

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.1(102).18435.

*В. В. ТОКАРУК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, О. О. МІКОСЯНЧИК, А. М. ХІМКО,
А. В. ГРЕЧУХА*

Національний авіаційний університет, Україна

АНАЛІЗ СИГНАЛІВ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ТРИБОСИСТЕМИ В УМОВАХ СТУПЕНЕВОГО ПІДВИЩЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ

Проведена оцінка працездатності електроіскрових покриттів в умовах ступеневого підвищення навантаження на основі аналізу сигналів акустичної емісії (АЕ). Мета досліджень полягала в визначенні змін в фрикційному контакті при переході трибосистеми від нормальної до катастрофічної стадії зношування. Дослідження проводились для трибосистеми сталь 30ХГСА – немодифікований або модифікований сплав дюралюмінію Д16. Модифікування проводилось нанесенням комбінованого дискретного покриття твердого сплаву ВК8 і міді цільністю 55 – 65% методом електроіскрового легування. Модифікування дюралюмінію Д16 забезпечує ефективну роботу пар тертя до 1200 Н, значення усередненої потужності сигналів АЕ та величин їх розкиду зменшуються в 2...4 рази. Встановлено зниження інтенсивності зношування трибосистем з комбінованим електроіскровим покриттям на 80%, в 2 рази зменшується глибина розповсюдження пластичних деформацій. Одержані емпіричні залежності інтенсивності зношування від навантажувальних параметрів та сигналів АЕ.

Ключові слова: електроіскрове покриття, акустична емісія, інтенсивність зношування, напружено-деформований стан.

Вступ. Домінуючим фактором, що визначає опір зношуванню деталей машин, є рівень міцності їх контактних поверхонь. При аналізі трибосистеми важливою умовою працездатності є утворення метастабільних дисипативних структур в процесі структурної пристосованості елементів трибоспряження до певних експлуатаційних режимів. При формуванні таких структур реалізуються механізми, які забезпечують зовнішнє тертя з мінімальною інтенсивністю зношування контактних поверхонь. На процес зовнішнього тертя впливає велика кількість чинників. До основних з них можна віднести напружено-деформований стан, навколишнє середовище, механічні та фізико-хімічні властивості контактуючих тіл, режим роботи і т.д. [1, 2]. Перспективним напрямком, направленим на розширення діапазону реалізації зовнішнього тертя в змінних навантажувально-швидкісних режимах експлуатації пар тертя, є застосування та удосконалення методів та технологій модифікування та приповерхневого зміцнення деталей [3-5].

Метод електроіскрового легування (ЕІЛ) є одним з найбільш раціональних шляхів, що дозволяє цілеспрямовано змінювати напружено-деформований стан в поверхневому шарі, деформаційно-силові параметри контактних областей і природу контактної взаємодії пар тертя. Визначення умов тертя, в яких електроіскрові покриття характеризуються ефективною структурною пристосовністю та мінімальною інтенсивністю зношування, є важливим моментом, спрямованим на встановлення діапазону працездатності покриттів. Розробка критеріїв переходу модифікованих електроіскровим легуванням контактних поверхонь від нормального до катастрофічного зношування

дозволить створити рекомендації щодо експлуатаційних умов та функціонального призначення зносостійких електроіскрових покриттів.

Важливим напрямком на шляху зниження матеріаломісткості при проектуванні машин і механізмів є використання матеріалів, які задовольняють вимогам технологічності, дозволяють знизити масу деталей, при цьому характеризуються високими механічними характеристиками та високою експлуатаційною надійністю. До таких матеріалів можна віднести алюмінієві сплави. Наприклад, багатокомпонентні алюмінієві антифрикційні сплави для підшипників кочення із вмістом олова 5,4...11,0 % Sn характеризуються підвищеними трибологічними властивостями, ефективними характеристиками в процесі припрацювання, високими протизадирними показниками за рахунок збільшення імовірності самоорганізації на поверхні тертя, результатом якої є формування вторинних структур, які відрізняються від вихідної структури сплавів [6].

Однак збільшенню сфери використання алюмінієвих сплавів для виготовлення пар тертя перешкоджають невисокі експлуатаційні властивості – низька твердість та зносостійкість поверхні. Усунення цих недоліків пов'язане з покращенням складу та якості поверхневих шарів виробів шляхом застосування сучасних методів зміцнення за рахунок поверхневої обробки алюмінієвих сплавів. Дешевим з економічної точки зору та ефективним у плані підвищення експлуатаційних властивостей термочутливих матеріалів є метод електроіскрового легування, що забезпечує нанесення захисних поверхневих шарів з покращеними властивостями щодо твердості, зносостійкості та корозійної стійкості без зміни властивостей матеріалу основи [7, 8].

Застосування даного методу дозволяє створювати покриття як з високою суцільністю контакту, так і пористі покриття, які характеризуються високою зносостійкістю [9, 10, 11, 12]. У роботі [13] встановлені високі триботехнічні властивості електроіскрових покриттів дискретного характеру із щільністю 55 – 65%, що характеризуються зниженням залишкових напружень у матеріалі основи.

Важливим напрямком у вивченні якості створюваних електроіскрових покриттів є встановлення критеріїв, що визначають навантажувальний діапазон їх працездатності. За характером зміни таких основних триботехнічних показників як коефіцієнт тертя, температура в зоні фрикційного контакту, товщина мастильного шару, питома робота тертя не завжди можливо передбачити та спрогнозувати настання стадії катастрофічного зносу [14 - 17]. До інформаційних методів визначення діапазону роботоzdатності триботехнічної пари можна віднести метод акустичної емісії, який характеризується високою чутливістю до пружно-пластичних деформацій у фрикційному контакті. На підставі спектрів зміни амплітуди сигналу АЕ, величини розкиду сигналів, що реєструються, і енергетичних параметрів АЕ можливо прогнозувати домінування нормального або катастрофічного процесів зношування [18, 19].

