

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Токарук Віталій Володимирович**



УДК 620.193:620.197.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЮРАЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ Д16  
АРМУВАННЯМ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДИСКРЕТНИМ  
ЕЛЕКТРОІСКРОВИМ ПОКРИТТЯМ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ 2023

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному авіаційному університеті.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Мікосянчик Оксана Олександрівна,**  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії  
матеріалів Аерокосмічного факультету

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Беспалов Сергій Анатолійович,**  
Сектор фізико-технічних і математичних наук  
Науково-організаційного відділу Президії  
Національної академії наук України, учений секретар

кандидат технічних наук, доцент

**Куц Олексій Іванович,**  
Національний транспортний університет,  
доцент кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства

Захист дисертації відбудеться «15» червня 2023 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, корпус 1, ауд. 1.334.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058 Україна, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1 та на сайті <http://asdoc.nau.edu.ua/golovne-menyu/specz%D1%96a1%D1%96zovan%D1%96-vchen%D1%96-radi-z-prisudzhennya-stupenya-doktora-nauk/>

Автореферат розісланий «10» травня 2023 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент



Михайло СВИРИД

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Підвищення надійності, економічності і продуктивності деталей машин, обладнання та виробів машинобудування, зниження їх питомої матеріаломісткості і енергоспоживання досягається, насамперед, застосуванням матеріалів і прогресивних зміцнюючих технологій. Перспективним напрямком для зниження питомої матеріаломісткості виробів являється застосування алюмінію і його сплавів. Однак, розширенню сфери практичного використання алюмінієвих сплавів триботехнічного призначення перешкоджає невідповідність високим технологічним вимогам таких його експлуатаційних характеристик, як недостатня твердість і низька зносостійкість. Ефективним способом підвищення механічних характеристик алюмінієвих сплавів є їх поверхневе зміцнення.

Одним з найбільш раціональних шляхів, що дозволяє цілеспрямовано змінювати напружено-деформований стан в поверхневому шарі, деформаційно-силові параметри контактних областей і природу контактної взаємодії тіл, є метод електроіскрового легування (ЕІЛ).

Значний внесок в започаткування та розвиток наукового напрямку армування поверхневих шарів металів ЕІЛ внесли українські та закордонні вчені Б. Р. Лазаренко, Н. І. Лазаренко, А. Д. Верхотуров, Б. Н. Золотих, А. Є. Гитлевич, І. О. Подчерняєва, Б. А. Ляшенко, С. Barile, С. Casavola, Н. Zhao, Е.Е. Feldshteina, Y. Mao, Y. J. Xie, M. C. Wang, R. N. Johnson, J. L. Reynold та ін.

Враховуючи недоліки суцільних електроіскрових покриттів (ЕІП), що полягають у когезійному розтріскуванні та адгезійному відшаруванні, перспективним напрямком поліпшення якості ЕІП є застосування технології зміцнення та відновлення шляхом нанесення покриттів дискретної структури.

Для зменшення вихідної шорсткості ЕІП та зміни величини і знака залишкових напружень доцільно застосування технології ЕІЛ спільно з поверхневою пластичною деформацією (ППД), що дозволяє сформувати поверхневий шар з високою твердістю, зносостійкістю, низькою шорсткістю і підвищеною втомною міцністю. Вивчення особливостей формування армованого шару на поверхнях деталей при комбінованій технології ЕІЛ та ППД, встановлення взаємозв'язку параметрів субструктури та напружено-деформованого стану армованого шару з його триботехнічними характеристиками є актуальним завданням у плані розробки технологічних рекомендацій щодо зміцнення деталей з метою підвищення міжремонтного ресурсу вузлів та агрегатів.

Таким чином, управління структуроутворенням та механічними характеристиками поверхневих шарів алюмінієвих сплавів за рахунок формування зносостійких електроіскрових покриттів дозволить вирішити науково-технічну проблему підвищення триботехнічних і міцнісних характеристик алюмінієвих сплавів та розширити навантажувально-швидкісний діапазон їх роботоздатного стану.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Національного авіаційного університету. Автор був співвиконавцем держбюджетних тем.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи 88/07.02.02. «Підвищення працездатності конструкцій з авіаційних матеріалів шляхом поверхневого зміцнення та відновлення деталей трибосистем». Автором розроблено методики діагностування трибопар авіаційних матеріалів за допомогою акустичних методів неруйнівного контролю.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи 110/07.02.02. «Технологічні методи підвищення працездатності елементів авіаційних трибомеханічних систем». Автором проведенні досліджень кінетики задиристості і перехідних процесів при зносі електроіскрових покриттів

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи 48-2022/07.06 «Підвищення ресурсу відповідальних вузлів авіаційної техніки та удосконалення технічного обслуговування повітряних суден». Автором визначені закономірності зносостійких дисипативних структур дискретними електроіскровими покриттями.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення протизношувальних властивостей та питомої маслоємності дюралюмінію Д16 формуванням дискретних електроіскрових покриттів з ефективними мікрогеометричними та міцністними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

- визначити оптимальну щільність нанесення дискретних ЕІП з урахуванням їх міцністних, геометричних, реологічних та триботехнічних показників;
- провести комплексну оцінку напружено-деформованого стану ЕІП – основа з застосуванням методів скінченно-елементного аналізу в сучасних програмних комплексах Nastran та SolidWorks;
- дослідити умови переходу трибосистеми сталь – дюралюміній Д16 до катастрофічного зношування при ступеневому підвищенні навантаження, визначити діапазон роботоздатного стану ЕІП;
- визначити закономірності структурної пристосованості трибосистеми сталь – дюралюміній Д16 при формуванні зносостійких дисипативних структур в процесі тертя;
- визначити механізми впливу механо-деструкційних процесів в поверхневих шарах металу при терті на інтенсивність зношування трибосистем сталь – дюралюміній Д16;
- провести статистичну оцінку впливу еквівалентних напружень в ЕІП та в матеріалі основи, температури, сигналів АЕ та триботехнічних параметрів на знос неармованого / армованого електроіскровим покриттям дюралюмінію Д16.

**Об'єкт дослідження** – механо-фізико-хімічні процеси трибоконтракту сталь – неармований / армований електроіскровим покриттям дюралюміній Д16.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу мікрогеометричних та міцністних характеристик дискретних електроіскрових покриттів на зносостійкість дюралюмінію Д16.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження ґрунтуються на основних положеннях матеріалознавства, трибології, фізичної хімії, фізико-хімічних основ електроіскрового легування, реолого-кінетичної концепції зносостійкості, теорії

самоорганізації та математичної статистики. Оцінка напружено-деформованого стану проводилась з застосуванням методів скінченно-елементного аналізу в програмних комплексах Nastran та SolidWorks. У роботі застосовувались трибологічні випробування; реєстрація та обробка сигналів акустичної емісії; вимірювання твердості проводилось за методами Роквела та Брінелля, мікротвердості та склерометрування – на приладі «Мікрон-гамма»; параметри профілю мікрорельєфу визначали на профілометрі Mitutoyo SurfTest SJ-201P; металофізичні дослідження проводились на мікроскопі-інтерферометрі Лінника МП-4, методом растрової електронної мікроскопії на мікроскопі-мікроаналізаторі CamScan 4DV; визначення хімічного складу поверхонь тертя проводилося за методикою кількісного визначення вмісту хімічних елементів (ZAF 4/FLS) та за методикою напівкількісного розподілу елементів за площею (програма "Digimap"). У роботі використовувалась статистична обробка експериментальних даних із застосуванням регресійного аналізу, при розрахунку використовувався пакет прикладних програм.

### **Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:**

1. Встановлено механізми підвищення зносостійкості в 2 рази в умовах ковзання та збільшення роботоzдатного стану до 1200 Н дюралюмінію Д16, армованого комбінованим електроіскровим покриттям зі сплаву ВК8 та міді з наступною поверхневопластичною деформацією, які полягають в дискретності покриття щільністю 55–65 %, реалізацією позитивного градієнту зміни механічних властивостей по глибині та домінуванні еластогідродинамічного або змішаного режиму мащення.

2. Вперше одержано емпіричні залежності інтенсивності зношування трибосистем сталь – дюралюміній Д16 (неармований / армований ЕП) з урахуванням антифрикційних характеристик, здатності матеріалу поглинати механічну енергію процесів деформації або руйнування та інтенсивності механо-деструкційних процесів в поверхневих шарах металу при терті, за якими можливо спрогнозувати ефективність створених зносостійких покриттів на етапі лабораторних досліджень.

