

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(96).16833

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

*Національний авіаційний університет, Україна*

## ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТРИБОКОНТАКТУ ЗА ЗМІНОЮ УСЕРЕДНЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

*Проведена оцінка кінетики зміни антифрикційних характеристик, температури в контакті, усередненої потужності акустичної емісії для трибоелементів зі сталі 30ХГСА та дюралюмінію Д16 з дискретним електроіскровим покриттям з міді. Визначено механізми зниження напружено-деформованого стану в поверхневих шарах модифікованого сплаву Д16 за рахунок високої здатності міді поглинати механічну енергію в процесі деформації та руйнування. За результатами моделювання напружено-деформованого стану трибосистем встановлено зменшення глибини розповсюдження еквівалентних напружень та їх локалізацію в покритті.*

**Ключові слова:** акустична емісія, електроіскрове легування, потужність тертя, деформація.

**Вступ та постановка задач дослідження.** Роботоздатність матеріалів в умовах контактної взаємодії в більшості випадків визначається можливістю самоорганізації структури поверхневих шарів до діючої схеми напружено-деформованого стану в процесі експлуатації. При терті кожен елементарний поверхневий об'єм елементів трибоспряження багаторазово сприймає навантаження, яке впливає на механізми деформації та руйнування. Пружнопластична деформація є основним процесом, що визначає характеристики зовнішнього тертя. Це пояснюється її безпосередньою участю у процесах контактування та опору переміщенню при терті, а також у процесах теплоутворення, формування експлуатаційного стану поверхні, сил тертя та поверхневого руйнування.

Контактна дія на поверхню носить складний характер і включає механічні, теплові, хімічні, дифузійні та інші фактори, тому моделювання цих процесів становить певні труднощі. Одним із перспективних напрямків оцінки напружено-деформованого стану поверхневого шару при терті є комплексний підхід, що включає оцінку триботехнічних параметрів фрикційного контакту з одночасним аналізом процесів акустичної емісії (АЕ). Встановлення взаємозв'язку між кінетикою зміни коефіцієнта тертя, температури, усередненої потужністю АЕ дозволить глибше виявити закономірності впливу навантажувально-швидкісних факторів на мікроструктурні зміни контактних поверхонь.

**Аналіз останніх публікацій з даної проблеми.** До основних параметрів, які характеризуються істотним впливом на мікроструктурні зміни в поверхневих шарах металу, відносяться нормальне навантаження і швидкість ковзання, що призводять до різних полів напружень і деформацій і тим самим спричиняють пластичну реакцію матеріалу [1]. Експерименти показали, що більшість пластичної деформації при ковзанні здійснюється за рахунок руху дислокацій, що призводить до збільшення щільності дислокацій, зменшення розміру зерен і зміни орієнтації зерен. При малих деформаціях під контактом утворюються дислокаційні осередки або стінки, що відокремлюють великі зерна від дрібніших.

При високошвидкісному ковзанні подрібнення зерен включає утворення високої щільності дислокацій поблизу поверхні, наявність двійників, що розділяють великі зерна на більш дрібні нанорозмірні.

В роботі [2] вперше розроблено точний метод корекції кривих деформації від початкового до високого рівня на основі еволюційної поведінки миттєвого коефіцієнта тертя як функції деформації.

Одним із методів, що пояснює природу пластичної деформації на мікрорівні, є акустичний емісійний метод. Акустичну емісію визначають як перехідні механічні хвилі, що утворюються внаслідок локалізованих фізичних змін у твердому матеріалі під впливом механічних або термічних навантажень і руйнування.

В роботі [3] встановлено, що зміна умов деформування та руйнування матеріалу призводить до суттєвих змін медіанної та центральної частот АЕ, а також часів наростання та спаду амплітуди сигналу АЕ. Аналіз амплітуди сигналів АЕ при пластичній деформації показує помітні періоди зростання та спаду, а також вищий рівень частоти та довший час медіанного падіння частоти. Поява мікро- та макротріщин відповідає різко зростаючій амплітуді сигналу АЕ з майже нульовим часом наростання.

В запропонованому методі акустичної емісії для оцінки ступеню деградації механічних властивостей в умовах складних динамічних деформаційних напружень показано, що зміна умов експлуатації металевих конструкцій, пікове навантаження, зовнішні зіткнення та термічно змінні навантаження, які неможливо врахувати, призводять до невизначеності та непередбачуваних структурних змін у матеріалі [4]. Зміни механічних властивостей за складних умов навантаження ідентифікують поліноміальною апроксимацією результатів вимірювань АЕ та побудовою граничних кривих, що відокремлюють область працездатності від області руйнування.