До основних джерел генерування сигналів АЕ при терті можна віднести інтенсифікацію деформаційних процесів, зародження та поширення тріщин у покритті або на межі покриття - основа, структурно-фазові перетворення в найбільш навантажених зонах фактичної площі контакту пар тертя [20, 21]. Дані процеси супроводжуються накопиченням енергії деформації, при досягненні критичного рівня цього показника відбуваються незворотні зміни у

фрикційному контакті, що призводять до катастрофічного зношування елементів трибосполучення.

Встановлення закономірностей переходу електроіскрових покриттів від нормального до катастрофічного виду зношування на основі аналізу сигналів акустичної емісії є актуальним напрямком на шляху прогнозування їхньої граничної роботоздатності, що дозволяє розробити рекомендації щодо застосування модифікованих поверхонь у певному навантажувально-швидкісному режимі.

Матеріали та методи досліджень. Для досліджень були обрані зразки зі сталі 30ХГСА та немодифікованого і модифікованого дюралюмінію Д16 (таблиця 1, 2).

Таблиця 1

Хімічний склад в % матеріала 30ХГСА

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,28 - 0,34	0,9 - 1,2	0,8 - 1,1	до 0,3	до 0,025	до 0,025	0,8 - 1,1	до 0,3

Таблиця 2

Хімічний склад в % сплаву Д16

Al	Mn	Cu	Fe	Si	Ni	Ti	Zn	Mg
90,8 - 94,7	0,3 - 0,9	3,8 - 4,9	до 0,5	до 0,5	до 0,1	до 0,1	до 0,3	1,2 - 1,8

Поверхневий шар зразків з матеріалу Д16 модифікувався шляхом нанесення комбінованого дискретного покриття твердого сплаву ВК8 (WC – 92%, Co – до 8%) і міді на установці «Елітон-22» за допомогою методу електроіскрового легування. Щільність дискретного покриття становила 55 – 65%. Товщина комбінованого покриття складає 2...2,5 мкм.

Для отримання рівномірно зміцненого шару комбінованого покриття необхідної шорсткості і щільності проводилася подальша обробка поверхні поверхневим пластичним деформуванням з подальшою фінішною обробкою. Отримана шорсткість контактних поверхонь була в межах $R_a = 0,5 \dots 0,7$ мкм.

Дослідження задиростійкості трибосистеми проводились за двома схемами:

– за першою схемою зразок зі сталі 30ХГСА був нерухомий, обертався лише зразок з модифікованого/немодифікованого дюралюмінію Д16: Д16+ВК8+Cu / Д16 (рухомий) – 30ХГСА (нерухомий);

– за другою схемою зразок з модифікованого/немодифікованого дюралюмінію Д16 був нерухомий, обертався лише зразок зі сталі 30ХГСА: 30ХГСА (рухомий) – Д16+ВК8+Cu / Д16 (нерухомий).

Трибологічні дослідження проводилися на вдосконаленій серійній машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою торцевого тертя «кільце-кільце» з дотриманням наступних умов (рис. 1):

– один із зразків обертається з частотою 400 хв^{-1} , а інший (нерухомий) встановлюють співвісно, притискають зразки один до одного торцевими поверхнями;

– мінімальне навантаження становило 100 Н;

– створювалося ступінчасте збільшення навантаження до утворення задира або до максимальної робочої температури мастильного матеріалу;

– величина кожного наступного ступеня навантаження становила 100 Н;

– час витримки на кожному ступені навантаження – 10 хв.

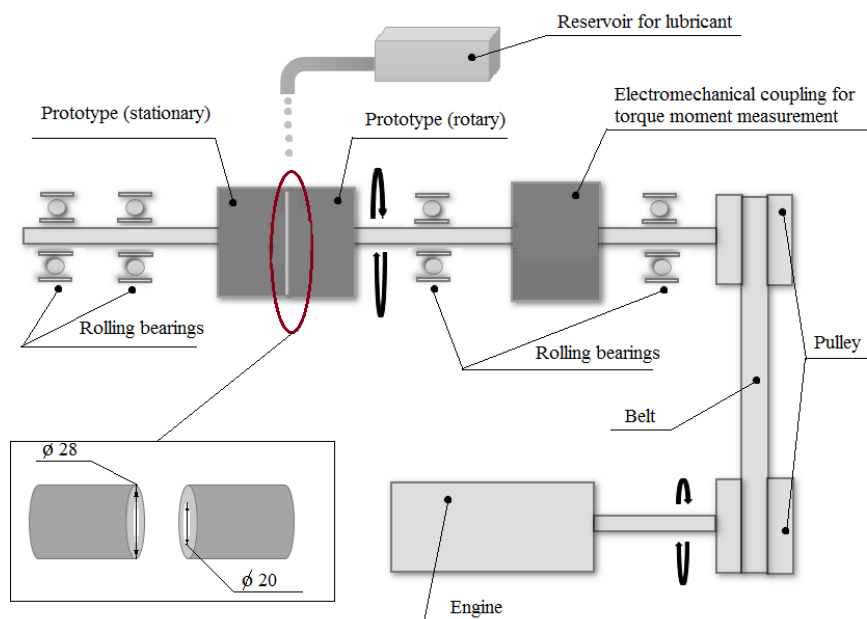


Рис. 1. Схема машини тертя 2070 СМТ-1.

