

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти БАКАЛАВРА
Бакалавра (Магістра)

Вдосконалення експлуатаційних характеристик мідної пари тертя з покриттям
Cu-Mo-S в умовах навколишнього середовища

Назва теми

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 132 Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва

Шифр КвРМТВА. 22010.01.01.00


Виконав студент(ка) 4-го курсу
група МТВАз 22-1
Шифр


Підпис Сергій КОГУТ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник


Підпис Михайло ГЕТЬМАН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер доцент кафедри ТАМ
Посада


Підпис Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва


Підпис Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 10.06 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

факультет інженерії, транспорту та архітектури

кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

світньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»

світньо-професійна програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Когуту Сергію Олеговичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Вдосконалення експлуатаційних характеристик мідної пари тертя з покриттям $Cu-Mo-S$ в умовах навколишнього середовища».

рівень роботи Гетьман Михайло Володимирович

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

затверджено наказом університету від 20 січня 2026 р. № 7 (Д14)

Строк подання студентом роботи на кафедру 16.06.2026 р.

Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали практики; матеріали курсових робіт.

Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз літературних джерел щодо триботехнічних властивостей міді;

2. Матеріали та методи дослідження;

3. Властивості покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$, отриманих методом імпульсного лазерного розпилення.

Перелік графічного матеріалу (презентація)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання 15.04 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітки
1	<i>Аналіз літературних джерел щодо триботехнічних властивостей міді</i>	28.05.2026	
2	<i>Матеріали та методи дослідження</i>	08.06. 2026	
3	<i>Властивості покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$ отриманих методом імпульсного магнетронного розпилення</i>	12.06. 2026	
4	<i>Висновки</i>	14.06. 2026	
5	<i>Захист дипломної роботи</i>	16.06. 2026	

Студент

Керівник роботи


Підпис


Підпис

Сергій КОГУТ
ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

Михайло ГЕТЬМА
ІМ'Я, ПРІЗВИЩЕ

Реферат

Бакалаврську випускную роботу виконав студент 4 курсу, група МТВАз-22-1 Когут Сергій на тему: «Вдосконалення експлуатаційних характеристик мідної пари тертя з покриттям Cu-Mo-S в умовах навколишнього середовища».

У дипломній роботі розглянуто питання вдосконалення експлуатаційних характеристик мідної пари тертя з покриттям Cu-Mo-S в умовах навколишнього середовища.

У першому розділі проведено огляд літературних джерел щодо трибо технічних властивостей міді, а також основні закономірності процесів тертя та зношування матеріалів.

У другому розділі було досліджено матеріали та методи, які будуть використовуватись в данні роботі.

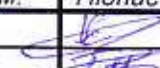



У третьому розділі було описано властивості покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$, отриманих методом імпульсного магнетронного розпилення, а також були описано трибо технічні властивості покриття під час випробувань.

Випускна робота складається з 71 сторінок, містить у собі 14 ілюстрацій, 2 таблиць та 25 джерел.

Ключеві слова: $Cu_xMo_yS_z$, ВЛАСТИВОСТІ, ПОКРИТТЯ, МІДЬ, ПРОЦЕС, ТЕРТЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 Аналіз літературних джерел щодо триботехнічних властивостей міді	9
1.1 Основні закономірності процесів тертя та зношування матеріалів	9
1.2 Основні типи зношування	13
1.3 Триботехнічні характеристики міді	19
1.4 Нанесення покриттів як спосіб підвищення зносостійкості	23
1.5 Формулювання завдань та мети дослідження	33
2 Матеріали та методи дослідження	37
2.1 Матеріали, використані для дослідження	37
2.2 Магнетронне осадження композитних покриттів в основі яких $Cu_xMo_yS_z$	38
2.3 Проведення триботехнічних випробувань	44
2.4 Дослідження електричних характеристик покриттів	47
2.5 Аналіз мікроструктури та хімічного складу покриття	48
3 Властивості покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$, отриманих методом імпульсного магнетронного розпилення	51
3.1 Мікроструктура та хімічний склад покриттів на основі $Cu_xMo_yS_z$	51

<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>				
Змін	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
Розроб.		Когут		
Перевір.		Гетьман		
Реценз.				
Н. Контр.		Бабак		
Затверд.		Диха		
Вдосконалення експлуатаційних характеристик мідної пари тертя з покриттям Cu-Mo-S в умовах навколишнього середовища				
			Літ.	Арк.
			71	4
<i>ХНУ група МТВАз 22-1</i>				

3.2 Триботехнічні властивості покриттів системи Cu–Mo–S під час випробувань.....	54
3.3 Триботехнічні характеристики покриттів $Cu_xMo_yS_z$ при випробуваннях у вакуумному середовищі	61
3.4 Електричні властивості покриттів $Cu_xMo_yS_z$	62
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69
ДОДАТКИ.....	71

ВСТУП

Однією з ключових вимог, що висуваються до космічних апаратів, є забезпечення їхньої безвідмовної роботи та збільшення тривалості функціонування на орбіті. Важливим елементом конструкції сканерів-зондувальників супутників дистанційного дослідження Землі виступає струмознімач, який під час експлуатації перебуває у стані безперервного обертання та працює як електроконтактна пара тертя. Саме цей вузол значною мірою визначає ресурс роботи апаратури на орбіті. Струмознімальний вузол являє собою систему типу «металева щітка – металеве контактне кільце», що забезпечує передачу електричного сигналу між космічним апаратом і зовнішніми обертовими пристроями, зокрема сканерами-зондувальниками.

Для підвищення довговічності струмознімачів актуальним є пошук методів збільшення зносостійкості матеріалів, які використовуються для виготовлення пар тертя. При цьому необхідно забезпечити не лише високі антифрикційні властивості та мінімальний знос, але й зберегти належний рівень електропровідності контактної пари.

Процес тертя в умовах космічного простору ускладнюється відсутністю кисню, що сприяє адгезійному схоплюванню контактуючих поверхонь, а також дією низьких температур, через які використання традиційних рідких мастильних матеріалів стає неможливим. Тому одним із основних напрямів підвищення ресурсу слаботочних струмознімачів є створення оптимальних композицій матеріалів щіток із використанням методів порошкової металургії. На сьогодні для виготовлення щіток застосовують переважно сплави на основі срібла та міді. З метою зменшення коефіцієнта тертя й підвищення опору зношуванню до складу таких матеріалів вводять дисульфід молібдену та вуглець. Контактні кільця, як правило, виготовляють із високочистих металів із вмістом

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		6

основного компонента не менше 99,999 %. Однак навіть сучасні матеріали не забезпечують необхідного ресурсу роботи перспективних космічних систем, тому проблема підвищення їхньої зносостійкості залишається актуальною.

Одним із перспективних способів збільшення строку служби електроконтактних пар тертя є поверхнева модифікація матеріалів за допомогою спеціальних покриттів. Разом із тим у науковій літературі представлено недостатньо даних щодо зносостійких покриттів, які б одночасно характеризувалися високою електропровідністю. У закордонній практиці, зокрема в NASA та ESA, для підвищення ресурсу вузлів тертя в космічній техніці застосовують багатошарові антифрикційні покриття типу «хамелеон» на основі композицій WC/DLC/WS₂ або ZrYO/Au/DLC/WS₂. Такі покриття забезпечують низький коефіцієнт тертя як у вакуумі, так і в сухому чи вологому середовищі. Проте їхнім суттєвим недоліком є недостатня електропровідність, що унеможлиблює використання подібних систем у струмознімальних вузлах. У зв'язку з цим виникає необхідність створення нових електропровідних та зносостійких покриттів і розроблення ефективних технологій їх нанесення.

Для змащування вузлів тертя, які працюють у космічному просторі, традиційно застосовується дисульфід молібдену. Проте використання чистого дисульфиду молібдену в слаботочних електроконтактних системах є обмеженим через його високий питомий електричний опір. Одним зі способів зниження цього показника може бути легування матеріалу міддю. Отриманий композиційний матеріал здатний поєднувати електропровідність металу з антифрикційними властивостями дисульфиду молібдену, що робить його перспективним для застосування у вузлах тертя електроконтактних пар, які функціонують у відкритому космічному просторі.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		7

У зв'язку з цим метою даної роботи є дослідження впливу покриття на основі системи Cu–Mo–S та умов навколишнього середовища на процес зношування мідної пари тертя.

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		8

1 Аналіз літературних джерел щодо триботехнічних властивостей міді

1.1 Основні закономірності процесів тертя та зношування матеріалів

Експлуатаційні властивості деталей машин і різноманітних механізмів значною мірою визначаються процесами тертя, що виникають під час їхньої роботи. Саме тертя є причиною появи складних фізико-механічних явищ, серед яких деформаційні, теплові, динамічні, адгезійні та хімічні процеси. У сукупності вони безпосередньо впливають на працездатність, довговічність і надійність вузлів тертя машин та обладнання. Під час взаємодії контактуючих поверхонь відбувається зміна стану поверхневих шарів матеріалу, що може супроводжуватися пластичною деформацією, локальним нагріванням, утворенням мікропошкоджень і поступовим руйнуванням поверхні.

Вивченням явищ тертя, зношування та супутніх процесів займається трибологія — наука, яка досліджує закономірності контактної взаємодії поверхонь. У процесі розвитку трибології було запропоновано значну кількість теорій, що пояснюють природу тертя та механізми зношування тіл, які перебувають у фрикційному контакті. На сучасному етапі найбільшого поширення набула молекулярно-механічна теорія тертя, відповідно до якої сила тертя формується внаслідок одночасної дії двох основних складових — молекулярної та механічної.

Молекулярна, або адгезійна, складова пов'язана з міжмолекулярним притяганням контактуючих поверхонь. У місцях фактичного контакту між мікронерівностями виникають сили зчеплення, які перешкоджають відносному переміщенню поверхонь. Механічна складова обумовлюється взаємним проникненням і зачепленням мікровиступів контактуючих тіл. У процесі ковзання ці нерівності деформуються або руйнуються, що

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		9

супроводжується додатковими енергетичними втратами та зношуванням поверхонь.

Під час тертя у поверхневому шарі матеріалу відбуваються складні структурні та фізико-хімічні зміни. На ці процеси впливають механічні навантаження, температура в зоні контакту, напружений стан матеріалу, а також властивості навколишнього середовища. У результаті на поверхнях можуть виникати наклеп, мікротріщини, окисні плівки та інші структурні зміни, які визначають характер подальшого зношування.

На рисунку 1.1 наведено п'ять основних типів руйнування фрикційних зв'язків, що виникають у зоні контакту поверхонь тертя. Перші три типи пов'язані переважно з механічною взаємодією контактуючих поверхонь, тоді як два останні обумовлені молекулярними процесами. Перехід між різними видами руйнування залежить від глибини проникнення мікронерівностей одного матеріалу в інший, величини адгезійних сил, а також від механічних характеристик поверхневих шарів.

Реалізація четвертого або п'ятого типу руйнування визначається співвідношенням міцності окисдної плівки та основного матеріалу. Якщо міцність оксидного шару є нижчою за міцність матеріалу основи, руйнування відбувається переважно в межах плівки. У випадку, коли поверхневі шари або оксидна плівка мають вищу міцність, процес руйнування поширюється вже на основний матеріал контактної поверхні. Це призводить до більш інтенсивного зношування та погіршення експлуатаційних характеристик вузла тертя.

Таким чином, процес тертя є складним багатофакторним явищем, яке супроводжується одночасною дією механічних, молекулярних і теплових процесів. Розуміння механізмів тертя та зношування має важливе значення для створення нових конструкційних матеріалів, мастильних систем і захисних покриттів, здатних забезпечити підвищення ресурсу роботи деталей машин і механізмів.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		10

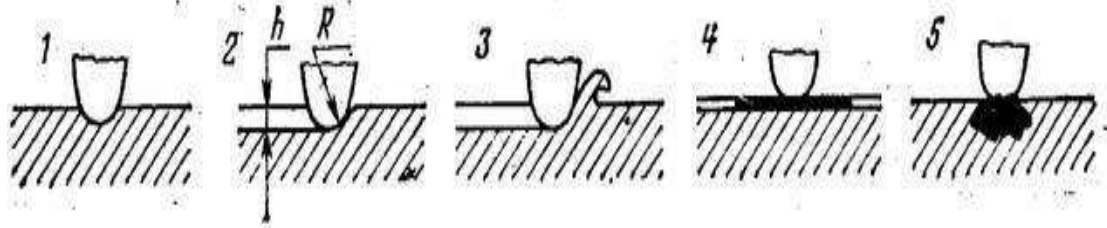


Рисунок 1.1 Типи порушення фрикційних зв'язків: 1-пружне витіснення металу; 2-пластичне витіснення матеріалу; 3 — зрізування поверхневого шару; 4 — схоплювання оксидних або захисних плівок із подальшим їх руйнуванням; 5 — адгезійне схоплювання, що супроводжується глибинним вириванням частинок металу.

Відповідно до молекулярно-механічного підходу процес тертя розглядається як послідовність кількох взаємопов'язаних стадій, кожна з яких впливає на подальший характер контактної взаємодії поверхонь. У загальному вигляді процес тертя можна поділити на три основні етапи:

- 1 взаємодія контактуючих поверхонь з урахуванням впливу навколишнього середовища;
- 2 зміна структури та властивостей поверхневих шарів унаслідок механічного й фізико-хімічного впливу;
- 3 поступове руйнування поверхонь тертя, яке формується під дією процесів, що відбувалися на попередніх стадіях.

На початковому етапі контакт між деталями відбувається не по всій площі поверхні, а лише в окремих точках дотику мікронерівностей. Реальна площа контакту є значно меншою за номінальну, оскільки поверхні навіть після механічної обробки мають виступи та западини різної висоти. Саме у вершинах цих мікровиступів виникають локальні контактні напруження, які визначають характер подальшої взаємодії поверхонь.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		11

У процесі ковзання або кочення поверхневі шари матеріалу зазнають деформацій, локального нагрівання та структурних змін. Під впливом навантаження відбувається часткове руйнування мікронерівностей, утворення нових контактних ділянок, а також зміна фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів. Значну роль у цих процесах відіграє навколишнє середовище, яке може сприяти окисненню, адсорбції активних речовин або формуванню захисних плівок на поверхнях тертя.