При моделюванні сигналів АЕ встановлено, що на стадії нормального зношування усереднені параметри сигналів акустичної емісії описуються лінійною функцією з певним їх розкидом [5]. За результатами моделювання зазначено, що при переході до стадії катастрофічного зношування спостерігається зростання середніх значень параметрів результуючого сигналу і збільшення їх розкиду. При цьому залежність зміни середніх параметрів результуючого сигналу в часі описується степеневою функцією, значення показника ступеня якої визначається швидкістю зростання інтенсивності зношування.

Оскільки не існує загальної концепції щодо опису сигналів АЕ з позицій зміни напружено-деформованого стану контактних поверхонь при терті, необхідно співставляти та аналізувати кінетику зміни умов тертя, напружено-деформованого стану контактних поверхонь, температури фрикційного контакту та сигналів АЕ в кожному конкретному випадку, щоб вірно оцінити взаємозв'язок зазначених параметрів та їх вплив на роботоздатність елементів трибосистеми.

**Мета роботи** – визначення ефективності застосування методу акустичної емісії для дослідження напружено-деформованого стану поверхневих шарів матеріалів контактних поверхонь при терті.

**Методика експериментальних досліджень.** Трибологічні дослідження процесів тертя і зношування контактних поверхонь проводилися на серійній

машині тертя 2070 СМТ-1 протягом 240 хв у режимі граничного мащення з витратою оливи 1,2 л/год.

Модельні кільцеві зразки пари тертя виготовлені зі сталі 30ХГСА та дюралюмінію Д16, на поверхню якого методом електроіскрового легування (ЕІЛ) нанесено мідь (Cu). Електроіскрове покриття (ЕІП) наносилось дискретно, зі щільністю 55 – 65%. Електроіскрове легування проводили на стандартній промисловій установці «Елітрон 22А» на повітрі при питомій тривалості обробки поверхні зразка - 1 хв/см<sup>2</sup>. Тривалість проходження електричних імпульсів становила 200 мкс. Після ЕІЛ проводили поверхнєве пластичне деформування (ППД) методом статичної чеканки, максимальне зусилля складало 190 МПа ( $\sigma_r^{0.7}$  для Д16). Використання комбінованої технології проведено з метою підвищення триботехнічних властивостей ЕІП шляхом зміни залишкових напружень розтягу в сформованих електроіскрових покриттях на залишкові напруження стиску після ППД [6, 7].

Умови експерименту: один з зразків обертається з частотою 400 хв<sup>-1</sup>, а інший (нерухомий) встановлюють співвісно, притискають один до одного торцевими поверхнями з вісьовим навантаженням 600 Н; в якості мастильного матеріалу використовувалася моторна олива М10Г<sub>2</sub>к (ГОСТ-8581-78).

Дослідження контактних поверхонь відбувалось за наступною схемою: кожний зразок зі сталі 30ХГСА та дюралюмінію Д16 (немодифікованого або модифікованого ЕІЛ) досліджувалися в якості рухомого та нерухомого елемента. Рухомий елемент в трибоспряженні позначається першим, нерухомий – другим. Наприклад, в парі тертя Д16+Cu – 30ХГСА рухомим елементом був модельний зразок з дюралюмінію Д16, поверхня якого модифікована ЕІП міді, в парі тертя 30ХГСА – Д16+Cu рухомим елементом був модельний зразок зі сталі 30ХГСА. Відповідно, другі елементи в зазначених парах тертя були нерухомими.

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).



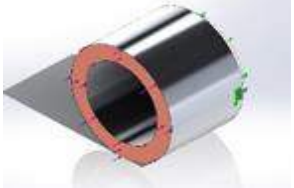
Моделювання напружено-деформованого стану контактних поверхонь проводилось в програмному комплексі SolidWorks в статичних умовах. Основні характеристики матеріалів при моделюванні наведено в табл. 1.

**Обговорення основних результатів.** Пара тертя Д16+Cu – 30ХГСА характеризується нормальним роботоздатним станом протягом всього періоду спостережень тривалістю 240 хв.

Аналіз зміни середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту виявив три характерних ділянки 0...30 хв, 30...200 хв та 200...240 хв (рис. 1). При цьому період припрацювання трибосистеми 0...30 хв характеризується значним зростанням середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту від 18 до 45 °С. Період 30...200 хв характеризується зменшенням швидкості зростання середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту, діапазон підвищення температури становив 45...84 °С. У подальшому середня температура поверхні в зоні трибологічного контакту залишається практично постійною на рівні  $\approx 84$  °С. Таким чином, підвищення температури свідчить про значну інтенсивність дисипації енергії, що виділяється при терті поверхонь фрикційного контакту.