Умови проведення випробувань: тертя досліджуваних контактних поверхонь проходило при домінуванні граничного режиму мащення в контакт, витрата робочої рідини становила 1,2 л/годину. В якості мастильного матеріалу застосовувалась моторна олива М10Г₂к (API CC, SAE 30, ГОСТ-8581-78). Робоча рідина для змащення подається через внутрішні отвори зразків.

В ході проведення експерименту проводилася реєстрація параметрів акустичної емісії. В якості інформаційної характеристики АЕ для дослідження динаміки утворення і руйнування вторинних структур була обрана усереднена потужність сигналу АЕ, пропорційна величині швидкості зношування (величина усереднення становила 20 мс). Методика обробки сигналів акустичної емісії при терті та зношуванні і вимірювання інтенсивності зношування із застосуванням методу АЕ викладена в роботі [22].

Аналіз результатів та обговорення. Одержані результати усередньої потужності сигналів АЕ (W_{yc}) та величини її розкиду ($W_{yc} \pm$) для досліджуваних трибосистем наведені в табл. 3 та на рис. 2.

Аналіз усередньої потужності сигналів АЕ заснований на принципах, що джерелом АЕ є пластична деформація, а робота, яка витрачається на пластичну деформацію, корелює з енергетичними характеристиками АЕ [23 - 25].

Встановлено, що для пари тертя з немодифікованим дюралюмінієм Д-16 (рухомий та нерухомий трибоелемент) працездатний стан характерний в діапазоні навантаження 100...600 Н, при навантаженні 600 Н зафіксовані схоплювання та задири елементів трибоспряження. В умовах ступеневого зростання навантаження інтенсивність зношування трибосистеми Д16 – 30ХГСА інтенсивно зростає від $9 \cdot 10^{-8}$ при 100 Н до $1,4 \cdot 10^{-3}$ при 600 Н, для трибосистем 30ХГСА – Д16 при 100 Н даний параметр становить $1,5 \cdot 10^{-6}$, при 600 Н – $8 \cdot 10^{-5}$ що свідчить про менш повільне зношування елементів трибоспряження.

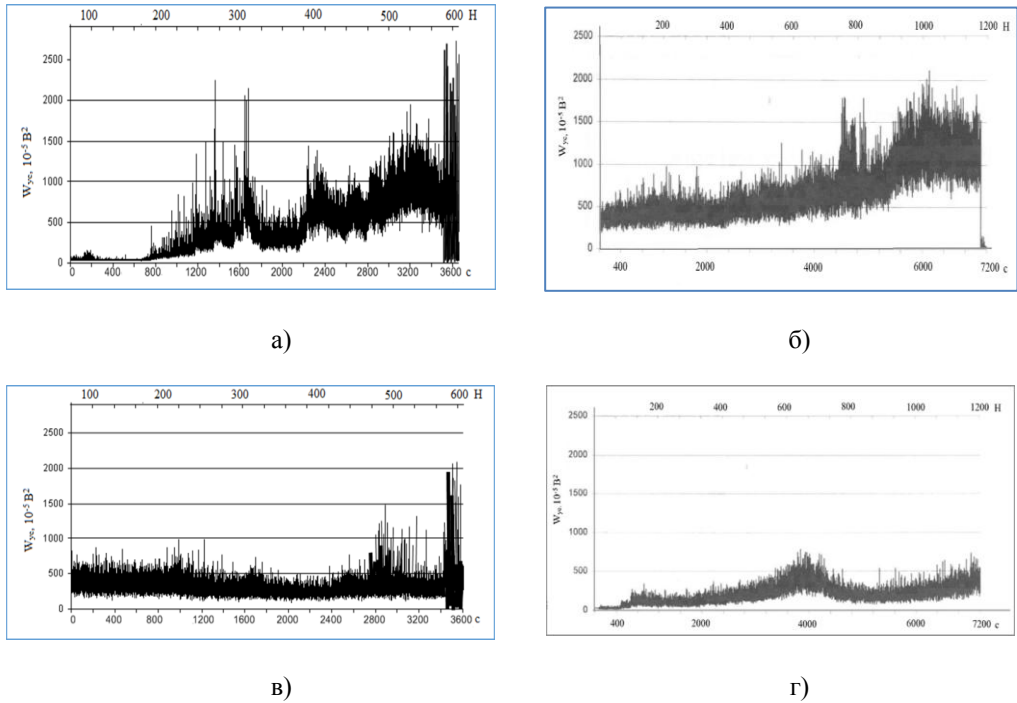


Рис. 2. Кінетика зміни усередної потужності сигналів АЕ в умовах ступеневого підвищення навантаження: а – пара тертя Д16 – 30ХГСА (рухомий трибоелемент Д16); б – пара тертя Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА (рухомий трибоелемент Д16+ВК8+Cu); в – пара тертя 30ХГСА – Д16 (рухомий трибоелемент 30ХГСА); г – пара тертя 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu (рухомий трибоелемент 30ХГСА).