3. Набула подальшого розвитку теорія оцінки переходу трибосистеми від нормального до катастрофічного зношування на основі аналізу сигналів акустичної емісії: передумовами настання катастрофічного зношування є зростання щільності, усередненої потужності та збільшення величини розкиду сигналів акустичної емісії, що спричинено підвищенням енергії руйнування до  $(0.88...1.6) \cdot 10^{-5}$  Дж, інтенсифікацією пластичних деформацій, мікросхоплюванням пар тертя.

4. Визначено механізм утворення зносостійких дисипативних структур для трибосистем з комбінованим дискретним електроіскровим покриттям сплаву ВК8 та міді, який полягає в формуванні хімічномодифікованих граничних шарів, насиченні поверхневих шарів пар тертя активними елементами сірки, фосфору та кисню в результаті активації механохімічних процесів окислення при терті та наявності резерву мастильного матеріалу внаслідок дискретності покриття.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Розроблено спосіб підвищення зносостійкості алюмінієвого сплаву Д16 шляхом його поверхневого зміцнення функціональними дискретними покриттями з

застосуванням енергозберігаючих технологій (акт про реалізацію результатів наукових досліджень на ТОВ «АВАНТІ Груп» від 23.01.2023 року, акт про реалізацію наукових досліджень на ТОВ «ПОДОЛЛЯ-АГРО» від 23.01.2023 року).

2. Розроблена методика оцінки граничної роботоздатності дискретних електроіскрових покриттів на основі аналізу сигналів акустичної емісії залежно від навантажувально-швидкісних режимів (акт про впровадження у навчальний процес Національного авіаційного університету від 16.01.2023 року).

3. Розроблено комплекс технологічно–експериментальних методів дослідження триботехнічних властивостей матеріалів з дискретними комбінованими електроіскровими покриттями для оцінки напружено-деформованого стану покриття та основи, оптимізації дискретності покриття, розподілу контактних навантажень, формуванні оптимальної мікрогеометрії поверхні (акт впровадження та реалізації наукових досліджень в Інституті проблем міцності імені І.С.Писаренка НАН України від 22.12.2022 року).

4. Розроблено і впроваджено в практику експериментальних випробувань пристрій для вимірювання величини лінійного зносу без зупинки машини, в якому використано у якості вимірювальної головки датчик кута-енкодер, що дозволяє здійснювати перетворення лінійного переміщення важеля в кутове переміщення енкодера при вимірюванні лінійного зносу шляхом перетворення кута повороту валу в електричні сигнали, які за відповідним інтерфейсом надходять до персонального комп'ютера та за розробленою програмою перераховуються в лінійний знос. (пат. № 62928, опубл. 26.09.2011, бюл. № 18)

Розроблені методики і способи, комп'ютеризована акусто-емісійна система для дослідження та діагностики трибосистем, програмно-математичне забезпечення, оцінка напружено-деформованого стану ЕПІ – основа з застосуванням методів скінченно-елементного аналізу в програмних комплексах Nastran та SolidWorks використовуються при проведенні наукових досліджень спільно з Інститутом проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України (м. Київ), ТОВ «ПОДОЛЛЯ-АГРО» під час ремонту та модернізації промислового маслопресу ПМ 450 (Вінницька обл.), ТОВ «АВАНТІ ГРУП» при ремонті та відновленні турбокомпресора двигунів внутрішнього згорання автомобільної техніки (м. Київ) та в навчальному процесі в Національному авіаційному університеті (м. Київ).

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення та практичні результати, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: проведено аналіз кінетики руйнування поверхневого шару елементів трибоспряження при зношуванні – [1]; встановлено взаємозв'язок між параметрами авіаційних матеріалів для прогнозування витривалості фрикційних вузлів авіаційної техніки – [2]; визначено енергію активації поверхневого руйнування сталі ШХ15 в середовищі авіапалива ТС-1 – [3, 16]; проведено оцінку ефективності мастильної дії змащувальних матеріалів в залежності від параметрів навантаження пари тертя – [4]; проведено аналіз анізотропії поверхневих поверхонь тертя агрегатів трансмісії авіаційної наземної техніки – [5]; проведено аналіз поверхонь тертя агрегатів трансмісії авіаційної наземної техніки з застосуванням фрактографічного методу та Фур'є-аналізу – [6]; визначено основні закономірності зміни акустичного

випромінювання при оцінці зносостійкості електроіскрових покриттів – [7]; визначено основні закономірності зміни акустичного випромінювання пар тертя з модифікованим покриттям у широкому діапазоні експлуатаційних навантажень – [8]; проаналізовано кореляційні зв'язки між параметрами сигналів акустичної емісії і процесами, які виникають на поверхнях фрикційного контакту об'ємних гідромашин – [9]; проаналізовано вплив швидкості ковзання при коченні з проковзуванням на інтенсивність тепловиділення в локальному контакті при різних режимах тертя – [10]; проаналізовано зміни товщини мастильного шару в умовах масляного голодування – [11]; проаналізовано вплив контактного навантаження на триботехнічні властивості літєвих мастил в нестационарних умовах тертя – [12]; встановлені чинники, що впливають на ефективність припрацювання ЕПІ по зміні усередненої потужності акустичної емісії – [13]; встановлені механізми формування зносостійких вторинних структур – [14]; встановлена кореляційна залежність загального вагового зносу пар тертя та усередненої потужності акустичної емісії – [15]; на основі скінченно-елементного методу проведено моделювання напружено-деформованого стану дискретних покриттів – [17]; визначено триботехнічні параметри для діагностики мастильних матеріалів – [18]; досліджено вплив структурно-деформаційних змін контактних поверхонь на їх зносостійкість – [19]; досліджено вплив твердості електроіскрового покриття на розповсюдження деформаційних процесів в матеріалі основи – [20]; визначено механізми зниження напружено-деформованого стану в поверхневих шарах модифікованого сплаву – [21]; встановлено кінетичні критерії та критерії енергії активації для оцінки зносостійкості сталі ШХ-15 – [22]; визначено оптимальну суцільність ЕПІ – [23].

**Апробація результатів дисертації.** Найважливіші ідеї, висновки, рекомендації, отримані в дисертації, оприлюднені на наукових та науково-практичних конференціях, у тому числі міжнародних, всеукраїнських та за міжнародною участю а саме: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми машинознавства» (Київ, 2008, 2019), Міжнародній науково-технічній конференції Сучасні проблеми трибології (Київ, 2010), XIII, XIV Міжнародних науково-технічних конференціях „Авіа-2017”, „Авіа-2019” (Київ, 2017, 2019); VIII International Scientific-Technical Conference «Problems of chemmology. theory and practice of rational use of traditional and alternative fuels & lubricants» (Kyiv–Kamianets-Podilskyi, 2021), The XXVIII International Scientific and Practical Conference “Science and practice, actual problems, innovations”(Milan, 2022), X Всесвітньому конгресі «Авіація в XXI столітті» (Київ, 2022).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 32 наукові праці, у тому числі: 1 колективна монографія, що входить до міжнародних наукометричних баз; 20 статей у фахових виданнях переліку МОН України; 2 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 8 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях; 1 патент.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації 214 сторінок, із них 153 сторінки основного тексту. Робота включає 25 таблиць, 57 рисунків, 5 додатків. Список використаних джерел налічує 190 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, поставлені мета та завдання досліджень, визначені наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, наведені дані щодо апробації і впровадження.

У першому розділі розглянуто сучасні методи формування зносостійких покриттів та проаналізовані методики оцінки їх якості.

На основі аналізу літературних даних встановлено, що застосування ЕІЛ при армуванні поверхневих шарів алюмінієвих сплавів надає переваги, в порівнянні з іншими технологіями, які ґрунтуються на використанні енергозберігаючої технології та підвищенні наукоємності технологічного забезпечення поверхневого зміцнення. Для підвищення якості ЕІЛ необхідно враховувати ступінь суцільності покриття, його мікрогеометричні та міцнісні характеристики. Комплексна оцінка якості ЕІЛ дозволить розробити технологічні рекомендації для їх нанесення з застосуванням багатофункціональних електродів, які забезпечать формування зносостійкого покриття.

Для оцінки зносостійкості армованих алюмінієвих сплавів необхідно встановити механізми механо-фізико-хімічних змін, які протікають в процесі структурної пристосованості при терті. Перспективним напрямком при цьому має бути залучення основних положень молекулярно-механічної та структурно-енергетичної теорій тертя, які дозволять виявити основні зміни, що відбуваються в фрикційному контакті та визначити домінуючі чинники, що забезпечують підвищення зносостійкості трибосистем.