Таблиця 1

## Механічні та фізичні властивості трибоелементів при моделюванні

Трибоелемент	Властивості		Аналог
 2024 Alloy	Тип моделі:	Лінійно-пружний ізотропний	Сплав Д16
	Межа текучості:	75,8291 Н/мм <sup>2</sup>	
	Міцність на розрив:	186,126 Н/мм <sup>2</sup>	
	Модуль пружності:	73 000 Н/мм <sup>2</sup>	
	Коефіцієнт Пуассона:	0,33	
	Щільність маси:	2,8 г/см <sup>3</sup>	
	Модуль зсуву:	28 000 Н/мм <sup>2</sup>	
	Коефіцієнт теплового розширення:	2,3e-05 /Kelvin	
 1.7223 (41CrMo4)	Тип моделі:	Лінійно-пружний ізотропний	Сталь 30ХГСА
	Межа текучості:	760 Н/мм <sup>2</sup>	
	Міцність на розрив:	980 Н/мм <sup>2</sup>	
	Модуль пружності:	190 000 Н/мм <sup>2</sup>	
	Коефіцієнт Пуассона:	0,28	
	Щільність маси:	7,8 г/см <sup>3</sup>	
	Модуль зсуву:	79 000 Н/мм <sup>2</sup>	
	Коефіцієнт теплового розширення:	1,1e-05 /Kelvin	
 Copper	Тип моделі:	Лінійно-пружний ізотропний	Дискретне ЕПМ міді
	Межа текучості:	258,646 Н/мм <sup>2</sup>	
	Міцність на розрив:	394,38 Н/мм <sup>2</sup>	
	Модуль пружності:	110 000 Н/мм <sup>2</sup>	
	Коефіцієнт Пуассона:	0,37	
	Щільність маси:	8,9 г/см <sup>3</sup>	
	Модуль зсуву:	40 000 Н/мм <sup>2</sup>	

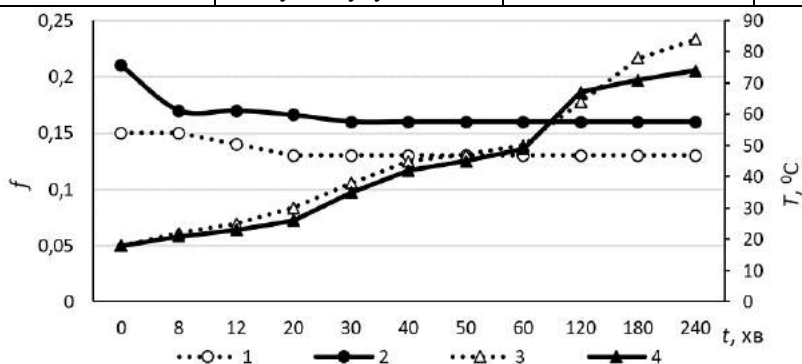


Рис. 1. Зміна коефіцієнту тертя і температури в зоні контактування трибосистем Д16+Cu – 30ХГСА (1 – коефіцієнт тертя, 3 – температура) та 30ХГСА – Д16 + Cu (2 – коефіцієнт тертя, 4 – температура)

Коефіцієнт тертя, який в процесі припрацювання контактних поверхонь становив 0,15...0,14, після закінчення етапу припрацювання трибосистеми Д16+Cu – 30ХГСА залишається постійним і дорівнює 0,13.

Характер зміни усередненої потужності акустичної емісії наведений на рис. 2.

