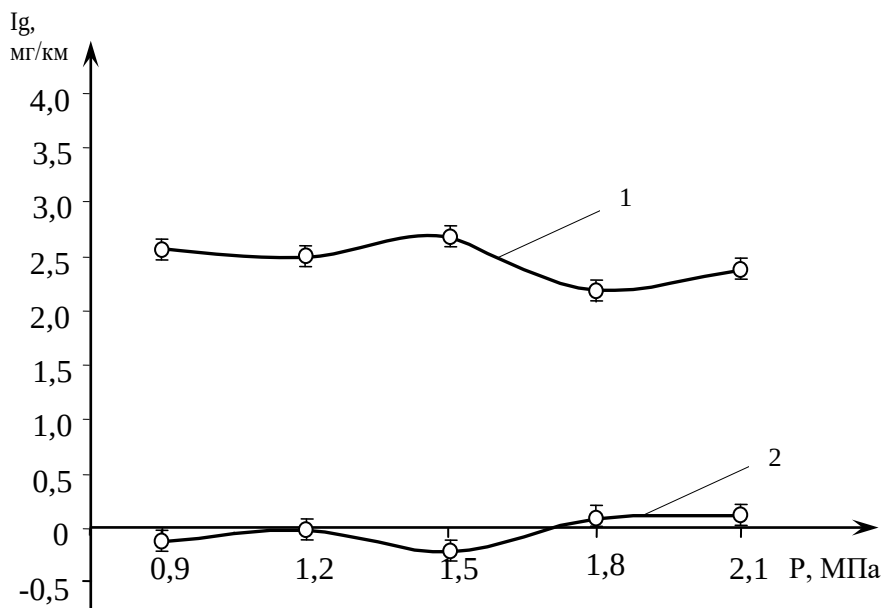
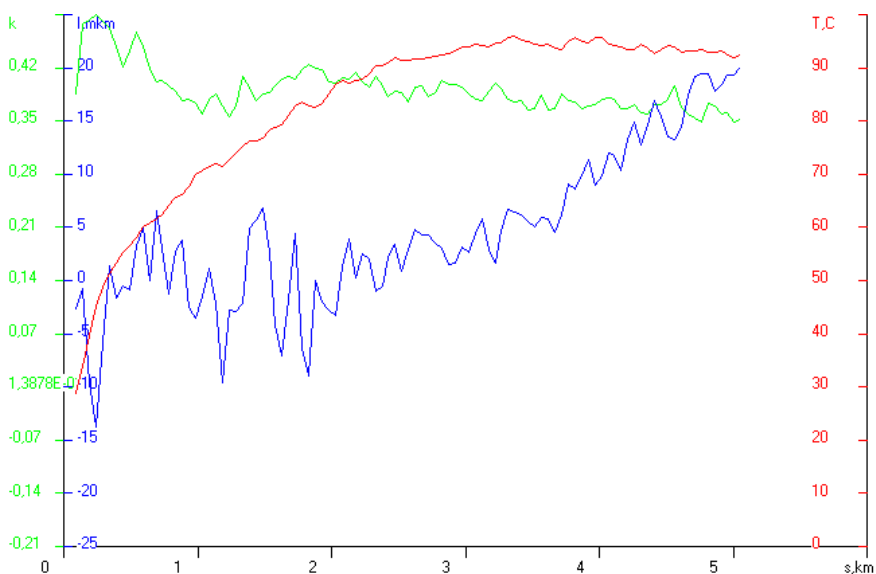


Рис. 4.29. Залежність інтенсивності зношування епоксикомпозиту (1) та контртіла (2) від питомого навантаження за швидкості ковзання 1,0 м/с

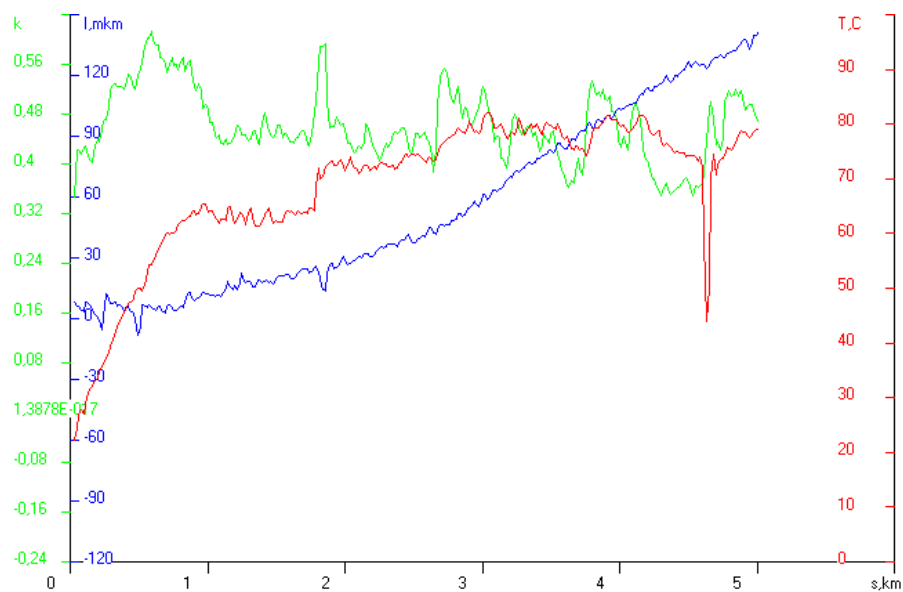
Дослідження показали, що з часом (після 1500-2000 м) дані параметри стабілізуються, оскільки відбувається пристосування трибосистеми до жорсткіших умов фрикційної взаємодії. Однак лінійна інтенсивність зношування є нестабільною величиною

протягом всього проміжку тертя, що пов'язано із збільшенням температури в зоні трибоконтакту та зростає через перенесення частини матеріалу на контртіло.

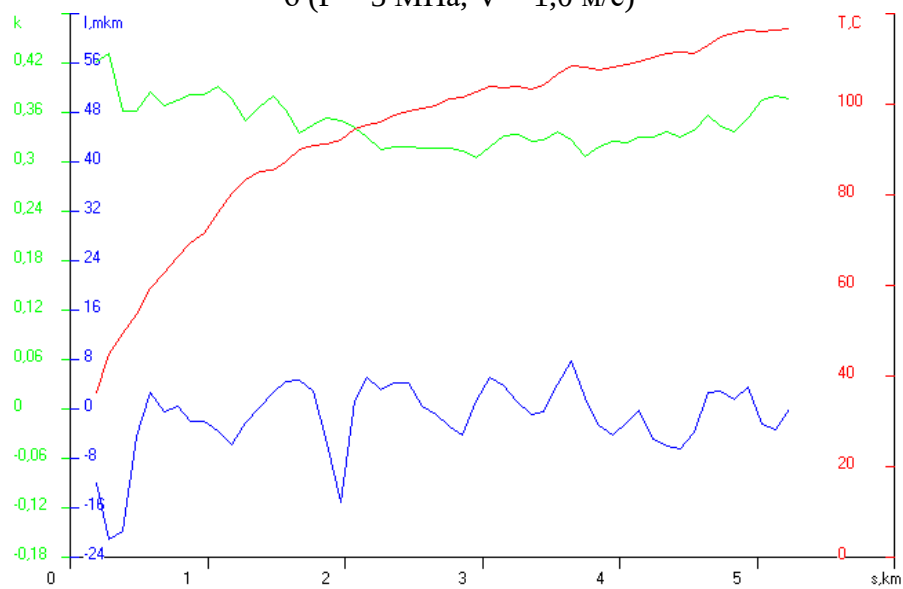
Під час трибовзаємодії вибіркове перенесення забезпечує стабілізацію триботехнічних характеристик, що дозволяє підвищити ресурс експлуатації обладнання та використовувати його в жорстких навантажувально-швидкісних умовах без мащення.



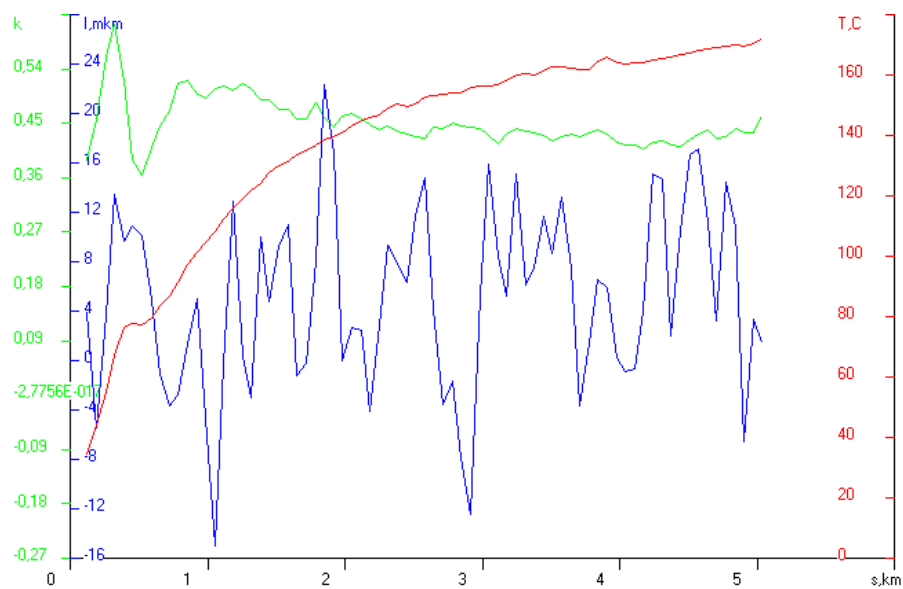
а ($P = 0,5 \text{ МПа}$, $V = 1,0 \text{ м/с}$)



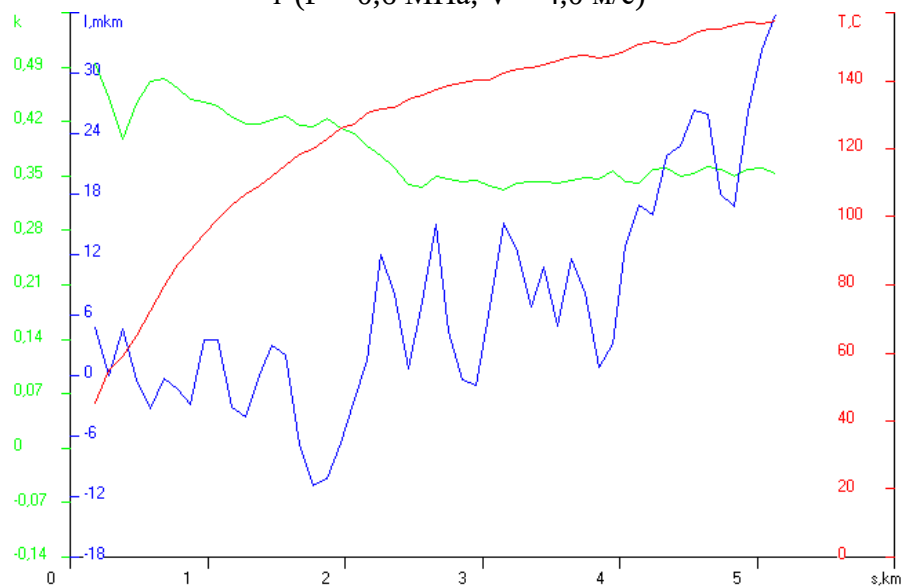
$\bar{\sigma}$ ($P = 5$ МПа, $V = 1,0$ м/с)



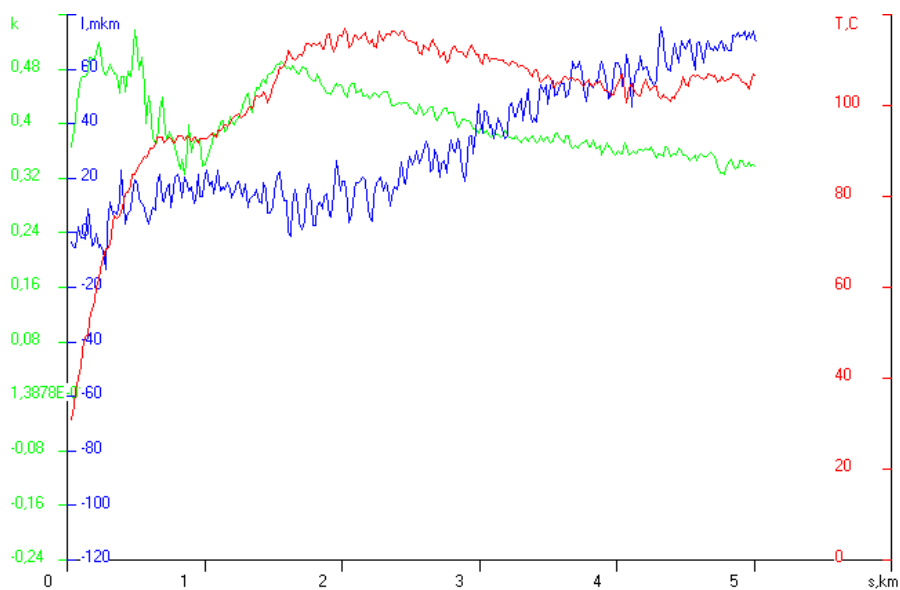
$\bar{\sigma}$ ($P = 0,5$ МПа, $V = 6,0$ м/с)