Перспективним напрямком дослідження зносостійкості ЕІЛ є розробка нових методик оцінки їх триботехнічних характеристик. Інформативним методом трибодіагностики вузлів тертя є метод АЕ, оскільки на підставі спектрів зміни амплітуди сигналу АЕ, величини розкиду сигналів і енергетичних параметрів АЕ можливо прогнозувати та оцінити процеси зношування. Проаналізовано, що використання методу АЕ дозволить більш глибоко оцінити якість сформованих ЕІЛ з урахуванням механізмів дисипації енергії та пружно-пластичних змін в поверхневих шарах.

Ґрунтуючись на вищезазначеному, визначена мета роботи і напрямки теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі наведено методологію оцінки якості електроіскрових покриттів триботехнічного призначення. З метою створення оптимальної мікрогеометрії та знаку залишкових напружень електроіскрових покриттів для термочутливих матеріалів, до яких відносяться алюмінієві сплави, обрано технологію ЕІЛ, при якій формуються ЕІЛ дискретного типу, з наступною обробкою сформованих покриттів ППД, що дозволяє сформувати поверхневий шар з високою твердістю, зносостійкістю, низькою шорсткістю і підвищеною втомною міцністю.

Обґрунтовано, що застосування методу кінцевих елементів для розрахунку напружено-деформованого стану дискретних ЕІЛ дозволить проаналізувати на стадії проектування оптимальну щільність ЕІЛ з урахуванням еквівалентних напружень в одиночному покритті, рівня максимальних напружень, залишкових напружень в покритті та дотичних напружень в площині адгезійного контакту.



Розроблено методики оцінки триботехнічних характеристик дискретних ЕП на модернізованій універсальній машині тертя СМТ-1 з інформаційно-вимірювальною системою реєстрації навантаження, моменту тертя, температури мастильного матеріалу, частоти обертання, сигналів АЕ, що дозволяє оцінювати кінетику зміни триботехнічних характеристик фрикційного контакту без зупинки установки та аналізувати інтенсивність зношування контактних поверхонь за параметром усередненої потужності АЕ ( $W_{yc}$ ). Представлена методика реєстрації та обробки сигналів АЕ, описано розподіл функцій між пристроями каналу реєстрації та обробки сигналів АЕ за їх призначенням та виконанням операцій, а саме: проведення вимірювань та передача даних; збереження даних, їх обробка та формування результатів, аналіз та відображення інформації, контроль та управління всіма процесами.

Обґрунтовано необхідність оцінки параметрів профілю мікрорельєфу поверхні дюралюмінію з ЕП, застосування сучасних методик металофізичних досліджень та оцінки хімічного складу поверхонь тертя для встановлення механізмів формування зносостійких дисипативних структур та оцінки рівня структурної пристосованості дискретних ЕП при терті.

У третьому розділі проаналізовано вплив процесів контактної взаємодії електроіскрових покриттів на зносостійкість трибоспряження.

За результатами моделювання напружено-деформованого стану покриття–основа встановлено переваги дискретних покриттів зі щільністю 55–65 %: збільшення щільності покриття з 20 до 60 % для матеріалів ВК-8, Сu, ВК-8+Сu обумовлює зниження еквівалентних напружень в одиночному покритті відповідно в 1,95 : 1,14 : 1,81 раз та в основі в 1,52 : 1,33 : 1,65 раз. При щільності покриття більше 65 % встановлено збільшення максимальних напружень за рахунок зростання залишкових напружень в покритті та дотичних напружень в площині адгезійного контакту (рис. 1).

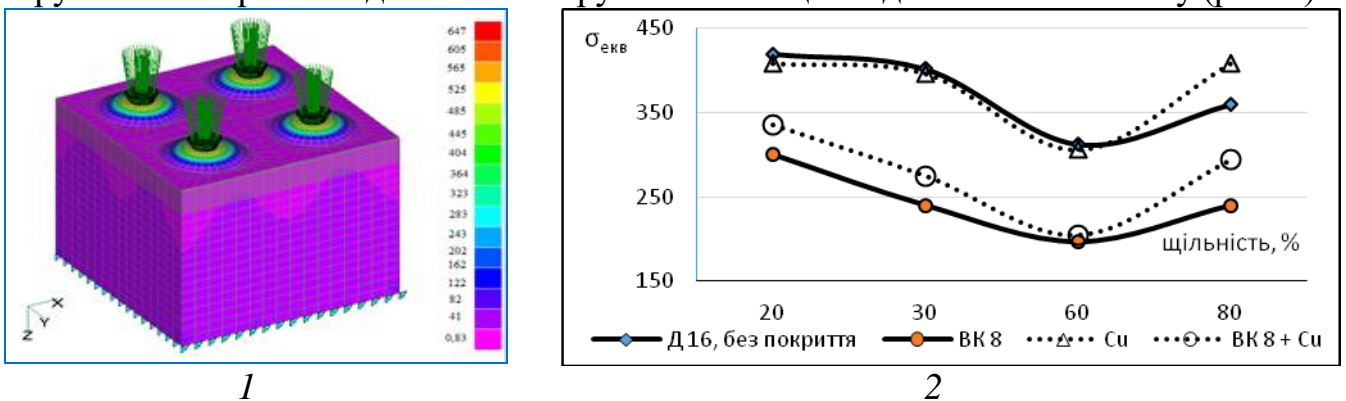


Рис. 1. Поля еквівалентних напружень від дії одиничного навантаження (1) та залежність розподілу еквівалентних напружень від щільності покриття в основі, під елементом покриття (2)

Визначено оптимальний роботоздатний стан дискретних ЕП зі щільністю 55–65 %, який характеризується мінімальними показниками зносу та усередненої потужності АЕ за рахунок зниження напружено-деформованого стану покриття та основи при оптимізації дискретності покриття, розподілу контактних навантажень, формуванні оптимальної геометрії поверхні (рис. 2).

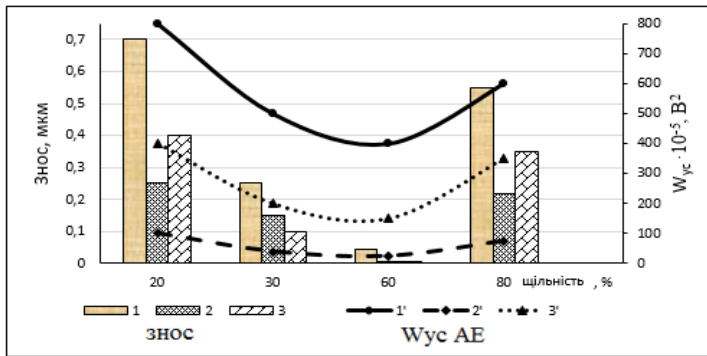


Рис. 2. Залежність зносу та усередненої потужності акустичної емісії ( $W_{yc}$ ) армованого Д16 від щільності нанесення електроіскрового покриття: 1, 1' – ВК-8; 2, 2' – Cu; 3, 3' – ВК-8+ Cu

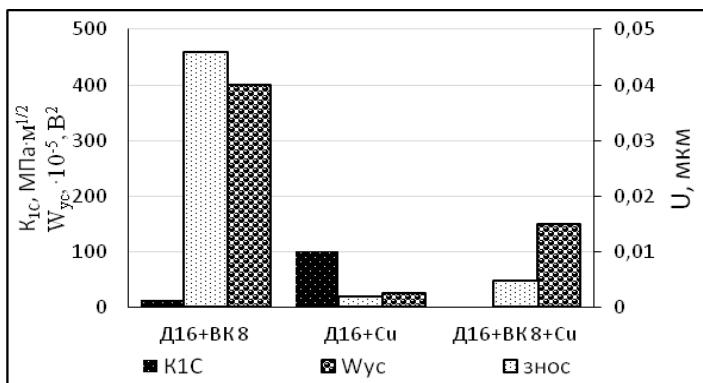


Рис. 3. Знос ( $U$ ), усереднена потужність АЕ ( $W_{yc}$ ), в'язкість руйнування ( $K_{1C}$ ) Д16 з дискретними електроіскровими покриттями щільністю 60 %

Проаналізовано мікрогеометричні характеристики електроіскрових покриттів в вихідному стані. Побудовані криві Аббота та визначені параметри, які найбільше впливають на зносостійкість ЕП: зменшення середньої арифметичної висоти виступів верхньої частини профілю обумовлює скорочення періоду припрацювання контактних поверхонь; зростання середньої арифметичної глибини серцевини мікронерівностей профілю забезпечує підвищення несучої здатності та визначає розподіл навантаження в контакт; збільшення середньої арифметичної глибини впадин профілю є головною передумовою щодо підвищення питомої маслоємності поверхні та забезпечення ефективних змащувальних та антифрикційних властивостей трибоконтакту.