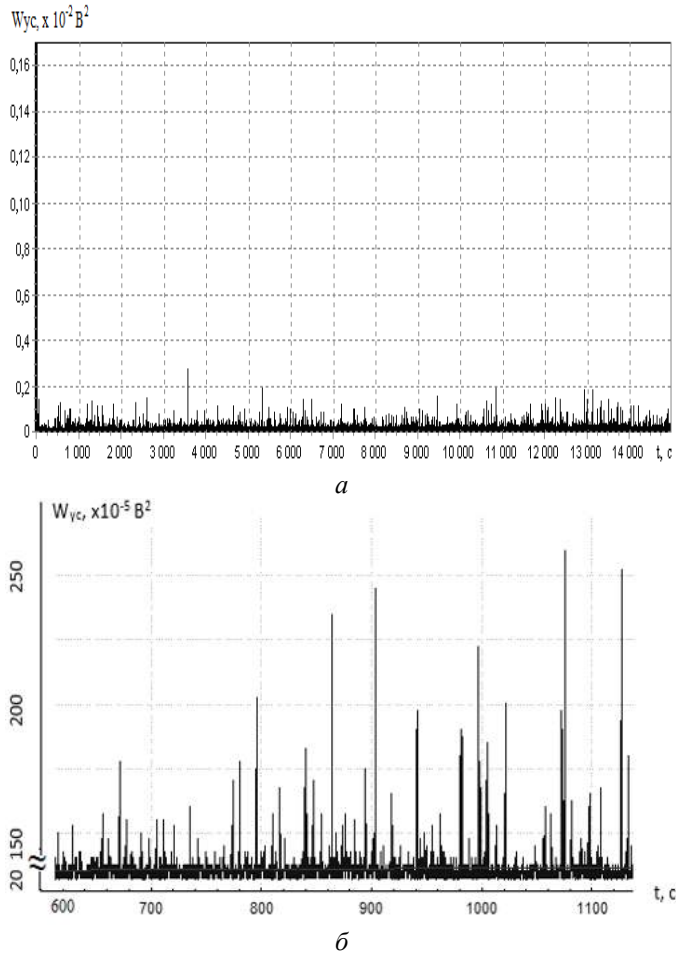


Рис. 2. Характер зміни усередненої потужності сигналів АЕ у часі для трибосистеми Д16+Cu – 30ХГСА: *a* – загальний час напрацювання, *б* – період напрацювання 600...1100 с

Аналіз зміни акусто-емісійного випромінювання у часі показав, що під час всього періоду випробувань зафіксовано практично незмінні низькі значення усередненої потужності акустичної емісії на рівні  $W_{yc} \approx (20...30) \times 10^{-5} \text{ B}^2$  та наявність її короточасних значних сплесків до  $(150...200) \times 10^{-5} \text{ B}^2$ .

Результати випробувань трибосистеми 30ХГСА – Д16+Cu (рухомий трибоелемент – зразок зі сталі 30ХГСА) також показали нормальну роботоздатність пар тертя протягом 240 хвилин випробувань.

Аналіз зміни середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту, також, як і для пари Д16+Cu – 30ХГСА, виявив три характерних ділянки 0...30 хв, 30...90 хв та 90...240 хв (рис. 1). При цьому, для періоду припрацювання трибосистеми 0...30 хв характерно значне зростання середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту – від 18 °С до 42 °С. Період 30...90 хв

характеризується зменшенням швидкості зростання середньої температури поверхні в зоні трибологічного контакту, даний параметр підвищується з 42 °С до 62 °С.

Коефіцієнт тертя в початковий період припрацювання становить 0,21, після закінчення припрацювання трибосистеми 30ХГСА – Д16+Cu стабілізується і дорівнює 0,17, що в 1,3 рази більше середніх значень коефіцієнту тертя трибосистеми Д16+Cu – 30ХГСА, що свідчить про менш ефективні антифрикційні властивості даної пари тертя (рис. 1).

Аналіз зміни акусто-емісійного випромінювання у часі для трибосистеми 30ХГСА – Д16+Cu показав як наявність незначного збільшення середніх значень усередненої потужності сигналів акустичної емісії до  $W_{yc} \approx (50...70) \cdot 10^{-5} B^2$ , так і дисперсії зміни цього параметру  $\sigma = 0,82 \cdot 10^{-5}$ , порівняно з трибосистемою Д16+Cu – 30ХГСА (рис. 3).