На завершальному етапі внаслідок накопичення пошкоджень відбувається руйнування поверхневих шарів матеріалу. Це може проявлятися у вигляді мікротріщин, відшаровування частинок матеріалу, адгезійного схоплювання або інтенсивного зношування. Характер руйнування залежить від механічних властивостей матеріалів, умов експлуатації, величини навантаження, температури та стану контактних поверхонь.

Взаємний контакт деталей здійснюється переважно на вершинах мікронерівностей поверхні, що утворюють окремі локальні ділянки контакту (рисунок 1.2). Саме ці мікроконтакти визначають величину сили тертя, інтенсивність зношування та довговічність роботи вузлів тертя машин і механізмів.

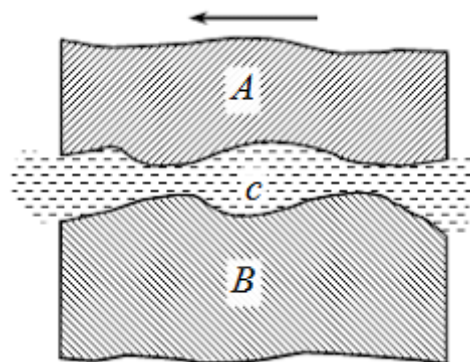


Рисунок 1.2 Схема поверхонь пар тертя

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		12

1.2 Основні типи зношування

Характер зношування деталей та інтенсивність руйнування поверхонь визначаються сукупним впливом механічних, фізичних і фізико-хімічних властивостей матеріалів, а також умовами їхньої експлуатації. На процес зношування суттєво впливають температура в зоні контакту, величина навантаження, швидкість відносного переміщення поверхонь, стан навколишнього середовища, наявність мастильних матеріалів та інші зовнішні фактори. Оскільки трибологічні системи можуть включати різні за структурою та властивостями матеріали, а умови їх роботи значно відрізняються, механізми зношування також характеризуються великою різноманітністю.

У сучасній трибології виділяють декілька основних типів зношування, кожен із яких має власні особливості перебігу та механізми руйнування поверхневих шарів матеріалу. Одним із найбільш поширених є адгезійне зношування, яке виникає внаслідок молекулярної взаємодії контактуючих поверхонь.

Адгезійне зношування обумовлене дією адгезійної складової сили тертя. Під час контакту мікронерівностей поверхонь у місцях фактичного дотику між атомами матеріалів виникають сили міжмолекулярного притягання, які сприяють утворенню локальних зв'язків. У результаті цього між поверхнями можуть формуватися досить міцні контактні з'єднання. Такі зв'язки виникають переважно на ділянках, де відсутні оксидні або адсорбційні плівки, що зазвичай виконують захисну функцію.

Найбільш інтенсивно адгезійне зношування проявляється у випадку контакту матеріалів із близькими фізико-хімічними властивостями, особливо для пар тертя, виготовлених з однакових або взаємно розчинних металів. У зоні контакту відбувається обмін вільними електронами між поверхнями, внаслідок чого формуються металеві зв'язки. Під час

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		13

подальшого переміщення поверхонь ці зв'язки руйнуються, що супроводжується відривом частинок матеріалу, їх перенесенням на іншу поверхню та поступовим руйнуванням контактних шарів.

Руйнування адгезійних зв'язків може відбуватися за різними механізмами залежно від співвідношення міцності з'єднання та механічних властивостей матеріалів пари тертя. Якщо міцність утвореного контакту є меншою за міцність обох матеріалів, руйнування відбувається безпосередньо по межі з'єднання. У випадку, коли адгезійний зв'язок міцніший за один із матеріалів, руйнування локалізується у менш міцному металі, а його частинки можуть переноситися на твердішу поверхню.

Якщо ж міцність утвореного з'єднання перевищує міцність обох контактуючих матеріалів, руйнування поширюється вглиб менш міцного металу, що призводить до значних пошкоджень поверхні. Особливо інтенсивне руйнування спостерігається під час тертя однакових металів. У такому випадку поверхневі шари зазнають зміцнення внаслідок пластичної деформації, що підвищує опір зрізу. Через це руйнування частіше відбувається не по площині контакту, а в глибині матеріалу, викликаючи суттєві пошкодження поверхневих шарів.

Для оцінювання інтенсивності адгезійного зношування широко використовуються математичні моделі, які дозволяють визначити об'єм матеріалу, втрачений у процесі тертя. Однією з найбільш відомих є модель, згідно з якою об'єм зношеного матеріалу прямо пропорційний величині нормального навантаження та довжині шляху тертя й обернено пропорційний твердості матеріалу контактних мікрорівнень.

Таким чином, адгезійне зношування є складним процесом, що супроводжується утворенням і руйнуванням міжповерхневих зв'язків, пластичною деформацією та перенесенням матеріалу між контактними поверхнями. Розуміння механізмів цього виду зношування має важливе значення для розроблення нових антифрикційних матеріалів, мастильних

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		14

композицій і захисних покриттів, здатних підвищити довговічність вузлів тертя машин і механізмів.

Для визначення об'єму зношування пар тертя, виготовлених із відносно м'яких матеріалів, широко застосовується аналітична модель Арчарда. Відповідно до цієї залежності величина зношування прямо залежить від нормального навантаження, прикладеного до контактуючих поверхонь, а також від довжини шляху тертя. Водночас інтенсивність руйнування поверхневого шару зменшується зі зростанням твердості матеріалу в зонах контакту мікронерівностей.

Згідно з моделлю, об'єм матеріалу, що видаляється внаслідок зношування, є пропорційним силі притискання поверхонь і величині пройденого шляху ковзання та обернено пропорційним твердості контактних ділянок поверхні:

$$V = k_A \frac{F_N \cdot L}{H} \dots\dots\dots(1.1)$$

Експериментальні дослідження показали, що коефіцієнт зношування k_A у розрахункових моделях може змінюватися в досить широких межах залежно від умов тертя, властивостей матеріалів та стану контактних поверхонь. Значення цього коефіцієнта визначається характером взаємодії поверхонь, рівнем навантаження, температурою та наявністю мастильного середовища.

Одним із найбільш ефективних способів запобігання захопленню контактуючих поверхонь є застосування мастильних матеріалів. Для цього можуть використовуватися рідкі, пластичні або тверді мастила, вибір яких залежить від умов роботи вузла тертя. Основне призначення мастильного шару полягає у зменшенні безпосереднього контакту між мікронерівностями поверхонь, зниженні сили тертя та обмеженні адгезійної взаємодії матеріалів.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		15

Ефективність роботи мастильного покриття значною мірою визначається його здатністю деформуватися під дією навантаження. Опір деформації мастильного шару повинен бути нижчим, ніж у матеріалу пари тертя. Якщо ж мастильна плівка є надто жорсткою або крихкою, при збільшенні нормального навантаження відбувається пластична деформація поверхневих шарів металу. Унаслідок цього мастильний шар руйнується та розділяється на окремі фрагменти, які залишаються локально закріпленими на поверхні.

Після розриву плівки між її окремими ділянками відкриваються незахищені області основного матеріалу. Саме в цих місцях виникає прямий контакт чистих металевих поверхонь, що створює умови для розвитку адгезійного схоплювання. Надалі це призводить до інтенсивного руйнування поверхневих шарів, перенесення частинок матеріалу та різкого зростання швидкості зношування.

Поряд з адгезійним зношуванням у вузлах тертя практично завжди спостерігається **втомне зношування**, яке супроводжує більшість процесів контактної взаємодії поверхонь. Такий вид руйнування характерний для умов, за яких відсутні значні пошкодження поверхні у вигляді задирів, мікрорізання чи глибокого схоплювання. Незважаючи на відсутність помітних дефектів, у поверхневих шарах матеріалу поступово накопичуються внутрішні пошкодження, що з часом призводять до руйнування.

Під час тертя кожна мікронерівність поверхні діє як своєрідний індентор, який переміщується по контрповерхні та викликає локальну деформацію матеріалу. Перед мікровиступом матеріал зазнає стискаючих напружень, а позаду нього — розтягувальних, що виникають під дією сили тертя. У результаті кожна ділянка поверхневого шару багаторазово піддається циклічному навантаженню.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		16

Багаторазове чергування стиску та розтягу призводить до поступового накопичення мікропошкоджень у поверхневому шарі. Особливо небезпечними є розтягувальні напруження, які значно прискорюють процес утворення мікротріщин. Руйнування внаслідок втоми може виникати навіть за умов, коли прикладені напруження не перевищують межу пружності матеріалу.

Характерною особливістю втомного зношування є наявність прихованого періоду розвитку пошкоджень. На початкових стадіях у поверхневому шарі відсутні помітні зміни, однак усередині матеріалу поступово накопичуються дефекти структури. Лише після досягнення критичного рівня пошкоджень на поверхні з'являються мікротріщини, відшарування або викришування матеріалу, що свідчить про початок активного руйнування.

Таким чином, втомне зношування є результатом тривалого циклічного навантаження поверхневих шарів матеріалу та характеризується поступовим накопиченням структурних пошкоджень. Розуміння механізмів розвитку цього процесу має важливе значення для підвищення довговічності деталей машин, оптимізації режимів роботи вузлів тертя та створення матеріалів із підвищеною опірністю до циклічних навантажень.

Окиснювальне зношування виникає в умовах, коли на поверхнях тертя формуються оксидні плівки, які в процесі роботи періодично руйнуються та знову утворюються. У такому випадку основну частину продуктів зношування становлять саме оксиди металів. Незважаючи на те, що інтенсивність руйнування поверхонь може бути досить значною, шорсткість поверхні тертя зазвичай залишається невеликою. Це пояснюється тим, що оксидні плівки частково запобігають безпосередньому контакту металевих поверхонь і перешкоджають розвитку адгезійного схоплювання.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		17

Для розвитку окиснювального зношування необхідно, щоб проміжок часу між послідовними руйнуваннями оксидного шару був достатнім для формування нової захисної плівки певної товщини. На початкових стадіях тонка оксидна плівка є досить еластичною та виконує позитивну функцію — зменшує силу тертя, захищає поверхні від пошкодження та запобігає зварюванню ювенільних ділянок металу, особливо в умовах вакууму або обмеженого доступу кисню.

Проте в процесі подальшої експлуатації товщина оксидного шару поступово збільшується. Плівка стає більш крихкою, втрачає здатність до пластичної деформації та починає руйнуватися під дією механічних навантажень. Частинки зруйнованих оксидів можуть виноситися із зони контакту разом із мастильним матеріалом або накопичуватися між поверхнями тертя.

У деяких випадках продукти руйнування оксидної плівки самі стають причиною додаткового зношування. Оскільки оксидні частинки часто мають високу твердість, вони здатні діяти як абразив, викликаючи мікрорізання та пошкодження контактних поверхонь. Унаслідок цього окиснювальне зношування може супроводжуватися розвитком абразивних процесів, що прискорює руйнування деталей.

Процес окиснювального зношування є складним і включає одночасний перебіг механічних, фізичних та хімічних явищ. У зоні контакту відбуваються пластична деформація поверхневих шарів, адсорбція активних компонентів середовища та хімічні реакції окиснення. Усі ці процеси є взаємопов'язаними та взаємно впливають один на одного.

Пластична деформація поверхневого шару активізує матеріал і підвищує його хімічну активність. У деформованих ділянках збільшується кількість дефектів кристалічної структури, зростає густина дислокацій та утворюються локальні області з підвищеною внутрішньою енергією. Саме

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		18

ці структурно ослаблені зони найбільш інтенсивно взаємодіють з киснем або іншими активними компонентами навколишнього середовища.

Якщо в системі присутній мастильний матеріал, поверхневий шар може взаємодіяти з киснем, розчиненим у мастилі. Це сприяє прискореному формуванню оксидних сполук на поверхні тертя. Таким чином, швидкість окиснювального зношування значною мірою залежить не лише від механічного навантаження, але й від температури, складу середовища, наявності мастила та інтенсивності пластичної деформації поверхневих шарів.

Отже, окиснювальне зношування є складним багатостадійним процесом, що поєднує механічне руйнування та хімічну взаємодію поверхонь із навколишнім середовищем. Розуміння механізмів цього виду зношування має важливе значення для вибору матеріалів, мастильних композицій та захисних покриттів, здатних забезпечити підвищення довговічності вузлів тертя машин і механізмів.

1.3 Триботехнічні характеристики міді

Мідь належить до матеріалів, які широко застосовуються у вузлах тертя завдяки високій електропровідності, теплопровідності та добрим технологічним властивостям. Разом із тим для міді характерна підвищена схильність до адгезійної взаємодії під час тертя, що призводить до схоплювання поверхонь і перенесення матеріалу на контртіло. Інтенсивність цих процесів значною мірою залежить від матеріалу контактної пари, умов навантаження та параметрів ковзання.

Особливо інтенсивне перенесення матеріалу спостерігається при терті однакових металів. Для мідних пар тертя швидкість перенесення матеріалу та інтенсивність адгезійного зношування можуть бути у десятки разів вищими порівняно з парами, що складаються з різнорідних металів. Це пояснюється

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		19

високою хімічною спорідненістю контактуючих поверхонь, близькістю параметрів кристалічної ґратки та полегшеним утворенням міжатомних зв'язків у зоні контакту.

На триботехнічні властивості міді суттєво впливають режими тертя — величина навантаження, швидкість відносного переміщення поверхонь, температура та характеристики навколишнього середовища. Дослідження процесів тертя міді у парі зі сталлю показали, що збільшення швидкості ковзання та навантаження призводить до скорочення періоду припрацювання поверхонь, однак одночасно сприяє зростанню інтенсивності зношування.