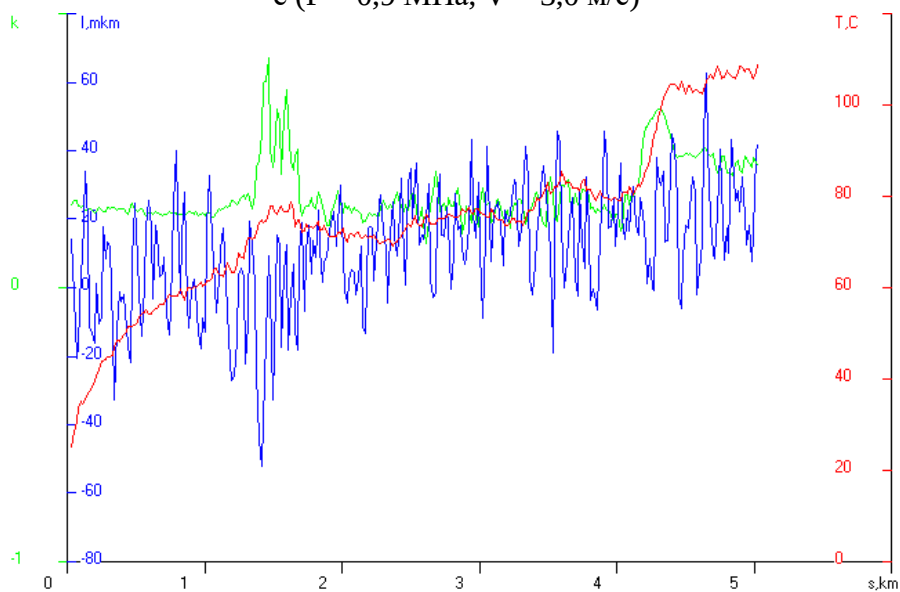
r ($P = 0,6 \text{ МПа}$, $V = 4,0 \text{ м/с}$)



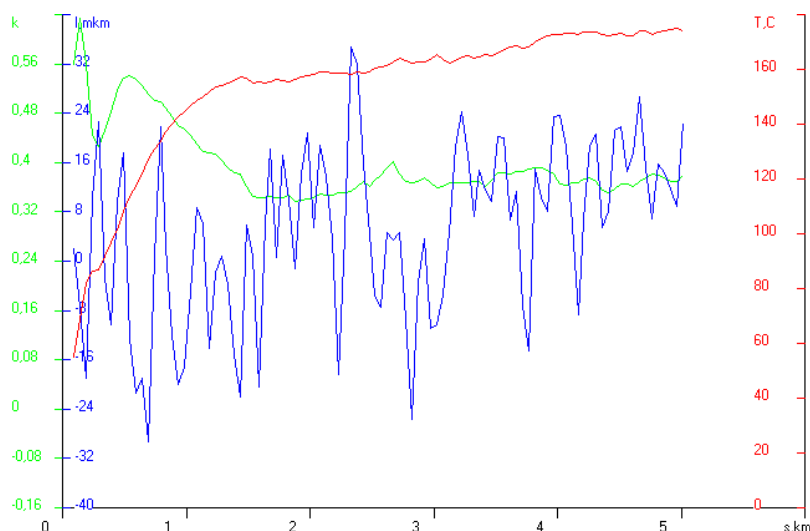
$д$ ($P = 0,75 \text{ МПа}$, $V = 6,0 \text{ м/с}$)



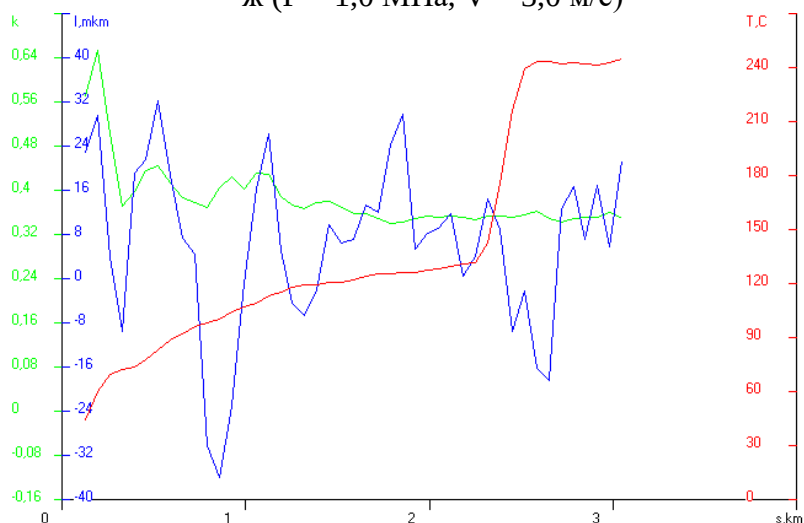
ϵ ($P = 0,9 \text{ МПа}$, $V = 3,0 \text{ м/с}$)



ϵ ($P = 1,0 \text{ МПа}$, $V = 1,0 \text{ м/с}$)



ж ($P = 1,0 \text{ МПа}$, $V = 3,0 \text{ м/с}$)



з ($P = 1,0 \text{ МПа}$, $V = 4,0 \text{ м/с}$)

Рис. 4.30. Динаміка зміни температури (—) в зоні трибоконтакту, лінійної інтенсивності зношування (—) та коефіцієнта тертя (—) на проміжку 5000 м фрикційної взаємодії за питомого навантаження (P , МПа) і швидкості ковзання (V , м/с)

Отже, формування на поверхні контртіла стійких стабільних структур, які утворюються завдяки направленим фізико-хімічним перетворенням на поверхні трибоконтакту, знижує інтенсивність зношування епоксикомпозитного матеріалу. Встановлено, що формування стійкої до зношування структури відбувається за оптимального стехіометричного співвідношення інгредієнтів епоксикомпозитного матеріалу та поступового поетапного зростання потужності тертя.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ, СТРУКТУРИ ТА ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТРИБОЕПОКСИКОМПОЗИТІВ

5.1. Дослідження зносостійкості фрикційно навантажених епоксикомпозитів

Для досліджень використано епоксикомпозити складів № 2 та № 3 (табл. 5.1), сформовані під тиском 300 МПа з наступним проведенням попередньої та основної термічної обробки.

Таблиця 5.1

Склад і умови формування епоксикомпозитного матеріалу

№ зразка	Матриця	Наповнювач	Вміст наповнювача, мас. ч.	Тиск пресування Р, МПа
1	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	СиО	100	150
		Си	16	
		подрібнене вуглецеве волокно	2	
2	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	СиО	100	300
		Си	16	
		подрібнене вуглецеве волокно	2	
3	100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	СиО	150	300
		Си	16	
		подрібнене вуглецеве волокно	2	

Встановлено, що розроблені епоксикомпозити складу № 2 та № 3 (табл. 5.1) мають підвищені показники інтенсивності зношування на початковому етапі досліджень (3000 м), що становить 2,3 мг/км і 3,3 мг/км відповідно (рис. 5.1). Це можна пояснити тим, що в поверхневому шарі епоксикомпозитних матеріалів інтенсивно відбуваються процеси, пов'язані з перенесенням міді на поверхню контртіла.

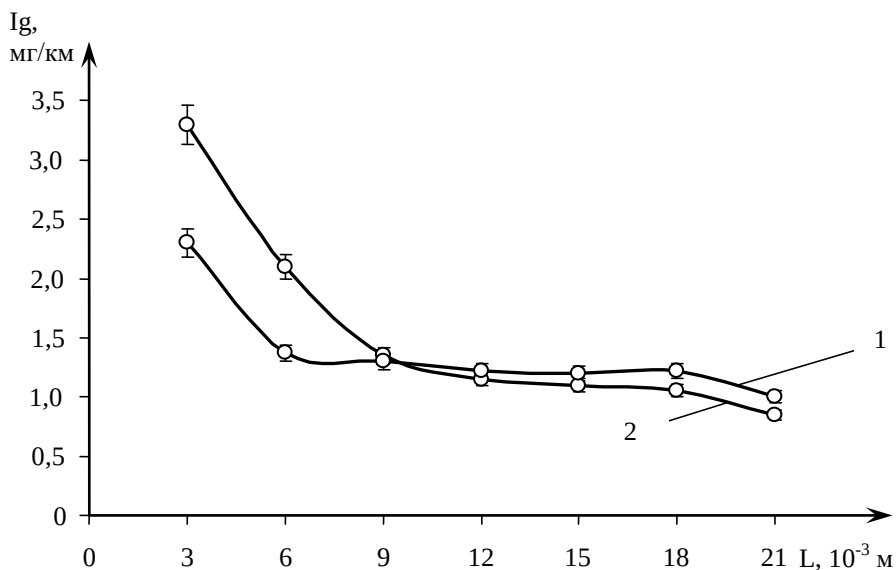


Рис. 5.1. Залежність інтенсивності зношування композитів від тривалості фрикційної взаємодії: 1 – зразок складу № 2; 2 – зразок складу № 3

Із подальшим збільшенням тривалості фрикційної взаємодії для епоксикомпозитів складу № 2 та № 3 спостерігається різке зниження інтенсивності зношування на 38-42 % на 6000 м та 9000 м відповідно, оскільки на поверхні контртіла утворюються фрагменти мідної плівки. Із збільшенням тривалості фрикційної взаємодії до 21000 м спостерігається поступове зниження зношування, яке

знаходиться в межах 7,4-24,1 %. Із збільшенням тривалості фрикційної взаємодії $L = 21000$ м відбувається поступове зниження інтенсивності зношування в межах 7,4-24,1 %, що пов'язано із збільшенням площі плівки.

5.2. Дослідження процесів поглинання, корозійної та атмосферної стійкості епоксикомпозитів

Дослідження процесів поглинання проведено з використанням епоксикомпозитних матеріалів оптимального складу та з вищим вмістом оксиду міді (150 мас. ч.), сформованих під різним тиском (див. табл. 5.1), для яких проведено попередню та основну термічну обробку. Результати показали, що розроблені матеріали здатні поглинати воду та гліцерин.

Матеріал складу № 2, наповнений 100 мас. ч. оксиду міді та сформований під вищим тиском (300 МПа), має нижчі показники водопоглинання (табл. 5.2), що пояснюється наявністю меншої кількості мікропор. Найнижчі значення даної характеристики спостерігається для епоксикомпозиту № 3, що містить 150 мас. ч. CuO .

Таблиця 5.2

Результати досліджень поглинання епоксикомпозитами води та гліцерину

№ зразка	Середовище занурення епоксикомпозитів	
	вода	гліцерин
1	+0,240	+0,089
2	+0,215	+0,195
3	+0,041	+1,126

Рівень поглинання епоксикомпозитними матеріалами гліцерину має антибатну залежність порівняно з водопоглинанням. Низьке поглинання гліцерину спостерігається для матеріалу, сформованого за низького тиску та невисокому ступені наповнення епоксисистеми, а найбільше – за високого

тиску та ступеня наповнення [144]. Це пов'язано з тим, що гліцерин має високу в'язкість, тому відбувається його втримування в мікропорах більш щільнішого матеріалу (150 мас. ч. оксиду міді), сформованого за тиску пресування 300 МПа за рахунок виникнення сил поверхневого натягу. Гліцерин сильніше взаємодіє із твердим тілом порівняно з водою, тому відбувається інтенсивне змочування епоксикомпозитного матеріалу даною речовиною. Для матеріалу з більшими розмірами мікропор (через нижчий тиск формування 150 МПа) можливе видалення гліцерину з останніх, що зменшує поглинання. Збільшення маси також можливе за рахунок утворення гліцератів [144, 145].

Для оцінки здатності матеріалу працювати за наявності рідкого середовища необхідно визначити вплив процесів поглинання гліцерину та водопоглинання епоксикомпозитними матеріалами на їх зносостійкість. Виявлено, що інтенсивність зношування епоксикомпозитів складів № 1 та № 3 (рис. 5.2) після водопоглинання підвищилась на 13,8-15,0 %, а для матеріалу складу № 2, сформованого під тиском 300 МПа із вмістом 100 мас. ч. CuO , – на 43,5 % порівняно із епоксикомпозитами, які не занурювались.

Отримані результати можна пояснити тим, що в даному матеріалі є більша кількість мікропор, оскільки він є менш наповненим порівняно із епоксикомпозитом складу № 3 та сформованим під нижчим тиском порівняно із матеріалом складу № 1, що підвищує рівень залишкових напружень за недостатнього вмісту наповнювача. Відбувається утримування води матеріалом, яка в подальшому під час фрикційної взаємодії перешкоджає формуванню стійкої плівки та інтенсивно видаляється, що підвищує інтенсивність зношування.

Найнижчі показники інтенсивності зношування серед епоксикомпозитів, які піддавались водопоглиненню, зафіксовано для епоксикомпозиту з найвищим ступенем наповнення та тиском формування. Дані результати

підтверджуються попередніми дослідженнями, оскільки мають найнижчі показники водопоглинання (див. табл. 5.2).

