

Вченому секретарю спеціалізованої  
вченої ради Д 26.062.06  
Михайлу СВИРИДУ  
Національний авіаційний університет,  
просп. Любомира Гузара, 1  
м. Київ, 03058

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Токарука Віталія Володимировича**

«Підвищення зносостійкості дюралюмінієвого сплаву Д16 армуванням поверхневого шару дискретним електроіскровим покриттям», яка подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» (13 – Механічна інженерія)

### **Актуальність теми дослідження**

Розвиток машинобудування вимагає постійного підвищення потужності, надійності та довговічності деталей машин і механізмів за умов їх роботи у різноманітних середовищах при різних температурах. Сучасні знання про фізико-механічні властивості матеріалів надають можливості щодо забезпечення їх тривалої безаварійної експлуатації. Але близько 90 % машин і механізмів виходять з ладу не внаслідок їх повного руйнування, а пошкодження та зношування деталей під дією сил тертя, що робить винятковими сучасні дослідження в галузі трибології та триботехніки.

Алюміній та його сплави завдяки унікальному комплексу фізичних і механічних характеристик широкого використовуються як конструкційні матеріали в машино-, авіа-, ракето-, суднобудуванні тощо. Водночас широкому застосуванню алюмінієвих антифрикційних сплавів перешкоджає їх недостатня твердість та низька зносостійкість.

Одним з ефективних методів підвищення трибологічних характеристик рухомих спряжень є зміцнення контактних поверхонь шляхом керованої зміни їхньої структури.

Враховуючи зазначене тема дисертаційної роботи, дослідження якої були спрямовані на вирішення науково-технічної проблеми підвищення триботехнічних і міцнісних характеристик алюмінієвих сплавів та розширення навантажувально-швидкісного діапазону їх працездатності шляхом управління структуроутворенням та механічними характеристиками їх поверхневих шарів, є актуальною.

Актуальність теми також підтверджена тим, що робота була виконана в рамках трьох держбюджетних тем Національного авіаційного університету.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідних робіт Національного авіаційного університету, а саме: 88/07.02.02 «Підвищення працездатності конструкцій з авіаційних матеріалів шляхом поверхневого

26.062.06/15

від 30.05.23

*М. Свирід*

зміцнення та відновлення деталей трибосистем»; 110/07.02.02 «Технологічні методи підвищення працездатності елементів авіаційних трибомеханічних систем»; 48-2022/07.06 «Підвищення ресурсу відповідальних вузлів авіаційної техніки та удосконалення технічного обслуговування повітряних суден».

При виконанні зазначених науково-дослідних робіт автором було розроблено методики діагностування трибопар авіаційних матеріалів за допомогою акустичних методів неруйнівного контролю, проведено дослідження кінетики задиростійкості та перехідних процесів при зносі електроіскрових покриттів, а також визначено закономірності зносостійких дисипативних структур дискретними електроіскровими покриттями.

### **Структура та обсяг дисертації**

Дисертаційна робота складається з анотацій українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 214 сторінок, з яких 153 сторінки основного тексту та 24 сторінки додатків. Робота включає 25 таблиць, 57 рисунків, 5 додатків. Список використаних джерел налічує 190 найменувань.

### **Загальна характеристика дисертаційної роботи**

У вступі відображена основна, передбачена нормативними положеннями ДАК МОН України, інформація, яка характеризує роботу, а саме актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами й темами, мета та завдання досліджень, наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, відомості про кількість публікацій.

У першому розділі проведено аналіз основних теоретичних відомостей про механізми тертя та зношування, що дозволило в подальшому встановити механізм утворення вторинних структур на поверхнях елементів трибоспряжень, оптимізувати структурні перетворення і процеси деформаційного зміцнення в металевих матеріалах при терті для підвищення їх зносостійкості.

Серед розглянутих методів підвищення задиростійкості і зносостійкості поверхонь фрикційного контакту алюмінієвих сплавів обрано дешевий з економічної точки зору та ефективний у плані підвищення експлуатаційних властивостей термочутливих матеріалів метод електроіскрового легування, що забезпечує нанесення захисних поверхневих шарів з покращеними властивостями щодо твердості та зносостійкості.

Поміж методів трибодіагностики вузлів тертя обрано найбільш перспективний метод акустичної емісії, який на підставі спектрів зміни амплітуди сигналу АЕ, величини розкиду сигналів, що реєструються, і енергетичних параметрів АЕ дозволяє прогнозувати та оцінювати процеси зношування.