Підвищення швидкості ковзання супроводжується локальним нагріванням контактних ділянок, унаслідок чого посилюється адгезійна взаємодія між поверхнями. Це викликає збільшення коефіцієнта тертя та активізує процеси перенесення металу. Водночас зі збільшенням навантаження фактична площа контакту між мікронерівностями поверхонь зростає, що також сприяє інтенсивнішому руйнуванню поверхневих шарів матеріалу.

Важливу роль у процесах зношування міді відіграє стан оксидних плівок на поверхні металу. За невеликих швидкостей ковзання оксидний шар може виконувати функцію своєрідного твердого мастила, зменшуючи безпосередній контакт металевих поверхонь і перешкоджаючи розвитку схоплювання. Однак зі збільшенням швидкості тертя та температури в зоні контакту оксидна плівка руйнується, після чого різко посилюється адгезійне зношування.

Порівняльні дослідження тертя міді з різними металами показують, що характер зношування значною мірою визначається фізико-механічними властивостями контртіла. Матеріали з високою пластичністю та значною взаємною розчинністю з міддю зазвичай демонструють нижчу зносостійкість через інтенсивне адгезійне схоплювання. Натомість твердіші матеріали з

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		20

високою міцністю та стабільними оксидними плівками здатні ефективніше протидіяти руйнуванню поверхонь навіть за підвищених навантажень.

Для міді характерним є переважно адгезійний механізм зношування. Під час тертя на поверхні можуть формуватися так звані нарости — локальні скупчення частинок металу, відірваних із контактної поверхні. Такі утворення періодично збільшуються, руйнуються та знову формуються в процесі ковзання. У результаті контакт між поверхнями відбувається не безпосередньо між основними матеріалами, а через сформований металевий наріст.

У процесі подальшого руху частина частинок наросту може відриватися та переноситися на іншу поверхню тертя, утворюючи нові осередки адгезійної взаємодії. Подібний механізм сприяє нестабільності коефіцієнта тертя та прискоренню руйнування поверхневих шарів матеріалу. Наявність мастильного середовища здатна суттєво зменшити інтенсивність цих процесів, оскільки мастило не лише розділяє контактуючі поверхні, але й обмежує зчеплення металевих частинок між собою.

Для вузлів тертя, що працюють в умовах вакууму або відкритого космічного простору, проблема адгезійного зношування міді є особливо актуальною. Відсутність стабільних оксидних плівок та неможливість використання традиційних рідких мастильних матеріалів призводять до різкого посилення схоплювання поверхонь. Саме тому одним із перспективних напрямів підвищення ресурсу мідних електроконтактних пар є застосування спеціальних антифрикційних і електропровідних покриттів.

Перспективним рішенням для покращення триботехнічних характеристик міді є використання композиційних покриттів на основі міді з додаванням твердих мастильних компонентів. Такі покриття дозволяють одночасно зберігати високу електропровідність матеріалу та зменшувати інтенсивність адгезійного зношування. Крім того, модифікація поверхні

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		21

сприяє стабілізації коефіцієнта тертя, зниженню температури в зоні контакту та збільшенню довговічності електроконтактних вузлів.

Таким чином, триботехнічні властивості міді визначаються складною взаємодією механічних, теплових та фізико-хімічних процесів, що відбуваються у зоні тертя. Дослідження механізмів зношування міді та способів підвищення її зносостійкості має важливе значення для створення надійних вузлів тертя, зокрема для систем, які працюють у складних умовах експлуатації, включаючи космічну техніку.

Отже, аналіз наведених у цьому розділі результатів дозволяє сформулювати основні закономірності процесу зношування міді в умовах тертя:

- Основним механізмом руйнування міді при взаємодії з більшістю металевих матеріалів є адгезійне зношування. У процесі тертя відбувається перенесення частинок міді з однієї поверхні на іншу, внаслідок чого формується контакт типу «мідь–мідь», що сприяє подальшому розвитку схоплювання та інтенсифікації зношування.

- Важливий вплив на характер зношування міді має навколишнє середовище. За умов вакууму переважають адгезійні процеси через відсутність захисних оксидних плівок на поверхні металу. У середовищах, що містять кисень, значну роль починає відігравати окиснювальне зношування, пов'язане з утворенням і руйнуванням оксидних шарів у зоні контакту.

- Пропускання електричного струму через зону тертя здатне суттєво змінювати механізм та інтенсивність зношування міді. В окиснювальному середовищі електричний струм активізує процеси окиснення контактуючих поверхонь, що призводить до збільшення швидкості окиснювального руйнування матеріалу. За високих значень сили струму на поверхні можуть виникати локальні ерозійні пошкодження, пов'язані з тепловою та електричною дією струму.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		22

- Під час роботи електроконтактних пар важливе значення має полярність контакту. В умовах окиснювального середовища більш інтенсивного зношування зазвичай зазнає катод, тоді як анод характеризується вищою стійкістю до руйнування. У нейтральному середовищі, зокрема в атмосфері аргону, вплив полярності на інтенсивність зношування проявляється значно слабше.

Таким чином, характер зношування міді визначається комплексною дією механічних, електричних та фізико-хімічних факторів. Розуміння цих закономірностей є необхідною умовою для розроблення ефективних способів підвищення зносостійкості мідних контактних пар, особливо для вузлів, що працюють у вакуумі, агресивних середовищах або під дією електричного струму.

1.4 Нанесення покриттів як спосіб підвищення зносостійкості

Відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя підвищення зносостійкості матеріалів може досягатися двома основними шляхами: збільшенням твердості контактних поверхонь та зменшенням адгезійної взаємодії між ними. Реалізація цих підходів дозволяє суттєво знизити інтенсивність руйнування поверхневих шарів у процесі тертя. На практиці це досягається шляхом нанесення твердих захисних покриттів або використання мастильних матеріалів, здатних зменшувати силу зчеплення між поверхнями тертя.

У сучасному матеріалознавстві значного розвитку набули надтверді нанокompatитні покриття, сформовані на основі різних елементних систем. Такі покриття зазвичай складаються з нанокристалічних зерен, розміщених в аморфній матриці, що забезпечує поєднання високої твердості та відносної тріщиностійкості. Завдяки цим властивостям подібні покриття

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		23

розглядаються як перспективні матеріали для захисту вузлів тертя, у тому числі електроконтактних систем.

Серед досліджуваних захисних покриттів особливу увагу привертають боридні та карбідні системи, які характеризуються високою твердістю та підвищеною стійкістю до механічного руйнування. У ряді досліджень для електроконтактних пар тертя розглядалися надтверді покриття на основі сполук ніобію та бору, отримані методом магнетронного напилення. Такі покриття демонстрували високі значення твердості та низький коефіцієнт тертя завдяки формуванню на поверхні тонких оксидних шарів під час роботи.

Проте використання надтвердих покриттів в електроконтактних системах має певні обмеження. Однією з головних проблем є їхній підвищений електричний опір, що ускладнює застосування в струмознімальних вузлах. Крім того, руйнування твердого покриття може супроводжуватися утворенням твердих частинок зношування. Такі частинки потрапляють у зону контакту та діють як абразивний матеріал.

У випадку, коли трибопара виготовлена з м'яких металів, наявність твердих незакріплених частинок у зоні тертя може призводити до розвитку абразивного зношування. Це значно прискорює руйнування поверхонь і спричиняє інтенсивне пошкодження матеріалу контактних деталей. Саме тому для м'яких металів, зокрема міді, не завжди доцільно використовувати виключно надтверді захисні покриття.

Згідно з сучасними уявленнями про механізми тертя, для підвищення довговічності м'яких металів більш ефективним підходом є зниження адгезійної взаємодії між контактуючими поверхнями. З цією метою широко застосовуються різноманітні мастильні матеріали, які формують на поверхні захисний шар та запобігають безпосередньому контакту металів.

Для вузлів тертя, що працюють у складних умовах експлуатації — при високому вакуумі, значних навантаженнях, великих швидкостях

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ доквм	Пілпис	Дата		24

ковзання або екстремальних температурах — традиційні рідкі мастильні матеріали часто виявляються малоефективними. У таких умовах використовують тверді мастильні матеріали, які здатні забезпечувати стабільні антифрикційні властивості навіть за відсутності рідкого мастильного середовища.

Твердомастильні матеріали умовно поділяють на декілька основних груп:

- матеріали на основі вуглецю;
- дихалькогеніди перехідних металів;
- полімерні матеріали;
- м'які метали.

До вуглецевих твердих мастил належать графіт, алмазоподібний вуглець (DLC) та нанокристалічний алмаз. Одним із найбільш відомих представників цієї групи є графіт. Його кристалічна структура має шарувату будову, у якій атоми вуглецю всередині площин зв'язані міцними ковалентними зв'язками, а між окремими шарами діють слабкі міжмолекулярні сили.

Завдяки такій структурі шари графіту можуть легко зміщуватися один відносно одного під дією навантаження, що забезпечує низький опір зсуву та добрі антифрикційні властивості. Саме можливість міжшарового ковзання обумовлює ефективність графіту як твердого мастильного матеріалу.

На ефективність роботи графіту суттєво впливає навколишнє середовище. Наявність водяної пари або кисню сприяє пасивації активних поверхневих зв'язків і зменшує адгезійну взаємодію між шарами. Якщо ж поверхня графіту пошкоджується, на її краях утворюються активні ділянки з незадоволеними ковалентними зв'язками, що може призводити до збільшення адгезії між шарами та погіршення антифрикційних властивостей.

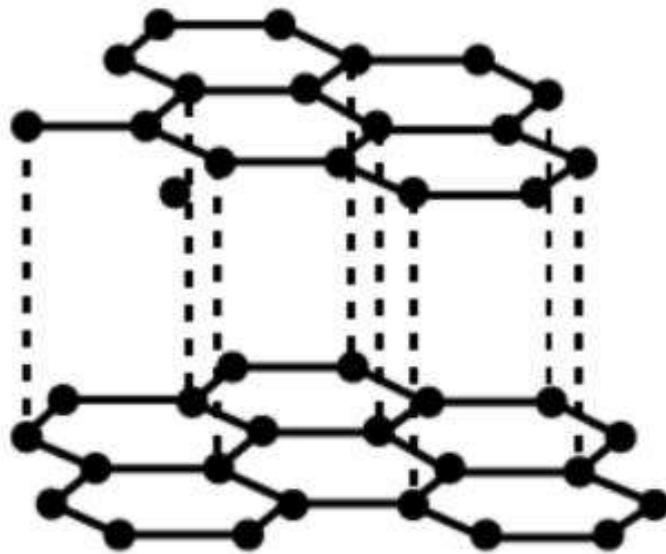
					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		25

У вакуумі або сухому середовищі, де відсутні адсорбовані гази та волога, графіт без додаткових присадок демонструє значно вищий коефіцієнт тертя. Це пов'язано з тим, що активні поверхневі зв'язки залишаються непасивованими, а міжшарове ковзання ускладнюється. Саме тому для умов космічного простору або високого вакууму графіт не завжди є ефективним мастильним матеріалом.

На відміну від графіту, дихалькогеніди перехідних металів здатні забезпечувати низький коефіцієнт тертя навіть у вакуумі. Завдяки цьому вони є перспективними компонентами для створення електропровідних антифрикційних покриттів, призначених для роботи в екстремальних умовах експлуатації.

Таким чином, вибір способу підвищення зносостійкості матеріалів повинен враховувати не лише механічні характеристики покриттів, але й умови роботи вузла тертя, електропровідність матеріалів, стабільність мастильного шару та можливість утворення абразивних продуктів зношування. Для мідних електроконтактних пар особливо перспективним є поєднання електропровідних покриттів із твердомастильними компонентами, здатними зменшувати адгезійне схоплювання та підвищувати ресурс роботи контактних поверхонь.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		26



graphite

Рисунок 1.3 –Графічне зображення структури графіта

Серед твердомастильних матеріалів на основі дихалькогенідів перехідних металів найбільшого поширення набули дисульфід молібдену (MoS_2) та дисульфід вольфраму (WS_2), які відзначаються високими антифрикційними властивостями. Завдяки здатності забезпечувати стабільне змащування в умовах вакууму ці матеріали широко використовуються у вузлах тертя, призначених для роботи у відкритому космічному просторі, де застосування традиційних рідких мастил є неможливим.

Високі мастильні властивості MoS_2 та WS_2 обумовлені особливостями їхньої кристалічної будови. Дисульфід молібдену має шарувату гексагональну структуру, в якій шар атомів молібдену розташований між двома шарами атомів сірки. Подібна будова формує

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		27

окремі ламелі типу S–Mo–S, що характеризуються міцними внутрішніми ковалентними зв'язками.

Водночас між сусідніми шарами діють лише слабкі міжмолекулярні сили Ван-дер-Ваальса. Саме через це опір зсуву між окремими шарами є дуже незначним. Під дією навантаження та сили тертя базальні площини легко зміщуються одна відносно одної, забезпечуючи низький коефіцієнт тертя та стабільну роботу вузла.

У процесі тертя шари дисульфіду молібдену поступово орієнтуються у напрямку ковзання, що додатково зменшує опір переміщенню поверхонь. Одночасно на контрповерхні формується тонка плівка перенесення, яка також бере участь у зниженні тертя та запобігає безпосередньому контакту металевих поверхонь.

Таким чином, основними механізмами забезпечення низького опору зсуву в покриттях на основі MoS₂ і WS₂ є:

формування базальних площин, орієнтованих паралельно напрямку ковзання;

переорієнтація кристалічних шарів у процесі тертя;

утворення плівки перенесення на поверхні контртіла.

Здатність дисульфіду молібдену та дисульфіду вольфраму формувати плівку перенесення має важливе практичне значення. Для забезпечення низького коефіцієнта тертя достатньо нанесення покриття лише на одну з контактуючих поверхонь. Після короткого періоду припрацювання мастильна плівка переноситься на контртіло, утворюючи стабільний антифрикційний шар у зоні контакту.

Ще однією важливою перевагою таких покриттів є відсутність необхідності у формуванні ідеально кристалічної структури під час осадження. Навіть якщо покриття спочатку має аморфний або хаотично

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		28

орієнтований стан, у процесі тертя під дією контактних напружень може відбуватися його структурна перебудова.