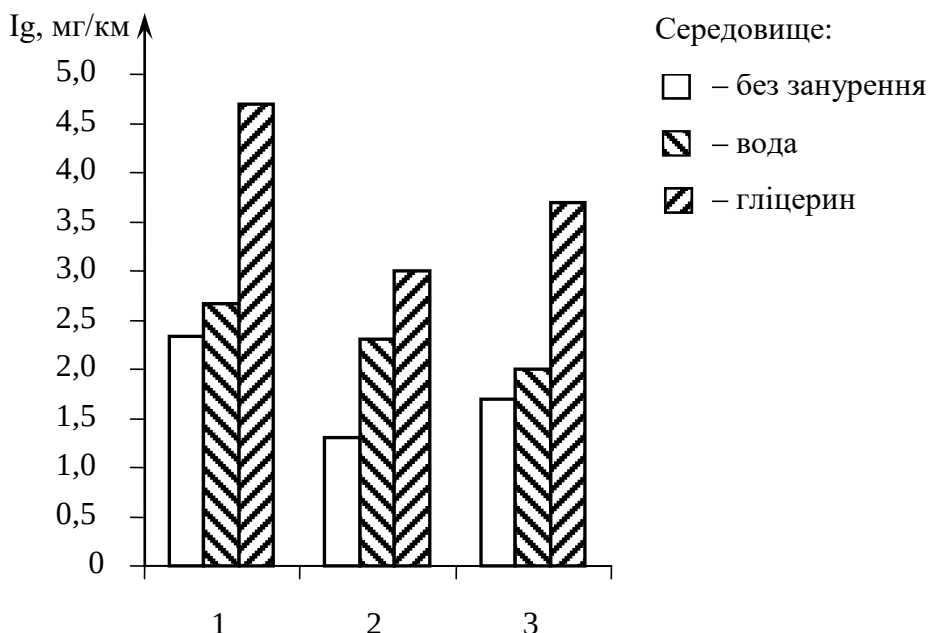


Рис. 5.2. Інтенсивність зношування епоксикомпозитів після занурення в середовище

Для матеріалів, які були занурені в гліцерин, виявлено високу інтенсивність зношування, яка зросла вдвічі порівняно із епоксикомпозитами, які не піддавались зануренню. Найнижча інтенсивність зношування спостерігається для матеріалу складу № 2 із вмістом 100 мас. ч. CuO , сформованого під тиском 300 МПа.

Оскільки гліцерин є розчинником для епоксидної матриці, то найбільш негативний вплив він має для менш наповненої епоксисистеми, що підтверджується отриманими результатами (найвищу інтенсивність зношування 4,7 мг/км виявлено для епоксикомпозиту складу № 1). Відповідно епоксикомпозити із вищими ступенем наповнення та тиском формування мають

вищу щільність, тому є більш стійкими до розчинення. Підвищену їх інтенсивність зношування можна пояснити розчиненням епоксидної смоли на поверхні епоксикомпозиту, що видаляється під час трибовзаємодії.

Встановлено, що із збільшенням тривалості фрикційної взаємодії, спостерігається значне зменшення інтенсивності зношування (рис. 5.3, а, б). Наявність екстремумів пояснюється інтенсифікацією процесів, пов'язаних із трансформацією структури під час трибовзаємодії, зокрема перенесенням частини матеріалу із поверхні епоксикомпозиту на поверхню контртіла з наступним формуванням плівки. Із збільшенням тривалості фрикційної взаємодії відбувається видалення поглинутої рідини та збільшення розмірів фрагментів мідної плівки, тобто поступово пара тертя епоксикомпозит-сталь локально стає парою мідь-мідь, що в загальному призводить до зменшення зношування епоксикомпозитного матеріалу.

Таким чином, вода і гліцерин негативно впливають на зношування лише на початковому етапі тертя, коли має місце взаємодія із поверхнею епоксикомпозитного зразка, яка найбільш була насичена розчинами. Із збільшенням тривалості трибовзаємодії, спостерігається видалення рідини та формування вторинної структури, яка призводить до стабілізації триботехнічних характеристик.

Після занурення епоксикомпозитів в розчини кислот спостерігається зниження маси епоксикомпозитів, що пов'язано із розчиненням і видаленням матеріалу. Збільшення маси епоксикомпозитів спостерігається після їх занурення в розчини солі (NaCl) та основи (NaOH). При цьому поверхня епоксикомпозитів покривається продуктами корозії, що призводить до зростання маси.

Для епоксикомпозитного матеріалу, сформованого під нижчим тиском (зразок № 1) отримано кращі результати корозійної стійкості (табл. 5.3). Для епоксикомпозитного матеріалу, сформованого під нижчим тиском (матеріал складу № 1), отримано кращі результати корозійної стійкості.

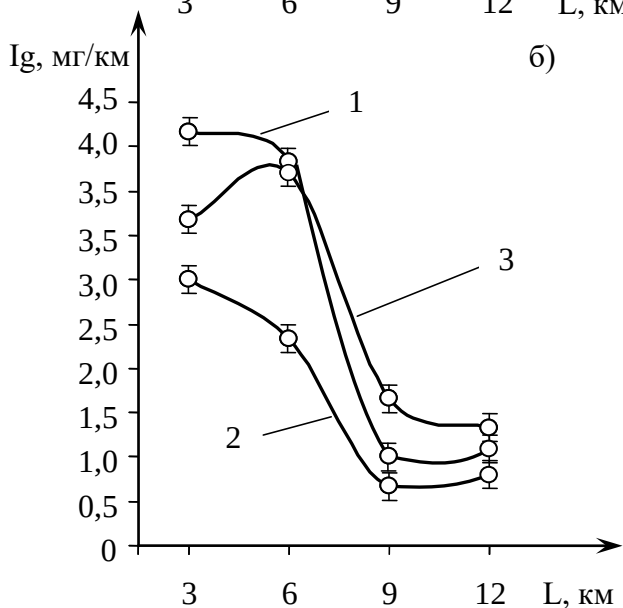
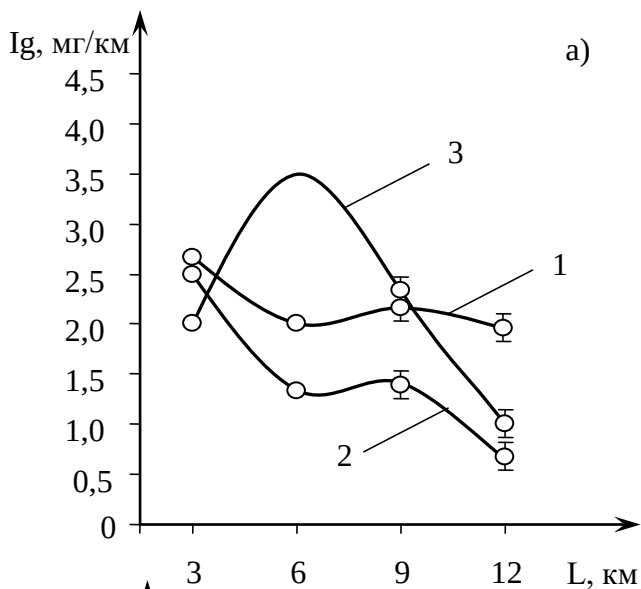


Рис. 5.3. Залежності інтенсивності зношування епоксикомпозитів від тривалості фрикційної взаємодії після поглинання гліцерину (а) та водопоглинання (б): 1 – зразок складу № 1; 2 – зразок складу № 2; 3 – зразок складу № 3

Це можна пояснити тим, що частинки наповнювача в композиті, сформованому під вищим тиском, розміщуються щільніше, що збільшує площу взаємодії частинок металевих наповнювачів епоксикомпозитного матеріалу із агресивним середовищем. Відповідно збільшується кількість продуктів корозії, що приводить до більшої втрати маси матеріалом.

Таблиця 5.3

Корозійна стійкість епоксикомпозитних матеріалів

№ зразка	Корозійна стійкість епоксикомпозитів				
	HNO ₃	HCl	NaCl	H ₂ SO ₄	NaOH
1	-1,436	-1,395	+0,289	-1,453	+0,163
2	-1,689	-1,559	+0,535	-1,853	+0,582

Дослідження впливу знакозмінних температур та атмосферної стійкості епоксикомпозитних матеріалів подано в табл. 5.4. Дослідження кліматичного впливу показали, що полімеркомпози́ти під дією атмосферних умов насичуються вологою, що підтверджується попередніми результатами їх здатності до водопоглинання (див. табл. 5.1).

З табл. 5.4 видно, що вищу атмосферну стійкість на 32,1 % має епоксикомпозитний матеріал з вмістом 100 мас. ч. оксиду міді, що сформований під тиском 300 МПа, порівняно із епоксикомпозитом, сформованим під тиском 150 МПа. Це можна пояснити вищим ступенем зшивання системи та наявністю меншої кількості мікропор.

Отримані результати показали, що для розроблених епоксикомпозитів попередня термічної обробки покращує атмосферну стійкість майже у два рази. Найкращі показники атмосферної стійкості (+0,041) має матеріал з ступенем наповнення 150 мас. ч. оксиду міді та сформований під тиском 300 МПа, що на 8,9 % є вищим значенням порівняно із результатами досліджень аналогічно сформованого матеріалу наповненого оксидом міді в кількості 100 мас. ч. Зовнішній вигляд епоксикомпозитів не змінився [144].

Таблиця 5.4

Вплив атмосферних умов на стійкість епоксикомпозитних матеріалів

№ зразка	попередня ТО	Кліматичний вплив
1	–	+0,156
	+	+0,082
2	–	+0,106
	+	+0,044
3	–	+0,079
	+	+0,041

5.3. Дослідження термічної стійкості полінаповнених епоксикомпозитів

Для дослідження термостійкості був вибраний композитний матеріал оптимального складу, наповнений порошками оксиду міді (100 мас. ч.), чистої міді (16 мас. ч.) та подрібненим вуглецевим волокном (2 мас. ч.). Епоксикомпозитні зразки сформовано в прес-формі під тиском 300 МПа протягом 24 год, після чого для останніх було проведено попередню та основну термічну обробку.

В результаті проведення досліджень, показано, що в діапазоні температур 293–593 К відсутня втрата маси досліджуваного композитного матеріалу на кривій ТГА. Це можна пояснити незначним вмістом золь-фракції і вологи в матеріалі. Наявність ендотермічних піків в даному діапазоні температур відповідає плавленню кристалічної складової композиції [145–149].

Встановлено, що під час нагрівання зразка до даної температури не спостерігається деструкція матеріалу. Це вказує

на оптимальний вміст наповнювачів та достатню кількість вузлів зшивання останніх з епоксидною матрицею, що призводить до ущільнення густини просторової сітки матриці та зниження рухливості сегментів макромолекул. Дані процеси сприяють покращенню термостійкості полімерних систем, гальмуючи процеси деструкції. Даний інтервал температур характеризується рядом екзо- та ендотермічних ефектів.

Наявність піків до 613 К свідчить про екзотермічні процеси розкладу епоксидної матриці внаслідок утворення поверхневих функціональних груп ($-\text{OH}$ і $-\text{COOH}$). Низькі значення втрати маси за невисоких температур пояснюються видаленням сорбованих форм води, що підтверджує перший ендотермічний мінімум на кривій ДТА. За температур вищих 593 К відбувається початок деструкції фрагментів поверхні з карбоксильними групами $-\text{COOH}$, перетворення вуглецевих структур з утворенням подвійних зв'язків $\text{C}=\text{C}$ та виділенням водню, а також вигорання вуглецю [148–153].

В діапазоні температур 593–613 К спостерігається зниження втрати маси зразка на 20 %, що супроводжується після екзотермічного ефекту ендотермічним на кривій ДТА. Це вказує на початок розкладу епоксидного полімеру, що призводить до появи процесів деструкції. Під час екзотермічного ефекту відбувається згоряння кінцевих продуктів розкладу епоксидного полімеру.

Наповнювачі змінюють структуру полімеркомпозиту, що сприяє підвищенню термостійкості і зростанню когезійної міцності [153–156]. Максимальна температура екзоефекту становить 483 К. Температура, за якої матеріал повністю втрачає термічну стійкість, становить 753 К.

Оскільки за температур вищих 593 К спостерігається лише початок деструкційних процесів матеріалу, що супроводжується незначною втратою маси зразка, то можна стверджувати, що розроблений матеріал характеризується високою термостійкістю.

5.4. Аналіз фрактограм зламу епоксикомпозитного матеріалу

Для дослідження був вибраний композитний матеріал триботехнічного призначення оптимального складу на основі епоксидного зв'язуючого (ЕД-20) та твердника ПЕПА, що наповнений порошками оксиду міді (100 мас. ч.), чистої міді (16 мас. ч.) та подрібненим вуглецевим волокном (2 мас. ч.). Епоксикомпозитні зразки сформовано в прес-формі під тиском 300 МПа протягом 24 год, після чого для останніх було проведено попередню термічну обробку (витримка за температури 40° С протягом 3 год). Далі проведено основну термічну обробку за ступінчастим режимом з кінцевою температурою 120 С.

З рис. 5.1. видно, що фрактограми зламу епоксикомпозитного матеріалу мають рівну поверхню, оскільки на них відсутні різкі перепади рельєфу. Через наявність незначних виступів на поверхні можна припустити, що розвиток тріщини проходить по границі розділу волокна та матриці. Це можна пояснити вищою когезійною міцністю компонентів епоксикомпозиту, ніж адгезійної міцності полімерної матриці з вуглецевим волокном.

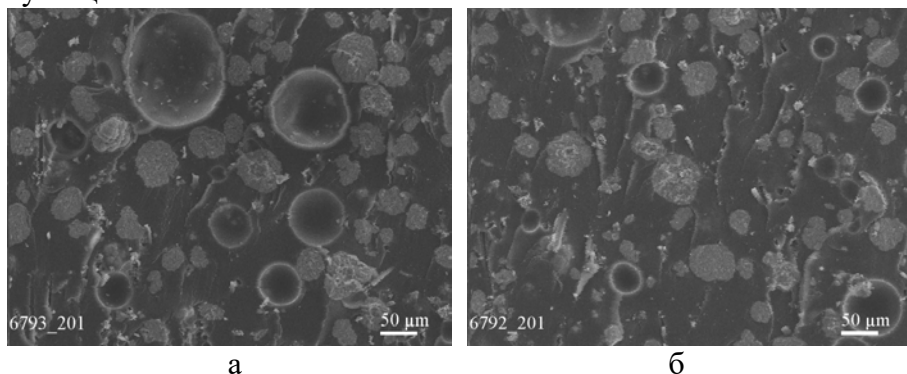


Рис. 5.1. Фрактограми зламу епоксикомпозитного матеріалу, сформованого під тисками 150 МПа (а) та 300 МПа (б)

Паралельність ліній сколювання на поверхнях вказує на рівномірний розподіл залишкових напружень в епоксикомпозитному матеріалі, що імовірно пов'язано із рівномірним розподілом напружень в матеріалі, оскільки проведення термічної обробки за підвищених температур (60°C) призводить до локального зшивання ділянок епоксикомпозиту, сформованого під тиском. Злам проходить по ділянках з переважним розташуванням мікропор.