Встановлено, що армування дюралюмінію Д16 комбінованим електроіскровим покриттям ВК-8+Cu забезпечує зменшення середньої арифметичної висоти виступів верхньої частини профілю в 4,4 і 3,2 рази, зростання середньої арифметичної глибини серцевини мікронерівностей профілю в 2 рази, збільшення середньої арифметичної глибини впадин профілю в 1,8 і 1,1 рази, в порівнянні з електроіскровими покриттями твердого сплаву ВК-8 та міді відповідно. Дані параметри сприяють скороченню періоду припрацювання контактних поверхонь, зміцнених комбінованим електроіскровим покриттям ВК-8+Cu, підвищують їх несучу здатність, контактну довговічність, питому маслоємність поверхні.

Підвищення зносостійкості армованого алюмінієвого сплаву Д16 комбінованим електроіскровим покриттям ВК-8+Cu реалізується за рахунок локалізації еквівалентних напружень в елементах покриття, зниження на 100 МПа еквівалентних напружень в основі, релаксації напружень при терті, що обумовлено комбінацією реологічних показників твердого сплаву ВК-8 з в'язкістю руйнування  $13,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  та пластичного матеріалу міді з в'язкістю руйнування  $100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$  (рис. 3).

Аналіз реолого-кінетичного механізму зношування ЕП з урахуванням показників в'язкості руйнування покриття – основа дозволяє оцінити та спрогнозувати локалізацію процесів руйнування та деформування при терті.

Оцінка реологічних показників матеріалу основи та покриття дозволяє встановити приховані процеси механо-деформаційних змін в основі (для матеріалу Д16+Cu) та на поверхні (для матеріалу Д16+ ВК-8) досліджуваних пар тертя.

Оцінка міцнісних характеристик дискретних електроіскрових покриттів при терті встановила вплив мікротвердості поверхневих та приповерхневих шарів матеріалу, градієнту механічних властивостей по глибині, суцільності покриття на їх оптимальну структурну пристосованість (рис. 4).

При формуванні комбінованого електроіскрового покриття ВК8+Cu усуваються недоліки, які встановлені для кожного покриття окремо. Його висока зносостійкість обумовлена як реалізацією позитивного градієнту

механічних властивостей по глибині, так і локалізацією деформаційних процесів в покритті. Наявність міді на твердому покритті забезпечує ефективну структурну пристосованість комбінованого покриття при терті за рахунок релаксації внутрішніх напружень: знеміцнення покриття в 1,25 разів, в порівнянні з покриттям ВК8, знижує імовірність формування локальних концентраторів напружень шляхом підвищення суцільності покриття (рис. 5).

Суцільність комбінованого покриття ВК8+Cu зростає в 2 рази, в порівнянні з покриттям ВК8, за рахунок заповнення несуцільностей твердого покриття ВК8 міддю, що сприяє локалізації нормальних та тангенціальних напружень в м'якій складовій комбінованого покриття.

У четвертому розділі проведена оцінка триботехнічних характеристик дискретних електроіскрових покриттів з реєстрацією та обробкою сигналів акустичної емісії.

Наявність армованої поверхні Д16 з покриттям сплаву ВК-8, який характеризується високою твердістю ( $HRC \approx 87$ ) за рахунок карбідів вольфраму, забезпечує зниження усередненої потужності АЕ в 2 рази на етапі припрацювання за рахунок реалізації структурної пристосованості трибоелементів з меншими напружено-деформованими змінами. Для армованої поверхні дюралюмінію покриттям сплаву ВК-8 характерні поодинокі сплески параметру  $W_{uc}$ , які перевищують сталі показники в 1,5–2 рази. Це обумовлено підвищенням потужності тертя в контакті за рахунок зростання фону внутрішнього тертя внаслідок збільшення внутрішніх напружень в поверхневих шарах металу при терті при зменшенні здатності матеріалу ВК-8 поглинати механічну енергію в процесі деформації. Основна причина – низька ударна в'язкість сплаву ВК-8, яка становить  $32 \text{ кДж/м}^2$ , що в 10 разів менше, ніж в еталонному сплаві Д16. Отже, зростання фону внутрішнього тертя може бути обумовлено підвищенням густини дефектів, які є

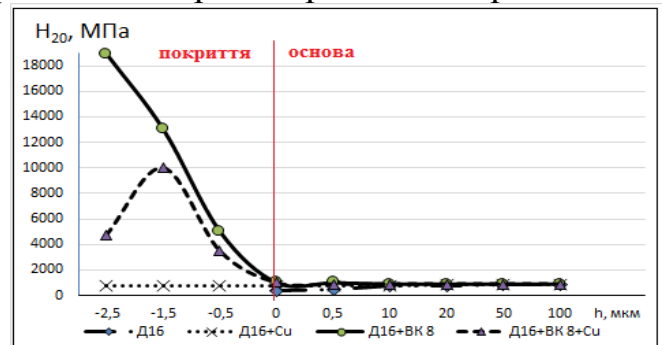


Рис. 4. Мікротвердість приповерхневих шарів металу по глибині

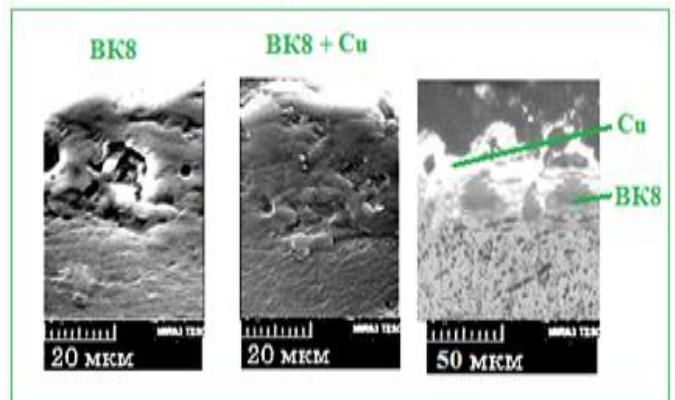


Рис. 6. Оптично-мікроскопічні зображення поперечних перерізів зразків дюралюмінію Д16 з електроіскровими покриттями після триботехнічних випробувань

концентратами крихкого руйнування, що проявляється в відшаруванні окисних плівок і фіксується поодинокими сплесками параметру усередненої потужності АЕ.

ЕПІ з міді забезпечує зниження параметру  $W_{yc}$  в 2...25 разів залежно від етапу наробітки та кінематики контакту, що свідчить про зниження напружено-деформованого стану в поверхневих шарах металу при терті. Механізм зниження напружено-деформованого стану в поверхневих шарах при терті при нанесенні покриття з Си полягає в високій здатності міді поглинати механічну енергію в процесі деформації та руйнування при терті (ударна в'язкість міді становить  $1700 \text{ кДж/м}^2$ , що в 5,8 разів більше за ударну в'язкість дюралюмінію Д16).

Армування поверхневих шарів дюралюмінію Д16 за рахунок нанесення дискретних електроіскрових покриттів зменшує напружено-деформований стан при терті та забезпечує прискорення структурної пристосованості. Як для покриття ВК8, так і для покриття Си встановлено зниження антифрикційних властивостей, в середньому, в 1,6–2 рази, однак при зростанні коефіцієнту тертя не знижується зносостійкість контактних поверхонь. Навпаки, процес структурної пристосованості досліджуваних електроіскрових покриттів характеризується зростанням потужності тертя, в середньому в 1,27–2 рази, що, в свою чергу, обумовлює підвищення температури.

Підвищення структурно-термічної активації армованих електроіскровими покриттями контактних поверхонь в процесі тертя призводить до інтенсифікації механо-фізико-хімічних процесів в умовах граничного мащення, що, в цілому, підвищує зносостійкість контактних поверхонь (рис. 6).