Експериментальні дослідження показали, що фрикційні навантаження здатні викликати кристалізацію аморфних покриттів на основі MoS_2 або змінювати орієнтацію кристалічних площин у вже сформованих покриттях. У процесі ковзання базальні площини поступово переорієнтовуються паралельно напрямку руху, що сприяє зменшенню сили тертя та стабілізації трибологічних характеристик.

У випадку аморфних покриттів під дією тертя може відбуватися утворення впорядкованої шаруватої структури, яка набуває властивостей, характерних для кристалічного дисульфіду молібдену. Така самоорганізація поверхневого шару є важливим фактором, що забезпечує ефективність твердомастильних покриттів у складних умовах експлуатації.

Особливу цінність покриття на основі MoS_2 та WS_2 мають для космічної техніки, вакуумних систем та електроконтактних вузлів. У таких умовах вони здатні забезпечувати стабільне змащування, знижувати інтенсивність адгезійного зношування та підвищувати ресурс роботи трибологічних систем.

Для електроконтактних пар тертя перспективним напрямом є створення композиційних покриттів на основі дисульфіду молібдену з додаванням електропровідних компонентів, зокрема міді. Подібні системи дозволяють поєднати високі антифрикційні властивості твердого мастила з необхідною електропровідністю, що є особливо важливим для струмознімальних вузлів космічних апаратів та іншого спеціалізованого обладнання.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		29

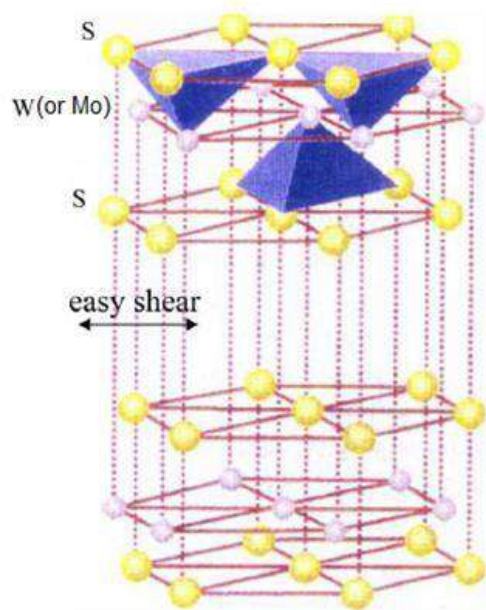


Рисунок 1.4 – Кристалічна структура дисульфіду молібдену

На трибологічні властивості дихалькогенідів перехідних металів суттєво впливають умови навколишнього середовища. Покриття на основі дисульфіду молібдену (MoS_2) та дисульфіду вольфраму (WS_2) демонструють надзвичайно низький коефіцієнт тертя — близько 0,05 або навіть менше — під час роботи у сухих інертних газах або в умовах надвисокого вакууму. За таких умов матеріал практично не піддається окисненню та не взаємодіє з молекулами водяної пари, завдяки чому зберігаються його високі мастильні властивості та забезпечується тривалий ресурс роботи, який може становити мільйони циклів ковзання.

У вологому повітрі триботехнічні характеристики цих покриттів суттєво погіршуються. Коефіцієнт тертя зазвичай зростає до 0,15–0,2, а довговічність покриттів різко зменшується. У багатьох випадках руйнування антифрикційного шару відбувається вже після кількох тисяч циклів тертя.

Негативний вплив вологості пояснюється взаємодією водяної пари з поверхнею покриття. Спочатку молекули води адсорбуються на поверхні

дисульфідного шару, після чого можуть проникати всередину матеріалу через дефекти кристалічної структури. Наявність води в міжшаровому просторі змінює фізико-хімічні властивості покриття та впливає на процес міжшарового ковзання.

Установлено, що молекули води здатні накопичуватися в структурних дефектах кристалічної ґратки MoS_2 . Це змінює міцність зв'язків між базальними площинами та впливає на їхню здатність до взаємного зміщення. Крім того, проникнення води в міжшарові проміжки може призводити до збільшення адгезії між сусідніми ламелями, що ускладнює ковзання шарів один відносно одного та спричиняє зростання сили тертя.

Погіршення трибологічних характеристик у вологому середовищі також пов'язане з хімічними реакціями на краях базальних площин. Активні валентні зв'язки, які утворюються на пошкоджених або відкритих ділянках шарів, взаємодіють із киснем і водяною парою навколишнього середовища. У результаті відбувається окиснення матеріалу та формування оксидних сполук, таких як оксид молібдену (MoO_3) або оксид вольфраму (WO_3).

Утворення оксидних фаз негативно впливає на мастильні властивості покриття, оскільки оксиди мають вищий опір зсуву порівняно з шаруватою структурою дихалькогенідів. Це призводить до збільшення коефіцієнта тертя, прискорення руйнування поверхневого шару та скорочення терміну служби покриття.

Для покращення експлуатаційних характеристик покриттів на основі MoS_2 та WS_2 у вологому середовищі застосовують різні методи модифікації їх структури. Одним із перспективних напрямів є легування покриттів металевими компонентами або створення композиційних

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		31

систем, здатних підвищувати стійкість матеріалу до окиснення та зменшувати проникнення вологи в структуру покриття.

Особливо актуальним є використання таких модифікованих покриттів у вузлах тертя космічної техніки, вакуумного обладнання та електроконтактних систем, де необхідно поєднати низький коефіцієнт тертя, високу зносостійкість і стабільність властивостей за різних умов навколишнього середовища.

1.5 Формулювання завдань та мети дослідження

Аналіз наукових джерел показав, що для міді при терті з більшістю конструкційних матеріалів основним механізмом руйнування є адгезійне зношування. У процесі контактної взаємодії відбувається перенесення частинок міді на поверхню твердішого контртіла, після чого подальше тертя фактично проходить за схемою «мідь–мідь». Такий характер взаємодії супроводжується інтенсивним схоплюванням поверхонь та значним зростанням швидкості зношування.

Найбільш несприятливі умови для роботи мідних пар тертя спостерігаються у вакуумі або в середовищі інертних газів. За відсутності кисню на поверхні не формуються стабільні оксидні плівки, які в звичайних умовах частково зменшують адгезійну взаємодію між металами. Унаслідок цього в безкисневому середовищі адгезійне схоплювання стає домінуючим процесом. Водночас у повітрі або інших окиснювальних середовищах значну роль може відігравати окиснювальне зношування, пов'язане з формуванням та руйнуванням оксидних шарів на поверхні металу.

Відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя підвищення зносостійкості матеріалів можливе двома основними способами: шляхом

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		32

збільшення твердості контактних поверхонь або за рахунок зменшення адгезійної взаємодії між ними. Практична реалізація цих підходів передбачає нанесення захисних покриттів або використання мастильних матеріалів, здатних знижувати силу зчеплення між поверхнями тертя.

Сучасні вакуумні методи осадження дозволяють формувати надтверді покриття на поверхні різних металів. Проте у випадку мідних трибосистем використання таких покриттів має певні обмеження. Якщо надтверде покриття наноситься на мідний зразок, який працює у парі з мідним контртілом, це може спричинити інтенсивне руйнування м'якшої контактної поверхні. Крім того, у процесі зношування тверді частинки покриття можуть виконувати роль вільного абразиву, що призводить до додаткового абразивного пошкодження міді та прискореного руйнування поверхневих шарів.

З огляду на це для підвищення довговічності мідних пар тертя доцільніше не збільшувати твердість поверхні, а зменшувати силу адгезійної взаємодії між контактуючими матеріалами. Одним із найбільш перспективних способів вирішення цієї задачі є застосування твердомастильних покриттів.

Серед твердомастильних матеріалів особливий інтерес становлять дихалькогеніди перехідних металів, зокрема дисульфід молібдену. У вакуумі та в атмосфері інертних газів такі покриття характеризуються низьким коефіцієнтом тертя та високою зносостійкістю. Під час роботи на поверхні контртіла формується тонка плівка перенесення, яка має низький опір зсуву та забезпечує стабільне ковзання поверхонь.

Важливою перевагою дисульфиду молібдену є те, що для ефективного змащування достатньо нанесення покриття лише на одну контактну поверхню. Після припрацювання частина матеріалу переноситься на контртіло, формуючи антифрикційний шар, який зменшує адгезійне схоплювання та стабілізує процес тертя.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		33

Разом із тим застосування чистого дисульфиду молібдену в електроконтактних вузлах є обмеженим через його високий питомий електричний опір. Для струмознімальних систем це є суттєвим недоліком, оскільки матеріал повинен поєднувати добрі антифрикційні властивості з достатньою електропровідністю.

Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є модифікація дисульфиду молібдену міддю. Створення композиційного покриття системи Cu–Mo–S дозволяє поєднати електропровідність металевої фази з мастильними властивостями дисульфиду молібдену. Подібні покриття можуть бути ефективними для електроконтактних вузлів тертя, що працюють у складних умовах, зокрема у відкритому космічному просторі.

Нанесення таких покриттів може здійснюватися методом магнетронного розпилення композиційної мішені, що містить мідь та дисульфід молібдену. Використання цього методу забезпечує можливість отримання тонких рівномірних покриттів із контрольованим складом, структурою та товщиною.

Для об'єктивної оцінки триботехнічних характеристик мідних матеріалів доцільно проводити випробування у безкисневому середовищі, що дозволяє моделювати умови вакууму та мінімізувати вплив вологи й кисню на процеси тертя. Одним із найбільш ефективних способів моделювання таких умов є проведення трибологічних досліджень в атмосфері інертного газу. Проте достовірність такого підходу потребує підтвердження шляхом порівняльних випробувань у різних газових середовищах та у вакуумі.

У зв'язку з цим метою даної роботи є дослідження впливу покриттів на основі системи Cu–Mo–S та умов навколишнього середовища на зношування мідної пари тертя.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		34

- 1 Дослідити закономірності іонно-магнетронного формування покриттів системи Cu–Mo–S, визначити їхній хімічний склад, структуру та електропровідність.
- 2 Вивчити особливості зношування мідних зразків без покриття та з покриттям Cu–Mo–S при роботі в парі з мідним контртілом в атмосфері аргону за тиску 1×10^5 Па та у вакуумі при залишковому тиску газів не вище 5×10^{-3} Па.
- 3 Дослідити вплив товщини та компонентного складу покриття на зносостійкість мідної пари тертя та визначити оптимальні параметри покриттів для роботи в умовах вакууму та інертного середовища.

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		35

2 Матеріали та методи дослідження

2.1 Матеріали, використані для дослідження

У даній роботі як експериментальні зразки використовувалися мідні паралелепіпеди розміром $5 \times 5 \times 15$ мм, виготовлені з листової міді марки М1. Вибір міді як основного матеріалу для досліджень обумовлений її фізико-механічними властивостями, які є близькими до характеристик матеріалів, що застосовуються у струмознімальних вузлах обертових контактних систем.

Мідь є пластичним електропровідним металом із високою теплопровідністю та стабільними електричними характеристиками, тому вона широко використовується для виготовлення контактних елементів, щіток і струмопровідних деталей. Саме ці властивості роблять її придатною для моделювання процесів тертя та зношування, характерних для електроконтактних пар.

Додатковою перевагою використання міді марки М1 є її висока чистота та однорідність структури, що дозволяє зменшити вплив сторонніх домішок на результати трибологічних досліджень. Крім того, цей матеріал є доступним для механічної обробки та забезпечує можливість отримання зразків із необхідними геометричними параметрами та якістю поверхні.

Хімічний склад міді марки М1 наведений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Хімічний склад (%) матеріала що досліджувався

Cu, не мень ше	Домішки, не більше									
	Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	O	Sb	Bi	Sn
99,9	0,005	0,003	0,002	0,004	0,003	0,003	0,04	0,003	0,002	0,001

2.2 Магнетронне осадження композитних покриттів в основі яких $Cu_xMo_yS_z$

Покриття на основі системи $Cu_xMo_yS_z$ наносили на робочу поверхню експериментальних зразків у вакуумній камері установки магнетронного осадження, призначеної для формування тонкоплівкових функціональних покриттів. Для проведення процесу використовувалась лабораторна установка магнетронного розпилення типу Kurt J. Lesker PVD 75, що широко застосовується у наукових дослідженнях для отримання зносостійких та композиційних покриттів (рис. 2.1).

Використання магнетронного методу осадження дозволяє формувати рівномірні покриття з контрольованими параметрами товщини, структури та хімічного складу. Крім того, дана технологія забезпечує високу адгезію покриття до поверхні підкладки та можливість отримання багатокомпонентних плівок із заданими триботехнічними й електрофізичними властивостями.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Дпк
Змн	Дпк	№ докум	Підпис	Дата		37



Рисунок 2.1 – Установка магнетронного розпилення типу Kurt J. Lesker PVD 75

Камера установки магнетронного осадження Kurt J. Lesker Company типу PVD 75 була оснащена магнетронною розпилювальною системою з композиційною мішенню Cu–Mo–S, обертовим тримачем зразків та системою водяного охолодження і нагріву, що забезпечувала підтримання необхідних температурних умов під час вакуумування та процесу осадження покриттів.

Покриття системи Cu–Mo–S формували методом імпульсного магнетронного розпилення. Суть цього методу полягає у передачі імпульсу від високоенергетичних іонів робочого газу до атомів поверхні мішені. Під дією електричного поля позитивно заряджені іони аргону Ar^+

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Анк
Змн	Анк	№ докум	Пілпис	Дата		38

прискорюються та бомбардують поверхню негативно зарядженої мішені, унаслідок чого з неї вибиваються атоми матеріалу, які надалі осаджуються на поверхню зразка з утворенням покриття.

Як робоче середовище використовували аргон, оскільки він є хімічно інертним щодо матеріалів мішені та не вступає у взаємодію з компонентами покриття. Крім того, значна атомна маса аргону забезпечує ефективне розпилення поверхні мішені та стабільність процесу осадження.