В матеріалі, сформованому під тиском 150 МПа, розмір мікропор становить 40-150 мкм, а під тиском 300 МПа – 25-100 мкм. Отже, формування епоксикомпозитів за вищого тиску пресування зменшує кількість пор та їх розмір в високонаповненій системі, чим підвищує її міцність та в'язкість, що є важливим моментом при розробці матеріалів триботехнічного призначення [144].

5.5. Дослідження структури та хімічного аналізу трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу

Для дослідження структури та хімічного складу вибрано епоксикомпозитний матеріал оптимального складу (100 мас. ч. CuO , 16 мас. ч. Cu та 2 мас. ч. подрібненого вуглецевого волокна) з високою зносостійкістю та здатністю до самоорганізації структури під час трибовзаємодії. Для епоксикомпозиту, сформованого під тиском 300 МПа, проведено попередню та основну термічну обробку. Перед дослідженням матеріал піддавався трибонавантаженню за наступним режимом: $V = 1,2 \text{ м/с}$, $P = 1 \text{ МПа}$, $L = 15000 \text{ м}$.

Аналіз композиційного контрасту трибоповерхні епоксикомпозиту (рис. 5.5, а, б) вказує на наявність мідних включень на поверхні та їх рівномірне розміщення на поверхні трибоконтакту. Топографічний контраст (рис. 5.5, в, г) трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу вказує на розвинену рельєфність. Виступи рельєфу на поверхні відповідають мідним включенням, що вказує на наявність

фрагментів мідної плівки, яка поступово покриває поверхню епоксикомпозитного матеріалу під час тертя. Тому можна стверджувати, що дані фрагменти плівок є джерелом міді для формування сервовитної плівки на поверхні контртіла під час фрикційної взаємодії [157].

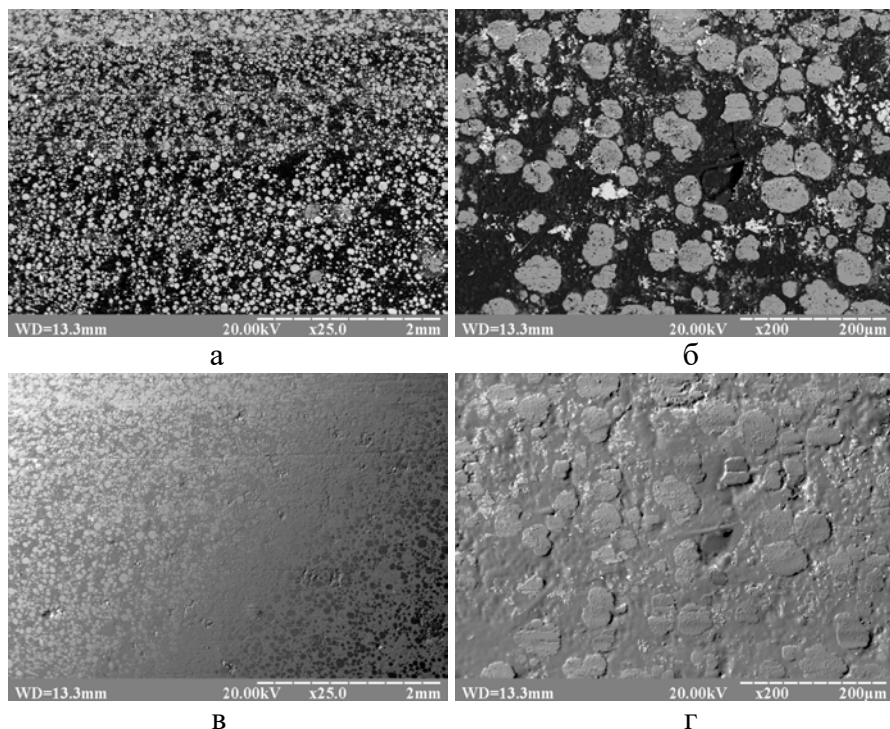


Рис. 5.5. Композиційний (а, б) та топографічний контраст (в, г) трибоповерхні епоксикопозитного матеріалу складу № 2: а, в – $\times 25$; б, г – $\times 200$

Оскільки мікроструктура трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу на рис. 5.6, а відрізняється у верхній та нижній частині, тому проведено хімічний аналіз поверхні наступних вибраних ділянок (рис. 5.6, а, б). Результати хімічного аналізу даних ділянок показали, що розподіл хімічний

елементів трибоповерхні є майже однаковим по всій площі поверхні. Концентрації вуглецю та кисню (рис. 5.6, в, г) є низькими (4,97-7,04 % і 4,68-7,91 % відповідно), що обумовлено хімічним складом епоксикомпозитного матеріалу.

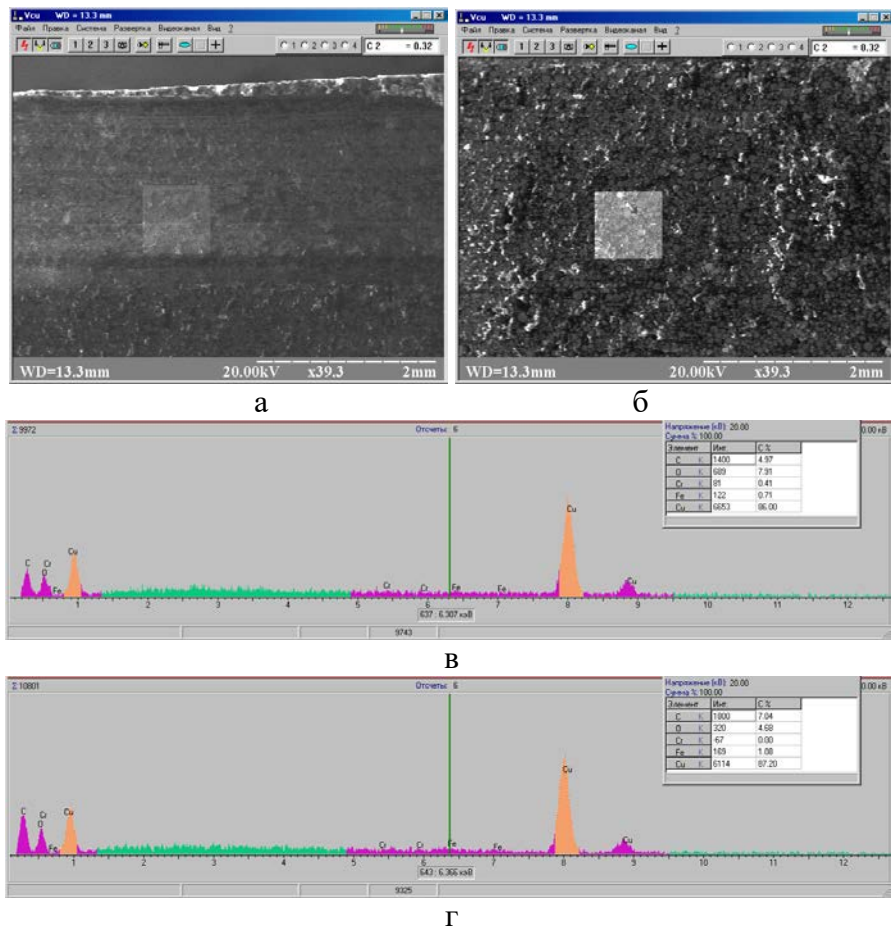
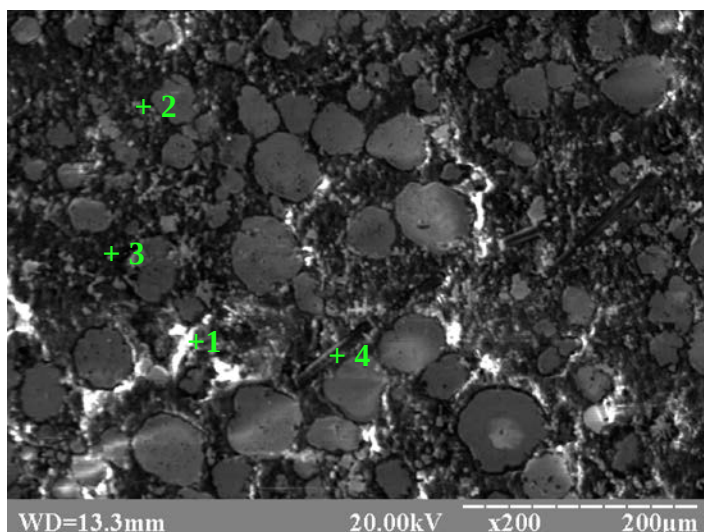


Рис. 5.6. Хімічний склад ділянки трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 2: а – загальний вигляд поверхні; б – загальний вигляд поверхні в нижній частині; в, г – результати хімічного аналізу до вибраної ділянки (а) і (б) відповідно

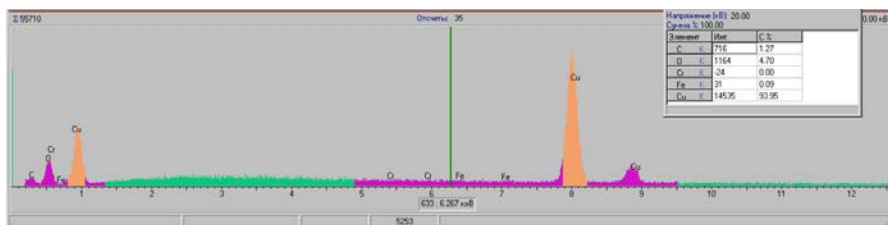
Концентрація міді є високою і становить 86-87,2 % на вибраних ділянках. Це обумовлено наявністю порошку чистої міді в складі епоксикомпозиту та відновленням її з оксиду в процесі трибовзаємодії. Отже, можна стверджувати про рівномірний розподіл хімічних елементів по всій поверхні епоксикомпозиту.

Вміст хрому та заліза, які потрапили на поверхню епоксикомпозиту із поверхні контртіла, є незначним і коливається в межах 0-0,41 % та 0,71-1,08 % відповідно. Тому вони не роблять суттєвого впливу на формування самоорганізованої структури під час фрикційної взаємодії.

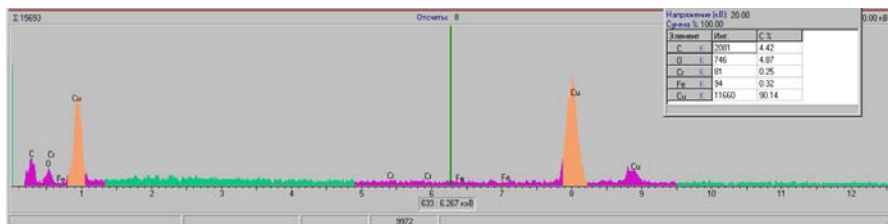
Хімічний склад трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу в окремих точках подано на рис. 5.7, а. В точках 1 та 2 (рис. 5.7, б, в) зафіксовано високий вміст міді 93,95 % та 90,14 % відповідно, що підтверджує наявність фрагментів мідної плівки на поверхні трибоконтакту. Вміст інших елементів (C, O, Fe, Cr) є незначним (0-4,87 %), що обумовлено їх перенесенням під час тертя із поверхні контртіла.



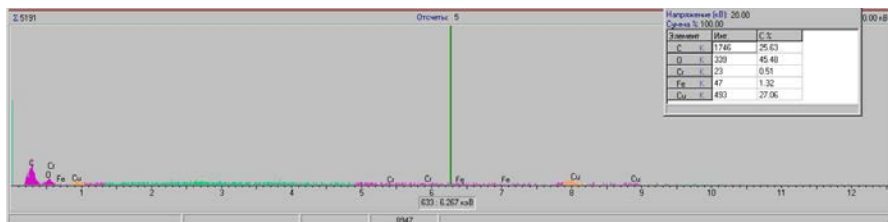
а



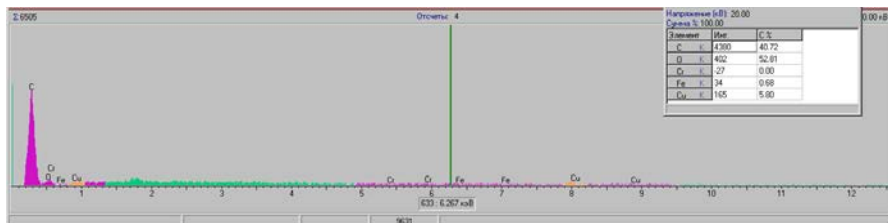
б



в



г



д

Рис. 5.7. Хімічний спектр трибоповерхні епоксикомпозитного матеріалу складу № 2: а – загальний вигляд поверхні, $\times 200$; б, в, г, д – результати хімічного аналізу в точках 1, 2, 3, 4 відповідно

Точка 3 (рис. 5.7, г) вказує на хімічний склад компонентів епоксикомпозитного матеріалу. В даній точці вміст вуглецю становить 16,15-25,63 %, кисню – 45,48-53,50 %, міді – 27,06-

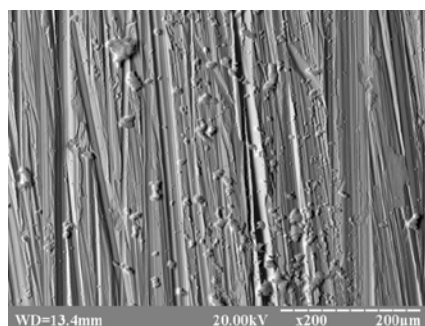
29,97 %. Висока концентрація кисню пояснюється його наявністю в молекулах епоксидного полімеру та оксиді міді. Вміст Cr та Fe знаходиться в межах 0-1,32 %.