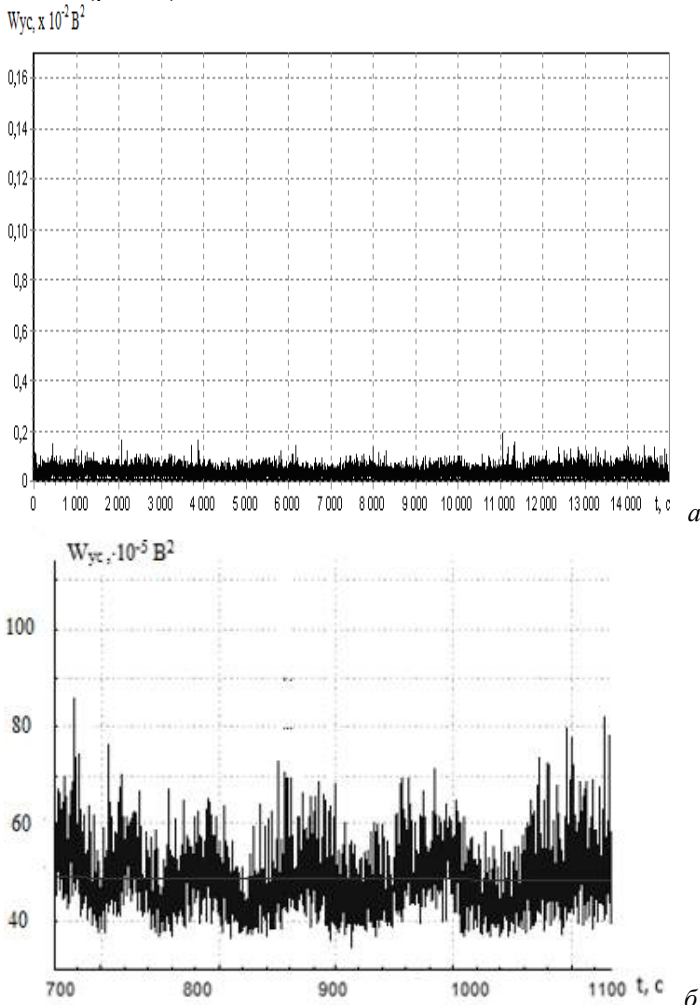


Рис. 3. Характер зміни усередненої потужності сигналів АЕ у часі для трибосистеми 30ХГСА – Д16+Cu: *a* – загальний час напрацювання, *б* – період напрацювання 700...1100 с

Аналіз діаграми акустичної емісії для трибосистеми 30ХГСА – Д16+Cu показав, що зміна середніх значень усередненої потужності акустичної емісії у часі носить коливальний хвилеподібний характер протягом всього періоду випробувань (рис. 3, *б*). Це, імовірно, свідчить, про наявність флуктуацій

напружено-деформованого стану поверхонь фрикційного контакту трибосистеми 30ХГСА – Д16+Cu, для яких характерна зміна приросту виробництва надлишкової ентропії  $(\delta^2S)_{тс}$  в часі [8, 9].

Розглянемо зміну енергетичного балансу трибосистеми при нанесенні методом ЕІЛ міді на поверхню дюралюмінію Д16. Проаналізуємо приріст температури залежно від швидкості ковзання та коефіцієнта температуропровідності, тобто від числа  $Pe$  (число Пекле). Число  $Pe$  характеризує відношення теплоємності потоку осьового напрямку до теплового потоку  $R$  поперечному напрямку:

$$Pe = \frac{V_{ковз} \cdot l}{a_t} = \frac{\rho \cdot c \cdot V_{ковз} \cdot l}{\lambda}, \quad (1)$$

де  $V_{ковз}$  – швидкість ковзання;  $l$  – довжина лінії контактування пар тертя;  $a_t$  – коефіцієнт температуропровідності;  $\rho$  – питома вага металу;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності металу.

Оскільки в кінематичній схемі проведених досліджень один зразок був нерухомий ( $V_{ковз} = 0$ ), тому критерій  $Pe$  розраховували для рухомого зразка.

Для пари Д16+Cu – 30ХГСА встановлено зростання потужності тертя в 1,6 рази, в порівнянні з еталонними зразками. В той же час, в 1,9 рази зменшується критерій  $Pe$ . Отже, зростання потужності тертя обумовлює підвищення інтенсивності тепловиділення в фрикційному контакті, що проявляється в підвищенні температури майже вдвічі до 200 хвилин напрацювання, в порівнянні з еталонними зразками. Однак, за рахунок високого коефіцієнту теплопровідності міді ( $\lambda = 401$  Вт/(м·К)) і коефіцієнту температуропровідності ( $a_t = 1,165 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с), температурне поле в трибологічному контакті, імовірно характеризується рівномірним градієнтом температур як в поперечному, так і в повздовжньому напрямках. Це є передумовою для релаксації температурних напружень, які виникають в зонах фактичного дотику контактних поверхонь. Згідно [10, 11] термопружні напруження сприяють появі залишкових напружень та формуванню дислокаційної структури. Таким, чином зменшення як осьового, так і радіального градієнту розподілу температур в поверхневих шарах металу за рахунок нанесення мідного покриття буде сприяти формуванню вторинних структур при структурній пристосованості трибоелементів, для яких буде характерна мінімальна генерація структурних недосконалостей.

Для пари тертя 30ХГСА – Д16+Cu, де нерухомим є зразок Д16+Cu, потужність тертя в 1,3 рази перевищує аналогічний показник, встановлений для пари Д16+Cu – 30ХГСА. Перш за все, це обумовлено тим, що рухомих елементом є зразок зі сталі 30ХГСА, при цьому критерій  $Pe$  зростає, в середньому в 11 разів внаслідок зниження коефіцієнту температуропровідності для зазначеного металу, в порівнянні з покриттям з міді. Відповідно, визначальний вплив на градієнтний розподіл температур буде створювати сталева поверхня.