Основними елементами магнетронної розпилювальної системи є катод-мішень, анод та магнітна система, схема якої наведена на рис. 2.2. Магнітне поле формується таким чином, що його силові лінії замикаються між полюсами магнітів поблизу поверхні мішені. У зоні проходження цих ліній формується область найбільш інтенсивного розпилення, яка має характерну замкнену конфігурацію. Геометрія цієї зони визначається конструкцією магнітної системи та параметрами магнітного поля.

Під час подачі постійної напруги між мішенню, яка має від'ємний потенціал, та анодом, що знаходиться під нульовим або додатним потенціалом, у камері виникає неоднорідне електричне поле. За таких умов формується аномальний тліючий розряд і утворюється плазма.

Наявність локалізованого магнітного поля поблизу поверхні мішені забезпечує утримання електронів у приповерхневій області. Це сприяє підвищенню густини плазми безпосередньо біля мішені та збільшує ефективність іонізації робочого газу. У результаті підвищується інтенсивність розпилення матеріалу та забезпечується стабільне формування покриттів із заданими властивостями.

Використання імпульсного магнетронного розпилення дозволяє отримувати рівномірні композиційні покриття системи Cu–Mo–S із високою адгезією до мідної підкладки, контрольованою товщиною та необхідними триботехнічними й електропровідними характеристиками.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		39

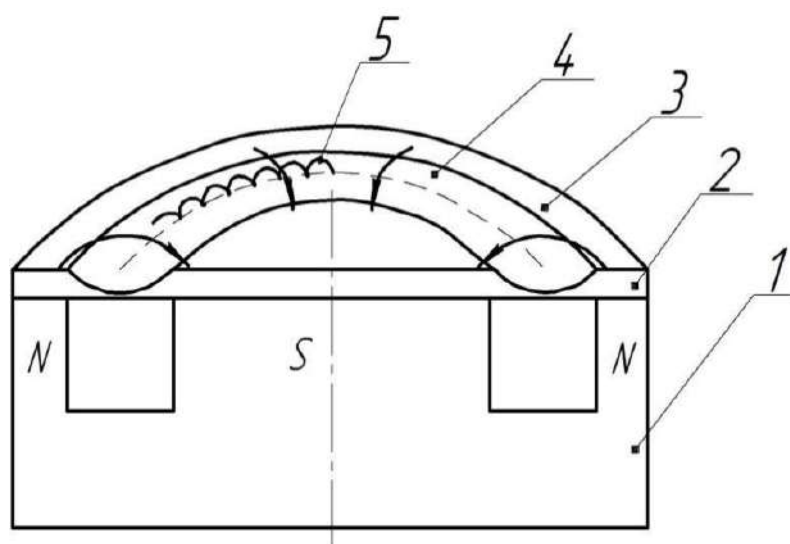


Рисунок 2.2 – Схема магнетронної системи розпилення з плоскою мішенню: 1 – магнітна система; 2 – катод-мішень; 3 – лінії магнітного поля; 4 – область ерозійного зношування поверхні катода; 5 – траєкторія руху електрона.

Електрони, які вибиваються з поверхні катода внаслідок бомбардування іонами робочого газу та прискорюються електричним полем, потрапляють під дію магнітного поля магнетронної системи. У приповерхневій зоні мішені вони рухаються складними циклоїдальними траєкторіями вздовж замкнених магнітних ліній.

Під впливом магнітного поля електрони утримуються поблизу поверхні катода, утворюючи своєрідну «магнітну пастку». З одного боку, магнітне поле повертає електрони до поверхні мішені, а з іншого — негативний потенціал катода перешкоджає їх віддаленню. Унаслідок цього електрони тривалий час залишаються в області розряду та багаторазово взаємодіють з атомами робочого газу.

Під час таких зіткнень відбуваються процеси іонізації та збудження атомів аргону. Енергія електронів переважно витрачається саме на підтримання плазмового розряду, що суттєво підвищує ефективність іонізації газового середовища. У результаті поблизу поверхні катода формується висока концентрація позитивно заряджених іонів.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ док.м	Піліпс	Дата		40

Збільшення кількості іонів у зоні розряду приводить до інтенсифікації іонного бомбардування мішені. Це, своєю чергою, сприяє зростанню швидкості розпилення матеріалу та підвищенню інтенсивності осадження покриття на поверхню зразків.

Живлення магнетронної системи установки Kurt J. Lesker Company PVD 75 здійснювалося за допомогою імпульсного біполярного джерела живлення, яке забезпечувало можливість роботи в режимах стабілізації струму, напруги або потужності залежно від параметрів процесу осадження.

Вакуумування робочої камери установки Kurt J. Lesker Company PVD 75 здійснювалося за двоступеневою схемою. Попереднє розрідження створювали за допомогою форвакуумної насосної системи, після чого до роботи підключався високовакуумний турбомолекулярний насос, який забезпечував досягнення необхідного рівня вакууму для проведення процесу магнетронного осадження.

Установка була обладнана системою подачі робочих та реактивних газів. Регулювання подачі газового середовища здійснювалося за допомогою електромагнітних клапанів, автоматичного натікача та електронного блоку керування. Система могла працювати як у ручному режимі, так і в автоматичному режимі підтримання заданого тиску в робочій камері.

Під час автоматичного керування витрата газу змінювалася відповідно до значення тиску у вакуумній камері, що дозволяло забезпечувати стабільність умов осадження покриттів. Контроль тиску в камері здійснювався за допомогою вакуумметра цифрового типу.

Для формування рівномірного потоку атомів компонентів покриття на магнетронне розпилювальне пристрої встановлювали спеціально виготовлену композиційну мішень діаметром 120 мм. Конструкція мішені

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		41

забезпечувала стабільне розпилення компонентів системи Cu–Mo–S та отримання однорідних покриттів із заданим хімічним складом.



Рисунок 2.3 Композиційна мішень Cu–MoS₂

Мішень являла собою мідний диск із листової міді марки М1 діаметром Ø120 мм, у якому були виконані кільцеві концентричні канавки. У ці канавки запресовували порошок дисульфиду молібдену. Магнітна система була спроектована таким чином, щоб зона розпилення мішені проходила вздовж концентричних канавок із MoS₂.

Завдяки розпиленню іонами аргону такої мішені забезпечувалося формування однорідного потоку атомів Cu, Mo та S. Зміною конфігурації магнітного поля магнетрона, режимів розпилення, а також кількості та ширини концентричних канавок можна регулювати хімічний склад отриманого покриття системи Cu–Mo–S.

Технологічний процес магнетронного нанесення покриття включав такі етапи:

1.1 промивання та сушіння експериментальних зразків;

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		42

- 1.2 прогрів стінок вакуумної камери до 60–80 °С для запобігання конденсації та видалення парів води, а також для дегазації під час відкачування;
- 1.3 завантаження зразків у вакуумну камеру за допомогою технологічної оснастки;
- 1.4 відкачування камери форвакуумним насосом до тиску не вище 6,65 Па;
- 1.5 подальше відкачування до $5 \cdot 10^{-3}$ Па за допомогою високовакуумного паромасляного насоса;
- 1.6 встановлення робочого тиску аргону на рівні 0,3 Па за допомогою регуляторів витрати газу;
- 1.7 увімкнення магнетрона та вихід на робочий режим розпилення;
- 1.8 проведення осадження покриття до досягнення необхідної товщини;
- 1.9 вимкнення магнетрона та подачі газу, витримка для охолодження магнетрона, камери та зразків;
- 1.10 напуск повітря в камеру та вивантаження зразків.
- 1.11 Покриття системи Cu–Mo–S наносили на мідні зразки відповідно до режиму, наведеного в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Режими нанесення покриттів Cu–Mo–S.

Параметр	Значення
Потужність	0,45 кВ
Сила струму	0,8 А
Напруга	550 В
Режим стабілізації	по потужності
Частота	60 кГц
Довготривалі імпульси	4 мкс
Тиск аргону	0,3 Па
Відстань від мішені до робочої зони зразкі	70 мм

2.3 Проведення триботехнічних випробувань

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Дпк
Змн	Дпк	№ док.м	Підпис	Дата		43

Випробування на зношування проводили на спеціально розробленому випробувальному стенді в атмосфері аргону за тиску 1×10^5 Па або у вакуумі при залишковому тиску газів не вище 5×10^{-3} Па (рис. 2.4). У першому випадку установка розміщувалася в герметичному прозорому боксі, заповненому аргоном, у другому — у вакуумній камері.

Для побудови кривих зношування використовували результати випробувань 4–6 зразків у кожній точці експерименту, після чого визначали середнє значення та стандартне відхилення.

Випробування іонно-імплантованих зразків та зразків із покриттям системи Cu–Mo–S проводили у парі з мідним контртілом діаметром $\varnothing 40$ мм із міді марки М1. Дослідження здійснювали при нормальному навантаженні 0,4 Н та швидкості ковзання 0,5 м/с в умовах сухого тертя за кімнатної температури за схемою «вал–колодка», де досліджувані матеріали виконували роль колодки (рис. 2.5).

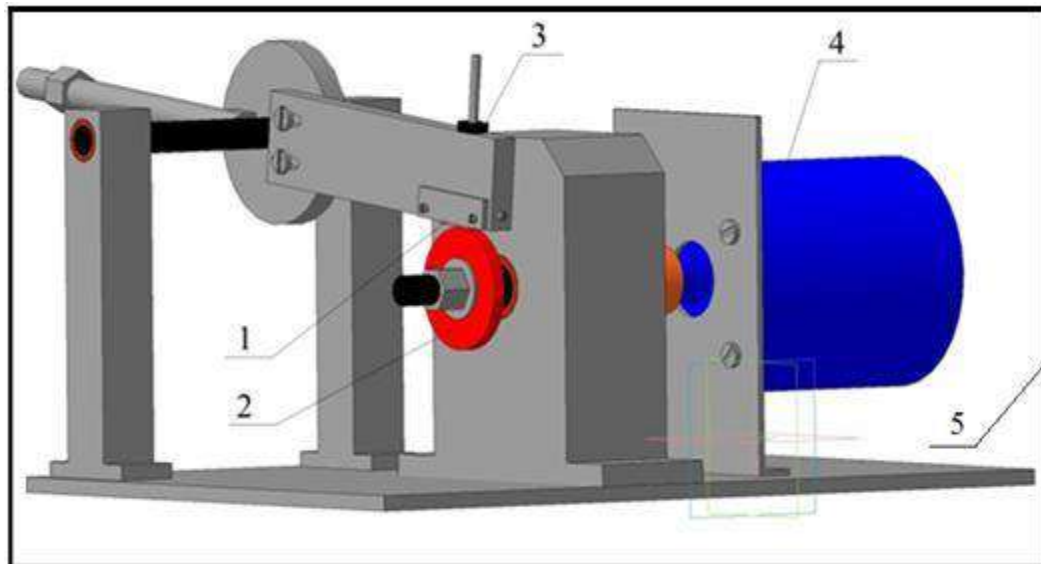


Рисунок 2.4 – Схема випробувального стенда для дослідження зношування: 1 – зразок; 2 – контртіло; 3 – навантажувальний вантаж; 4 – електродвигун; 5 – стінки резервуара з аргоном або вакуумної камери.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ док.м	Піппис	Дата		44

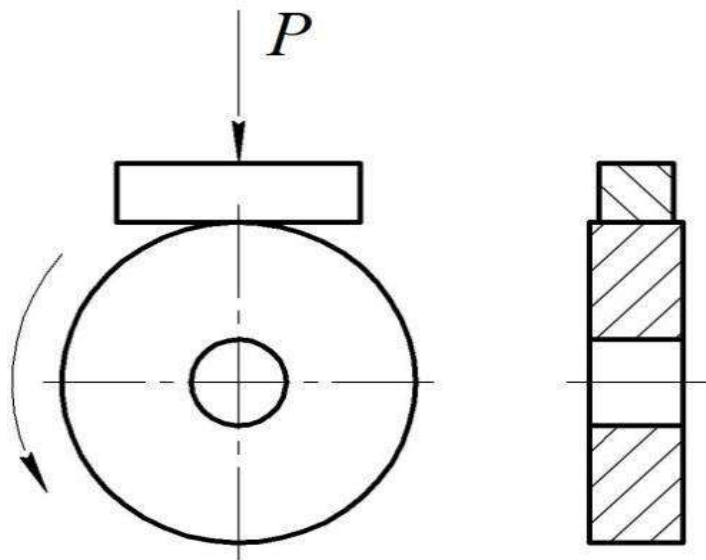


Рисунок 2.5 – Схема випробувань зразків на тертя та зношування за схемою «обертовий вал – закріплена колодка».

Режими випробувань на зношування являли собою методику прискорених лабораторних досліджень, що моделюють роботу обертових електроконтактних вузлів, які забезпечують передачу електричного сигналу між рухомими частинами механізмів та зовнішніми обертовими елементами різного призначення.

Випробування зразків із покриттям Cu_xMo_ySz проводили протягом часу t в інтервалі від 0,5 до 140 годин. Про завершення початкової стадії руйнування покриття свідчила поява частинок зношування мідного кольору, що відповідало масовому зносу приблизно 5 мг. Визначення масового зносу виконували шляхом зважування на аналітичних вагах ВЛР-200 з точністю $\pm 0,1$ мг.

Умовний ресурс роботи покриття заданої товщини визначали на трибологічному стенді (рис. 2.5). Критерієм вважали момент часу, коли у зоні контакту з'являлися перші мікрочастинки міді, що передували інтенсивному відшаруванню матеріалу та переходу від режиму переважно втомного зношування до адгезійного руйнування без захисного покриття.

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ док.м	Підпис	Дата		45

Випробування мідної пари для визначення коефіцієнта тертя проводили на трибометричній установці типу СМТ-1 tribometer system за схемою «обертний диск – нерухомий зразок». Контртілом слугував мідний диск діаметром Ø50 мм із міді марки М1, закріплений на обертному валу. Як зразок використовували паралелепіпед розміром 5×5×15 мм з робочою поверхнею 5×15 мм.