Таблиця 3

Параметри АЕ в умовах ступеневого підвищення навантаження

Параметр	Навантаження, Н						
	100	200	400	600	800	1000	1200
Д16 – 30ХГСА (рухомий трибоелемент Д16)							
W_{yc}, B^2	0.0015	0.00425	0.00925	0.0141	-	-	-
$W_{yc} \pm, B^2$	0.0005	0.00275	0.00575	0.0139	-	-	-
Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА (рухомий трибоелемент Д16+ВК8+Cu)							
W_{yc}, B^2	0.004	0.0065	0.005	0.0076	0.01075	0.01375	0.0125
$W_{yc} \pm, B^2$	0.002	0.0035	0.0025	0.0044	0.00725	0.00775	0.0055
30ХГСА – Д16 (рухомий трибоелемент 30ХГСА)							
W_{yc}, B^2	0.005	0.006	0.005	0.0106	-	-	-
$W_{yc} \pm, B^2$	0.0025	0.0035	0.003	0.0104	-	-	-
30ХГСА – Д16+ВК8+Cu (рухомий трибоелемент 30ХГСА)							
W_{yc}, B^2	0.0005	0.00165	0.00235	0.00515	0.0025	0.0036	0.00515
$W_{yc} \pm, B^2$	0.00025	0.00115	0.00145	0.00335	0.0015	0.0024	0.00335

Для трибосистем Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА та 30ХГСА – Д16+ВК8+Cu встановлено збільшення вдвічі діапазону навантаження до прояву перших ознак схоплювання, які проявляються при ступеневому підвищенні навантаження до

1200 Н. Інтенсивність зношування трибосистем з модифікованим комбінованим ЕП на дюралюмінію Д16 при 600 Н знижується, в порівнянні з трибосистемами з немодифікованим Д16, в 5,5 разів та в 6,5 разів відповідно для пар тертя, де трибоелемент Д16+BK8+Cu рухомий та нерухомий (рис. 3).

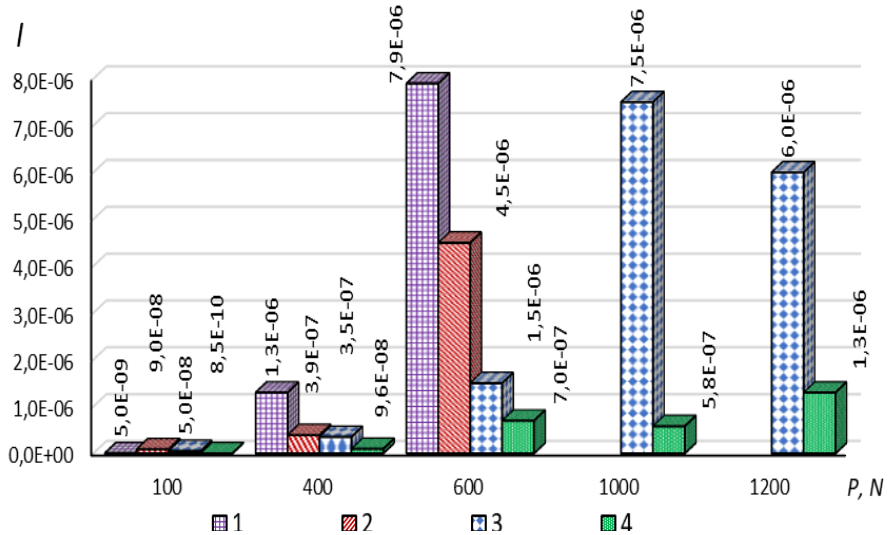


Рис. 3. Інтенсивність зношування (I) трибосистем в умовах ступеневого підвищення навантаження (P): 1 – трибосистема Д16 – 30ХГСА; 2 – трибосистема 30ХГСА – Д16; 3 – Д16+BK8+Cu – 30ХГСА; 4 – 30ХГСА – Д16+BK8+Cu.

Подальше зростання навантаження до 1200 Н призводить до підвищення інтенсивності зношування в 4 та в 1,9 раз для трибосистем з рухомих та нерухомих трибоелементом Д16+BK8+Cu відповідно.

Аналіз сигналів АЕ свідчить про зниження напружено-деформованого стану фрикційного контакту та інтенсивності протікання пластичних деформацій для трибосистем з модифікованим дюралюмінієм. На кожному ступені навантаження значення усередненої потужності сигналів АЕ та величин їх розкиду зменшуються в 2-4 рази (табл. 2).

Основною передумовою зменшення ступеня пластичних деформацій в фрикційному контакті являється наявність комбінованого дискретного ЕП, яке характеризується ефективними демпфуючими властивостями як за рахунок мідної плівки, яка в процесі структурної пристосованості трибосистеми покриває до 80 % площі поверхні модифікованого 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 [13].

На основі проаналізованих експериментальних даних зносостійкості досліджуваних трибосистем одержані емпіричні залежності інтенсивності зношування від погонного навантаження (N/l , Н/мм²), усередненої потужності сигналів АЕ (W_{yc} , В²), розкиду величини усередненої потужності сигналів АЕ ($W_{yc} \pm$, В²), часу напрацювання (t , хв) та шляху тертя (L , м) (рис. 4, 5)

$$I = \left(\frac{N}{l} \cdot W_{yc} \cdot W_{yc \pm}^{0,5} \cdot t^{0,5}\right) / L \quad (2)$$

де N – навантаження, Н; l – довжина контакту, мм.

Розбіжність між експериментальними значеннями інтенсивності зношування досліджуваних трибосистем та значеннями, одержаними за формулою (2), складає 5...15%. За одержаною емпіричною формулою, на основі усередненої потужності сигналів АЕ можливо прогнозувати інтенсивність зношування трибосистеми в оптимальному діапазоні навантаження, що надасть можливість на етапі лабораторних випробувань елементів трибоспряжень визначати межу переходу від нормального до катастрофічного зношування трибосистеми.

Висновки

1. Визначено граничну межу роботоздатності по навантажувальному діапазону пари тертя сплав дюралюмінію Д16 - сталь 30ХГСА, яка становить 600 Н, критеріями переходу трибосистеми до катастрофічного зношування є зростання щільності, амплітуди та величини розкиду сигналів АЕ, що проявляється в схоплюванні контактних поверхонь.