Досить ґрунтовно в роботі проведено аналіз джерел акусто-емісійного випромінювання під час тертя та параметрів акустичної емісії в трибодіагностиці.

Також сформульовані основні задачі дослідження.

У другому розділі наведені переваги застосування методу електроіскрового легування для термочутливих матеріалів, до яких відносяться алюмінієві сплави. З метою створення оптимальної мікрогеометрії та зміни знаку залишкових напружень електроіскрових покриттів обрано технологію електроіскрового легування, при якій формуються електроіскрове покриття дискретного типу, з наступною обробкою сформованих покриттів поверхнево-пластичною деформацією, що дозволило сформувати поверхневий шар з високою твердістю, зносостійкістю, низькою шорсткістю та підвищеною втомною міцністю.

Застосування методу кінцевих елементів для розрахунку напружено-деформованого стану дискретних електроіскрових покриттів дозволило визначити на стадії проектування оптимальну щільність електроіскрових покриттів з урахуванням еквівалентних напружень в одиночному покритті, рівня максимальних напружень, залишкових напружень в покритті та дотичних напружень в площині адгезійного контакту.

Методика, яку застосовує автор для оцінки триботехнічних характеристик дискретних електроіскрових покриттів на модернізованій універсальній машині тертя СМТ-1 з інформаційно-вимірювальною системою реєстрації навантаження, моменту тертя, температури мастильного матеріалу, частоти обертання, сигналів АЕ, дозволила оцінити кінетику зміни триботехнічних характеристик фрикційного контакту без зупинки машини тертя та аналізувати інтенсивність зношування контактних поверхонь за параметром усередненої потужності АЕ.

Для дослідження механо-фізико-хімічних характеристик пар тертя використано сучасне обладнання таке, як профілометр Mitutoyo SurfTest SJ-201P та багатофункціональний прилад «Мікрон-гамма».

В свою чергу проведення металографічних досліджень та оцінки хімічного складу поверхонь тертя надало можливість встановити механізми формування зносостійких дисипативних структур, оцінити рівень структурної пристосованості дискретних електроіскрових покриттів при терті.

У третьому розділі за результатами моделювання напружено-деформованого стану покриття різної щільності встановлено оптимальну щільність дискретного електроіскрового покриття, яка становить 55 – 65%, та характеризується мінімальним зносом та показниками усередненої потужності акустичної емісії. Це досягається за рахунок зниження напружено-деформованого стану покриття та основи при оптимізації дискретності покриття, розподілу контактних навантажень, формуванні оптимальної геометрії поверхні.

Проведений аналіз реолого-кінетичного механізму зношування електроіскрового покриття з урахуванням показників в'язкості руйнування покриття-основа дозволив оцінити та спрогнозувати локалізацію процесів руйнування та деформування при терті.

За побудованими кривими Аббота визначені параметри, які найбільше впливають на зносостійкість. Встановлено, що армування дюралюмінію Д16 комбінованим електроіскровим покриттям ВК-8+Cu забезпечує: зменшення середньої арифметичної висоти виступів верхньої частини профілю; зростання

середньої арифметичної глибини серцевини мікронерівностей профілю; збільшення середньої арифметичної глибини впадин профілю у порівнянні з електроіскровими покриттями твердого сплаву ВК-8 та міді відповідно. Перелічені параметри сприяють скороченню періоду припрацювання контактних поверхонь, зміцнених комбінованим електроіскровим покриттям ВК-8+Cu, підвищують їх несучу здатність, контактну довговічність, питому маслоємність поверхні.

З допомогою оцінки міцнісних характеристик дискретних електроіскрових покриттів при терті встановлено вплив мікротвердості поверхневих та приповерхневих шарів матеріалу, градієнту механічних властивостей по глибині, суцільності покриття на їх оптимальну структурну пристосованість. Виявлено, що ефективні протизношувальні характеристики проявляє комбіноване покриття з твердого (ВК8) та м'якого (Cu) матеріалів на дюралюмінію Д16 за рахунок наявності позитивного градієнту механічних властивостей по глибині покриття-основа і локалізації деформаційних процесів в покритті.

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

Простежується чітка кореляційна залежність вагового зносу пар тертя від параметру середнього значення усередненої потужності акустичної емісії (враховані показники в період припрацювання та на етапі сталої роботи).