Процес тертя здійснювали в повітряному середовищі за відносної вологості не більше 50% у режимі сухого ковзання при лінійній швидкості 0,1 м/с та навантаженні 49 Н. Результати випробувань фіксували у вигляді залежності моменту тертя від часу за допомогою реєструвального пристрою, після чого виконували перерахунок у значення коефіцієнта тертя.

Робочу циліндричну поверхню контртіла перед випробуваннями додатково обробляли точінням до досягнення шорсткості $R_a = 0,32$ мкм для забезпечення стабільних умов контакту під час проведення трибологічних досліджень.

2.4 Дослідження електричних характеристик покриттів

Питомий електричний опір осаджених покриттів визначали чотиризондовим методом із використанням спеціально розробленої вимірювальної установки, що включала джерело постійного струму Б5-45А, цифровий мультиметр MASTECH MS8050 та вимірювальний датчик із чотирма голчастими зондами.

Для проведення вимірювань електричного опору покриття наносили на скляні підкладки. Після завершення експерименту виконували поперечний скол зразка зі скляною пластиною та покриттям, після чого товщину осадженого шару визначали за допомогою растрового електронного мікроскопа.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ доквм	Пілпис	Дата		46

Питомий електричний опір покриття ρ розраховували за відповідною розрахунковою залежністю :

$$\rho = 4,53 \cdot \frac{U}{I} \cdot d, \quad (2.1)$$

Де U – показник напруження між внутрішніми зондами, I – сила струму що пропускається, d – товщина покриття.

2.5 Аналіз мікроструктури та хімічного складу покриття

Дослідження морфології поверхні зразків, мікроструктури та хімічного складу покриттів виконували методами сканувальної електронної мікроскопії (SEM) із використанням сучасного електронного мікроскопа європейського класу Thermo Fisher Scientific Phenom XL. За допомогою SEM також визначали товщину осаджених покриттів на поперечних шліфах зразків.

Базова конфігурація сканувального електронного мікроскопа включає:

- 1.1 електронну колонку з термоемісійним катодом;
- 1.2 вакуумну камеру з предметним столиком, що має п'ять ступенів свободи;
- 1.3 високовакуумну насосну систему;
- 1.4 керуючий комп'ютерний модуль з програмним забезпеченням для обробки зображень;
- 1.5 систему точного позиціонування зразка (джойстикове керування).
- 1.6 Формування зображення в SEM здійснюється за рахунок реєстрації сигналів вторинних та відбитих електронів.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		47

Вторинна електронна емісія являє собою процес випромінювання електронів із поверхні твердого тіла під дією електронного пучка. Зміна інтенсивності цього сигналу пов'язана як із рельєфом поверхні, так і з локальними відмінностями складу матеріалу, що дозволяє отримувати детальну інформацію про мікроструктуру зразка. Первинні електрони, взаємодіючи з атомами матеріалу, передають їм частину енергії, що призводить до іонізації та утворення вторинних електронів, які виходять із поверхні. Саме цей тип сигналу забезпечує найвищу просторову роздільну здатність і є основним джерелом інформації про топографію поверхні.

Другим важливим сигналом є електрони зворотного розсіювання. Вони утворюються внаслідок пружного та багаторазового розсіювання первинного електронного пучка на атомах зразка. Їх інтенсивність залежить від атомного номера елементів, що дозволяє проводити контрастне розрізнення фаз із різним хімічним складом. Для елементів із більшим атомним номером ймовірність відбиття електронів є вищою, що формує більш яскравий контраст на зображенні.

SEM також дозволяв проводити мікроаналіз елементного складу за допомогою енергодисперсійної спектроскопії (EDS) із використанням сучасного спектрометричного модуля Oxford Instruments AZtec EDS. Метод ґрунтується на реєстрації характеристичного рентгенівського випромінювання, що виникає під час взаємодії електронного пучка зі зразком.

Отриманий сигнал перетворюється в електричний імпульс, який надходить до системи обробки даних. Програмне забезпечення формує енергетичний спектр, у якому кожен пік відповідає певному хімічному елементу. Це дозволяє проводити як якісний, так і кількісний аналіз складу покриттів із урахуванням поправок на поглинання та матричні ефекти.

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		48

Таким чином, використані методи SEM/EDS забезпечують комплексне дослідження поверхні, мікроструктури та локального хімічного складу покриттів із високою просторовою роздільною здатністю.

Мікрозонд, що використовується для елементного аналізу, складається з таких основних вузлів:

- електронно-оптичної системи формування сфокусованого електронного пучка малого діаметра, яка включає електронну гармату та систему електронних лінз;
- двох рентгенівських спектрометрів, призначених для визначення довжини хвилі та інтенсивності характеристичного рентгенівського випромінювання;
- оптичної системи спостереження (світлового мікроскопа) для вибору ділянки зразка, що підлягає аналізу.

Елементний аналіз за допомогою рентгенівського мікроаналізатора базується на вимірюванні енергії та інтенсивності рентгенівського випромінювання, яке виникає при опроміненні зразка сфокусованим електронним пучком. У процесі взаємодії електронів із атомами матеріалу формується характеристичне рентгенівське випромінювання, параметри якого залежать від елементного складу зразка.

Вимірюючи довжину хвилі та інтенсивність цього випромінювання, можна ідентифікувати наявні елементи та визначити їх концентрацію. Дані щодо енергій характеристичних піків для кожного елемента подані у вигляді довідкових таблиць або графічних залежностей («енергетичних шкал»), які інтегровані у програмне забезпечення мікроаналізатора.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		49

3 Властивості покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$, отриманих методом імпульсного магнетронного розпилення

3.1 Мікроструктура та хімічний склад покриттів на основі $Cu_xMo_yS_z$

Для розроблення та дослідження твердозмащувального покриття, яке поєднує високу електропровідність із мастильними властивостями дисульфиду молібдену, було розглянуто можливість створення композиційного електропровідного шару на основі системи Cu–Mo–S.

Для реалізації цієї задачі була спроектована спеціальна композиційна мішень, яка забезпечує рівномірне розпилення різнорідних матеріалів за допомогою імпульсного магнетронного розряду — полікристалічної міді у твердому стані та мікрокристалічного порошку MoS_2 . Мішень виконана у вигляді мідного диска з листової міді марки М1 діаметром $\varnothing 120$ мм із кільцевими концентричними канавками, у які запресовували порошок дисульфиду молібдену.

Після попереднього «пропрацювання» мішені в режимі холостого ходу протягом 3–4 годин відбувається часткове спікання порошку MoS_2 та стабілізація поверхні, що забезпечує її подальшу експлуатаційну готовність. Магнітна система була сконфігурована таким чином, щоб зона розпилення проходила вздовж концентричних канавок із MoS_2 .

Використання імпульсного розпилення іонами аргону дозволяє формувати однорідний потік атомів Cu, Mo і S у межах площі круга діаметром до 100 мм на відстані близько 60 мм від мішені. Регулювання конфігурації магнітного поля та режимів роботи магнетрона дає змогу змінювати співвідношення елементів Cu, Mo та S у покритті, що, у свою

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		50

чергу, впливає на його фазовий склад, структуру та трибомеханічні властивості.

Дослідження морфології поверхні осаджених покриттів системи $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ методом сканувальної електронної мікроскопії показало наявність складної волокнисто-глобулярної структури (рис. 3.1а). Покриття складається з переплетених волокон із поперечними розмірами приблизно 0,5–3 мкм і довжиною до 30 мкм (рис. 3.1б).

У внутрішній частині шару між волокнами спостерігаються об'ємні включення глобулярної форми із середнім розміром 2–8 мкм (рис. 3.1в). На поверхні волокон, особливо в місцях вигину, також фіксуються дрібні глобули розміром 2–3 мкм у вигляді локальних наростів.

Аналіз мікроструктури показав, що для покриття товщиною близько 15 мкм частка волокон становить 65–75 %, а глобулярної фази — 25–35 %. При збільшенні товщини понад 25–30 мкм спостерігається нерівномірність росту структурних складових: швидкість формування глобул зменшується порівняно з ростом волокон, що призводить до поступового зниження щільності структури. Ця тенденція зберігається до товщин 50–60 мкм, після чого міжволоконний простір практично перестає заповнюватися глобулами, а найбільш довгі волокна руйнуються, що обмежує подальше зростання шару.

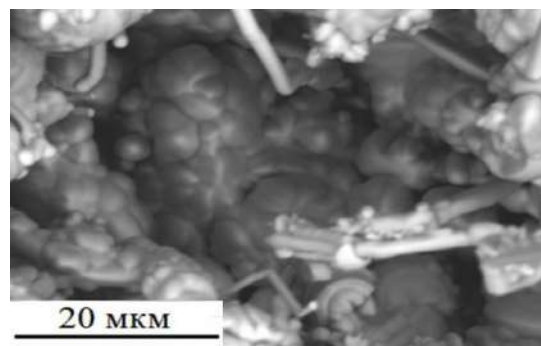
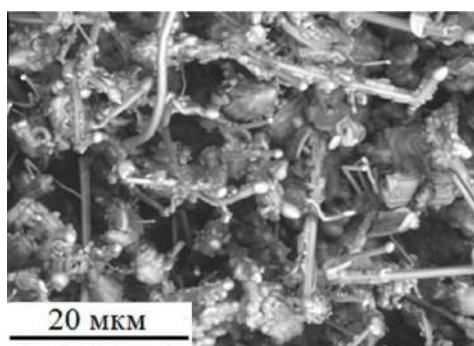
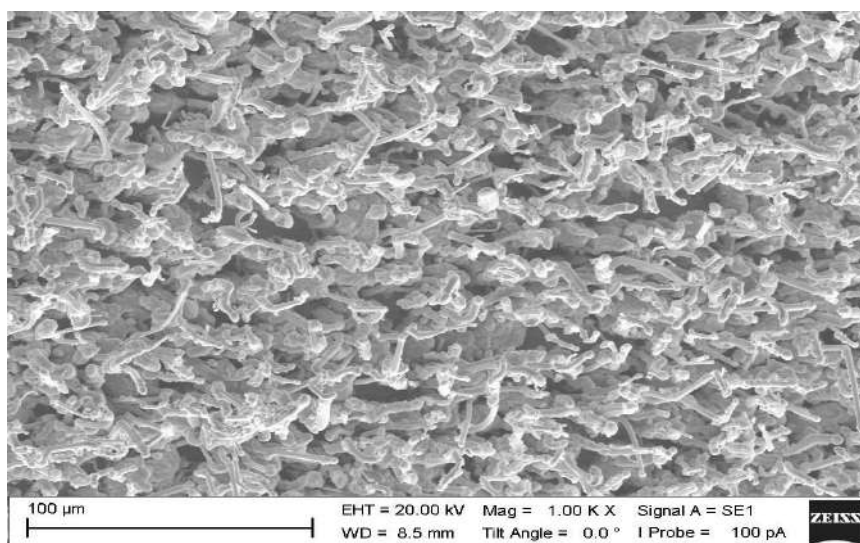
Елементний склад покриття $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ товщиною 15 мкм, визначений методом рентгеноспектрального аналізу на площі приблизно 16 мм², становить: Cu — 52 ат.%, Mo — 19 ат.%, S — 29 ат.%.

Локальний аналіз волокон показав інший розподіл елементів: Cu — 15±3 ат.%, Mo — 38±3 ат.%, S — 47±4 ат.%, тоді як у глобулах виявлено практично чисту мідь: Cu — 99,1±0,6 ат.%, Mo — 0,2±0,1 ат.%, S — 0,7±0,3 ат.%.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		51

Отримані результати дозволяють представити склад волокон як $\text{Cu}_{2,4}\text{Mo}_{6,1}\text{S}_{7,5}$, що близький до сполуки $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$, яка належить до сімейства фаз Шевреля типу MxMo_6X_8 (де М — метал І групи, X — S, Se або Te). Незначне відхилення вмісту міді порівняно з літературними даними (12,5 ат.% проти ~15 ат.%) пояснюється впливом об'єму аналізу, який охоплює як волокнисту, так і глобулярну фази.

Фази Шевреля є особливою групою сполук із унікальними фізико-хімічними властивостями, зокрема надпровідністю та підвищеним магнітоопором. Для сполуки $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$ характерні надпровідні властивості в діапазоні температур 9,5–10,3 К, що робить такі системи перспективними для подальших функціональних застосувань.



а

б

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Дпк
Змн	Дпк	№ доквм	Пілпис	Дата		52

Рисунок 3.1 – Зображення поверхні осаджених покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$, отримані за допомогою сканувального електронного мікроскопа: (а) – морфологія поверхні покриття при збільшенні 500×; (б) – волокниста структура; (в) – глобулярні утворення при збільшенні 1300X.

3.2 Триботехнічні властивості покриттів системи Cu–Mo–S під час випробувань

Мідні зразки з покриттям на основі системи $Cu_xMo_yS_z$, нанесеним методом магнетронного розпилення, піддавали випробуванням на зношування в умовах тертя ковзання у парі з мідним контртілом за схемою «вал–колодка». Дослідження проводили в атмосфері аргону при швидкості відносного ковзання 0,5 м/с та нормальному навантаженні 0,4 Н.

Під час проведення експериментів трибологічний стенд розміщувався у герметичній камері з органічного скла, з якої попередньо відкачували повітря та надалі заповнювали її аргоном. Такий підхід дозволяв мінімізувати вплив кисню та вологи на процеси тертя і зношування, а також моделювати роботу електроконтактних вузлів у безокиснювальному середовищі.

Режими та схема випробувань були наближені до умов роботи обертових контактних систем, які функціонують у вузлах передачі електричного сигналу між рухомими елементами механізмів. Це дозволило оцінити поведінку покриттів в умовах тривалого ковзального контакту та циклічного навантаження.

Для визначення оптимальної товщини покриттів із найбільшим ресурсом роботи осадження системи $Cu_xMo_yS_z$ на мідну підкладку здійснювали при різній тривалості напилення. Встановлено, що товщина сформованого шару практично лінійно залежить від часу роботи магнетрона.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		53

Вимірювання товщини покриттів виконували на поперечних шліфах контрольних зразків за допомогою сканувального електронного мікроскопа. На рисунку 3.2 наведено приклад визначення товщини осадженого шару. Для представленого зразка товщина покриття становила приблизно 5,6 мкм.