2. Модифікування дюралюмінію Д16 дискретним комбінованим електроіскровим покриттям сплаву ВК-8 та міді забезпечує ефективну роботоздатність трибосистем до 1200 Н, в умовах ступеневого зростання навантаження значення усередненої потужності сигналів АЕ та величин їх розкиду зменшуються в 2...4 рази, дисипативні енергетичні процеси в фрикційному контакті забезпечують формування зносостійких структур.

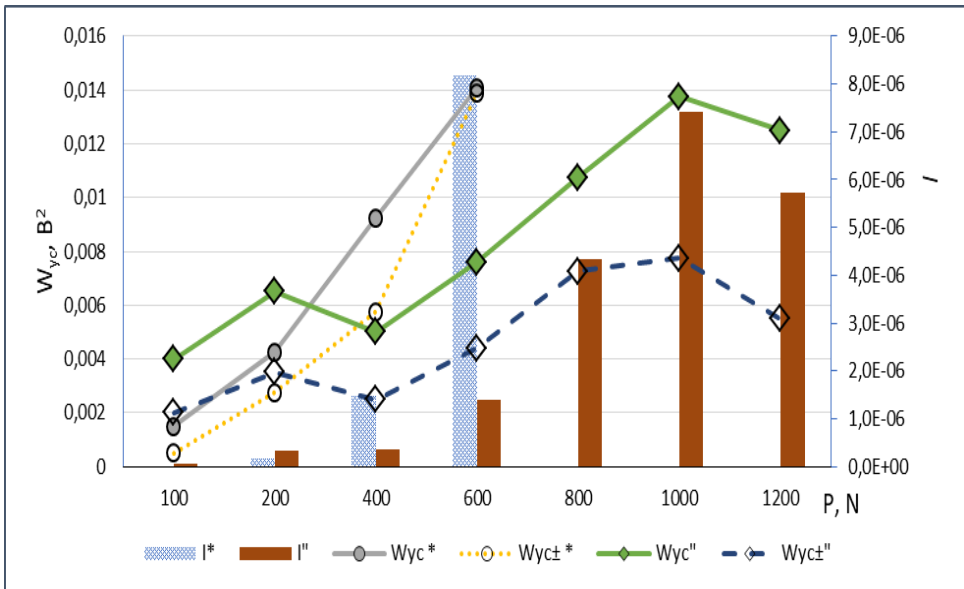
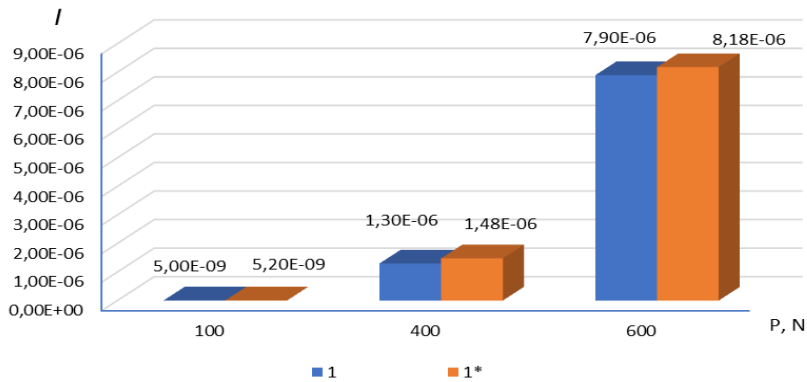
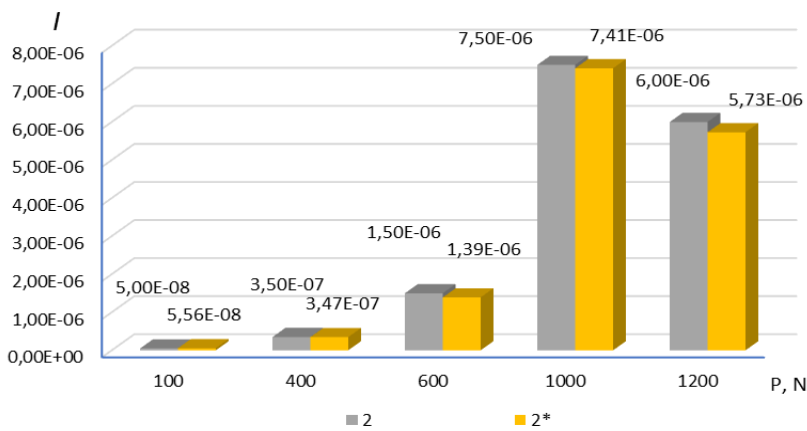


Рис. 4. Розрахункові залежності інтенсивності зношування (I) від усередненої потужності сигналів АЕ (W_{yc}) та величини її розкиду ($W_{yc\pm}$): * – трибосистема Д16 – 30ХГСА; '' – трибосистема Д16+ВК8+Cu – 30ХГСА.



а)



б)

Рис. 5. Експериментальні та емпіричні показники інтенсивності зношування (I): а) – для трибосистеми Д16 – 30ХГСА (1 – експериментальні значення, 1* – за формулою (2)); б) – для трибосистеми Д16+BK8+Cu – 30ХГСА (2 – експериментальні значення, 2* – за формулою (2)).

3. За одержаними емпіричними залежностями інтенсивності зношування трибосистем від погонного навантаження, усередненої потужності та розкиду величини усередненої потужності сигналів АЕ, часу напрацювання та шляху тертя можливо визначати на етапах лабораторних випробувань перехід трибосистеми від нормального до катастрофічного зношування.