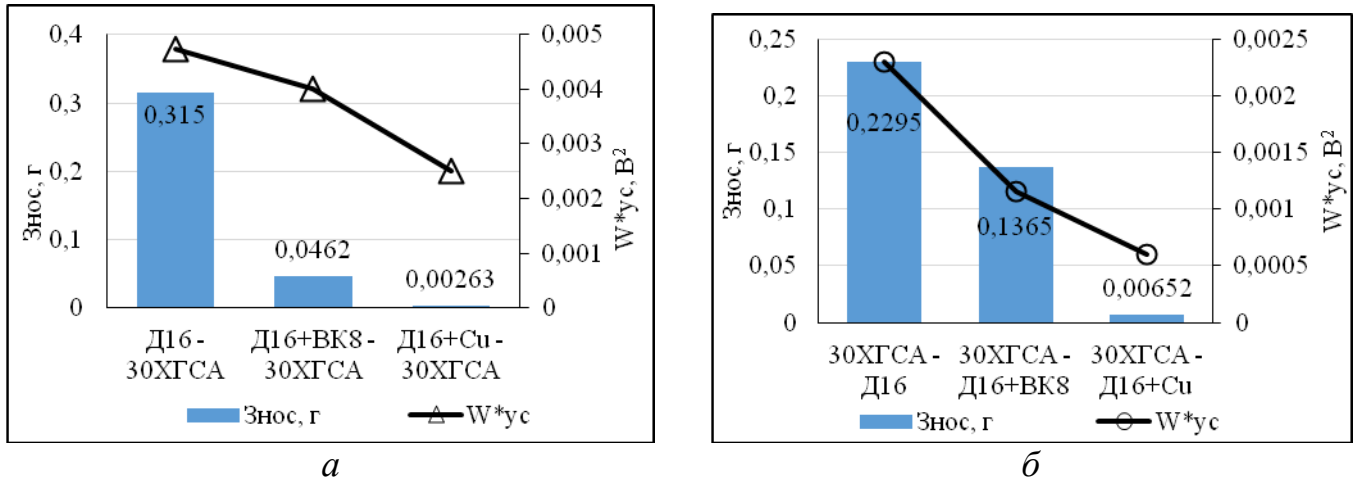


Рис. 6. Взаємозв'язок параметру усередненої потужності акустичної емісії ( $W^*_{\text{ош}}$ )

та вагового зносу контактних поверхонь: *а* – рухомий трибоелемент неармований/армований дюралюміній Д16; *б* – рухомий трибоелемент сталь 30ХГСА

Механізм підвищення зносостійкості полягає в збільшенні швидкості протікання фізико-хімічних процесів, які обумовлюють утворення вторинних структур за участю кисню та активованих молекул мастильного матеріалу. За зовнішніми ознаками, на контактних поверхнях формуються вторинні структури, які характеризуються гетерогенністю – домінують вигладжені ділянки, вкриті плівкою, подекуди проявляються ділянки зі зруйнованою плівкою. Руйнування плівки свідчить про відшарування метастабільних вторинних структур, які представляють

собою оксиди нестехіометричного складу. Хімічний аналіз вторинних структур зразків Д16, Д16+ВК8, Д16+Cu встановив, що концентрація кисню становить відповідно 0,64; 9,87; 0,78 %.

За параметром ударної в'язкості в емпіричних залежностях спрогнозовано знатність матеріалу поглинати механічну енергію процесів деформації та руйнування при терті. Критерій, за яким можливо спрогнозувати інтенсивність механо-деструкційних процесів в поверхневих шарах металу при терті, є параметр усередненої потужності АЕ.

У п'ятому розділі проведено прогнозування зносостійкості трибосистеми за параметрами акустичної емісії.

Проаналізовано числові енергетичні показники при переході трибосистеми від нормального до катастрофічного зношування на основі уявлення кореляції енергії пластичної деформації з амплітудними характеристиками сигналів АЕ (табл. 1).

Таблиця 1 – Енергія сигналів акустичної емісії

Пари тертя	Навантаження, $N$						
	100	200	400	600	800	1000	1200
Д16 – 30ХГСА	$8 \cdot 10^{-8}$	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$			
30ХГСА – Д16	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-7}$	$1,28 \cdot 10^{-7}$	$8,8 \cdot 10^{-6}$			
Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$	$9,2 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$
30ХГСА – Д16+ВК8+Cu	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$10^{-7}$

Одержані показники енергетичних характеристик сигналів АЕ свідчать про те, що для трибосистеми Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА стадія інтенсивного зношування характерна при навантаженні 800...1200 Н – енергетичні показники досягають  $(6,5...9,2) \cdot 10^{-6}$  Дж, що відповідає енергії руйнування. Однак в процесі експерименту не спостерігалось схоплювання і задирів контактних поверхонь. Збільшення енергетичних показників трибоконтакту обумовлено інтенсифікацією дисипативних процесів в поверхневих шарах контактних поверхонь, що призводить до формування модифікованих структур в поверхневих шарах матеріалів пар тертя, які характеризуються підвищеною питомою роботою зношування. Для трибосистем 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu не встановлено суттєвої зміни енергетичних характеристик трибоконтакту, що свідчать про реалізацію механізмів зношування, віддалених від катастрофічних.

Аналіз сигналів АЕ свідчить про зниження напружено-деформованого стану фрикційного контакту та інтенсивності протікання пластичних деформацій для трибосистем з армованим дюралюмінієм. На кожному ступені навантаження значення усередненої потужності сигналів АЕ та величин їх розкиду ( $W_{\text{оф}} \pm$ ) зменшуються в 2–4 рази (табл. 2).

Таблиця 2 – Параметри АЕ в умовах ступеневого підвищення навантаження

Параметр	Навантаження, Н						
	100	200	400	600	800	1000	1200
30ХГСА – Д16 (рухомий трибоелемент 30ХГСА)							
$W_{\text{оїп}}, B^2$	0,005	0,006	0,005	0,0106	–	–	–
$W_{\text{оїп} \pm}, B^2$	0,0025	0,0035	0,003	0,0104	–	–	–
30ХГСА – Д16+ВК8+Cu (рухомий трибоелемент 30ХГСА)							
$W_{\text{оїп}}, B^2$	0,0005	0,00165	0,00235	0,00515	0,0025	0,0036	0,00515
$W_{\text{оїп} \pm}, B^2$	0,00025	0,00115	0,00145	0,00335	0,0015	0,0024	0,00335

Основною передумовою зменшення ступеня пластичних деформацій в фрикційному контактi являється наявність комбінованого дискретного ЕПІ, яке характеризується ефективними демпфуючими властивостями як за рахунок мідної плівки, яка в процесі структурної пристосованості трибосистеми покриває до 80 % площі поверхні армованого дюралюмінію Д16, так і за рахунок дискретного шару твердого сплаву ВК-8, що забезпечує локалізацію напружень в покритті та перешкоджає розповсюдженню пластичних деформацій в більш м'яку основу дюралюмінію Д16.

За результатами моделювання глибини локалізації пластичних деформацій в програмному забезпеченні SolidWorks встановлено зниження цього параметру в 2 рази для армованого дюралюмінію Д16, в порівнянні з неармованою поверхнею, напружено-деформований стан локалізується в електроіскровому комбінованому покритті, не розповсюджуючись в матеріал основи (рис. 7).

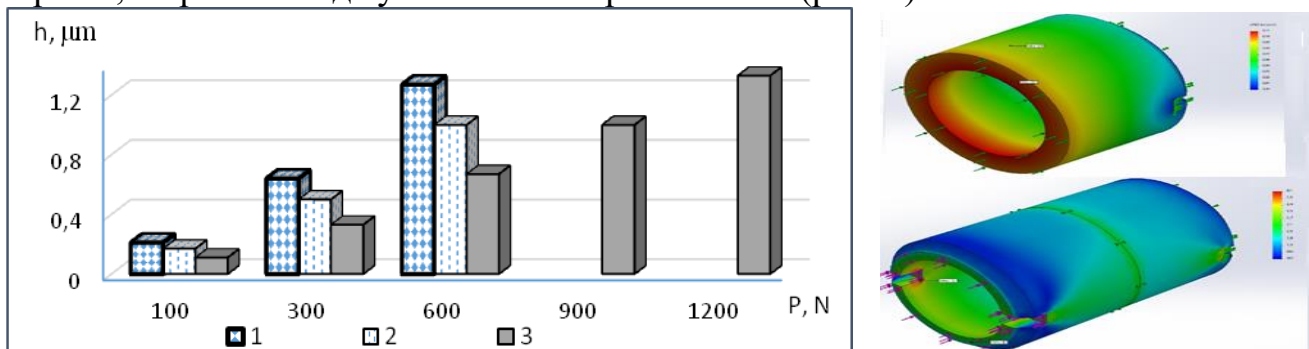


Рис. 7. Результати моделювання впливу навантаження ( $P$ ) на глибину локалізації напружено-деформованого стану приповерхневих шарів ( $h$ ): 1 – Д16 (рухомий трибоелемент); 2 – Д16 (нерухомий трибоелемент); 3 – Д16+ВК8+Cu (рухомий та нерухомий трибоелемент).