Аналіз мікроструктури показав, що при такій товщині покриття має достатньо щільну будову: між волокнистими елементами структура заповнена глобулярними включеннями, а видимі мікропори практично відсутні. Подібна морфологія свідчить про формування суцільного захисного шару з високою однорідністю, що позитивно впливає на його триботехнічні характеристики та зносостійкість під час тертя.

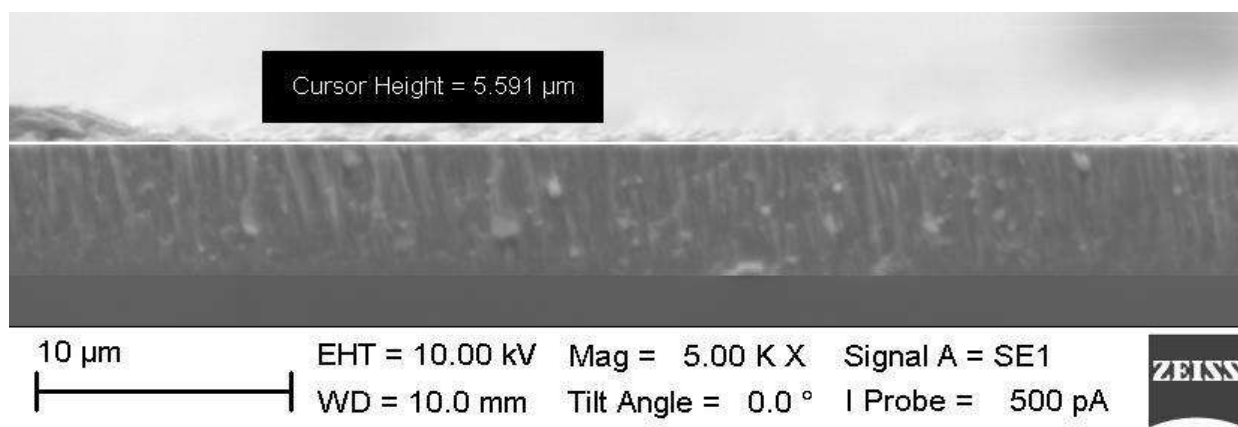


Рисунок 3.2 Зовнішній вигляд зображення покриття $Cu_xMo_yS_z$

Трибологічні випробування в атмосфері аргону продемонстрували суттєве підвищення зносостійкості мідної пари тертя з покриттям $Cu_xMo_yS_z$ товщиною близько 15 мкм порівняно зі зразками без покриття. На рисунку 3.3 наведені залежності зміни маси мідних зразків від тривалості процесу зношування.

Отримані експериментальні криві добре апроксимуються лінійними залежностями. Аналіз кутів нахилу цих графіків показав, що нанесення

покриття системи $Cu_xMo_yS_z$ забезпечує зменшення швидкості зношування мідної пари тертя в атмосфері аргону приблизно у 300 разів.

Таке суттєве підвищення зносостійкості пояснюється формуванням на поверхні тертя твердозмащувального шару, який знижує силу адгезійної взаємодії між контактуючими поверхнями та перешкоджає інтенсивному переносу міді. Крім того, покриття сприяє стабілізації процесу ковзання та зменшенню локальних механічних пошкоджень у зоні контакту.

Отримані результати свідчать про високу ефективність покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$ для захисту мідних електроконтактних вузлів і деталей, що працюють в умовах сухого тертя та обмеженого доступу кисню.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докum	Пілпис	Дата		55

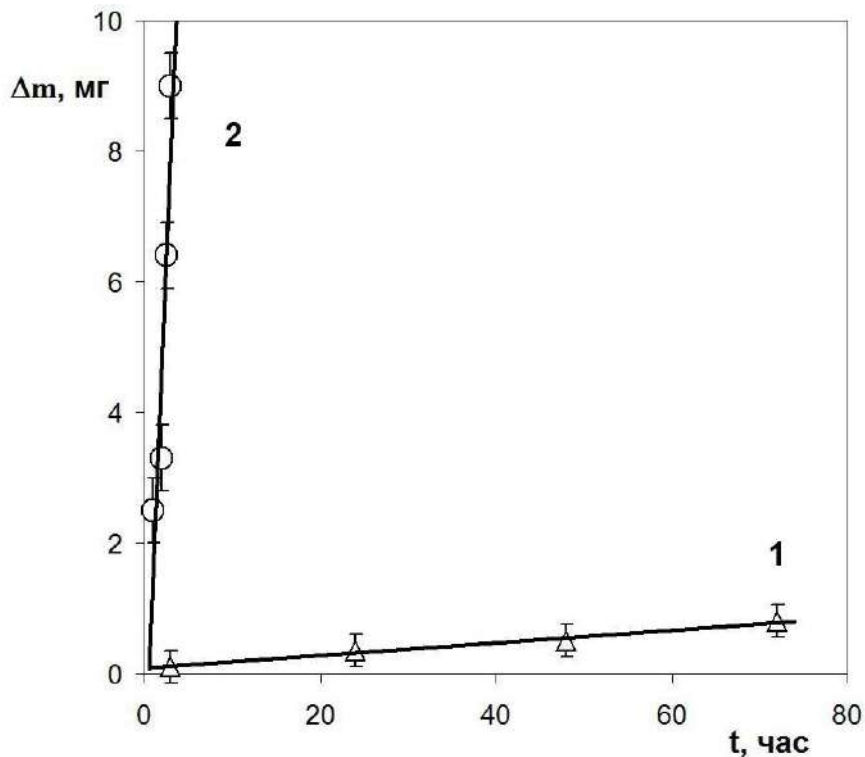


Рисунок 3.3 Кінетичний знос пари терт яз покриттям $Cu_xMo_yS_z$ і без нього

На рисунку 3.4 наведено залежності умовного ресурсу роботи покриттів до моменту їх руйнування від товщини осадженого шару. Отримані результати показують, що зі збільшенням товщини покриття $Cu_xMo_yS_z$ тривалість його ефективної роботи зростає майже лінійно.

Встановлено, що нанесення покриттів товщиною понад 60–65 мкм є ускладненим, оскільки при таких значеннях починається часткове руйнування поверхневого шару. У процесі тертя спостерігається відшаровування дрібних частинок покриття без оголення мідної основи. Імовірно, це пов'язано з руйнуванням верхніх ділянок надто довгих і масивних волокон структури, які характеризуються недостатньою пластичністю та підвищеною крихкістю.

Таким чином, можна зробити висновок, що покриття товщиною близько 60 мкм мають найкращу зносостійкість у досліджуваних умовах тертя.

Разом із тим збільшення ресурсу роботи можливе шляхом формування багат шарових покриттів типу $Cu_xMo_yS_z / Cu$. Використання декількох шарів системи $Cu_xMo_yS_z$ із тонкими проміжними прошарками міді товщиною до 1 мкм дозволяє підвищити довговічність покриття приблизно у 1,5–2 рази порівняно з одношаровими покриттями товщиною 60 мкм.

Із графіків, наведених на рисунку 3.4, також видно, що під час випробувань в атмосфері аргону залежність ресурсу роботи покриття від його товщини зростає інтенсивніше, ніж у повітряному середовищі. Аналіз кутів нахилу лінійних залежностей показав, що швидкість збільшення строку служби покриттів зі зростанням товщини в атмосфері аргону приблизно у 2,3 рази вища, ніж при випробуваннях у повітрі.

Це пояснюється тим, що в безокиснювальному середовищі зменшується вплив окиснювальних процесів на поверхню тертя, а сформована твердозмащувальна плівка довше зберігає свої захисні та антифрикційні властивості. Завдяки цьому покриття ефективніше перешкоджає адгезійному контакту між мідними поверхнями та забезпечує стабільніші умови роботи вузла тертя.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		57

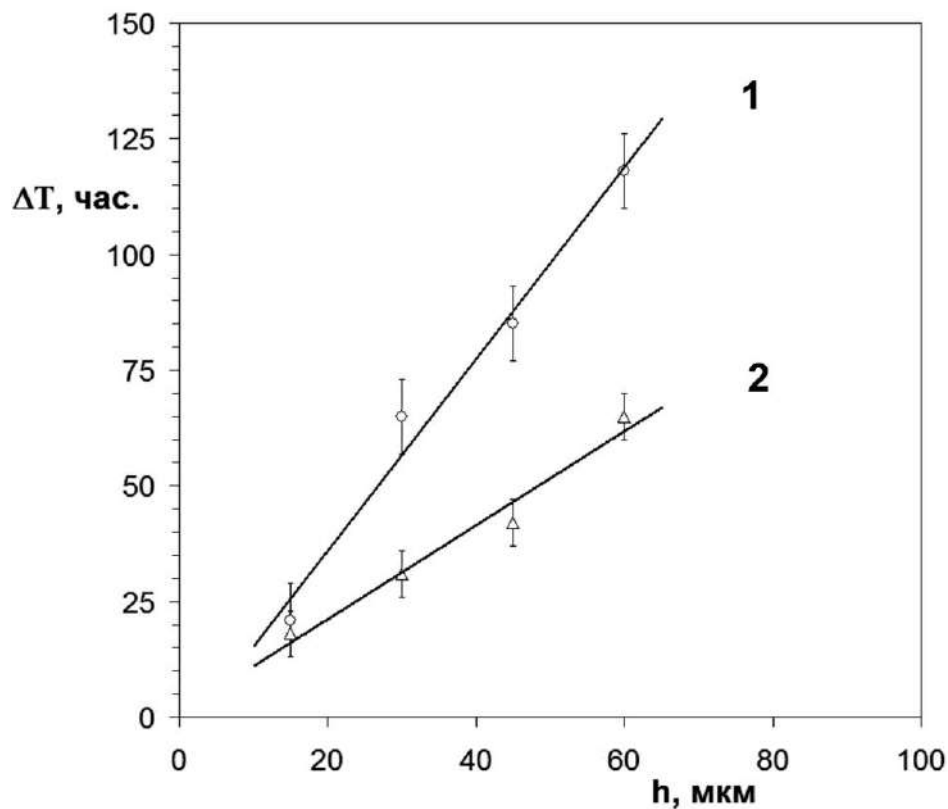


Рисунок 3.4 Графіки залежності умовного ресурсу роботи ΔT покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$ до моменту руйнування від товщини h осаджених шарів при терті в парі з мідним контртілом в атмосфері аргону.

Повна кінетична крива зношування мідного зразка з покриттям $Cu_xMo_yS_z$ наведена на рисунку 3.5. Отримана залежність має характерний двостадійний перебіг процесу зношування [5].

На початковому етапі тертя протягом перших годин роботи на поверхню контртіла переноситься тонкий шар покриття, який виконує функцію твердої мастильної плівки. Після формування цієї плівки настає стадія I, тривалість якої становить приблизно 120–130 годин. Для даного етапу характерна незначна інтенсивність зношування та стабільна робота пари тертя.

Упродовж першої стадії в поверхневих шарах покриття поступово накопичуються втомні напруження, що виникають унаслідок циклічного пластичного деформування мідного глобулярного шару мікронерівностями

контртіла. Матеріал глобул зазнає локальної пластичної деформації, а антифрикційні властивості покриття забезпечуються, ймовірно, дрібнодисперсними частинками фази $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$, з яких сформовані волокнисті елементи структури.

У процесі ковзання на поверхнях контакту формується тонка мастильна плівка на основі $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$, яка зменшує адгезійну взаємодію між мідними поверхнями та частково локалізує зсувні деформації в зоні контакту. Одночасно інша частина навантаження передається на глобулярний шар покриття, що спричиняє його поступове деформування та ініціює зародження мікротріщин.

Формування тріщин найчастіше відбувається поблизу структурних неоднорідностей і меж зерен. У подальшому окремі мікротріщини об'єднуються між собою, що призводить до локального руйнування матеріалу та винесення частинок зношування із зони тертя.

Разом із продуктами зношування поступово видаляється і частина твердозмащувального матеріалу покриття. Водночас мастильна плівка частково відновлюється за рахунок нових мікрочастинок фази $\text{Cu}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$, які надходять із внутрішніх шарів покриття під час його подальшого руйнування. Новоутворені ювенільні ділянки поверхні після відриву частинок зношування активно взаємодіють із плівкою переносу, що сформувалася на контртілі, унаслідок чого товщина цієї плівки поступово зменшується.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		59

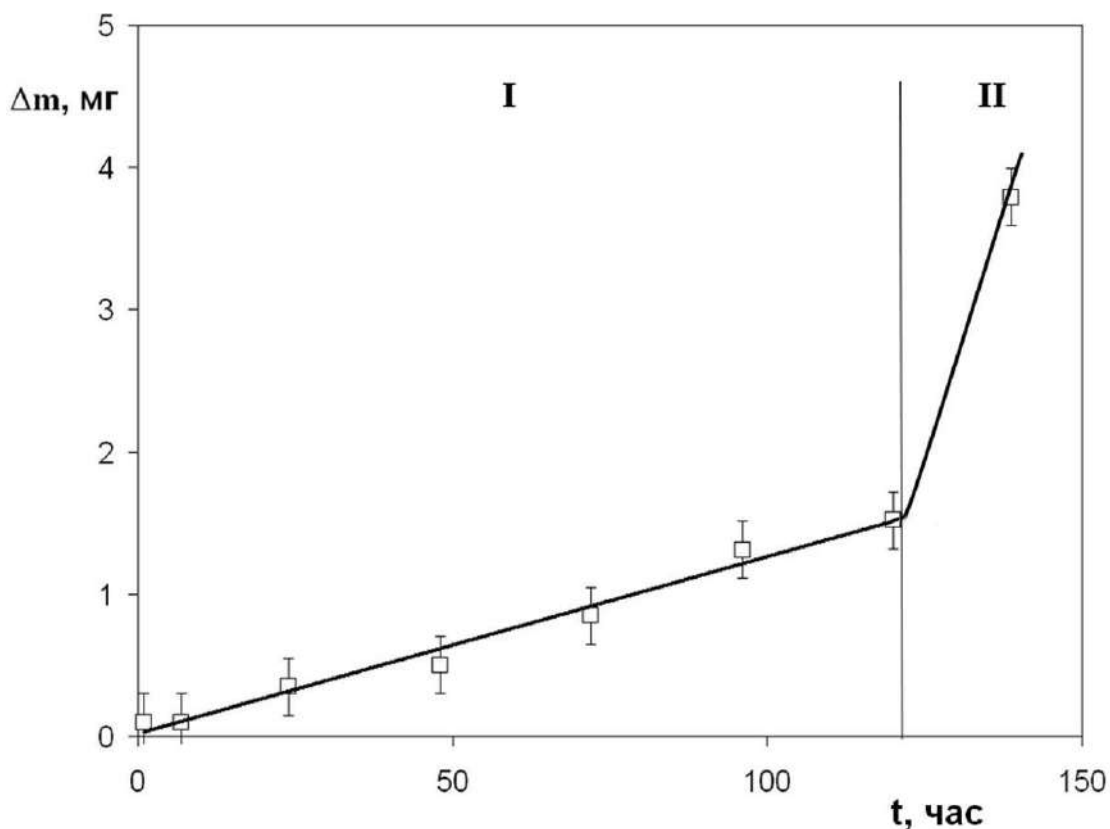


Рисунок 3.5 Кінетична залежність зношування мідного зразка з покриттям $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ під час тертя в парі з мідним контртілом в атмосфері аргону.