Список літератури

1. Zhai, W., Bai, L., Zhou, R., Fan, X., Kang, G., Liu, Y., Zhou, K. (2021) Recent Progress on Wear-Resistant Materials: Designs, Properties, and Applications. *Advanced Science*, 8, P. 2003739. <https://doi.org/10.1002/advs.202003739>
2. K. Santhosh Kumar, R. Vaira Vignesh, G. Ajith Kumar, A. Abiram, R. Padmanaban (2021) Soft computing model for predicting the wear resistance of friction stir processed aluminum alloy AA5083, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, Part 17, P. 7236-7243, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.472>

3. Khodabakhshi F., Simchi A., Kokabi A.H. (2017) Surface modifications of an aluminum-magnesium alloy through reactive stir friction processing with titanium oxide nanoparticles for enhanced sliding wear resistance, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 309, P. 114-123 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.060>
4. Azadi M., Shahsavand A., Sadegh M., Parast A. (2022) Analyzing experimental data from reciprocating wear testing on piston aluminum alloys, with and without clay nano-particle reinforcement, *Data in Brief*, Vol. 45, P. 108766 <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108766>
5. Mordyuk, B.N., Mikosyanchik, O.O., Mnatsakanov, R.G. (2020) Structure-Phase State and Wear of Ni–Cr–B–Si–C Coating on Steel 1045 under Friction Conditions with the Shear Load Component, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 42, No. 2, P. 175—195 (in Ukrainian) <https://doi.org/10.15407/mfint.42.02.0175>
6. Mironov A., Gershman I., Podrabinnik P., Kuznetsova E. (2019) Influence of secondary structures formation on tribological properties of aluminum alloys- steel friction pairs. *BALTRIB' 2019: proceedings of X international scientific conference, Vytautas Magnus University, Agriculture Academy, Kaunas, Lithuania*, 14-16 November 2019, P. 119-125 <https://doi.org/10.15544/baltrib.2019.20>
7. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Renna G. (2022). Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review, *Coatings*, 12 (10), P. 1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>
8. Pliszka I., Radek N., Gądek-Moszczak A., Dwornicka R., Bronček J. (2018) Microstructure of laser-modified electro-sparking coatings, *Technical Transactions*, Vol. 115, No.10, P. 181-186. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.18.155.9103>
9. Velichko, S.A., Senin, P.V., Ivanov, V.I. *et al.* (2017) Formation of thick layer electro-spark coatings for restoring worn-out parts of power hydraulic cylinders, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(2), P. 116-123. <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>
10. Burumkulov, F.K., Ivanov, V.I., Velichko, S.A., Denisov V. A.. (2014) Plasticity of electrospark, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 50, P. 106–110. <https://doi.org/10.3103/S1068375514020033>
11. Yurchenko E., Rushika I., Agafii V., Dikusar A. (2018) Al-Sn nanostructured coatings on aluminum surfaces using electrospark alloying and their wear behavior, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 2(2), P. 115-120. <https://doi.org/10.30464/jmee.2018.2.2.115>
12. Yurchenko V.I., Yurchenko E.V., Dikusar A.I. (2020) Thick-Layer Nanostructured Electrospark Coatings of Aluminum and Its Alloys, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 56, 656–664. <https://doi.org/10.3103/S1068375520060162>
13. Al-Quraan T.M.A., Tokaruk V.V., Mikosianchyk O.A. at all. (2021) Influence of continuity of electric spark coatings on wear resistance of aluminum alloy, *Tribology in Industry*, 43(4), P. 603–614 <http://www.tribology.rs/journals/2021/2021-4/9-1170.pdf>
14. Mnatsakanov, R.G., Mikosianchyk, O.A., Yakobchuk, O. E., Khalmuradov, B.D. (2021) Lubricating Properties of Boundary Films in Tribosystems under Critical Operation Conditions, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 50 (3), P. 229–235. <https://link.springer.com/article/10.3103/S1052618821030110>
15. Dykha, A.V., Marchenko, D.D., Dytynyuk, V.A. (2020) Determination of the Parameters of the Wear Law Based on the Results of Laboratory Tests, *Journal of Friction and Wear*, 41, P. 153–159. <https://doi.org/10.3103/S1068366620020038>
16. Mikosyanchyk O.O., Mnatsakanov R.H., Lopata L.A., Marchuk V.E. (2019) Wear Resistance of 30KhGSA Steel Under the Conditions of Rolling with Sliding, *Materials Science*, V. 55. Is. 3. P. 402-408. DOI 10.1007/s11003-019-00317-9.
17. Voitov V., Stadnychenko V., Varvarov V., Stadnychenko N. (2020) Mechanisms of self-organization in tribosystems operating under conditions of abnormally low friction and wear, *Advances in Mechanical Engineering*, 12(10), P. 1-18. <https://doi.org/10.1177/1687814020963843>
18. Filonenko S., Stakhova A. (2019). A study to determine the onset of catastrophic wear of a processing tool by statistical parameters of acoustic emission, *Eastern-European Journal*

of Enterprise Technologies, Vol. 6, No. 9 (102), P. 6–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184959>

19. Hase A., Mishina H., Wada M. (2016) Fundamental study on early detection of seizure in journal bearing by using acoustic emission technique, *Wear*, Vol. 346–347, P. 132–139 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.012>

20. Löhr M., Spaltmann D., Binkowski S., Santner E., Woydt M. (2006) In situ Acoustic Emission for wear life detection of DLC coatings during slip-rolling friction, *Wear*, Vol. 260, Is. 4–5, P. 469–478 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.009>

21. Zaman S., Hazrati J., Rooij M., Matthews D., Boogaard T. (2021) Investigating AISi coating fracture at high temperatures using acoustic emission sensors, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 423, P. 127587 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127587>

22. Filonenko S. F., Stadnychenko V. M., Kosmach O. P. (2010) Acoustic emission during scuff tests of friction units, *Advances in Aerospace Technology*, 44(3), P. 106–110 <https://doi.org/10.18372/2306-1472.44.1915>