Встановлено, що процес структурної пристосованості досліджуваної армованої поверхні Д16 з електроіскровими покриттями характеризується зростанням потужності тертя, в середньому в 1,27-2 рази, що, в свою чергу, обумовлює підвищення температури, яка безперечно впливає на процеси структурної пристосованості елементів трибоспряження за рахунок термічної активації при терті.

Проведений аналіз дослідних зразків за кінетикою зміни триботехнічних показників та усередненої потужності АЕ дозволив виділити основні чинники, які впливають на інтенсивність зношування контактних поверхонь. До таких чинників відносять критерій Пекле  $Pe$ , коефіцієнт тертя  $f$ , ударна в'язкість ( $KCU$ ).

Одержані емпіричні залежності загальної інтенсивності зношування трибосистем сталь-неармований/армований (нанесення електроіскрового покриття та подальша обробка поверхнево-пластичною деформацією) дюралюмінію Д16 від параметру усередненої потужності акустичної емісії, критерію  $Pe$ , коефіцієнту тертя, ударної в'язкості, що дозволило оцінити на стадії лабораторних досліджень ефективність електроіскрових покриттів.

У п'ятому розділі встановлено граничну межу працездатності за навантажувальним діапазоном пари тертя сплав дюралюмінію Д16-сталь 30ХГСА. Визначено критерії переходу трибосистеми до катастрофічного зношування, а саме зростання щільності, амплітуди та величини розкиду сигналів акустичної емісії, збільшення енергії руйнування, що проявляється в схоплюванні контактних поверхонь. В свою чергу, встановлено, що армування дюралюмінію Д16 дискретним комбінованим електроіскровим покриттям



сплаву ВК-8 та міді забезпечує ефективну працездатність трибосистем в умовах ступеневого зростання навантаження, характеризується зменшенням у 2 рази значенням усередненої потужності сигналів акустичної емісії та величин їх розкиду за рахунок протікання дисипативних енергетичних процесів в фрикційному контакті, які забезпечують формування зносостійких структур.

Формування зносостійких структур за рахунок збільшення активних елементів кисню, сірки та фосфору підтверджується металографічними дослідженнями та оцінкою хімічного складу поверхонь тертя.

Експериментальними дослідженнями триботехнічних властивостей армованого дюралюмінію Д16 комбінованим електроіскровим покриттям встановлено низку параметрів, що впливають на знос пар тертя, який можна врахувати методами математичної статистики.

Проведений статистичний аналіз, проаналізовано кореляційну матрицю з коефіцієнтом множинної кореляції 0,866 та одержано емпіричне рівняння множинної регресії впливу температури у фрикційному контакті, усередненої потужності сигналів АЕ та зміни мікротвердості поверхні при напрацюванні на знос неармованого / армованого електроіскровим покриттям дюралюмінію Д16 зі сплаву ВК8 та міді.

По модулю усі статистики коефіцієнтів є меншими за квантиль, а отже є значущими, що свідчить про адекватність моделі регресії та адекватність експерименту.

**Висновки** дисертаційної роботи ґрунтуються на аналізі отриманих теоретичних та експериментальних результатів досліджень, які наведені в кінці кожного розділу та в узагальненому вигляді в заключній частині дисертації.

**Список літературних джерел** включає 190 найменувань, що свідчить про глибоке і ґрунтовне опанування дисертантом обробленої інформації за обраною тематикою та її аналіз.

**У додатках** наведені: результати моделювання напружено-деформованого стану трибосистеми сталь 30ХГСА-неармований / армований дискретним електроіскровим покриттям дюралюміній Д16 в SolidWorks; список публікацій за темою дисертації; акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень; технологічний процес зміцнення деталей; порівняння режимів обробки поверхні дюралюмінію Д16 дискретним електроіскровим покриттям.

### **Наукова новизна одержаних в дисертації результатів**

1. Встановлено механізми підвищення зносостійкості в 2 рази в умовах ковзання та збільшення працездатного 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 хімічно модифікованих 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 отриманих 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, акт про реалізацію наукових досліджень на ТОВ «ПОДОЛЛЯ-АГРО» від 23.01.2023).

2. Розроблена методика оцінки граничної працездатності 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).

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 ім. Г.С. Писаренка НАН України від 22.12.2022).

4. Розроблено і впроваджено в практику експериментальних випробувань пристрій для вимірювання величини лінійного зносу без зупинки машини, в якому використано як вимірювальну головку датчик кута-енкодер (пат. № 62928, опубл. 26.09.2011, бюл. № 18).