3.3 Триботехнічні характеристики покриттів $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ при випробуваннях у вакуумному середовищі

Випробування в умовах вакууму проводили на трибологічному стенді, розміщеному у вакуумній камері, яку перед початком досліджень відкачували до залишкового тиску газів не більше 1×10^{-3} Па. Режими випробувань відповідали умовам, що застосовувалися під час досліджень у середовищі аргону.

Отримано кінетичні залежності зношування мідних зразків із покриттям $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ при роботі в парі з мідним контртілом у вакуумі та в атмосфері аргону. Порівняння результатів показало, що обидві залежності

добре описуються лінійними функціями, що свідчить про стабільний характер процесу зношування протягом основної частини випробувань.

Швидкість зношування покриття оцінювали шляхом визначення тангенса кута нахилу отриманих лінійних залежностей. Проведений аналіз дозволив порівняти інтенсивність руйнування покриття під час тертя в атмосфері аргону та у вакуумному середовищі.

$$\Delta m_{\text{Ar}} / \Delta t \approx 0,013 \text{ мг/час} \approx 3,4 \times 10^{-6} \text{ мг/с}, \quad (1)$$

$$\Delta m_{\text{вак}} / \Delta t \approx 0,0066 \text{ мг/час} \approx 1,85 \times 10^{-6} \text{ мг/с}, \quad (2)$$

де Δm_{Ar} та $\Delta m_{\text{вак}}$ — зміна маси зразка з покриттям $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ під час зношування протягом інтервалу часу Δt відповідно в середовищі аргону та у вакуумі.

Отримані результати показали, що у вакуумних умовах швидкість зношування покриття приблизно у 1,8 раза нижча порівняно з випробуваннями в атмосфері аргону. Ймовірною причиною цього є наявність у газовому середовищі незначних домішок кисню та повітря, які можуть активізувати окиснювальні процеси на поверхні тертя та спричиняти додаткове окиснювальне зношування покриття.

3.4 Електричні властивості покриттів $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$

Для використання покриттів $\text{Cu}_x\text{Mo}_y\text{S}_z$ як твердозмащувального матеріалу у ковзних електроконтактах, зокрема у струмопровідних вузлах із рухомими елементами, важливими є не лише високі антифрикційні характеристики, але й достатній рівень електропровідності. Саме поєднання низького коефіцієнта тертя та здатності проводити електричний

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Анк
Змн	Анк	№ док.ум	Підпис	Дата		61

струм визначає перспективність таких покриттів для застосування у контактних системах, що працюють в умовах тривалого тертя.

У таблиці 3.1 наведено результати визначення питомого електричного опору покриття $Cu_xMo_yS_z$, отримані чотиризондовим методом, а також довідкові значення питомого опору чистої міді та дисульфиду молібдену.

Аналіз отриманих даних показав, що формування багатокомпонентного покриття на основі міді, молібдену та сірки забезпечує суттєве підвищення електропровідності порівняно з чистим дисульфідом молібдену. Відомо, що MoS_2 характеризується напівпровідниковим типом провідності та має відносно високий питомий електричний опір, що обмежує можливість його безпосереднього використання у струмопровідних парах тертя.

Введення міді до складу покриття сприяє формуванню електропровідних ділянок у структурі матеріалу та створенню додаткових каналів перенесення заряду. У результаті цього електричний опір покриття помітно знижується, а його електропровідні властивості значно покращуються. При цьому покриття зберігає антифрикційні властивості, характерні для сполук на основі дисульфиду молібдену.

Отримане поєднання триботехнічних та електрофізичних характеристик свідчить про перспективність покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$ для використання у вузлах тертя, де одночасно необхідні стабільна електропровідність, знижене зношування та тривалий ресурс роботи контактних поверхонь.

Таблиця 3.1 Результати визначення питомого електричного опору покриття $Cu_xMo_yS_z$

покриття $Cu_xMo_yS_z$, Ом·м	Cu, Ом·м	MoS_2 , Ом·м
$(22,9 \pm 3,2) \cdot 10^{-8}$	$1,77 \cdot 10^{-8}$	8,52

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	Но докум	Пілпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання роботи було проведено комплексне дослідження триботехнічних та електрофізичних властивостей покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$, сформованих методом імпульсного магнетронного розпилення на поверхні мідних зразків. Основною метою дослідження було підвищення зносостійкості мідної пари тертя при збереженні достатньо високої електропровідності покриття, що є важливою умовою для використання таких матеріалів у струмопровідних вузлах тертя та ковзних контактах.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що для міді характерною є висока схильність до адгезійного зношування. Під час тертя в парі з більшістю металів відбувається перенесення матеріалу з однієї поверхні на іншу, внаслідок чого формується контакт типу «мідь–мідь», що супроводжується інтенсивним схоплюванням та прискореним руйнуванням поверхневих шарів. Встановлено, що середовище експлуатації істотно впливає на механізм зношування міді. У безкисневому середовищі домінує адгезійне зношування, тоді як у повітрі або за наявності кисню значну роль починають відігравати окиснювальні процеси.

На основі проведеного аналізу було обґрунтовано доцільність використання твердозмащувальних покриттів на основі дисульфідів молібдену, легованого міддю. Дисульфід молібдену характеризується низьким опором зсуву між кристалічними шарами та високими антифрикційними властивостями, однак його практичне застосування в електроконтактних вузлах обмежується високим питомим електричним опором. Введення міді до складу покриття дозволило підвищити електропровідність матеріалу при збереженні його змащувальної здатності.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		64

У роботі була розроблена спеціальна композиційна мішень для магнетронного розпилення, яка забезпечувала одночасне осадження атомів міді, молібдену та сірки. Встановлено, що використання імпульсного магнетронного розпилення дозволяє отримувати однорідні покриття системи $Cu_xMo_yS_z$ із контрольованим хімічним складом та стабільними експлуатаційними характеристиками.

Дослідження морфології поверхні покриттів методом растрової електронної мікроскопії показали, що сформовані шари мають складну волокнисто-глобулярну структуру. Покриття складається з волокон, між якими розташовані глобулярні утворення на основі міді. Встановлено, що волокнисті елементи містять фазу, близьку за складом до сполуки $Cu_2Mo_6S_8$, яка належить до групи фаз Шевреля. Саме ця фаза, імовірно, забезпечує основні антифрикційні властивості покриття та формування стійкої плівки переносу на поверхні контртіла.

Експериментальні триботехнічні дослідження показали суттєве підвищення зносостійкості мідної пари тертя після нанесення покриття $Cu_xMo_yS_z$. В атмосфері аргону швидкість зношування мідної пари з покриттям зменшувалася приблизно у 300 разів порівняно з незахищеними мідними поверхнями. Встановлено, що в процесі тертя на поверхні контакту формується тонка твердозмащувальна плівка, яка знижує силу адгезійної взаємодії між поверхнями та локалізує частину зсувних деформацій у зоні контакту.

Дослідження кінетики зношування показали, що процес руйнування покриття має двостадійний характер. На першій стадії спостерігається стабільне зношування з малою швидкістю руйнування матеріалу. У цей період покриття ефективно виконує захисну функцію, а в його поверхневих шарах поступово накопичуються втомні напруження.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		65

Подальший розвиток мікротріщин та їх об'єднання призводять до локального руйнування матеріалу та переходу до другої стадії зношування.

Встановлено, що товщина покриття істотно впливає на його ресурс роботи. Зі збільшенням товщини шару умовний строк служби покриття зростає майже лінійно. Найкращі результати були отримані для покриттів товщиною близько 60 мкм. При подальшому збільшенні товщини спостерігалось часткове відшаровування поверхневих ділянок покриття через руйнування надто довгих волокон структури. Показано, що використання багат шарових покриттів типу $Cu_xMo_yS_z / Cu$ з тонкими проміжними шарами міді дозволяє додатково підвищити ресурс роботи у 1,5–2 рази.

Порівняльні випробування в атмосфері аргону та у вакуумі показали, що у вакуумному середовищі швидкість зношування покриття приблизно у 1,8 раза нижча. Це пов'язано зі зменшенням впливу окиснювальних процесів на поверхню тертя. В атмосфері аргону навіть незначні домішки кисню та вологи можуть спричинити додаткове окиснювальне зношування поверхневого шару.

Вимірювання питомого електричного опору показали, що покриття системи $Cu_xMo_yS_z$ мають значно вищу електропровідність порівняно з чистим дисульфідом молібдену. Завдяки введенню міді до складу покриття формується електропровідна структура, яка забезпечує стабільне проходження електричного струму через контактну пару. Це дозволяє розглядати такі покриття як перспективний матеріал для використання у струмопровідних вузлах тертя, де необхідне одночасне забезпечення високої зносостійкості, низького коефіцієнта тертя та достатньої електропровідності.

Таким чином, у роботі доведено ефективність використання покриттів системи $Cu_xMo_yS_z$ для підвищення довговічності мідних пар тертя. Отримані результати свідчать про перспективність подальших

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		66

досліджень багатокомпонентних твердомащувальних електропровідних покриттів, сформованих методом магнетронного розпилення, для застосування у сучасних високонавантажених вузлах тертя та електроконтактних системах.

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Дпк
Змн	Дпк	№ докum	Пілпис	Дата		67

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bhushan B. *Introduction to Tribology*. 2nd ed. New York: Wiley, 2013. 752 p.
2. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*. 2017. Vol. 5. P. 263–284.
3. Hutchings I., Shipway P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 500 p.
4. Blau P. J. *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009. 384 p.
5. Kragelsky I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Friction and Wear: Calculation Methods*. Oxford: Elsevier, 1982. 520 p.
6. Bowden F. P., Tabor D. *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford: Clarendon Press, 2001. 456 p.
7. Persson B. N. J. *Sliding Friction: Physical Principles and Applications*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2014. 515 p.
8. Stachowiak G. W., Batchelor A. W. *Engineering Tribology*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. 944 p.
9. Hiratsuka K., Miyoshi K. Solid lubrication in space. *Tribology International*. 2001. Vol. 34. P. 433–439.
10. Donnet C., Erdemir A. Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. 155307.
11. Voevodin A. A., Zabinski J. S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 65. P. 741–748.
12. Furlong O. J., Lewis R. Investigation of MoS₂-based coatings for vacuum tribological applications. *Wear*. 2010. Vol. 268. P. 117–125.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Днк
Змн	Днк	№ докум	Підпис	Дата		68

13. Martin J. M. Extreme tribology: friction, wear and lubrication at the nanoscale. *Physics Reports*. 2018. Vol. 740. P. 1–48.
14. Singer I. L. Formation and properties of transfer films. *Tribology Letters*. 1998. Vol. 4. P. 195–203.
15. Sliney H. E. Solid lubricant materials for high temperature applications. NASA Technical Report. 2002.
16. Savaskan T., Hekimoglu A. Wear behavior of copper-based materials. *Materials & Design*. 2004. Vol. 25. P. 435–440.
17. Eder S. J., et al. Copper-based composites for tribological applications. *Wear*. 2016. Vol. 348–349. P. 1–10.
18. Zabinski J. S., Donley M. S. Lubricious coatings for space mechanisms. *Surface and Coatings Technology*. 1998. Vol. 108–109. P. 277–282.
19. Vlassov A. et al. MoS₂-based coatings: structure and tribological behavior. *Applied Surface Science*. 2012. Vol. 258. P. 5936–5943.
20. Scharf T. W., Prasad S. V. Solid lubricants: a review. *Journal of Materials Science*. 2013. Vol. 48. P. 1–20.
21. Heimberg J. A., Wahl K. J. Tribology of transition metal dichalcogenides. *Tribology Letters*. 2001. Vol. 10. P. 125–134.
22. Cumings J., Zettl A. Low-friction nanoscale materials. *Science*. 2000. Vol. 289. P. 602–604.
23. Hsu S. M., Shen M. C. Ceramic coatings in tribology. *Wear*. 2003. Vol. 255. P. 1129–1139.
24. Silverman G. S. Electrical contact materials and their tribology. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2005. Vol. 28. P. 98–105.
25. Rapoport L. et al. MoS₂ nanoparticles as solid lubricants. *Advanced Materials*. 2003. Vol. 15. P. 651–655.

					КвРМТВА. 22010.01.01.00	Анк
Змн	Анк	№ докум	Підпис	Дата		69

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Дпк
Змн	Дпк	Но докум	Пілпис	Дата		70

ДОДАТКИ

					<i>КвРМТВА. 22010.01.01.00</i>	Днк
Змн	Днк	№ докум	Пілпис	Дата		71