Точка 4 (рис. 5.7, д) відповідає хімічному складу вуглецевого волокна. В даній точці міститься 40,72 % вуглецю та 52,81 % кисню. Вміст міді є низьким і становить 5,80 %. Концентрація заліза 0,38-0,68 %.

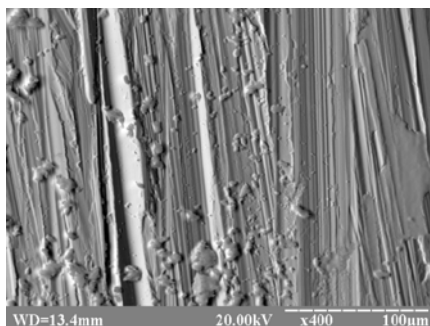
5.6. Дослідження структури та хімічного складу трибоповерхні контртіла

Дослідження структури та хімічного складу трибоповерхні контртіла проводили в два етапи: після 3000 м та 10000 м фрикційного навантаження. Структура епоксикомпозитного матеріалу (рис. 5.8) після 3000 м дослідження характеризується мінімальним перенесенням міді на контртіло.

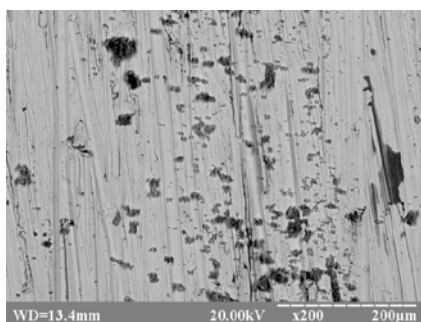
На рис. 5.8, а, б представлено поверхню трибоконтакту контртіла після 3000 м фрикційної взаємодії, яка характеризується початковою шорсткістю. На поверхні (рис. 5.8, в, г) зафіксовано присутність продуктів зношування і мідних включень та їх нерівномірний розподіл по площі контртіла.



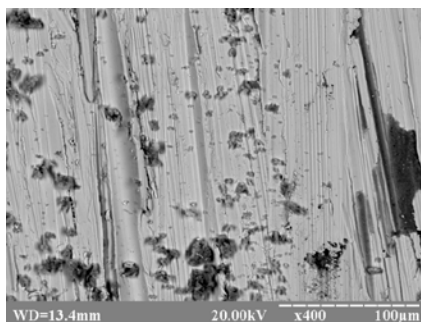
а, ×200



б, ×400



в, ×200



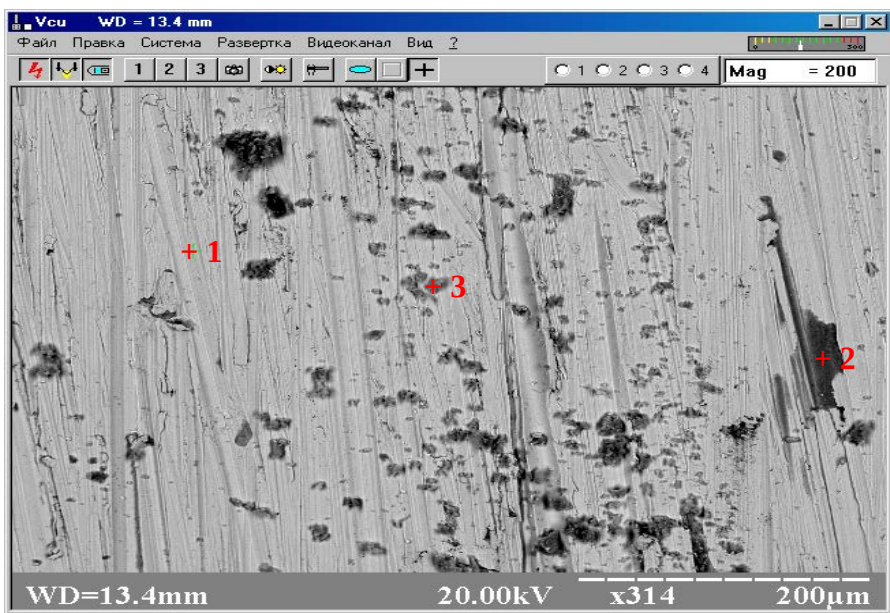
г, ×400

Рис. 5.8. Топографічний (а, б) та композиційний контраст (в, г) трибоповерхні контртіла після 3000 м фрикційної взаємодії

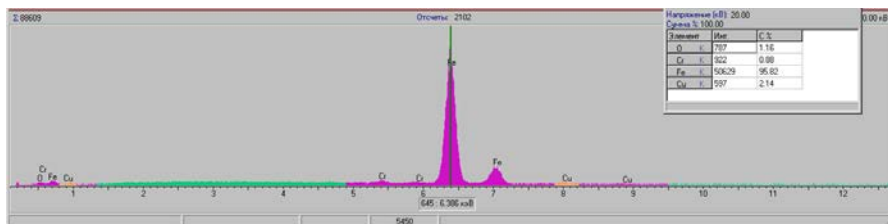
За допомогою хімічного аналізу встановлено, що після 3000 м фрикційного навантаження, на поверхні контртіла міститься мінімум слідів міді та мідних включень (рис. 5.9, а). В точці 1 концентрація заліза становить 95,82 % (рис. 5.9, б), а кисню, хрому та міді – не перевищує 2,14 %, що відповідає хімічному складу сталі (контртіла). З рисунка видно, що хімічний склад даної точки відповідає загальній площі поверхні контртіла.

Темні включення (рис. 5.9, а), де знаходиться точка 2, відповідає оксиду міді на трибоповерхні контртіла, що підтверджують результати хімічного аналізу (рис. 5.9, в). Наявність оксиду міді можна пояснити локальним підвищенням температури в даній зоні з наступним окисленням фрагменту мідної плівки. В даній точці вміст міді становить 45,79 %, заліза – 49,16 %, кисню – 5,05 %.

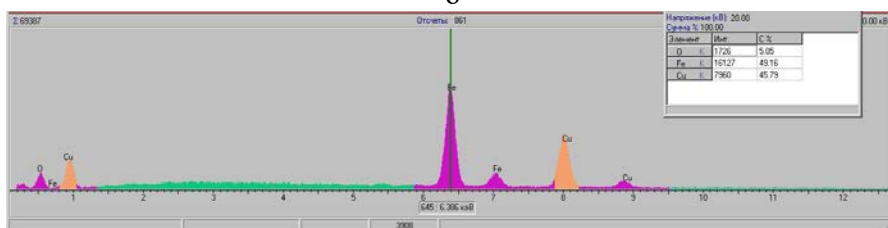
Точка 3 відповідає включенню міді на трибоповерхні контртіла (рис. 5.9, г). Результати хімічного аналізу показали, що в даній точці вміст міді становить 60,05 %, заліза – 37,29 %, кисню – 2,66 %.



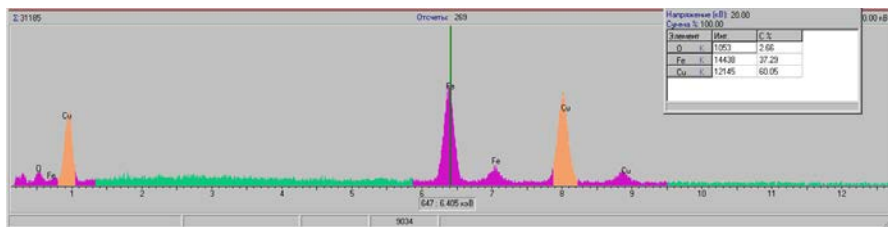
a



б



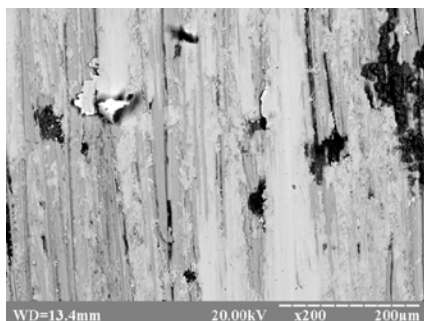
B



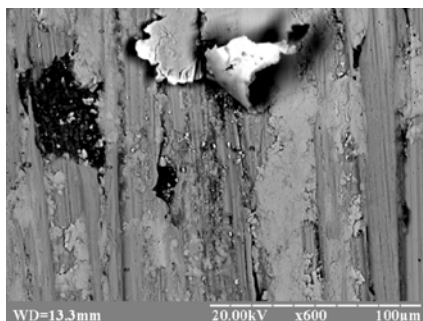
Г

Рис. 5.9. Хімічний спектр трибоповерхні контртіла після 3000 м фрикційної взаємодії: а – загальний вигляд поверхні; б, в, г – результати хімічного аналізу поверхні в точках 1, 2, 3 відповідно

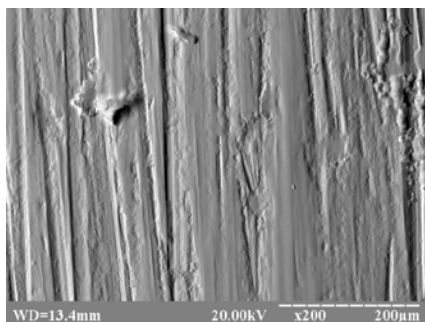
Після збільшення тривалості фрикційної взаємодії (10000 м) кількість перенесеної міді на контртіло (рис. 5.10 та 5.11) збільшується, а її розподіл стає рівномірнішим. Під час фрикційної взаємодії формуються фрагменти сервовитної плівки (рис. 5.10 а, б) з мідних включень, яка поступово стає суцільною. Плівка має витягнуту форму в напрямку обертання контртіла. Встановлено, що дана сервовитна плівка заповнює мікронерівності поверхні контртіла (рис. 5.10, в, г), що зафіксовано на рис. 5.8. Це виключає мікрорізання поверхні епоксикомпозитного матеріалу виступами контртіла під час подальшої фрикційної взаємодії. Покриваючи поверхні трибопари, сервовитна плівка знижує інтенсивність зношування епоксикомпозитного матеріалу, оскільки тертя відбувається між фрагментами самоорганізованих плівок.



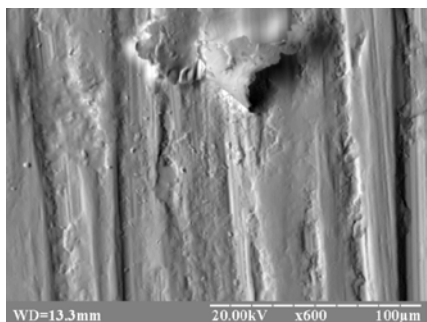
а, $\times 200$



б, $\times 600$



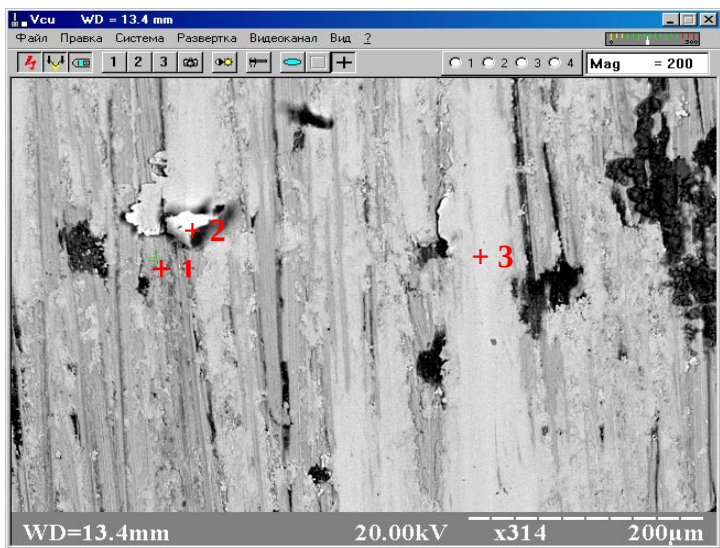
б, $\times 200$



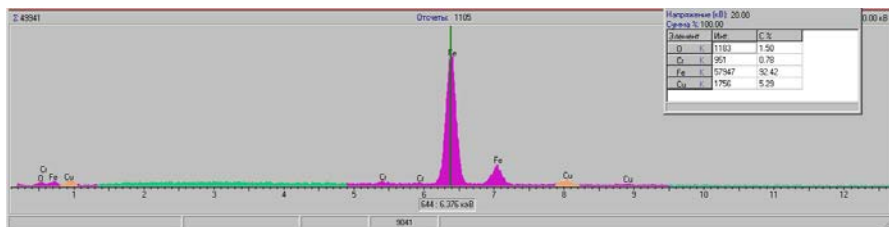
г, $\times 600$

Рис. 5.10. Композиційний (а, б) та топографічний контраст (в, г) фрагментів утвореної мідної плівки на трибоповерхні контртіла після 10000 м фрикційної взаємодії

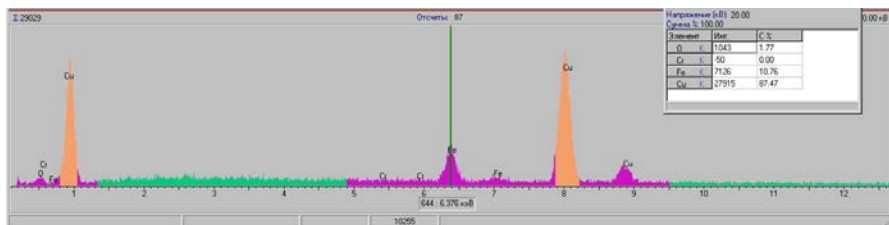
За результатами хімічного аналізу в точці 1 (рис. 5.11, а) встановлено, що вміст міді є низьким (5,29 %), а концентрація заліза становить 92,42 %. Концентрація кисню та хрому не перевищує 1,5 %.