23. Landis E. N., Baillon L. Acoustic emission measurements of fracture energy / Fracture Mechanics of Concrete Structures, de Borst et al (eds). – Swets & Zeit/inger, Lisse, 2001. – P.389–394. <https://framcos.org/FraMCoS-4/389.pdf>

24. Landis E. N., Baillon L. (2002) Experiments to relate acoustic emission energy to fracture energy of concrete, *Journal of Engineering Mechanics*. 128 (6), P. 698–702. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2002\)128:6\(698\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:6(698))

25. Kravchuk R., Landis E. N. (2018) Acoustic emission-based classification of energy dissipation mechanisms during fracture of fiber-reinforced ultra-high-performance concrete, *Construction and Building Materials*, 176 (21), P. 531–538. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.05.039](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.039)

Стаття надійшла до редакції 04.03.2024.

Токарук Віталій Володимирович – канд. техн. наук, старший викладач кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380444067658, E-mail: vitalii.tokaruk@npp.nau.edu.ua <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-1965-1765>

Мнацаканов Рудольф Георгійович – докт. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380444067770, E-mail: rudolf.mnatsakanov@npp.nau.edu.ua <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>

Мікосянчик Оксана Олександрівна – докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 77 70, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Хімко Андрій Миколайович - канд. техн. наук, доцент кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +380444067658, E-mail: andrii.khimko@npp.nau.edu.ua <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0009-8059-880X>

Гречуха Анастасія Владиславівна – здобувач вищої освіти 1-го курсу ОС «Магістр» спеціальності 272 «Авіаційний транспорт» ОПП «Технічне обслуговування та ремонт літальних апаратів та авіаційних двигунів», Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: hrechukha12@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-1888-6567>

V. TOKARUK, R. MNATSAKANOV, O. MIKOSIANCHYK, A. KHIMKO, A. HRECHUKHA

ANALYSIS OF SIGNALS OF ACOUSTIC EMISSION OF TRIBOSYSTEM IN CONDITIONS OF STEPPED LOAD INCREASE

An evaluation of the performance of electric spark coating in conditions of stepped load increase was carried out based on the analysis of acoustic emission (AE) signals. The purpose of the research was to determine the changes in the frictional contact during the transition of the tribosystem from the normal to the catastrophic stage of wear. The research was carried out for tribosystem steel 30XГСА - unmodified or modified Д16 duralumin alloy. Modification was carried out by applying a combined discrete coating of hard alloy BK8 and copper with a density of 55-65% by the method of electrospark alloying. Modification of Д16 duralumin provides efficient operation of friction pairs up to 1200 N, the average power of AE signals and their dispersion values are reduced by 2...4 times. An 80% reduction in wear intensity of tribosystems with combined electric spark coating was established, the depth of propagation of plastic deformations is reduced by 2 times. Empirical dependences of wear intensity on loading parameters and AE signals were obtained.

Key words: electric spark coating, acoustic emission, wear intensity, stress-strain state.

References

1. Zhai, W., Bai, L., Zhou, R., Fan, X., Kang, G., Liu, Y., Zhou, K. (2021) Recent Progress on Wear-Resistant Materials: Designs, Properties, and Applications. *Advanced Science*, 8, P. 2003739. <https://doi.org/10.1002/adv.202003739>
2. K. Santhosh Kumar, R. Vaira Vignesh, G. Ajith Kumar, A. Abiram, R. Padmanaban (2021) Soft computing model for predicting the wear resistance of friction stir processed aluminum alloy AA5083, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, Part 17, P. 7236-7243, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.472>
3. Khodabakhshi F., Simchi A., Kokabi A.H. (2017) Surface modifications of an aluminum-magnesium alloy through reactive stir friction processing with titanium oxide nanoparticles for enhanced sliding wear resistance, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 309, P. 114-123 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.11.060>
4. Azadi M., Shahsavand A., Sadegh M., Parast A. (2022) Analyzing experimental data from reciprocating wear testing on piston aluminum alloys, with and without clay nano-particle reinforcement, *Data in Brief*, Vol. 45, P. 108766 <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108766>
5. Mordyuk, B.N., Mikosyanchik, O.O., Mnatsakanov, R.G. (2020) Structure-Phase State and Wear of Ni-Cr-B-Si-C Coating on Steel 1045 under Friction Conditions with the Shear Load Component, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 42, No. 2, P. 175—195 (in Ukrainian) <https://doi.org/10.15407/mfint.42.02.0175>
6. Mironov A., Gershman I., Podrabinnik P., Kuznetsova E. (2019) Influence of secondary structures formation on tribological properties of aluminum alloys- steel friction pairs. *BALTRIB' 2019: proceedings of X international scientific conference, Vytautas Magnus University, Agriculture Academy, Kaunas, Lithuania*, 14-16 November 2019, P. 119-125 <https://doi.org/10.15544/baltrib.2019.20>
7. Barile C., Casavola C., Pappalettera G., Renna G. (2022). Advancements in Electrospark Deposition (ESD) Technique: A Short Review, *Coatings*, 12 (10), P. 1536. <https://doi.org/10.3390/coatings12101536>
8. Pliszka I., Radek N., Gądek-Moszczak A., Dwornicka R., Bronček J. (2018) Microstructure of laser-modified electro-sparking coatings, *Technical Transactions*, Vol. 115, No.10, P. 181-186. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.18.155.9103>
9. Velichko, S.A., Senin, P.V., Ivanov, V.I. *et al.* (2017) Formation of thick layer electro-spark coatings for restoring worn-out parts of power hydraulic cylinders, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(2), P. 116-123. <https://doi.org/10.3103/S1068375517020119>