Порівняльний аналіз кінетики зміни середніх значень усередненої потужності акустичної емісії при нанесенні мідного покриття виявив наступні закономірності, в порівнянні з еталонними зразками. Покриття з міді забезпечує стабільність параметру  $W_{yc}$  як на етапі припрацювання, так і на подальшому етапі нормальної роботи трибоелементів. Для пари тертя, де рухомою поверхнею є Д16+Cu, зниження середніх значень  $W_{yc}$  зафіксовано в 25 разів під час припрацювання та в 9 разів при подальшому напрацюванні, в порівнянні з еталонним зразком Д16 без покриття. Для пари з рухомою сталєвою поверхнею

30ХГСА параметр  $W_{yc}$  знижується в 5 разів та в 2 рази на етапах припрацювання і нормальної подальшої роботи відповідно.

Оскільки певна частка енергії, що розсіюється в результаті протікання пружно-пластичних деформацій в фрикційному контакті, виявляється системою моніторингу акустичної емісії, можливо прогнозувати різні механізми руйнування та пошкодження поверхневих шарів матеріалу пар тертя за зміною акустичних сигналів. Отже, за кінетикою зміни середніх значень усередненої потужності акустичної емісії, припускаємо про зниження напружено-деформованого стану в поверхневих шарах металу при терті за рахунок наявності м'якого покриття міді на поверхні сплаву Д16. Основним чинником, який сприяє цьому процесу, є те, що ударна в'язкість міді становить  $1700 \text{ кДж/м}^2$ , що, в середньому у 5,8 рази більше за ударну в'язкість дюралюмінію. Таким чином, механізм зниження напружено-деформованого стану в поверхневих шарах при терті при нанесенні покриття з Cu полягає в високій здатності міді поглинати механічну енергію в процесі деформації та руйнування при терті.

За результатами моделювання напружено-деформованого стану досліджуваних трибосистем встановлено, що електроіскрове дискретне покриття міді на дюралюмінії Д16 спричинює зменшення глибини розповсюдження еквівалентних напружень за Мізесом до  $15 \text{ мкм}$ , що свідчить про їх локалізацію в модифікованому ЕП (рис. 4). Рівень локалізації еквівалентних напружень в приповерхневих шарах еталонного зразку Д16 сягає до  $30 \text{ мкм}$ .

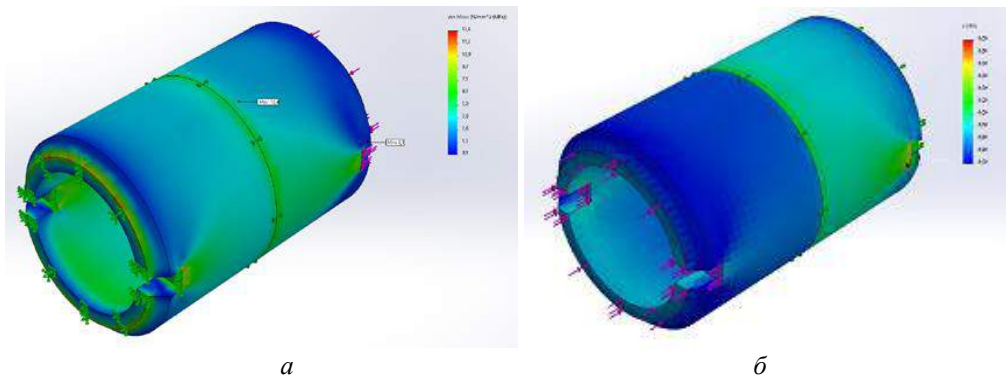


Рис. 4. Моделювання напружено-деформованого стану в зоні контактування трибосистем: а – Д16 – 30ХГСА, б – Д16+Cu – 30ХГСА.

Отже, модифікування поверхні Д16 дискретним ЕП забезпечує локалізацію напружено-деформованого стану при терті в сформованому покритті, яке характеризується високою зносостійкістю (рис. 5).

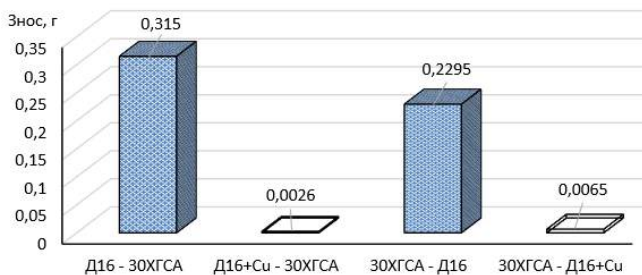


Рис. 5. Загальний ваговий знос трибосистем при напрацюванні 240 хв.



Таким чином, встановлена чітка кореляційна залежність напружено-деформованого стану поверхневих шарів в фрикційному контакті від параметрів акустичної емісії, процесів релаксації температурних напружень та фізико-механічних властивостей металу. Доведено, що саме за рахунок вибору покриття для електроіскрового легування контактних поверхонь можливо забезпечити формування вторинних структур певного типу при терті, які будуть характеризуватися високою зносостійкістю.