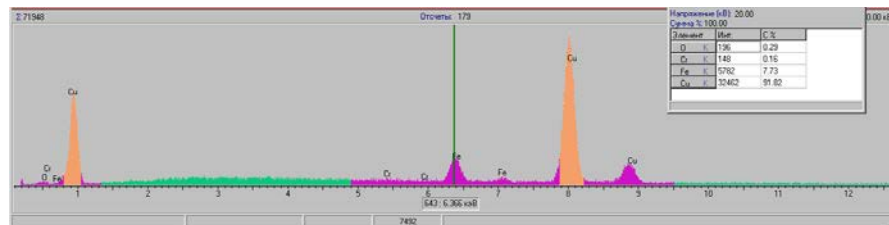
а



б



в



г

Рис. 5.11. Хімічний спектр фрагментів мідної плівки на трибоповерхні контргіла після 10000 м фрикційної взаємодії: а – загальний вигляд поверхні; б, в, г – результати хімічного аналізу поверхні в точках 1, 2, 3 відповідно

В точках 2 і 3, які належать утвореним фрагментам сервовитної плівки (рис. 5.11, а), концентрація міді є досить високою і становить 87,47 % та 91,82 % відповідно. Вміст заліза в даних точках знаходиться в межах 7,73-10,76 %. Вміст оксигену не перевищує 1,77 %, хрому – 0,16 %.

Отже, можна стверджувати, що формування фрагментів мідної плівки в поверхневих шарах епоксикомпозитного трибо-матеріалу відбувається за рахунок процесів самоорганізації структури, що забезпечує стабілізацію триботехнічних характе-

ристик під час поетапного підвищення фрикційного навантаження.

5.7. Технологія виготовлення виробів та рекомендації до їх застосування

Оптимальний склад епоксикомпозитного трибоматеріалу представлений в табл. 5.5, умови формування – в табл. 5.6.

Таблиця 5.5

Склад епоксикомпозитного трибоматеріалу

Матриця	Наповнювачі	Вміст наповнювача, мас. Ч.
100 мас. ч. ЕД-20 + 12 мас. ч. ПЕПА	CuO	150
	подрібнене вуглецеве волокно	2
	Cu	16

Примітка: довжина вуглецевих волокон становить 4 мм.

Приготування композиції полягає у підготовці наповнювачів та поетапному їх введенні у композицію. Порошки міді та оксиду міді, а також подрібнені вуглецеві волокна перед застосуванням просушують в сушильній шафі за температури 473 ± 5 К протягом 2 год.

Таблиця 5.6

Умови формування епоксикомпозитного трибоматеріалу

Тиск пресування, МПа	Попередня ТО	Режим основної ТО
500	3 год – 40°C	1 год – 50°C , 1 год – 100°C , 4 год – 120°C

Просушені порошки перед приготуванням композицій просіюються через сито з відповідними розмірами отворів. Надалі наповнювачі дозують відповідно до складу, змішують та помішують в металевий контейнер.

До 100 мас. ч. смоли марки ЕД-20 вводять твердник ПЕПА з наступним їх змішуванням. В дану полімерну матрицю вводять поступово наповнювачі, перемішуючи систему протягом 6-10 хв при мінімальній швидкості для запобігання інтенсивного нагріву композиції.

Формування виробів здійснюється в прес-формі під тиском 300 МПа протягом 24 год. Далі проводять попередню термічну обробку в печі за температури 40 °С з витримкою 3 год. Охолодження виробу проводять на повітрі. Після цього застосовують ступінчастий режим термічної обробки: 1 год – 50 °С, 1 год – 100 °С, 4 год – 120 °С. На останньому етапі вироби підлягають контролю на якість (відсутність дефектів, відповідність розмірам тощо). Виправний брак не допускається.

Розроблені епоксикомпозитні матеріали можуть працювати за наступними режимами: питоме навантаження 0,9...1,2 МПа – швидкість ковзання до 5 м/с; питоме навантаження 1,2...1,5 МПа – швидкість ковзання до 4 м/с; питоме навантаження 1,5...1,8 МПа – швидкість ковзання до 2 м/с. Даний матеріал придатний до експлуатації в умовах впливу агресивного середовища за динамічних навантажень.

ВИСНОВКИ

Для епоксисистем, наповнених порошком Cu_2O , відбувається підвищення адгезійної міцності на 80,18 % із збільшенням ступеня наповнення від 50 мас. ч. до 250 мас. ч., а, наповнених порошком CuO , спостерігається зниження адгезійної міцності на 39,50 %. Найвищу межу міцності при стисненні ($\sigma_c=135,03$ МПа для Cu_2O та $\sigma_c=121,02$ МПа для CuO) отримують із оптимальним вмістом 150 мас.ч., що пояснюється низькими значеннями внутрішніх напружень ($\sigma_{\text{вн}}=0,88$ МПа і $\sigma_{\text{вн}}=1,16$ МПа відповідно) та найвищим ступенем структурування систем. Нижчий вміст наповнювачів не забезпечує високу конструкційну міцність епоксикомпозитів, що пов'язано з утворенням меншої кількості хімічних та фізичних вузлів зшивання матриці з наповнювачем та наявністю різноманітних дефектів. При вищому вмісті утворюються конгломерати, які підвищують напруження в епоксисистемі та виступають джерелом поширення тріщин.

Залежність адгезійної міцності від довжини вуглецевих волокон із ступенем наповнення 1,5 мас. ч. та 2,5 мас. ч. має симбатний характер, а із ступенем наповнення 2 мас. ч. – антибатний. Максимальну межу міцності при стисненні ($\sigma_{\text{ст}} = 72,61$ МПа) мають епоксикомпозити з вмістом 1,5 мас.ч. подрібнених вуглецевих волокон та довжиною 4 мм. За результатами адгезійної міцності та межі міцності при стисненні епоксикомпозитів, наповнених подрібненими вуглецевими волокнами, встановлено, що оптимальним є вміст 2 мас. ч. з довжиною волокон 4 мм. Це пояснюється тим, що волокна довжиною 2 мм гірше змочуються епоксидною матрицею, оскільки утворюють конгломерати, а більші волокна (6 мм) нерівномірно розміщуються в останній.

Проведення попередньої термічної обробки (3 год з витримкою за 40°C) дозволить знизити внутрішні напруження епоксикомпозитів, сформованих під тиском, що знижує в 1,5-1,8 раз інтенсивність зношування епоксикомпозитів.

Позитивний вплив на триботехнічні характеристики здійснює порошок оксиду міді (CuO), підвищення вмісту якого (до 100-150 мас. ч.) підвищує зносостійкість епоксикомпозитних 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 трибовзаємодії.

Формування стійкої до зношування структури відбувається за оптимального співвідношення інгредієнтів епоксикомпозитного матеріалу (100 мас. ч. CuO , 16 мас. ч. Cu , 2 мас. ч. подрібненого вуглецевого волокна) та поетапного зростання потужності тертя (питомого навантаження до 1,8 МПа або швидкості ковзання до 5 м/с), що дозволяє підвищити ресурс експлуатації обладнання. Встановлення стабільного режиму вибіркового перенесення знижує інтенсивність зношування епоксикомпозитного матеріалу, що дозволяє використовувати його в умовах з обмеженим мащенням або відсутності мастильного середовища.

Розроблені епоксикомпозитні матеріали характеризуються відносно високою термостійкістю (613 К) та стабільністю теплофізичних характеристик, хімічною стійкістю в розведених кислотах; стійкі до незначних перепадів температур та атмосферних умов; здатні реалізувати ефект вибіркового перенесення після їх витримки в воді та гліцерині.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Материаловедение – основа развития современной триботехники / В.Ф. Лабунець, Л.С. Братица, Т.С. Климова, Н.А. Медведева; гол. ред. М.В. Кіндрачук // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – 2010. – № 53. – С. 34–41.
2. Косторнов А.Г. Триботехническое материаловедение: монографія / А.Г. Косторнов. Изд-во «Ноулидж», 2012. – 696 с.
3. Трибологія: [підруч.] / [Кіндрачук М.В., Лабунець В.Ф., Пашечко М.І., Корбут Є.В.]. – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту “НАУ-друк”, 2009. – 392 с.
4. L'industrie française des matériaux composites / Louis Berreuer, Bertrand de Maillard, Stanislas Nösperger. – 2002. – 129 p.
5. Савчук П.П. Особливості застосування епоксидних композиційних матеріалів у триботехніці / П.П. Савчук // Проблеми трибології. – 2008. – № 4 (50). – С. 120-125.
6. Friedrich K. Composite materials series: advances in composite tribology / K. Friedrich. – 1993. – Vol. 8. – 773 p.
7. Kato H. Wear and mechanical properties of sintered copper-tin composites containing graphite or molybdenum disulfide / H. Kato, M. Takama, Y. Iwai and others // Wear: 14th International conference on wear of materials. – August-September 2003. – Vol. 255, Issues 1-6. – P. 573-578.
8. Савчук П.П. Структура та функціональні властивості епоксидних композитів, наповнених високодисперсними частинками / П.П. Савчук, А.Г. Косторнов // Порошкова металургія. – 2009. – № 9/10. – С. 81-87.
9. Lancaster J.K. Polymer-based bearing materials: The role of fillers and fibre reinforcement / J.K. Lancaster // Tribology. – December 1972. – Volume 5, Issue 6. – P. 249-255.
10. Савчук П.П. Закономерности регулирования структуры и свойств защитных эпоксидных композиционных покрытий / П.П. Савчук, А.Г. Косторнов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск № 7. Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів. – 2008. – С. 453-456.

11. Косторнов А.Г. Закономерности создания эпоксидных композиционных материалов с управляемыми свойствами / А.Г. Косторнов, П.П. Савчук // Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий: материалы V международной конференции, 22-26 сентября 2008 г. – К., 2008. – С. 28.

12. Зайцев А.Л. О фрикционном взаимодействии некоторых полимерных материалов с твердым сплавом / А.Л. Зайцев, П.В. Сысоев // Трение и износ. – 1987. – Т. 8. – № 2. – С. 348-353.

13. Золоторева В.В. Исследование истирания эпоксидных композиций / В.В. Золоторева, В.А. Липская, Ю.С. Кочергин // Матеріали 25-ї міжнародної науково-практичної конференції. – Київ: УЦ “Наука. Техніка. Технологія”. – 2005. – С. 312-314.

14. Friedrich K. Composite materials series: friction and wear of polymer composites / K. Friedrich. – 1996. – Vol. 1. – 457 p.

15. Богданович П.Н. Тепловые процессы в зоне контакта трущихся тел / П.Н. Богданович, В.Н. Белов // Трение и износ. – 1992. – № 4. – Т. 13. – С. 624-632.

16. Мышко В.И. Исследование износостойкости высоконаполненных медью полимерных композиций / В.И. Мышко, Я.В. Кочетова // Композиционные полимерные материалы. – 1981. – № 9. – С. 12-18.

17. Крыжановский В.К. Технологические свойства полимерных материалов: учеб. справ. пособие / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. – [2-е изд., испр. и доп.]. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с.

18. Триботехнические характеристики полимерных композитов, армированных волокнистыми структурами / А.И. Юга, Т.В. Грудина, В.М. Волкогон [и др.] // Порошковая металлургия. – 2004. – №9-10. – С. 32-37.

19. Денисов Л.М. Подшипники скольжения с безызносным режимом трения. Трибоника: [учеб. пособие] / Денисов Л.М. – Иркутск: ИПИ, 1982. – 88 с.

20. Белый В.А. Актуальные направления развития исследований в области трения и изнашивания / В.А. Белый, А.И. Свириденко // Трение и износ. – 1987. – Т. 8. – №1. – С. 5-24.

21. Тагер А.А. Физико-химия полимеров / А.А. Тагер. – [4-е изд.]. – М.: Научный мир, 2007. – 576 с.

22. Влияние структуры “третьего тела” на фрикционные характеристики сопряжения эпоксидный композит – металл / А.Т. Козаков, Д.Н. Любимов, А.В. Никольский [и др.] // Трение и износ. – 1992. – Т. 13. – № 6. – С. 1032-1038.

23. Крагельский И.В. Трибохимические процессы в наполненных покрытиях из высокомолекулярной эпоксидной смолы / И.В. Крагельский М.Н. Зеленская // Трение и износ. – 1987. – Т. 8. – № 6. – С. 965-971.

24. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): [учебник] / Д.Н. Гаркунов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: “Издательство МСХА”, 2001. – 616 с.

25. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / Л. Нильсен. – М.: Химия, 1978. – 310 с.

26. Yakil U.M. Crosslinked epoxies: Network structure characterization and physical-mechanical properties / U.M. Yakil, G.C. Martin // Journal of Applied Polymer. – Science. – 1992. – V. 46. – P. 2089.

27. Гуль В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.П. Кулезнев. – М.: Высшая школа, 1979. – 352 с.

28. Мониторинг трибологических параметров узла трения в условиях переноса массы / М.Н. Свирид, В.Г. Парашанов, А.Н. Химко [и др.] // Проблемы тертя та зношення, 2009. – № 51. – С. 26-33.