На основі проаналізованих експериментальних даних зносостійкості досліджуваних трибосистем одержані емпіричні залежності інтенсивності зношування від погонного навантаження ( $N/l$ ), усередненої потужності сигналів АЕ ( $W_{yc}$ ), розкиду величини усередненої потужності сигналів АЕ ( $W_{\text{оїп} \pm}$ ), часу напрацювання ( $t$ ) та шляху тертя ( $L$ ) (рис. 8):

$$I = \frac{\frac{N}{l} \cdot W_{\text{оїп}} \cdot W_{\text{оїп} \pm}^{0,5} \cdot t^{0,5}}{L}. \quad (1)$$

Проаналізовано формування дисипативних структур досліджуваними трибосистемами.

Для трибосистеми 30ХГСА – Д16 встановлено, що в результаті механо-температурної активації поверхневих шарів трибоелементів та активованих внаслідок дії градієнту швидкості зсуву компонентів моторної оливи М10Г<sub>2</sub>к відбувається формування граничних плівок мастильного матеріалу різної природи. Досліджуваний мастильний матеріал є джерелом активних компонентів при насиченні поверхневих шарів металів вуглецем, сіркою та фосфором. Однак, в умовах ступеневого підвищення навантаження при 600 Н реалізується напівсухий режим мащення, відбувається деструкція граничних плівок. В таких умовах домінує процес механохімічного окислення дюралюмінію Д16, спричинений інтенсивною пластичною деформацією поверхневих шарів даного сплаву, який характеризується меншою твердістю, в порівнянні зі сталлю 30ХГСА. З ростом товщини окисної плівки в нерівноважних термодинамічних умовах в ній збільшуються внутрішні напруження, відбувається відшаровування плівки. Оскільки мікротвердість окисних шарів сплаву Д16 досягає 10...12 ГПа, дані частки зносу виступають в якості твердого абразиву для поверхні сталі 30ХГСА з мікротвердістю поверхневих шарів 7...9 ГПа. В таких умовах домінують процеси катастрофічного зношування, які характеризуються зниженням антифрикційних властивостей трибосистеми 30ХГСА – Д16 та зростанням швидкості зношування дисипативних структур в 14 разів.

Інший механізм механохімічного окислення реалізується в процесі тертя трибосистеми 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu. Домінування змішаного режиму мащення в умовах ступеневого підвищення навантаження обумовлено як формуванням граничних шарів мастильного матеріалу на активованих тертях контактних поверхнях, так і наявністю резерву мастильного матеріалу внаслідок дискретності сформованого комбінованого покриття на поверхні сплаву Д16.

Аналіз хімічного складу поверхневих шарів трибоелементів встановив збільшення концентрації сірки в 6,2 рази та кисню в 3 рази для сплаву Д16+ВК8+Cu; для сталі 30ХГСА концентрація сірки, фосфору та кисню зростає в 2,9, 6 та 15 разів відповідно. (табл. 3, 4).

Таблиця 3 – Хімічний склад поверхневих шарів сплаву Д16

Матеріал	Вміст хімічних елементів, %							
	O	Mg	Fe	Al	Mn	Cu	C	S
Д16 (вихідна поверхня)	0.85	1.23	0.49	92.26	0.53	4.64	-	-
Д16 (після тертя)	2.24	1.11	0.33	90.62	0.66	4.4	0.27	0.38
Матеріал	Вміст хімічних елементів, %							
	O	Co	Fe	Al	W	Cu	S	
Д16+ВК8 +Cu (вихідна поверхня)	1.15	0.09	0.31	77.20	1.00	20.15	0.10	
Д16+ВК8 +Cu (після тертя)	3.46	0.10	0.29	64.16	1.57	29.80	0.62	

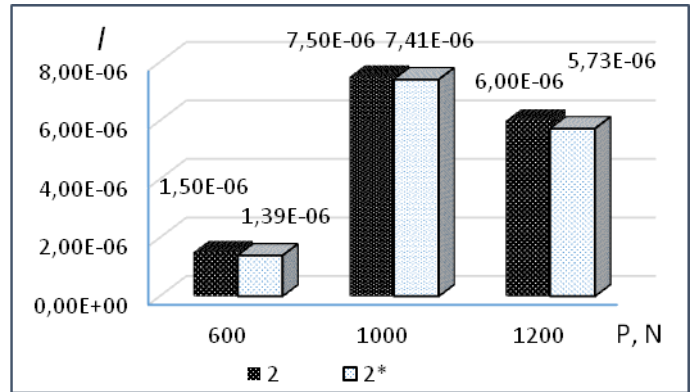


Рис. 8. Показники інтенсивності зношування (I) для трибосистеми Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА: 2 – експериментальні, 2\* – за формулою (1)

Таблиця 4 – Хімічний склад поверхневих шарів сталі 30ХГСА

Матеріал	Вміст хімічних елементів, %							
	O	Al	Si	Fe	Mn	S	P	Cr
Сталь 30ХГСА (вихідна поверхня)	0.22	–	1.59	95.7	1.1	0.33	0.19	0.87
Сталь 30ХГСА (поверхня після тертя, контртіло Д16)	0.25	0.23	1.43	95.37	1.1	0.47	0.33	0.82
Сталь 30ХГСА (поверхня після тертя, контртіло Д16+ВК8 +Cu)	3.69	0.06	0.79	91.47	1.04	0.96	1.13	0.86

Насичення поверхневих шарів зазначеними елементами свідчить про інтенсифікацію дисипативних процесів при структурній пристосованості трибоелементів в процесі тертя, що спричинює формування хімічномодифікованих граничних шарів. Насамперед, цьому сприяє наявність міді в комбінованому електроіскровому покритті, для якої характерна висока спорідненість до сірки та фосфору. Утворені дисипативні структури забезпечують зниження впливу зовнішніх чинників шляхом реалізації принципу найменшої дії. По-перше, в 1,4 рази знижується приріст температури в зоні фрикційного контакту, в порівнянні з трибосистемою 30ХГСА–Д16. По-друге, утворені дисипативні структури характеризуються стійкістю в умовах ступеневого зростання навантаження, що забезпечує розширення діапазону нормальної роботи трибосистеми 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu до 1200 Н. При цьому не спостерігається зростання антифрикційних характеристик, коефіцієнт тертя стабільний. По-третє, сформовані дисипативні структури характеризуються високою зносостійкістю – швидкість зношування трибосистеми 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu, наприклад, при 600 Н зменшується в 7 разів в умовах нормального зношування.

Експериментальні дослідження триботехнічних властивостей армованого дюралюмінію Д16 комбінованим електроіскровим покриттям дозволили встановити низку параметрів, що впливають на знос пар тертя, який можна врахувати методами математичної статистики. Проведено регресійний аналіз оцінки впливу домінуючих чинників на знос дискретних електроіскрових покриттів.

Отримано емпіричне рівняння множинної регресії, де знос ( $I$ ) армованого/неармованого дюралюмінію Д16 можливо спрогнозувати на основі кінетики зміни температури в фрикційному контакті ( $T$ ), усередненої потужності сигналів АЕ ( $W_{yc}$ ) та зміни мікротвердості поверхні при напрацюванні ( $\Delta H_{20}$ ):

$$I = a_0 - a_1 * T + a_2 * W_{yc} + a_3 * \Delta H_{20}. \quad (2)$$

По модулю, усі статистики коефіцієнтів є меншими за квантиль (табл. 5), а отже є значущими, що свідчить про адекватність моделі регресії, а отже і про адекватність експерименту.

Таблиця 5 – Показники адекватності моделі регресії

Коефіцієнт детермінації	0,75			
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Коефіцієнти регресії	0,1426	- 0,0019	9,56E-05	- 1,84E-06
$t$ – статистика коефіцієнтів регресії	–	0,2557	0,8525	0,0493
$t$ – статистика квантиль	–	1,0364		



*У додатках* представлено: результати моделювання напружено–деформованого стану трибосистеми сталь 30ХГСА – армований/неармований дискретним ЕП дюралюміній Д16 в SolidWorks, акти впровадження результатів наукових досліджень та технологічний процес електроіскрового легування.