**Висновки.** Встановлено зниження напружено-деформованого стану трибоконтакту при модифікуванні поверхні дюралюмінію Д16 дискретним електроіскровим покриттям міді зі щільністю 55 – 65%. Механізм реалізації цього процесу полягає в локалізації пружно-пластичних деформацій в дискретному покритті, яке характеризується високою ударною в'язкістю, вищими коефіцієнтами теплопровідності та температуропровідності, в порівнянні з матеріалом основи. Модифікування дюралюмінію забезпечує суттєве зниження амплітуди та інтенсивності сигналів акустичної емісії при терті, що характеризує домінування в трибоконтакті релаксаційних процесів, зумовлених формуванням зносостійких дисипативних структур.

### Список літератури

1. Variations in strain affect friction and microstructure evolution in copper under a reciprocating tribological load / S. Becker, K. Schulz, D. Scherhauser et al. // *Journal of Materials Research*. – 2021. – 36. – P.970–981.
2. Li Y.P., Onodera E., Matsumoto H., Chiba A. Correcting the Stress-Strain Curve in Hot Compression Process to High Strain Level. *Metallurgical and Materials Transactions A* – 2009. – 40. – P.982–990.
3. Acoustic emission response to severe friction in deformation by cutting on metals and alloys / N. N. Shamarin, A. V. Filippov, S. Yu. Tarasov et al. // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2051, Is. 1. – P. 020275.
4. Louda P., Sharko A., Stepanchikov D. An Acoustic Emission Method for Assessing the Degree of Degradation of Mechanical Properties and Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses / P. Louda, A. Sharko, D. Stepanchikov // *Materials*. – 2021. – 14. – P. 2090.
5. Моделирование сигналов акустической эмиссии при переходе от стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания / С.Ф. Филоненко, А.П. Стахова // *Технологические системы*. – 2007. - № 40/4. – С. 41-47.
6. Microgeometrical characteristics of electrospark coatings in the initial state / V.V. Tokaruk, O.O. Mikosianchyk, R. G. Mnatsakanov, N.O. Rohozhyna // *Problems of Tribology*. – 2020. - V. 25, No 4/98. – P.33-39.
7. Influence of Continuity of Electric Spark Coatings on Wear Resistance of Aluminum Alloy / T.M.A. Al-Quraan, V.V. Tokaruk, O.A. Mikosianchyk, R.G. Mnatsakanov et al. // *Tribology in industry*. – 2021. – 43, No 4. – P. 603-614.
8. Стадниченко В. Н., Варваров В. В. Методология применения метода акустической эмиссии для прогнозирования ресурса агрегатов авиационной техники / В. Н. Стадниченко, В. В. Варваров // *Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки: наук. практич. конф.*, Київ: ДНДІА, 2013. – С. 27.
9. Варваров В.В. Аналіз механізмів дисипації зовнішньої енергії при аномально низькому терті та зношуванні / В. В. Варваров // *Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі: XV Міжнар. форум молоді*, Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2019. – С. 11.
10. Liang H., Dunne F. P. E. GND accumulation in bi-crystal deformation: Crystal plasticity analysis and comparison with experiments / H. Liang, F. P. E. Dunne // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2009. – 51. – P. 326-333.
11. Investigating the effect of grain interaction during plastic deformation of copper / U. Lienert, T. Han, J. Almer, et al. // *Acta Materialia*. – 2004. – 52. – P. 4461-4467.

V. V. TOKARUK, O. A. MIKOSIANCHYK, R. G. MNATSAKANOV, A. M. KHIMKO, O. A. ILINA

### ASSESSMENT OF THE STRESSED AND DEFORMED STATE OF TRIBOCONTACT BY CHANGE IN THE AVERAGE POWER OF ACOUSTIC EMISSION

The study evaluated the kinetics of changes in antifriction characteristics, the temperature in contact, and averaged acoustic emission power for triboelements made of 30KhHSA steel and duralumin D16 with a discrete electrospark coating of copper with a density of 55-65%. A decrease in the stress-strain state of the tribocontact was established when the D16 duralumin surface was modified with a discrete electrospark coating of copper. This process's implementation mechanism consists of the localization of elastic-plastic deformations in a discrete layer characterized by high impact viscosity, higher coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity compared to the base material. The copper coating ensures the stability of the parameter of the average power of the acoustic emission both during the run-in stage and subsequent stage of the regular operation of the triboelements. Modifying duralumin significantly reduces the amplitude and intensity of acoustic emission signals during friction. That shows the dominance of relaxation processes in tribocontact caused by the formation of wear-resistant dissipative structures. Based on the modeling results of the stress-strain state of the studied tribosystems, it was established that the electrospark discrete coating of copper on duralumin D16 caused a decrease in the depth of distribution of the equivalent Mises stresses to 15  $\mu\text{m}$  due to their localization in the formed coating. The localization of equivalent stresses in the near-surface layers of reference sample D16 reaches 30  $\mu\text{m}$ . A clear correlative dependence of the stress-strain state of surface layers in frictional contact on acoustic emission parameters, temperature stress relaxation processes, and physical and mechanical properties of the metal was established. It was defined that precisely due to the choice of coating for electrospark alloying of contact surfaces, it is possible to ensure the formation of secondary structures of a specific type during friction, characterized by high wear resistance.