### **Достовірність результатів та висновків.**

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у роботі, обґрунтовані повно та достатньо переконливо. Достовірність і обґрунтованість одержаних у дисертації наукових положень підтверджуються коректною

постановкою наукової проблеми, використанням апробованого математичного апарату, збігом результатів теоретичних досліджень з результатами проведених експериментів, упровадженням технології у виробництво.

В роботі застосовано комплексний підхід до наукових досліджень, який забезпечив всебічне глибоке вивчення та аналіз процесів, які відбуваються у контакті при терті пар ковзання. При цьому використані сучасні експериментальні методи: оцінки триботехнічних характеристик дискретних ЕП на модернізованій універсальній машині тертя СМТ-1 з інформаційно-вимірною системою реєстрації навантаження, моменту тертя, температури мастильного матеріалу, частоти обертання, сигналів АЕ, для оцінки кінетики зміни триботехнічних характеристик фрикційного контакту без зупинки установки та аналізу інтенсивності зношування контактних поверхонь за параметром усередненої потужності акустичної емісії; металографічних досліджень та оцінки хімічного складу поверхонь тертя для встановлення механізмів формування зносостійких дисипативних структур, оцінки рівня структурної пристосованості дискретних ЕП при терті; методи інженерної механіки для дослідження залишкових напружень, мікротвердості, триботехнічних характеристик матеріалів в умовах зношування при терті ковзання. Всі експериментальні дослідження, а також роботи з впровадження підтвержені відповідними актами.

#### **Повнота викладення результатів дисертації у наукових фахових виданнях**

Основні результати дисертаційних досліджень В.В. Токарука опубліковані в 32 наукових працях, у тому числі: 1 колективна монографія, що входить до міжнародних наукометричних баз (SCOPUS); 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 різного рівня; 1 патент на корисну модель. Всі вимоги положень ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано.

#### **Загальні зауваження до змісту та оформленню дисертації і автореферату**

1. В дисертаційній роботі аналізується товщина мастильного шару та зазначаються режими мащення при терті. Однак не вказано яким методом вимірювалась товщина мастильного шару в контакті або були застосовані розрахункові формули визначення товщини мастильного шару.

2. Здобувачем встановлено і доведено, що умовою настання катастрофічного зношування є збільшення густини усередненої потужності та зростання величини розкиду сигналів акустичної емісії. В зазначених умовах не наведено кінетику зміни коефіцієнту тертя, температури та товщини мастильного шару – параметрів, за якими переважно встановлюється прояв процесів схоплювання та заїдання елементів трибоспряження.

3. В роботі зустрічаються невдалі термінологічні словосполучення. Наприклад, на стор. 42 замість виразу «вогнищ корозії», на мій погляд, більш правильно вжити «осередків корозії».

4. У підрозділі 2.6. «Методи механо-фізико-хімічних характеристик пар тертя» можна було не робити детальний опис роботи растрового електронного мікроскопа, до конструкції якого та методики досліджень автор не вносив жодних змін.

5. Немає пояснень щодо обрання як матеріалу покриття інструментального сплаву ВК8.

6. Не проведені дослідження розмірних параметрів дискретного електроіскрового покриття на трибологічні характеристики дюралюмінію Д16.

7. В дисертаційній роботі відсутній підрозділ з розрахунку економічного ефекту від впровадження розробок.

### **Загальний висновок по роботі.**

Не дивлячись на наведені зауваження, які значною мірою мають дискусійний характер і суттєво не впливають на загальний зміст отриманих результатів, визначаю позитивну оцінку роботи, яка виконана здобувачем і представлена в його дисертації.

Дисертаційна робота В.В. Токарука «Підвищення зносостійкості дюралюмінієвого сплаву Д16 армуванням поверхневого шару дискретним електроіскровим покриттям» є закінченою науковою працею, в якій отримано нові науково-обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, спрямовані на вирішення важливої проблеми підвищення триботехнічних і міцнісних характеристик алюмінієвих сплавів та розширення їх навантажувально-швидкісного діапазону працездатного стану.

Дисертаційна робота у цілому виконана на високому науковому рівні, її результати є актуальними, обґрунтованими та достовірними. Оформлення та стиль викладання роботи в повній мірі відповідає вимогам пунктів 9, 11, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 №567 (зі змінами) до кандидатських дисертацій, а її автор, Токарук Віталій Володимирович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Офіційний опонент  
учений секретар Сектору  
фізико-технічних і математичних наук  
Науково-організаційного відділу  
Президії НАН України  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

Сергій БЕСПАЛОВ