10. Burumkulov, F.K., Ivanov, V.I., Velichko, S.A., [Denisov V. A.](#) (2014) Plasticity of electrosark, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 50, P. 106–110. <https://doi.org/10.3103/S1068375514020033>
11. Yurchenko E., Rushika I., Agafii V., Dikusar A. (2018) Al-Sn nanostructured coatings on aluminum surfaces using electrosark alloying and their wear behavior, *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, 2(2), P. 115-120. <https://doi.org/10.30464/jmee.2018.2.2.115>
12. Yurchenko V.I., Yurchenko E.V., Dikusar A.I. (2020) Thick-Layer Nanostructured Electrosark Coatings of Aluminum and Its Alloys, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 56, 656–664. <https://doi.org/10.3103/S1068375520060162>
13. [Al-Quraan T.M.A.](#), [Tokaruk V.V.](#), [Mikosianchyk O.A.](#) at all. (2021) Influence of continuity of electric spark coatings on wear resistance of aluminum alloy, *Tribology in Industry*, 43(4), P. 603–614 <http://www.tribology.rs/journals/2021/2021-4/9-1170.pdf>
14. Mnatsakanov, R.G., Mikosianchyk, O.A., Yakobchuk, O. E., Khalmuradov, B.D. (2021) Lubricating Properties of Boundary Films in Tribosystems under Critical Operation Conditions, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 50 (3), P. 229–235. <https://link.springer.com/article/10.3103/S1052618821030110>
15. Dykha, A.V., Marchenko, D.D., Dytynyuk, V.A. (2020) Determination of the Parameters of the Wear Law Based on the Results of Laboratory Tests, *Journal of Friction and Wear*, 41, P. 153–159. <https://doi.org/10.3103/S1068366620020038>
16. Mikosyanchyk O.O., Mnatsakanov R.H., Lopata L.A., Marchuk V.E. (2019) Wear Resistance of 30KhGSA Steel Under the Conditions of Rolling with Sliding, *Materials Science*, V. 55. Is. 3. P. 402-408. DOI 10.1007/s11003-019-00317-9.
17. Voitov V., Stadnychenko V., Varvarov V., Stadnychenko N. (2020) Mechanisms of self-organization in tribosystems operating under conditions of abnormally low friction and wear, *Advances in Mechanical Engineering*, 12(10), P. 1-18. <https://doi.org/10.1177/1687814020963843>
18. Filonenko S., Stakhova A. (2019). A study to determine the onset of catastrophic wear of a processing tool by statistical parameters of acoustic emission, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, No. 9 (102), P. 6–11. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184959>
19. Hase A., Mishina H., Wada M. (2016) Fundamental study on early detection of seizure in journal bearing by using acoustic emission technique, *Wear*, Vol. 346–347, P. 132-139 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.11.012>
20. Löhr M., Spaltmann D., Binkowski S., Santner E., Woydt M. (2006) In situ Acoustic Emission for wear life detection of DLC coatings during slip-rolling friction, *Wear*, Vol. 260, Is. 4–5, P. 469-478 <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.009>
21. Zaman S., Hazrati J., Rooij M., Matthews D., Boogaard T. (2021) Investigating AlSi coating fracture at high temperatures using acoustic emission sensors, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 423, P. 127587 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127587>
22. Filonenko S. F., Stadnychenko V. M., Kosmach O. P. (2010) Acoustic emission during scuff tests of friction units, *Advances in Aerospace Technology*, 44(3), P. 106–110 <https://doi.org/10.18372/2306-1472.44.1915>
23. Landis E. N., Baillon L. Acoustic emission measurements of fracture energy / Fracture Mechanics of Concrete Structures, de Borst et al (eds). – Swets & Zeit/inger, Lisse, 2001. – P.389–394. <https://framcos.org/FraMCoS-4/389.pdf>
24. Landis E. N., Baillon L. (2002) Experiments to relate acoustic emission energy to fracture energy of concrete, *Journal of Engineering Mechanics*. 128 (6), P. 698–702. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2002\)128:6\(698\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:6(698))
25. Kravchuk R., Landis E. N. (2018) Acoustic emission-based classification of energy dissipation mechanisms during fracture of fiber-reinforced ultra-high-performance concrete, *Construction and Building Materials*, 176 (21), P. 531–538. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.05.039](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.039)

Vitalii Tokaruk – Ph.D., Senior lecturer in Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, 03058, Ukraine, Kyiv, ave. Lubomir Husar, 1, tel.number: +380444067658, E- mail: vitalii.tokaruk@npp.nau.edu.ua <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-1965-1765>

Rudolf Mnatsakanov – Doctor. Sc., Professor, Professor in Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, 03058, Ukraine, Kyiv, ave. Lubomir Husar, 1, tel.number: +380444067770, E-mail: rudolf.mnatsakanov@npp.nau.edu.ua <https://orcid.org/0000-0001-5035-2432>

Oksana Mikosianchyk - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: oksana.mikos@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

Andrii Khimko - Ph.D., Associate Professor in Aircraft Continuing Airworthiness Department, National Aviation University, 03058, Ukraine, Kyiv, ave. Lubomir Husar, 1, tel.number: +380444067658, E-mail: andrii.khimko@npp.nau.edu.ua. <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0009-8059-880X>

Anastasiia Hrechukha – 1st year student for the Master's degree of speciality 272 «Aviation transport» EPP «Maintenance and repair of aircraft and aircraft engines», National Aviation University, 03058, Ukraine, Kyiv, ave. Lubomir Husar, 1, E-mail: hrechukha12@gmail.com <https://orcid.org/0009-0003-1888-6567>