**Key words:** acoustic emission, electrospark alloying, friction power, deformation.

#### Referenses

1. Variations in strain affect friction and microstructure evolution in copper under a reciprocating tribological load / S. Becker, K. Schulz, D. Scherhauser et al. // *Journal of Materials Research*. – 2021. – 36. – P.970–981.
2. Li Y.P., Onodera E., Matsumoto H., Chiba A. Correcting the Stress-Strain Curve in Hot Compression Process to High Strain Level. *Metallurgical and Materials Transactions A* – 2009. – 40. – P.982–990.
3. Acoustic emission response to severe friction in deformation by cutting on metals and alloys / N. N. Shamarin, A. V. Filippov, S. Yu. Tarasov et al. // *AIP Conference Proceedings*. – 2018. – Vol. 2051, Is. 1. – P. 020275.
4. Louda P., Sharko A., Stepanchikov D. An Acoustic Emission Method for Assessing the Degree of Degradation of Mechanical Properties and Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses / P. Louda, A. Sharko, D. Stepanchikov // *Materials*. – 2021. – 14. – P. 2090.
5. Modelirovanie signalov akusticheskoy jemissii pri perehode ot stadii normal'nogo k stadii katastroficheskogo iznashivaniya / S.F. Filonenko, A.P. Stahova // *Tehnologicheskie sistemy*. – 2007. - № 40/4. – S. 41-47.
6. Microgeometrical characteristics of electrospark coatings in the initial state / V.V. Tokaruk, O.O. Mikosianchyk, R. G. Mnatsakanov, N.O. Rohozhyzna // *Problems of Tribology*. – 2020. - V. 25, No 4/98. – P.33-39.
7. Influence of Continuity of Electric Spark Coatings on Wear Resistance of Aluminum Alloy / T.M.A. Al-Quraan, V.V. Tokaruk, O.A. Mikosianchyk, R.G. Mnatsakanov et al. // *Tribology in industry*. – 2021. – 43, No 4. – P. 603-614.

8. Stadnichenko V. N., Varvarov V. V. Metodologija primenenija metoda akusticheskoy jemissii dlja prognozirovaniya resursa agregatov aviacionnoj tehniki / V. N. Stadnichenko, V. V. Varvarov // Aktual'ni problemi rozvitku aviacijnoї tehniki: nauk. praktich. konf., Kiїv: DNDIA, 2013. – S. 27.

9. Varvarov V.V. Analiz mehanizmv disipacii zovnishn'oi energii pri anomal'no niz'komu terti ta znoshuvanni / V. V. Varvarov // Molod' i sil's'kogospodars'ka tehnika u NHI storichci: HV Mizhnar. forum molodi, Harkiv: HNTUSG im. Petra Vasilenka, 2019. – S. 11.

10. Liang H., Dunne F. P. E. GND accumulation in bi-crystal deformation: Crystal plasticity analysis and comparison with experiments / H. Liang, F. P. E. Dunne // International Journal of Mechanical Sciences. – 2009. – 51. – P. 326-333.

11. Investigating the effect of grain interaction during plastic deformation of copper / U. Lienert, T. Han, J. Almer, et al. // Acta Materialia. – 2004. – 52. – P. 4461-4467.

Стаття надійшла до редакції 02.09.2022.

**Токарук Віталій Володимирович** – старший викладач кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 78 56, E-mail: [vetalion1980@gmail.com](mailto:vetalion1980@gmail.com).

**Мікосянчик Оксана Олександрівна** – д. 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](mailto:oksana.mikos@ukr.net).

**Мнацаканов Рудольф Георгійович** – д. техн. наук, професор, професор кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, E-mail: [mnatsakanov@ukr.net](mailto:mnatsakanov@ukr.net).

**Хімко Андрій Миколайович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри підтримання льотної придатності повітряних суден, Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 76 70, E-mail: [andrii.khimko@npp.nau.edu.ua](mailto:andrii.khimko@npp.nau.edu.ua).

**Ільїна Ольга Андріївна** – аспірант 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: [ilivna19930@gmail.com](mailto:ilivna19930@gmail.com).