## ВИСНОВКИ

1. Визначено роботоздатний стан дискретних ЕП зі щільністю 20...80 %. Мінімальні показники зносу та усередненої потужності АЕ, характерні для ЕП з щільністю 55...65 %, обумовлені оптимальним розподілом контактних навантажень, формуванням оптимальної мікрогеометрії поверхні в області максимального збільшення матеріалу профілю мікрорельєфу поверхні на кривій Аббота до 36...56 % та зростанням маслоємності поверхні в 1,23...3,12 разів.

2. Встановлено підвищення зносостійкості в 2 рази дюралюмінію Д16 шляхом формування дискретного комбінованого електроіскрового покриття зі сплаву ВК8 та міді щільністю 55–65 % з подальшим поверхневопластичним деформуванням за рахунок формування в покритті залишкових напружень стиску -70...-90 МПа, локалізації головних нормальних напружень в покритті та зниження розповсюдження деформаційних процесів в приповерхневих шарах матеріалу по глибині на 70 %.

3. Встановлено зниження в 3 рази механо-деформаційних змін в приповерхневих шарах дюралюмінію Д16 з комбінованим електроіскровим покриттям внаслідок ефективної релаксації напружень при терті за рахунок комбінації реологічних показників твердого сплаву ВК8 (в'язкість руйнування  $13,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) та пластичного матеріалу міді (в'язкість руйнування  $100 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ ) і формування позитивного градієнту механічних властивостей по глибині ЕП – основа Д16.

4. Обґрунтовані закономірності переходу трибосистеми до катастрофічного зношування при ступеневому підвищенні навантаження, що спричинює інтенсифікацію пластичних деформацій, зародження та розвиток дефектів і супроводжується появою сигналів акустичної емісії з великими амплітудами та величинами їх розкиду, зростанням енергії руйнування до  $1,5 \cdot 10^{-5} \dots 8,5 \cdot 10^{-6}$  Дж, утворенням ділянок мікросхоплювання в фрикційному контакті та переходом до внутрішнього тертя.

5. Армування дюралюмінію Д16 електроіскровим покриттям ВК8+Cu забезпечує збільшення питомої маслоємності поверхні до  $0,128 \text{ мм}^3/\text{см}^3$ , що спричинює домінування еластогідродинамічного або змішаного режимів мащення, підвищення антифрикційних характеристик контакту та зниження швидкості зношування в умовах ступеневого зростання навантаження до 1200 Н.

6. Ефективність структурної пристосованості трибосистеми сталь 30ХГСА – дюралюміній Д16 збільшується при армуванні дюралюмінію Д16 електроіскровим покриттям ВК8+Cu за рахунок утворення зносостійких дисипативних структур з концентрацією сірки 0,62...0,95 %, фосфору 0,9...1,13 % та кисню до 3,65 % внаслідок механо-температурної активації поверхневих шарів трибоелементів та активованих дією градієнту швидкості зсуву компонентів мастильного матеріалу.

7. На основі статистичного аналізу впливу випадкових величин (еквівалентні напруження, температура, коефіцієнт тертя, усереднена потужність сигналів АЕ та ін.) виділено незалежні ознаки з парним коефіцієнтом кореляції  $> 0,6$  при

коефіцієнті множинної кореляції для вибірки 0,866 та одержано емпіричне рівняння множинної регресії для оцінки зносу армованого/неармованого електроіскровим покриттям ВК8+Cu дюралюмінію Д16.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографія

1. Mikosianchuk O., Mnatsakanov R., Tokaruk V., Kharchenko O. Phenomenological probabilistic model of friction pair wear taking into account thermal mechanical stability of boundary layers. *Chemmotological Aspects of Sustainable Development of Transport. Sustainable Aviation: monograph* / Boichenko S. et al. (eds). Springer, Cham, 2022. P. 31–49. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06577-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06577-4_3) (Scopus).

### У фахових виданнях:

2. Бабак В. П., Стадніченко В. М., Приймаков О. Г., Токарук В. В. Прогнозування витривалості авіаційних матеріалів. *Автоматика. Автоматизація, електротехнічні комплекси і системи*. 2004. № 1 (13). С. 158–162.

3. Запорожець В. В., Білякович О. М., Токарук В. В. Експериментальна оцінка енергії активації поверхневого руйнування сталі ШХ15 в авіапаливі ТС-1. *Проблеми трибології*. 2006. № 1. С. 118–126.

4. Запорожець В. В., Білякович О. М., Токарук В. В. Вплив параметрів навантаження на товщину мастильного шару в контактній зоні трибосполучень. *Проблеми трибології*. 2006. № 2. С. 101–104.

5. Запорожець В. В., Білякович О. М., Токарук В. В. Оцінка впливу трансмісійної оливи на стан поверхонь трибоспряжень. *Проблеми трибології*. 2007. № 3. С. 30–33.

6. Запорожець В. В., Білякович О. М., Токарук В. В., Федина В. П. Застосування Фур'є-аналізу для оцінки ресурсу трансмісійних оливи. *Вісник Національного транспортного університету*. 2007. № 14. С. 242–244.

7. Запорожець В. В., Стадніченко В. В., Токарук В. В. Методология ускоренной оценки износостойкости образцов с электроискровыми покрытиями. *Проблеми трибології*. 2010. № 4. С. 25–31.

8. Запорожець В. В., Стадніченко В. В., Токарук В. В. Динамика задиростойкости и переходные процессы при износе электроискровых покрытий. *Проблеми трибології*. 2010. № 4. С. 47–51.

9. Запорожець В. В., Стадніченко В. В., Токарук В. В. Критерії оцінювання механізму дисипації енергії та прогнозування ресурсу при акусто-емісійній діагностиці аксіально-поршневих гідромашин. *Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб.* 2010. Вип. 54. С. 5–18.

10. Мікосянчик О. О., Кудрін А. П., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Токарук В. В. Оцінка теплових процесів у фрикційному контакті при коченні з проковзуванням. *Проблеми тертя та зношування*. 2017. № 4 (77). С. 1–4.

11. Якобчук О. Є., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Хімко А.М., Токарук В. В. Протизадирні властивості мастила Aero Shell Grease 33 при використанні конструкційних сталей 9ХС і 30ХГСА. *Проблеми тертя та зношування*. 2018. № 1 (78). С. 27–36.

12. Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Якобчук О. Є., Токарук В. В. Прогнозування лінійного зносу контактних поверхонь в екстремальних умовах тертя. *Проблеми тертя та зношування*. 2018. № 4 (81). С. 4–12.

13. Токарук В. В., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О., Кудрін А. П. Закономірності зміни триботехнічних параметрів та сигналів акустичної емісії для пари тертя 30ХГСА-Д16. *Проблеми тертя та зношування*. 2019. № 2 (83). С. 19–28. DOI: 10.18372/0370-2197.2(83).13688.

14. Токарук В. В., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О. Кінетика зміни сигналів акустичної емісії та триботехнічних характеристик для пар тертя в умовах ковзання. *Проблеми тертя та зношування*. 2019. № 3 (84). С. 40–47. DOI: 10.18372/0370-2197.3(84).13850.

15. Mikosianchuk O. A., Tokaruk V. V., Mnatsakanov R. G. Estimation of tribotechnical characteristics and signals of acoustic emission for a friction pair of steel 30HGSА and duraluminium D16 modified by an alloy VK8. *Problems of Tribology*. 2019. № 2 (92). С. 48–54. DOI: 10.31891/2079-1372-2019-92-2-48-54.

16. Богданович О. І., Токарук В. В., Статніков Ю. Я. Визначення енергії активації механо-хімічного модифікування сталі ШХ15 в середовищі авіаційного палива ТС-1 довготривалого зберігання. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 1 (86). С. 93–97. (категорія Б) DOI: 10.18372/0370-2197.1(86).14492.

17. Tokaruk V. V., Mikosianchuk O. O., Mnatsakanov R. G., Rohozhyna N. O. Microgeometrical characteristics of electrospark coatings in the initial state. *Problems of Tribology*. 2020. №4 (98). С. 33–39. DOI: 10.31891/2079-1372-2020-98-4-33-39.

18. Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Якобчук О. Є., Хімко А. М., Токарук В. В. Розробка методики контролю та діагностики експлуатаційних властивостей мастильних матеріалів за триботехнічними параметрами. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 1 (90). С. 11–19. DOI: 10.18372/0370-2197.1(90).15234.