29. Закономерности трения, износа и целенаправленного синтеза поверхностей трения композиционных самосмазывающихся материалов / А.Г. Косторнов, И.О. Фущич, Т.М. Чевычелова [и др.] // Порошковая металлургия. – 2007. – № 3/4. – С. 11-19.

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

31. Савчук П.П. Реологічні властивості епоксидних композитів з різним ступенем полідисперсного наповнення / П.П. Савчук, А.Г. Косторнов // Порошкова металургія. – 2009. – № 3/4. – С. 42-48.

32. Савчук П.П. Наукові і технологічні основи створення та керованого функціонування епоксидних композитів з різним ступенем наповнення: дис. д-ра техн. наук: 05.02.01 / П.П. Савчук– К.: ІПМ, 2010. – 320 с.

33. Будник А.Ф. Фізика та механіка трибодизайну матеріалів: [навч. посібник] / А.Ф. Будник, В.Б. Юскаєв. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 203 с.

34. Будник А.Ф. Неметалеві матеріали в сучасному суспільстві: навч. Посібник / А.Ф. Будник, В.Б. Юскаєв, О.А. Будник. – Суми: СДУ, 2008. – 222 с.

35. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Высшая школа, 2008. – 535 с.

36. Богданович П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск: Высшая школа, 1999. – 374 с.

37. Полимерные композиционные материалы: Структра, свойства, технология: [учеб. пособие] / [Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др.]. – М.: Профессия, 2008. – 557 с.

38. Сравнительная оценка работоспособности самосмазывающихся материалов при трении на воздухе /

П.Н. Хотин, А.В. Петренко, Н.В. Фролова [и др.] // Пластические массы. – 1991. – № 10. – С. 25-27.

39. Савчук П.П. Властивості епоксидних композиційних матеріалів триботехнічного призначення / П.П. Савчук, А.Г. Косторнов // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – 2008. – Вип. 49. – Т. 2 – С. 52-60.

40. Воронков Б.Д. Защита от водородного изнашивания концевых опор валов аппаратов с перемешивающими устройствами / Б.Д. Воронков // Долговечность трущихся деталей машин. – 1990. – № 4. – С. 302-315.

41. Friedrich K. Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites / K. Friedrich, Z. Zhang, A.K. Schlarb // Composites science and technology. – December 2005. – Vol. 65, Issues 15-16. – P. 2329-2343.

42. Ключихин В.И. Некоторые особенности трения и изнашивания покрытий на основе эпоксидного композита в условиях работы цилиндрического шарнира / В.И. Ключихин, П.Д. Стухляк // Трение и износ. – 1988. – Т. 9. – №5. – С. 897-902.

43. Богданович П.Н. Образование частиц изнашивания при фрикционном нагружении эпоксидного полимера / П.Н. Богданович // Трение и износ. – 1988. – Т.9. – № 6. – С. 1000-1006.

44. Савчук П.П. Вплив технологічних параметрів на властивості епоксидних композиційних матеріалів / П.П. Савчук, А.Г. Косторнов, В.П. Кашицький // Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія хімія. – Івано-Франківськ: Гостинець, 2008. – Вип. VI. – С. 56-64.

45. Липатов Ю.С. Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю.С. Липатов. – М.: Химия, 1991. – 260 с.

46. Ludema K.C. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology / K.C. Ludema. – 1996. – 259 p.

47. El-Sayed A.A. Friction and wear properties of polymeric composite materials for bearing applications / A.A. El-Sayed, M.G.

El-Sherbiny, A.S. Abo-El-Ezz, G.A. Aggag // Wear. – April 1995. – Vol. 184, Issue 1. – P. 45-53.

48. Связь триботехнических свойств самосмазывающегося композиционного материала на основе меди с упруго-пластическими характеристиками зоны трибосинтеза / А.Г. Косторнов, О.И. Фущич, В.Ф. Горбань, Т.М. Чевычелова, А.Д. Костенко // Порошковая металлургия. – 2008. – № 1/12. – С. 63-70.

49. Стухляк П.Д. Исследование триботехнических характеристик пары эпоксидный композит-плазменное аморфное покрытие / П.Д. Стухляк, В.И. Коржик, О.К. Шкодзинский // Трение и износ. – 1990. – Т. 11. – №3. – С. 556-559.

50. Производство изделий из полимерных материалов / [Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д.]. – С.-Петербург: Профессия, 2008. – 460 с.

51. Белоусов В.Я. Долговечность деталей машин с композиционными материалами / В.Я. Белоусов / – Львов: Вища школа, 1984. – 180 с.

52. Альшиц И.Я. Проектирование деталей из пластмасс: справочник / И.Я. Альшиц, Б.Н. Благов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.

53. Quintelier J. Self-lubricating and self-protecting properties of polymer composites for wear and friction applications / J. Quintelier, P. Samyn, L. De Doncker and others // Polymer composites. – July, 2009. – Vol. 30. – P. 932-940.

54. Гаркунов Д.Н. Избирательный перенос в узлах трения / Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский, А.А. Поляков. – М.: Транспорт, 1969. – 103 с.

55. Хебды М. Справочник по триботехнике / М. Хебды; под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3-х Т. – М.: Машиностр., 1989. – 400 с.

56. Кашеев В.Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов / В.Н. Кашеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 213 с.

57. Стухляк П.Д. О влиянии оксидов металлов на износостойкость модифицированных эпоксидных смол / П.Д. Стухляк, М.М. Блинец // Трение и износ. – 1989. – Т. 10. – № 3. – С. 473-478.

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

59. Свириденко А.И. Роль фрикционного переноса в механизме самосмазывания композиционных материалов / А.И. Свириденко // Трение и износ. – 1987. – Т.8. – №5. – С.773-778.

60. Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров / В.Е. Гуль. – М.: Химия, 1978. – 327 с.

61. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий. – Киев: Техника, 1970. – 390 с.

62. Механізм вибіркового перенесення з точки зору резонансного потенціалу за Нечаєвим / [А.П. Ранський, Н.О. Діденко, Т.С. Тітов, І.І. Безвозюк] // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 4.

63. Yu L. An investigation of the friction and wear behaviors of micrometer copper particle- and nanometer copper particle-filled polyoxymethylene composites / L. Yu, Sh. Yang, H. Wang, Q. Xue // Journal of Applied Polymer Science. – 12 September 2000. – Vol. 77, Issue 11. – P. 2404-2410.

64. Kim M.R. The tribological performance of self-lubricating bearing following secondary sizing adjustment / M.R. Kim, Y.H. Peng, C.D. Small // International compressor engineering conference at Purdue. – July 14-17 2008. – P. 1433-1439.

65. Lancaster J. K. Composite self-lubricating bearing materials / J.K. Lancaster // Proceedings of the institution of mechanical engineers. – June 1967. – Vol. 182. – № 1. – P. 33-54.

66. Li F. The tribological behaviors of copper-coated graphite filled PTFE composites / F. Li, F. Yan, L. Yu, W. Liu // *Wear*. – January 2000. – Vol. 237, Issue 1. – P. 33-38.

67. Santner E. Tribology of polymers / E. Santner, H. Czichos // *Tribology international*. – April 1989. – Vol. 22, Issue 2. – P. 103-109.

68. Burris D.L. A low friction and ultra low wear rate PEEK/PTFE composite / D.L. Burris, W.G. Sawyer // *Wear*. – 30 August 2006. – Vol. 261, Issues 3-4. – P. 410-418.

69. Xiang D. Friction and wear behavior of self-lubricating and heavily loaded metal-PTFE composites / D. Xiang, K. Shan // *Wear*. – 31 May 2006. – Vol. 260, Issues 9-10. – P. 1112-1118.

70. New low – friction. Ship Repair Maint. – 1973, – № 6. – P. 17.

71. Permaglide low – friction bearing material. Mach and Prod. Tng. – 1973. – № 3. – P. 696.

72. Rodgers use of Copper to prevent scuffing in diesel engines / *Wear*. – 1972. – Vol. 22, № 2. – P. 245-258.

73. Воронков Б.Д. Эффект безыснжности при повышении ресурса и надежности машин и аппаратов химических производств / Б.Д. Воронков // Эффект безыснжности и триботехнологии, 1997. – № 1. – С. 11-19.

74. Bruce R.W. CRC handbook of lubrication: theory and practice of tribology / R.W. Bruce. – Volum II: theory and design. – 1983. – 691 p.

75. Голуб М.В. Основы комплексного решения проблемы повышения износостойкости, надежности долговечности уплотнений насосов магистральных нефтепроводов: автореф. дис. на получение науч. степени доктора техн. наук. / М.В. Голуб. – Гомель, 1992. – 52 с.

76. Голуб М.В. Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля (технология получения, исследование и применение) / М.В. Голуб // Эффект безыснжности и триботехнологии, 1994. – № 1. – С. 24-39.

77. Гаркунов Д.Н. Избирательный перенос в тяжело нагруженных узлах трения / Д.Н. Гаркунов; под ред. Д. Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1982. – 207 с.
78. Поляков А.А. Трение на основе самоорганизации / А.А. Поляков, Ф.И. Рузанов. – М.: Наука, 1992. – 135 с.
79. Гаркунов Д.Н. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса. / Д.Н. Гаркунов. – М., Машиностроение, 1977. – 215 с.
80. Крагельский И.В. Трение и износ. / И.В. Крагельский – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
81. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов – М: Машиностроение, 1989. – 328 с.
82. Поляков А.А. Физико-химические принципы безысности // Повышение износостойкости на основе избирательного переноса / А.А. Поляков; под ред. Д.Н. Гаркунова. – М: Машиностроение, 1977. – 214 с.
83. Савкин В.Г. Адгезия и перенос материала при трении полимеров / В.Г. Савкин, В.А. Смургов // Трение и износ. – 1983. – Т. 4. – №1. – С. 34-39.
84. Haberland H. Clusters of atoms and molecules / H. Haberland; [Ed. H. Haberland]. – М.: Mir. 1994. – Vol. 1 – P. 205-243.
85. Польцер Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф Майсснер; [пер. с нем. О.Н. Озерского, В.Н. Пальянова; под. ред. М.Н. Добычина]. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
86. Фенкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей / И.Я. Фенкель Сер. Классика науки. – М.: Наука, 1975. – 27 с.
87. Buckley D.H. Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication / D.H. Buckley. – 1981. – 631 p.
88. Специальная антифрикционная механическая обработка поверхностей катания колесной пары / [В.И. Балабанов, С.М. Мамыкин, Ю.А. Хрусталеv и др.] // Железнодорожный транспорт, 1992. – № 12. – С. 30-34.

89. Методы исследования структуры и свойств полимеров: учеб. пособие / И.Ю. Аверко-Антонович, Р.Т. Бикмуллин. – Казань: КГТУ, 2002. – 604 с.

90. Ellis B. Chemistry and technology of epoxy resins / B. Ellis. – London: blackie academic and professional. – 1994. – 410 p.

91. Князев В.К. Эпоксидные конструкционные материалы в машиностроении / В.К. Князев. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.

92. Крыжановский В.К. Износостойкие реактопласты / В.К. Крыжановский. – Л.: Химия, 1984. – 120 с.

93. Тризно М.С. Клеи и склеивание / М.С. Тризно, Е.В. Москолев. – Л.: Химия, 1980. – 120 с.

94. Х. Ли. Справочное руководство по эпоксидным смолам / Ли Х., Невилл К.; [пер. с англ.]. – М.: Энергия, 1973. – 416 с.

95. Композиционные материалы: справочник / [под ред. Д.М. Карпиноса]. – К.: Наукова думка, 1985. – 592 с.

96. Сагалаев Г.В. Антифрикционные пластмасы / Г.В. Сагалаев, Н.Л. Шембель // Трение и износ. – 1982. – Т. 3. – № 4. – С. 627-631.

97. Дроздов Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях: справочник / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

98. Сироватка Л.А. Термо- и механодеструкция антифрикционного композиционного материала с эпоксидным связующим / Л.А. Сироватка, Т.В. Дмитриева, В.И. Бортницкий // Композиционные полимерные материалы. – 1988. – №38. – с. 49-53.

99. Кашицкий В.П. Розробка захисних покриттів з підвищеною зносостійкістю на основі епоксидних композитів, модифікованих кремнійорганічним лаком КО-921: автореф. дис. к-та техн. наук: 05.02.01 – “Матеріалознавство” / В.П. Кашицкий. – Луцьк, 2006 – 20 с.

100. Bahadur S. The role of copper compounds as fillers in

the transfer and wear behavior of polyetheretherketone / S. Bahadur, D. Gong // Wear. – 15 April 1992. – Vol. 154, Issue 1. – P. 151–165.

101. Tsukizoe T. Friction and wear of advanced composite materials / T. Tsukizoe, N. Ohmae // Fibre science and technology. – 1983. – Vol. 18, Issue 4. – P. 265-286.

102. Павлов В.И. Влияние толщины прослойки полимерной матрицы на свойства наполненных эпоксидных композиций / В.И. Павлов, Т.П. Муравская, Р.А. Веселовский // Пластические массы. – 1987. – № 10. – С. 12-14.

103. Химический энциклопедический словарь [гл. ред. И.Л. Кнунянц]. – М.: Сов. Энциклопедия, 1983. – 792 с.

104. Хімія: [підруч: для вищ. навч. закл.] / [Яцимирський В.К., Павленко В.О., Савченко І.О. та ін.]. – К.; Ірпінь: Перун, 2010. – 432 с.

105. Антифрикционные термостойкие полимеры / [Сиренко Г.А., Свидерский В.П., Герасимов В.Д., Никонов В.З.]. – К.: Техніка, 1978. – 246 с.

106. Гоц В.І. Вплив температури на текстурні характеристики базальтового волокна / В.І. Гоц, П.П. Пальчик, О.Ю. Рєзнік // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. – 2012. – Вип. 45. – С. 18-21.

107. Савчук П. П. Властивості епоксикремнійорганічних композитів армованих базальтовими волокнами / П.П. Савчук, О.А. Отченашенко // Наукові нотатки. – Луцьк: ЛДТУ, 2006. – Вип. 18. – С. 340–348.

108. Химическая энциклопедия: Даффа-Меди / [гл. ред. Кнунянц И.Л. и др.]. – М.: Сов. энцикл., 1990. – В 5 т.: т. 2 – 671 с.

109. Химическая энциклопедия: А-Дарзана / [гл. ред. Кнунянц И.Л. и др.]. – М.: Сов. энцикл., 1988. – В 5 т.: т. 1 – 671 с.

110. Карякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий / М.И. Карякина – М.: Химия, 1988. – 272 с.

111. Система антикорозійного захисту об'єктів нафтогазового комплексу захисні покриття. Методи випробування покриттів в лабораторних умовах. ВБН В.2.3-00018201.01.02.01-96. – Київ: Державний комітет нафтової, газової та нафтопереробної промисловості України, 1996.

112. Карякина М.И. Лабораторный практикум по испытанию лакокрасочных материалов и покрытий / М.И. Карякина – М.: Химия, 1977. – 234 с.

113. Замышляева О.Г. Методы исследования современных полимерных материалов: учебно-методическое пособие / О.Г. Замышляева. – Нижний Новгород: НГУ, 2012. – 90 с.

114. Рабек Я.Р. Экспериментальные методы в химии полимеров: пер. с англ. под ред. В.В. Коршака.- М.: Мир, 1983. – Ч.1. – 384 с.

115. Рижков С.С., Маркіна Л.М., Крива М.С. Дослідження кінетики термічної деструкції органічних відходів / Екологічна безпека. – № 2. – 2013. – С. 82-88.

116. Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1973. – 504 с.

117. У. Уэндландт. Термические методы анализа. – М.: Мир, 1978.

118. Зиман З.З. Методичні вказівки до виконання спецпрактикуму з мікроскопії, спектроскопії та термічного аналізу твердих тіл / З.З. Зиман, М.В. Ткаченко., В.І. Глушко, Л.П. Подус. – Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2008. – 40 с.

119. Широков В.В. Особливості фізико-хімічних процесів між металевими поверхнями тертя / В.В. Широков, О.В. Білоус //Фізика і хімія твердого тіла. – 2010. – Т. 11. – № 1. – С. 214-220.

120. Лебедева А.А. Электронная микроскопия / А.А. Лебедев, Гостехтеоретиздат, 1954.

121. Кашицький В.П. До питання про реалізацію ефекту вибіркового перенесення в епоксикомпозитах, додатково

наповнених оксидами міді / [В.П. Кашицький, П.П. Савчук, О.Л. Будкіна, Р.Г. Редько] // Науковий вісник ХДМІ: Науковий журнал. – Херсон: Видавництво ХДМІ, 2011. – № 1 (4). – С. 190-197.

122. Букетов А.В. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів / А.В. Букетов П.Д. Стухляк, Є.М. Кальба. – Тернопіль: Збруч, 2005. – 182 с.

123. Сташко А.І. Адгезія механічно напружених поверхневих покриттів / А.І. Сташко // Вісник НУ “Львівська політехніка”: Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів, 2008. – № 618.

124. Будкіна О.Л. Розробка епоксикомпозитного матеріалу для середньонавантажених підшипників ковзання / О.Л. Будкіна, В.П. Кашицький // Студентський науковий Вісник. – Луцьк: Навчально-науковий відділ ЛНТУ, 2011. – С. 16-21.

125. Кашицький В.П. Дослідження триботехнічних характеристик епоксидних антифрикційних прескомпозитів / В.П. Кашицький, О.Л. Будкіна // Тези XXXIV університетської студентської науково-технічної конференції “Україна сьогодні: інтеграція освіти і науки” (Технічний напрям). – Луцьк: Навчально-науковий відділ ЛНТУ, 2011. – С. 142-143.

126. Тагер А.А. Физико-химия полимеров / А.А. Тагер. – М.: Изд. “Химия”, 1968. – 536 с.

127. Кашицький В.П. Особливості виникнення ефекту вибіркового перенесення в епоксикомпозитах / В.П. Кашицький, П.П. Савчук, О.Л. Будкіна, Р.Г. Редько, А.В. Букетов // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. У 2-х тт. Том 2. – Херсон: Видавництво Херсонського державного морського інституту, 2011. – С. 130-131.

128. Савчук П.П. Дослідження процесів вибіркового перенесення в епоксикомпозитах триботехнічного призначення / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, О.Л. Садова,

Н.Л. Плєскот // Фізика і хімія твердого тіла. Стан, досягнення і перспективи: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, 19-20 жовтня 2012 р., м. Луцьк. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2012. – С. 18-20.

129. Садова О.Л. Технологічні аспекти формування композиційних матеріалів триботехнічного призначення з високими механічними характеристиками / О.Л. Садова, В.П. Кашицький, П.П. Савчук // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: Збірка матеріалів V міжнародної науково-практичної конференції, 28-30 травня 2013 р. – У 2-х тт. – Т.2. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2013. – С. 146-147.

130. Садова О.Л. Оптимізація складу антифрикційних епоксикомпозитів для підсилення процесів самоорганізації при трибоконтакті / О.Л. Садова, В.П. Кашицький, П.П. Савчук, Р.Г. Редько // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: збірка матеріалів IV міжнародної науково-практичної конференції, 29-31 травня 2012 р. – У 2-х тт. – Т.2. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2012. – С. 117-118.

131. Садовая О.Л. Технологические аспекты обеспечения конструкционной устойчивости эпоксикомпозитов триботехнического назначения / О.Л. Садовая, В.П. Кашицкий, П.П. Савчук // Порошковая металлургия: современное состояние и будущее. – Киев. – 2014. – С. 75.

132. Садова О.Л. Дослідження корозійної стійкості епоксикомпозитів триботехнічного призначення / О.Л. Садова, В.П. Кашицький // Нові матеріали і технології в машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції, 20-21 травня 2014 р. – Київ: НТУУ „КПІ”, 2014. – С. 102-104.

133. Кашицький В.П. Трибологічні процеси та структурні перетворення в поверхневих шарах полімеркомпозитів при навантаженні тертям / В.П. Кашицький, П.П. Савчук, О.Л. Садова // Проблеми трибології – Хмельницьк, 2011. – №4 (62). – С. 103-107.

134. Пат. 66490 Україна, МПК C08K3/00, F16C33/00. Триботехнічний полімеркомпозиційний матеріал / П.П. Савчук, А.Г. Косторнов, В.П. Кашицький, О.П. Кислюк, І.В. Боярська, О.Л. Будкіна. – №201106429; Заявл. 23.05.2011; Опубл. 10.01.2012, Бюл. №1.

135. Кашицький В.П. Дослідження інтенсивності зношування мультинаповнених епоксикомпозитів триботехнічного призначення / В.П. Кашицький, П.П. Савчук, О.Л. Садова, О.І. Давидюк // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: матеріали 4-ої міжнародної науково-практичної конференції, 9-11 жовтня 2013 р. – Херсон, 2013. – С. 108 – 110.

136. Sawczuk P. Współczesne trendy rozwoju badań w zakresie tarcia i zuycia materiałów / P. Sawczuk, O. Sadova, V Kaszyckij // PRO FUTURO. – Łódź, 2013. – № 2 (1). – Р. 188-198.

137. Кашицький В.П. Оптимізація складу епоксикомпозитного матеріалу триботехнічного призначення / В.П. Кашицький, О.Л. Садова, П.П. Савчук // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 2 (61). – С. 101-104.

138. Садова О.Л. Забезпечення ефективного функціонування трибосистем при використанні полінаповнених епоксикомпозитів / О.Л. Садова, В.П. Кашицький, П.П. Савчук, О.Д. Костенко // Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування: матеріали 5-ої міжнародної науково-практичної конференції, 1-3 жовтня 2014 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2014. – С. 321-324.

139. Савчук П.П. Наукові передумови та світова практика реалізації явища “вибіркового перенесення” в полімеркомполитах при навантаженні тертям / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, О.Л. Садова // Наукові нотатки. – Луцьк, 2011. – Вип. 34. – С. 236-240.

140. Садова О.Л. Особливості трансформації поверхневих шарів епоксидних прес композитів при навантаженні тертям // О.Л. Садова, В.П. Кашицький. Фізика і хімія твердого тіла. Стан,

досягнення і перспективи: матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів, 24-25 жовтня 2014 р., м. Луцьк. – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2014. – С. 203-205.

141. Пат. 85861 Україна, МПК C08L63/00. Полімерна композиція триботехнічного призначення / Савчук П.П., Кашицький В.П., Садова О.Л., Плескот Н.Л.; заявник і патентовласник Луцький національний технічний ун-т. – № u201302589; заявл. 11.03.13; опубл. 10.12.13, Бюл. № 23.

142. Особливості зношування модифікованих епоксидних композитів при навантаженні тертям / П.П. Савчук, А.Г. Косторнов, В.П. Кашицький, О.Л. Садова // Порошкова металургія. – 2014. – №. 3/4 – С.103-109.

143. Садова О.Л. Особливості виникнення явища самоорганізації в поверхневих шарах епоксикомпозитних матеріалів при фрикційній взаємодії / О.Л. Садова // Наукові нотатки. – Луцьк, 2014. – Вип. 47. – С. 199-202.

144. Садова О.Л. Дослідження корозійної та атмосферної стійкості епоксикомпозитних трибоматеріалів / О.Л. Садова, І.В. Боярська, В.П. Кашицький // Наукові нотатки. – Луцьк, 2015. – Вип. 50. – С. 199-202.

145. Лобко Є.В. Вплив мультипротонних карбонових кислот на термостійкість епоксидних композицій. / [Є.В. Лобко, Н.В. Козак, Г.М. Нестеренко, В.В. Клепо]. Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – № 2. – С. 53-58.

146. Рачій Б.І. Структурно-функціональні особливості вуглецевих наноматеріалів. / Б. І. Рачій, Л. Ю. Куницька, В. В. Трачевський та ін. Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2010. – Т. 8. – № 3. – С. 651-662.

147. О.І. Лавренюк. Компонентний склад та токсичність продуктів термоокисної деструкції епоксиолімерів. – Вісник ЛДУ БЖД. –2013. – № 7 – С. 189-193.

148. Віленський В.О. Теплофізичні властивості й термодеструкція нанокомпозитів, отверднених у сталих фізичних полях. / [В.О. Віленський, Ю.В. Бардадим, С.В. Рябов,

Т.В. Дмитрієва]. – Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2013. – № 5 – С. 107-114.

149. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis / Katarzyna Slopiecka, Pietro Bartocci, Francesco Fantozzi. *Applied Energy* 97 (2012). P. 491–497.

150. Зінчук В.К. Фізико-хімічні методи аналізу: Навч. Посібник. / В.К. Зінчук, Г.Д. Левицька, Л.О. Дубенська. – Львів: Видав. центр ЛНУ ім. І. Франка. – 2008. – 362 с.

151. Литвин Б.Л. Фізичні методи дослідження будови органічних речовин: методичний посібник. – Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника, 2009. – 134 с.

152. Курта О.С. Визначення концентрації гідроксильних груп на поверхні високодисперсних кремнеземів. / О.С. Курта, В.С. Луців, С.А. Курта, І.І. Керестій. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.pu.if.ua/depart/BioorganicChemistry/resource/file/W-05-5.pdf>

153. Thermogravimetry of Polymers / Duncan M. Price, Douglas J. Hourston, and Fabrice Dumont. *Encyclopedia of Analytical Chemistry* R.A. Meyers (Ed.) John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000. – P. 8094–8105.

154. Віленський В.О., Демченко В.Л. Вплив природи дисперсних наповнювачів на структуру, теплофізичні властивості та електропровідність композитів на основі епоксидно смоли // Полімер. журнал. – 2008. – № 2. – С. 133-140.

155. D.W. van Krevelen, *Properties of Polymers*. Elsevier. – 2009. – 1004 p.

156. Пентин Ю.А. Физические методы исследования в химии. / Ю.А. Пентин, Л.В. Вилков. – М., Мир. – 2003. – 286 с.

157. Формування самоорганізованих структур в поверхневих шарах трибовиробів / О.Л. Садова, В.П. Кашицький, П.П. Савчук // Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія Хімія. – Випуск ХІХ. – Івано-Франківськ, 2015. – С. 13-23.

Наукове видання

Савчук Петро Петрович
Кашицький Віталій Павлович
Садова Оксана Леонідівна

**ФОРМУВАННЯ САМООРГАНІЗОВАНИХ СТРУКТУР В
ПРОЦЕСІ ФРИКЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ТРИБОПАРИ
ЕПОКСИКОМПОЗИТ-СТАЛЬ**

Колективна монографія

Друкується в авторській редакції
Технічний редактор *О. Л. Садова*

Підписано до друку 12.12.17 р. Формат 60х84 ¹/₁₆.

Обсяг 10,0 ум. друк. арк., 9,54 обл.-вид. арк.

Наклад 300 пр. Зам. 153. Видавець і виготовлювач – Вежа-Друк
(м. Луцьк, вул. Винниченка, 14, тел. (0332) 29-90-65).

Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України
ДК № 4607 від 30.08.2013 р.