19. Мікосянчик О. О., Токарук В. В., Мнацаканов Р. Г., Занько С. М., Жосан О. Ю. Вплив деформаційних процесів і структурно-фазових перетворень на зносостійкість контактних поверхонь. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 2 (91). С. 54–62. DOI: 10.18372/0370-2197.2(91).15529.

20. Мікосянчик О. О., Токарук В. В., Мнацаканов Р. Г., Занько С. М., Жосан О. Ю. Вплив деформаційних процесів і структурно-фазових перетворень на зносостійкість контактних поверхонь. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 2 (91). С. 54–62. DOI: 10.18372/0370-2197.2(91).15529.

21. Токарук В. В., Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко А. М., Ільїна О. А. Оцінка напружено-деформованого стану трибоконтакту за зміною усередненої потужності акустичної емісії. *Проблеми тертя та зношування*. 2022. № 3 (96). С. 30–40. DOI: 10.18372/0370-2197.3(96).16833.

#### **У іноземних спеціалізованих виданнях:**

22. Bogdanovych O. I., Al-Quraan T. M. A., Tokaruk V. V., Haddad J. S. Algorithm for Tribokinetic Modeling Tests of Triboconjunction Materials for Industrial Products. *Tribology in Industry*. 2021. Vol. 43, № 1. P. 159–166. DOI: 10.24874/ti.977.10.20.02 (Scopus)

23. Al-Quraan T. M. A., Tokaruk V. V., Mikosianchyk O. A., Mnatsakanov R. G., Kichata N. M., Kuzin N. O. Influence of Continuity of Electric Spark Coatings on Wear Resistance of Aluminum Alloy. *Tribology in Industry*. 2021. Vol. 43, № 4. P. 603–614. DOI: 10.24874/ti.1170.08.21.10 (Scopus)

#### Матеріали та тези конференцій:

24. Запорожець В. В., Токарук В. В. Фурье анализ структуры поверхностного слоя в связи с оценкой ресурса смазочных материалов. *Сучасні проблеми машинознавства*: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., м. Київ, 22–23 верес. 2008 р., Київ, 2008. С. 32.

25. Запорожець В. В., Токарук В. В. Трибологическая оценка пар трения нано-покрытий акусто-эмиссионным методом. *Сучасні проблеми трибології*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф., м. Київ, 19–21 трав. 2010 р. Київ, 2010. С. 51.

26. Богданович О. І., Токарук В. В. Порівняння енергії активації поверхневого руйнування сталі ШХ 15 в середовищі авіапалив “ТС-1” кондиційного та “ТС-1” довготривалого зберігання. *ABIA-2017*: матеріали XIII Міжн. наук.-техн. конф., м. Київ, 19–21 квітн. 2017 р. Київ, 2017. С. 19.78–19.82

27. Токарук В. В., Мнацаканов Р. Г., Мікосянчик О. О. Кінетика зміни сигналів акустичної емісії та триботехнічних характеристик для пар тертя в умовах ковзання. *Сучасні проблеми машинознавства*: матеріали IV Міжн. наук.-техн. конф., м. Київ, 10 жовтн. 2019 р. Київ, 2019. С. 40–47..

28. Tokaruk V. V., Mikosianchyk O. O. Stress-strain state of duralumin alloy with wear-resistant discrete coatings. *ABIA-2019*: матеріали XIV Міжн. наук.-техн. конф., м. Київ, 23–25 квітн. 2019 р. Київ, 2019. С. 19.42–19.44.

29. Mikosianchyk O. O., Mnatsakanov R. G., Tokaruk V. V., Kharchenko O. V. Phenomenological probabilistic model of friction pair wear taking into account thermomechanical stability of boundary layers. *Problems of chemmology. Theory and practice of rational use of traditional and alternative fuels & lubricants*: VIII International Scientific-Technical Conference, at Kyiv–Kamianets-Podilskyi, 21–25 June 2021. P.31–49.

30. Ільїна О.А., Мікосянчик О.О., Мнацаканов Р.Г., Харченко О.В., Токарук В.В. Моделирование процессов износа зубчатого зацепления. *Science and practice, actual problems, innovations*: The XXVIII International Scientific and Practical Conference, 19–22 July 2022, Milan, Italy. 2022. P. 280–284.

31. Токарук В. В., Мнацаканов Р. Г., Горб Є. С., Якобчук О. Є. Оцінка структурної пристосованості трибосистеми на основі реєстрації та обробки сигналів акустичної емісії. «*AVIATION IN THE XXI-st CENTURY*»: *Safety in Aviation And Space Technologies*: The Tenth World Congress, 28–30 September 2022, Kyiv. 2022. С. 1.2.1–1.2.4

#### Патенти:

32. Пристрій для вимірювання величини лінійного зносу без зупинки машини: пат. 62928 Україна: МПК G01 B21/06. №201100937; заявл. 28.01.2011; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18. 3 с.

## АНОТАЦІЯ

**Токарук В. В. Підвищення зносостійкості дюралюмінієвого сплаву Д16 армуванням поверхневого шару дискретним електроіскровим покриттям. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» (13 – Механічна інженерія). – Національний авіаційний університет, Київ, 2023.

В дисертаційній роботі вирішувалась науково-технічна проблема підвищення триботехнічних і міцністних характеристик алюмінієвих сплавів та розширення навантажувально-швидкісного діапазону їх роботоздатного стану управлінням структуроутворенням та механічними характеристиками при армуванні поверхневих шарів алюмінієвих сплавів зносостійкими електроіскровими покриттями.

Запропоновано формування дискретного комбінованого електроіскрового покриття зі сплаву ВК8 та міді з наступною поверхневопластичною деформацією для підвищення твердості, зносостійкості та розширення навантажувального діапазону працездатного стану армованої поверхні застосуванням енергозберігаючої технології армування поверхні дюралюмінію Д16.

Одержано емпіричні залежності інтенсивності зношування трибосистем сталі – дюралюмінії Д16 (армований/неармований ЕП) з урахуванням антифрикційних характеристик, здатності матеріалу поглинати механічну енергію процесів деформації або руйнування та інтенсивності механо-деструкційних процесів в поверхневих шарах металу при терті, за якими можливо спрогнозувати ефективність створених зносостійких покриттів.

Практичне значення одержаних результатів реалізовані в розробленому комплексі технологічно–експериментальних методів дослідження триботехнічних властивостей матеріалів з дискретними комбінованими електроіскровими покриттями, що призначені для оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів при виготовленні та зміцненні пар тертя ковзання.

**Ключові слова:** акустична емісія, дюралюмінії, дисипативні структури, дискретне покриття, електроіскрове легування, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, зносостійкість, маслоємність поверхні, напружено-деформований стан, поверхневопластичне деформування, усереднена потужність акустичної емісії.

## SUMMARY

**Tokaruk V. V. Increasing the wear resistance of D16 duralumin alloy by reinforcing the surface layer with a discrete electrospark coating – Qualifying scientific work on manuscript rights.**

Thesis for a Candidate Degree in Engineering by specialty: 05.02.04 - The friction and wear in the machines (13 – Mechanical engineering). National Aviation University, Kiev, 2023.

The thesis has solved the scientific and technical problem of increasing the tribotechnical and strength characteristics of aluminium alloys and expanding the load-speed range of their workable state by controlling the structure formation and mechanical characteristics at the reinforcement of the surface layers of aluminium alloys with wear-resistant electrospark coatings (ESC).

It was proposed to form a discrete combined electrospark coating from VK8 alloy and copper with subsequent surface plastic deformation to increase hardness, wear resistance and expand the load range of the workable state of the reinforced surface using energy-saving D16 duralumin surface reinforcement technology.

Empirical dependences of the intensity of wear of steel-duralumin D16 (reinforced/unreinforced ESC) tribosystem were obtained, taking into account anti-friction characteristics, the ability of the material to absorb the mechanical energy of deformation or destruction and the intensity of mechano-destructive processes in the surface layers of the metal at friction, which can be used to predict the effectiveness of the created wear-resistant coatings

The practical value of the obtained results is realized in the developed complex of technologically experimental research methods the tribotechnical properties of materials with discrete combined electrospark coatings, which are designed to optimize the technological processes of applying coatings in the manufacture and strengthening of sliding friction pairs.

**Keywords:** acoustic emission, duralumin, dissipative structures, discrete coating, electrospark alloying, wear intensity, friction coefficient, wear resistance, surface oil content, stress-strain state, surface-plastic deformation, average power of acoustic emission.